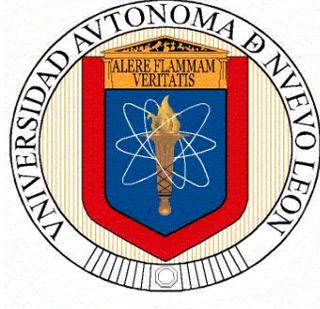


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



***“FORMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS  
PROPIEDADES FÍSICOMECÁNICAS DE CONCRETOS  
VEGETALES ELABORADOS CON MAÍZ Y GIRASOL”***

**POR:**

**M. EN I. GERARDO ALTAMIRANO DE LA CRUZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN  
EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

**San Nicolás de los Garza N. L. 16 de diciembre 2022**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



***FORMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE CONCRETOS VEGETALES ELABORADOS CON MAÍZ Y GIRASOL***

**POR:**

**GERARDO  
ALTAMIRANO DE LA  
CRUZ**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. CESAR ANTONIO  
JUÁREZ ALVARADO  
DIRECTOR DE TESIS: PROF: GILLES ESCADEILLAS  
CO-DIRECTOR: DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER  
EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA CON  
ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE  
CONSTRUCCIÓN.**

**San Nicolás de los Garza N. L. 16 de diciembre 2022**



# THÈSE

**En vue de l'obtention du  
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE  
Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier**

**Cotutelle internationale: Universidad Autónoma de Nuevo León**

---

**Présentée et soutenue par  
GERARDO ALTAMIRANO**

Le 16 décembre 2022

**Developpement et caracterisation de materiaux de construction  
composites a faible impact environnemental a base de tiges de  
maïs**

---

Ecole doctorale : **MEGEP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés**

Spécialité : **Génie civil**

Unité de recherche :

**LMDC - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse**

Thèse dirigée par

**Gilles ESCADEILLAS et César Antonio JUAREZ ALVARADO**

Jury

**Mme ANA MARÍA LACASTA PALACIO, Rapporteur**

**M. PEDRO CASTRO BORGES, Rapporteur**

**M. Gilles ESCADEILLAS, Directeur de thèse**

**M. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO, Co-directeur de thèse**

## Índice

Résumé.....	8
Resumen .....	34
Introduction.....	1
Introducción.....	2
Capítulo 1. Antecedentes .....	4
1.1 Hipótesis .....	4
1.2 Objetivo general.....	4
1.3 Objetivos específicos .....	5
1.4 Desarrollo sustentable .....	5
1.5 Construcción sustentable.....	7
1.6 Materiales de base biológica en la construcción.....	8
1.7 Bio-agregados.....	10
1.8 Cementantes .....	15
1.8.1 Cemento portland .....	15
1.8.2 Cal .....	17
1.8.3 Metacaolín .....	21
1.8.4 Cal formulada.....	23
1.8.5.5 Cenizas volantes.....	24
1.9 Concreto de cáñamo .....	26
1.10 Aspectos relacionados con las propiedades físico-mecánicas de los concretos vegetales .....	28
1.10.1 Efectos del bio-agregados en los cementantes .....	28
1.10.2 Densidad, conductividad térmica e higroscopia .....	29
1.10.3 Resistencia a compresión y módulo elástico .....	32
1.11 Durabilidad en los concretos vegetales .....	37
1.12 Conclusion .....	40
1.13 Conclusión .....	41
Capítulo 2 Materiales y métodos .....	44
2.1 Introduction.....	44
Introducción.....	45
2.2 Materiales .....	46
2.2.1 Bio-agregados.....	46
2.2.1.1 Origen de los bio-agregados en Francia .....	51

2.2.1.2 Origen de los bio-agregados en México .....	52
2.2.2 Cementantes .....	54
2.2.2.1 Cementantes empleados en Francia.....	54
2.2.2.2 Cementantes empleados en México .....	56
2.2.3 Adiciones .....	57
2.2.3.1 Adiciones utilizadas en Francia .....	57
2.2.3.2 Adiciones utilizadas en México .....	58
2.2.4 Aditivos .....	60
2.2.4.1 Aditivo superplastificante utilizado en Francia.....	60
2.2.4.2 Aditivo superplastificante utilizado en México .....	61
2.3 Obtención de los bio-agregados .....	61
2.3.1 Obtención de los bio-agregados utilizados en Francia.....	61
2.3.1.1 Molienda de los tallos .....	61
2.3.1.2 Separación de los bio-agregados .....	62
2.3.2 Obtención de los bio-agregados utilizados en México .....	62
2.4 Métodos de caracterización de los bio-agregados.....	63
2.4.1 Videomicroscopía.....	64
2.4.2 Microscopía electrónica de barrido .....	65
2.4.3 Densidad aparente.....	65
2.4.4 Absorción de agua .....	66
2.4.5 Distribución del tamaño de partícula.....	68
2.4.6 Conductividad térmica .....	69
2.5 Métodos de caracterización de los bio-agregados empleados en México.....	71
2.5.1 Microscopía electrónica de barrido .....	71
2.5.2 Densidad aparente.....	72
2.5.3 Absorción de agua .....	72
2.5.4 Distribución del tamaño de partícula.....	72
2.5.5 Masa volumétrica compactada.....	73
2.6 Métodos de caracterización de los concretos vegetales elaborados en Francia.....	74
2.6.1 Propiedades físicas .....	74
2.6.1.1 Densidad aparente.....	74
2.6.1.2 Conductividad térmica .....	76

2.6.2 Propiedades mecánicas de los concretos vegetales elaborados en Francia.....	77
2.6.2.1 Ensayo a compresión de los concretos vegetales .....	77
2.6.3 Microscopía electrónica de barrido .....	79
2.6.4 Interacción química y observaciones .....	80
2.6.4.1 Obtención de los hidrosolubles .....	80
2.6.4.2 Calorimetría isotérmica .....	81
2.6.4.3 Análisis termogravimétrico.....	84
2.6.4.4 Difracción de rayos X.....	85
2.7 Conclusiones .....	86
Contexte français.....	86
Contexte mexicain .....	87
Contexto Francés .....	87
Contexto Mexicano.....	89
Capítulo 3 Obtención y caracterización de los bio-agregados.....	91
3.1 Introduction.....	91
3.1 Introducción .....	92
3.2 Bio-agregados empleados en Francia .....	93
3.2.1 Bio-agregado de cáñamo comercial .....	93
3.2.2 Bio-agregados del tallo de girasol .....	93
3.2.2.1 Metodología.....	93
3.2.2.2 Molienda .....	95
3.2.2.3 Obtención de los bio-agregados del tallo de girasol.....	96
3.2.2.4 Síntesis, rendimientos y cantidades de bio-agregados de girasol .....	98
3.2.3 Bio-agregados el tallo de maíz .....	103
3.2.3.1 Metodología.....	103
3.2.3.2 Molienda .....	105
3.2.3.3 Obtención de los bio-agregados del tallo de maíz .....	105
3.2.3.4 Síntesis, rendimientos y cantidades de bio-agregados de maíz .....	107
3.3 Bio-agregados empleados en México.....	110
3.3.1 Bio-agregados del tallo de maíz .....	110
3.3.1.1 Metodología.....	110
3.3.2 Transformación de los bio-agregados.....	113

3.3.2.1 Obtención de los bio-agregados de la corteza de maíz .....	113
3.3.2.2 Obtención de los bio-agregados de la médula de maíz .....	114
3.3.3.2 Médula .....	117
3.3.2.3 Obtención de los bio-agregados de la Mezcla de corteza y médula de maíz .....	119
3.3.3 Síntesis, rendimientos y cantidades de bio-agregados de maíz en México .....	121
3.4 Caracterización de los bio-agregados obtenidos .....	123
3.4.1. Videomicroscopía .....	123
3.4.1.1 Cáñamo .....	123
3.4.1.2 Corteza y médula de girasol .....	124
3.4.1.3 Corteza y médula de maíz .....	125
3.4.1.4 Síntesis .....	127
3.4.2 Microscopía electrónica de barrido .....	128
3.4.2.1 Agregados empleados en Francia .....	128
3.4.2.1.1 Cáñamo .....	128
3.4.2.1.2 Bio-agregados del tallo de girasol .....	128
3.4.2.1.3 Bio-agregados del tallo de maíz .....	130
3.4.2.2 Agregados empleados en México .....	132
3.4.2.2.1 Corteza de maíz y médula de maíz .....	132
3.4.2.3 Síntesis .....	132
3.4.3 Densidad aparente .....	133
3.4.3.1 Agregados empleados en Francia .....	133
3.4.3.1.1 Cáñamo .....	133
3.4.3.1.2 Bio-agregados del tallo de girasol .....	133
3.4.3.1.3 Bio-agregados del tallo de maíz .....	134
3.4.3.2 Agregados empleados en México .....	134
3.4.3.2.1 Bio-agregados de maíz .....	134
3.4.3.4 Síntesis .....	135
3.4.4 Conductividad térmica .....	139
3.4.4.1 Cáñamo .....	139
3.4.4.2 Bio-agregados del tallo de girasol .....	139
3.4.4.3 Bio-agregados del tallo de maíz .....	139
3.4.4.4 Síntesis .....	140
3.4.5 Absorción de agua .....	142

3.4.5.1 Agregados empleados en Francia .....	142
3.4.5.1.1 Cáñamo .....	143
3.4.5.1.2 Bio-agregados del tallo de girasol .....	144
3.4.5.1.3 Bio-agregados del tallo de maíz .....	144
3.4.5.2 Agregados empleados en México .....	144
3.4.5.1.4 Síntesis .....	146
3.4.6. Distribución del tamaño de partícula .....	147
3.4.6.1 Agregados empleados en Francia .....	147
3.4.6.1.1 Cáñamo .....	148
3.4.6.1.2 Bio-agregados del tallo de girasol .....	148
3.4.6.1.3 Bio-agregados del tallo de maíz .....	150
3.4.6.2 Bio-agregados empleados en México .....	153
3.4.6.2.1 Bio-agregados del tallo de maíz .....	153
3.4.6.3 Síntesis .....	155
3.5.4 Masas volumétricas compactadas .....	157
3.5 Conclusiones .....	159
Contexte français .....	159
Contexte mexicain .....	160
Contexto francés .....	160
Contexto mexicano .....	161
Capítulo 4. Formulación, elaboración y caracterización de los concretos vegetales .....	164
Introduction .....	164
Introducción .....	164
4.1 Diseño y fabricación de los compuestos de concreto vegetal .....	164
4.2 Elaboración de las mezclas .....	169
4.3 Selección, formulación y elaboración de pastas elaboradas en México .....	172
4.4 Caracterización de los compuestos de concreto vegetal .....	174
4.4.1 Densidad aparente .....	174
4.4.2 Conductividad térmica .....	178
4.4.3 Ensaye a compresión .....	182
4.4.4 Caracterización mecánica de las pastas elaboradas en México ..	190
4.5 Estudio de las interacciones químicas de los extractos hidrosolubles de los bio-agregados y los cementantes .....	191

4.5.1 Calorimetría isotérmica.....	192
4.5.2 Análisis mineralógico.....	196
4.5.2.1 Análisis termogravimétrico (TGA).....	196
4.5.3 Difracción de rayos X (XRD) .....	203
4.6 Microscopía electrónica de barrido y análisis EDS .....	208
4.6.1 Microscopía electrónica de barrido .....	208
4.6.2 Análisis de Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) .....	210
4.6.2.1 Mezcla HP .....	210
4.6.2.2 Mezcla SBP.....	212
4.6.2.3 Mezcla SPP.....	213
4.6.2.4 Mezcla CBP .....	215
4.6.2.5 Mezcla CPP.....	217
4.6.2.6 Mezcla HL .....	218
4.6.2.7 Mezcla SBL.....	220
4.7 Conclusiones .....	222
Contexte mexicain.....	224
Contexto francés .....	225
4.7.2 Contexto mexicano.....	227
CONCLUSIONES GENERALES.....	229
Conclusiones específicas.....	229
Recomendaciones en trabajos futuros.....	232
ANEXO.....	233
Resistencia térmica .....	233
Referencias .....	242

## Índice de tablas

Tableau 1. Programme expérimental.....	9
Tabla 1. Programa experimental.....	35
Tabla 1.1. Disponibilidad del cáñamo, girasol y maíz [46].....	11
Tabla 1.2. Propiedades físicas y térmicas de diferentes bio-agregados .....	12
Tabla 1.3. Composición química en porcentaje de diferentes bio-agregados .....	14
Tabla 1.4. Composición química de la cal apagada [88] .....	21
Tabla 1.5. Composición química y mineralógica de la cal comercial [56] .....	24
Tabla 1.6. Proporciones de materiales para la elaboración de 1 m <sup>3</sup> de concreto de cáñamo (kg) [108] .....	27
Tabla 1.7. Porosidad de diferentes concretos vegetales .....	30
Tabla 1.8 Valores mínimos a cumplir según las reglas profesionales de construcción con cáñamo [34] .....	33
Tabla 1.9. Características mecánicas del concreto con cáñamo a los 28 días [134].....	35
Tabla 1.10. Propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los concretos vegetales .....	36
Tableau 2.1. Programme expérimental.....	44
Tabla 2.1. Programa experimental.....	45
Tabla 2.2. Composición química y mineralógica de cal formulada en porcentaje [98].....	55
Tabla 2.3. Composición química y mineralógica de cal apagada Calcinor [160].	55
Tabla 2.4. Composición química del cemento CPO 40-R.....	56
Tabla 2.5 Composición química de la cal hidratada REBASA en porcentaje .....	57
Tabla 2.6. Composición química de metacaolín [159].....	58
Tabla 2.7 Composición química de la ceniza volante .....	59
Tabla 2.8 Características del aditivo superplastificante .....	61
Tableau 3.1 Nomenclature des bio-agrégats obtenus.....	91
Tabla 3.1 Nomenclatura de los bio-agregados obtenidos .....	92
Tabla 3.2 Características técnicas del cáñamo comercial [60].....	93
Tabla 3.3 Material obtenido en el primer proceso de molienda en kilogramos .....	99
Tabla 3.4 Separación de los bio-agregados obtenidos del tallo del girasol.....	99
Tabla 3.5 Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 1 mm <sup>2</sup> de abertura.....	100

<b>Tabla 3.6</b> Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 4 mm <sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y en porcentaje) .....	<b>101</b>
<b>Tabla 3.7</b> Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de girasol (Material útil entre 1 y 4 milímetros) .....	<b>102</b>
<b>Tabla 3.8</b> Material obtenido en el primer proceso de molienda.....	<b>107</b>
<b>Tabla 3.9</b> Separación de los bio-agregados obtenidos del tallo del maíz.....	<b>107</b>
<b>Tabla 3.10</b> Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 1 mm <sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y porcentaje) .....	<b>108</b>
<b>Tabla 3.11</b> Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 4 mm <sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y en porcentaje) .....	<b>109</b>
<b>Tabla 3.12</b> Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de maíz.....	<b>109</b>
<b>Tabla 3.13</b> Material obtenido en el primer proceso de molienda.....	<b>115</b>
<b>Tabla 3.14</b> Primer proceso de preparación de la corteza de maíz.....	<b>115</b>
<b>Tabla 3.15</b> Segundo proceso de preparación de la corteza de maíz.....	<b>116</b>
<b>Tabla 3.16</b> Tercer proceso de preparación de la corteza de maíz .....	<b>117</b>
<b>Tabla 3.17</b> Cuarto proceso de preparación de la corteza de maíz.....	<b>117</b>
<b>Tabla 3.18</b> Material obtenido en el primer proceso de molienda en kilogramos .....	<b>118</b>
<b>Tabla 3.19</b> Primer proceso de preparación de la médula de maíz.....	<b>118</b>
<b>Tabla 3.20</b> Segundo proceso de preparación de la médula de maíz.....	<b>118</b>
<b>Tabla 3.21</b> Tercer proceso de preparación de la médula de maíz .....	<b>119</b>
<b>Tabla 3.22</b> Material obtenido en el primer proceso de molienda.....	<b>119</b>
<b>Tabla 3.23</b> Primer proceso de preparación de la mezcla de corteza y médula de maíz.....	<b>120</b>
<b>Tabla 3.24</b> Segundo proceso de preparación de la mezcla de corteza y médula de maíz.....	<b>120</b>
<b>Tabla 3.25</b> Tercer proceso de preparación de la mezcla de corteza y médula de maíz.....	<b>120</b>
<b>Tabla 3.26</b> Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 1 mm <sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y en porcentaje) .....	<b>121</b>
<b>Tabla 3.27</b> Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 4 mm <sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y en porcentaje) .....	<b>121</b>
<b>Tabla 3.28</b> Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de maíz.....	<b>122</b>
<b>Tabla 3.29</b> Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de maíz.....	<b>122</b>
<b>Tabla 3.30</b> Densidad aparente de los diferentes bio-agregados utilizados .....	<b>133</b>
<b>Tabla 3.31</b> Densidad aparente de los diferentes bio-agregados utilizados (en kg/m <sup>3</sup> ) .....	<b>134</b>
<b>Tabla 3.32</b> Densidad aparente de los diferentes bio-agregados utilizados (en kg/m <sup>3</sup> ) .....	<b>135</b>

<b>Tabla 3.33 Análisis bibliográfico de la densidad aparente de los bio-agregados utilizados en esta investigación .....</b>	<b>138</b>
<b>Tabla 3.34 Conductividad térmica de los diferentes bio-agregados utilizados (en W/(m.K)) .....</b>	<b>139</b>
<b>Tabla 3.35 Conductividad térmica de los diferentes bio-agregados utilizados (en W/(m.K)) .....</b>	<b>140</b>
<b>Tabla 3.36 Análisis bibliográfico de la conductividad térmica (<math>\lambda</math>) de los bio-agregados obtenidos en Francia para esta investigación .....</b>	<b>142</b>
<b>Tabla 3.37 Parámetros de absorción de los bio-agregados: cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula de girasol (SM), corteza de maíz (CB), médula de maíz (CP) y mezcla de corteza y médula de maíz (CM) .....</b>	<b>143</b>
<b>Tabla 3.38 Parámetros de absorción de los bio-agregados: Cáñamo (H), Corteza de maíz (CB), Médula de maíz (CP) y Mezcla de corteza y médula de maíz (CM) .....</b>	<b>145</b>
<b>Tabla 3.39 Valores de absorción de agua encontrados en la bibliografía .....</b>	<b>146</b>
<b>Tabla 3.40 longitudes promedio de los diferentes bio-agregados .....</b>	<b>156</b>
<b>Tabla 3.41 Masas compactadas de los bio-agregados .....</b>	<b>158</b>
<b>Tabla 4.1. Cantidad de materiales para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal (kg) [159] .....</b>	<b>165</b>
<b>Tabla 4.2. Absorción de agua a 1 minuto de los bio-agregados .....</b>	<b>166</b>
<b>Tabla 4.3. Densidad aparente de los bio-agregados .....</b>	<b>166</b>
<b>Tabla 4.4. Cantidad de materiales para fabricar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal de corteza de girasol .....</b>	<b>167</b>
<b>Tabla 4.5. Volumen proyectado de los especímenes en metros cúbicos .....</b>	<b>167</b>
<b>Tabla 4.6. Cantidad de materiales para elaborar 0.0214 m<sup>3</sup> de concreto vegetal de corteza de girasol (kg).....</b>	<b>168</b>
<b>Tabla 4.7. Cantidad de materiales para elaborar 0.02 m<sup>3</sup> de concreto vegetal de corteza de girasol con cal comercial (kg).....</b>	<b>168</b>
<b>Tabla 4.8. Nomenclatura de las mezclas fabricadas en este estudio.....</b>	<b>169</b>
<b>Tabla 4.9 Cantidades de materiales para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal .....</b>	<b>169</b>
<b>Tabla 4.10 Formulaciones seleccionadas para la elaboración de pastas con ceniza volante y cal hidráulica. ....</b>	<b>172</b>
<b>Tabla 4.11. Densidades de los concretos vegetales obtenidas en esta investigación kg/m<sup>3</sup> .....</b>	<b>176</b>
<b>Tabla 4.12 Dosis de los materiales para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal .....</b>	<b>177</b>
<b>Tabla 4.13. Conductividad térmica de los concretos vegetales (Cáñamo (H), Corteza de girasol (SB), Médula de girasol (SP), Mezcla de corteza y médula de girasol (SM), Corteza de maíz (CB), Médula de maíz (CP) y Mezcla de corteza y médula de maíz (CM)) con una matriz puzolánica (P) o un ligante comercial (L) .....</b>	<b>180</b>

<b>Tabla 4.14. Valores de esfuerzo y deformación máximos promedio .....</b>	<b>187</b>
<b>Tabla 4.15 Formulaciones seleccionadas para la elaboración de pastas con ceniza volante y cal hidráulica. ....</b>	<b>190</b>
<b>Tabla 4.19. Contenido de masa de compuestos en la mezcla HP en porcentaje .....</b>	<b>211</b>
<b>Tabla 4.20. Contenido de masa de compuestos en la mezcla SBP en porcentaje .....</b>	<b>213</b>
<b>Tabla 4.21. Contenido de masa de compuestos en la mezcla SPP en porcentaje .....</b>	<b>215</b>
<b>Tabla 4.22. Contenido de masa de compuestos en la mezcla CBP en porcentaje .....</b>	<b>216</b>
<b>Tabla 4.23. Contenido de masa de compuestos en la mezcla CPP en porcentaje .....</b>	<b>218</b>
<b>Tabla 4.24. Contenido de masa de compuestos en la mezcla HL en porcentaje .....</b>	<b>219</b>
<b>Tabla 4.25. Contenido de masa de compuestos en la mezcla SBL en porcentaje .....</b>	<b>221</b>
<b>Tabla A.1 Clasificación climática (internacional) de Köppen [241] .....</b>	<b>234</b>
<b>Tabla A.2 Clasificación por zonas térmicas [241] .....</b>	<b>237</b>
<b>Tabla A.3 Conductividad térmica de materiales dentro de la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009 [241] .....</b>	<b>239</b>
<b>Tabla A.4 Sistemas de aislamiento estructurado “ONNCCE” [241] .....</b>	<b>240</b>
<b>Tabla A.5 Valores de resistencia térmica de los concretos vegetales según el estado seco y en equilibrio con la humedad relativa ambiental para la fabricación de un muro .....</b>	<b>241</b>

## Índice de figuras

Figura 18. a) Gráfica de la calorimetría isotérmica de las mezclas puzolánicas, b) Gráfica de la calorimetría isotérmica de las mezclas realizadas con cal comercial formulada.....	57
Figura 1.1. Componentes del desarrollo sustentable .....	6
Figura 1.2. a) Consumo de energía a nivel mundial. b) Emisiones de CO <sub>2</sub> a nivel mundial.....	8
Figura 1.3. a) Consumo de energía por sectores en México, b) Cantidades de consumo de energía.....	8
Figura 1.4. Ciclo del carbono en la industria de la construcción .....	9
Figura 1.5. Economía circular del aprovechamiento de los recursos.....	10
Figura 1.6. Microscopía electrónica de barrido de una partícula de cáñamo, a) Micrografía óptica de una sección transversal de cáñamo (90x) b) 10 µm, c) 100 µm .....	11
Figura 1.7. Diagrama ternario de los materiales cementantes suplementarios .....	15
Figura 1.8. Cantera de piedra caliza .....	16
Figura 1.9. Proceso sintetizado de la producción de cemento .....	17
Figura 1.10. Diagrama de fases de la fabricación del cemento .....	17
Figura 1.11. Estructura del carbonato de calcio.....	18
Figura 1.12 Proceso de transformación del carbonato de calcio en cal aérea	18
Figura 1.13. Proceso de la transformación de la cal .....	20
Figura 1.14. Cal hidráulica .....	21
Figura 1.15. Estructura de la caolinita.....	22
Figura 1.16. Transformación de la caolinita a metacaolín .....	22
Figura 1.17. Termograma del caolín .....	22
Figura 1.18 Morfología de una partícula de metacaolín calcinada por el método flash (b) y de una partícula calcinada por el método convencional.....	23
Figura 1.19. Batichanvre .....	24
Figura 1.20. Concreto vegetal aislante .....	24
Figura 1.21 Carbón mineral.....	25
Figura 1.22 Cenizas volantes .....	25
Figura 1.23. Planta termoeléctrica.....	25
Figura 1.24. Cenizas de carbón bituminoso (clase F) .....	26
Figura 1.25. Cenizas de carbón sub-bituminoso (clase C) .....	26
Figura 1.26 a) Colocación de concreto de cáñamo en el sistema de techado, b) Colocación de concreto de cáñamo en muros, c) Recubrimiento con mortero de cáñamo en muros.....	28

<b>Figura 1.27. Porosidad intraparticular de los concretos vegetales y porosidad interparticular de los bio-agregafos .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 1.28. Ensaye de amortiguamiento de humedad (a) Valores de regulación higroscópica (b) Valores de regulación higroscópica de algunos materiales de construcción (c).....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 1.29. Ensaye cíclico .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 1.30. Etapas destructivas del concreto con cáñamo durante el ensaye a compresión .....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 1.31. (a) Bajo nivel de deformación, (b) nivel de deformación moderada y, (c) nivel de alta deformación.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 1.32. a) Carbonatación de los concretos vegetales, b) Hongos en los concretos vegetales, c) Cristalización de cloruros en los poros y d) Degradación de los las fibras por el medio alcalino .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 2.1. a) Planta de girasol, b) aquenios de girasol.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 2.2. a) Estructura de la planta de girasol, b) corte transversal del tallo de girasol .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 2.3. a) maíz, b) evolución del teocintle .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 2.4. a) Estructura de la planta de maíz, b) Sección transversal de la planta de maíz.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 2.5. Cáñamo.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 2.6. a) Estructura de la planta de cáñamo b) corte transversal del tallo de cáñamo.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 2.7. a) Ubicación del departamento de Gers, b) Plantío de girasol y b) plantío de maíz .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 2.8. a) Cáñamo comercial “biofibat” b) Cáñamo comercial tamizado con una malla de 1 y 4 milímetros de abertura [50] .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 2.9. a) Ubicación del municipio de Quechultenango, b) Plantío de maíz en la zona de Quechultenango Guerrero .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 2.10. a) Corte transversal del tallo de girasol, b) Corte longitudinal del tallo de girasol, c) Corte transversal del tallo de maíz y d) Corte longitudinal del tallo de maíz.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 2.11. Difracción de rayos X aplicado en la cal formulada .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 2.12. Difracción de rayos X aplicado a la cal apagada (P, Portlandita, y C, Calcita).....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 2.12. Difracción de rayos X aplicado en cemento CPO 40-R .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 2.13. Difracción de rayos X de la cal hidratada [164].....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 2.14. Difracción de rayos X aplicado en el metacaolín.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 2.15. Difracción de rayos X de la ceniza volante .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 2.16. Molino utilizado para la trituración del tallo de girasol y maíz .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 2.17. Sistema de separación de bio-agregados .....</b>	<b>62</b>

<b>Figura 2.18. a) Molino forrajero, de motor a gasolina, motor Honda de 13 HP. b) Tamiz Swequipos, del modelo LS30C666 de ½ hp y de 1140 RPM .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 2.19. Proceso de selección y muestreo, a) Cono de bio-agregado, b) enrase de la superficie del cono, c) separación y cuarteo, d) selección y toma de muestras .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 2.20. Videomicroscopio Keyence modelo VH-5911 .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 2.21. a) Preparación de las muestras para la microscopía electrónica de barrido, b) Análisis de la microestructura a través de la microscopía electrónica de barrido.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 2.22. Información obtenida a través del análisis de imagen 2D.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 2.23. a) Colocación de las partículas en el escáner y, b) Binarización de los bio-agregados para el análisis del tamaño de distribución de partícula .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 2.24. a) Equipo, b) Sonda c) Calibración de la sonda y software .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 2.25. a) Molde para obtener la conductividad térmica y, b) Orientación de la sonda .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 2.26. Microscopio electrónico de barrido JSM-6490LV .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 2.27. a) Salad spinner , b) Resultado del proceso de absorción .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 2.28. Masa seca compactada: a) secado al horno de los bio-agregados, b) Inmersión durante 30 segundos, c) elaboración de las probetas, d) desmolde de las probetas, e) probeta seca.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 2.29. a) Obtención de alturas y, b) Obtención de diámetros de los cilindros de concreto vegetal .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 2.30. a) Obtención de las de las mediciones y, b) Orientación de las medidas .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 2.31. Delimitación de los ciclos de carga .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 2.32. a) Preparación de las muestras y, b) Corte de las muestras .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 2.33. Proceso de obtención de los compuestos hidrosolubles: a) Molino, b) Partículas menores a 1 milímetro, c) Agitación de la mezcla, d) Filtración del agua .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 2.34. Preparación de las pastas: a) Frascos para mezclas y agua de referencia, b) Calorímetro TAM Air 3116-2, c) Preparación de la pasta, d) Muestras de pasta para ATG y DRX.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 2.35. Tasa de la evolución del calor durante la hidratación del cemento.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 2.36. Preparación de las muestras para ensayos mineralógicos a) Criogenización de las pastas, b) Sublimación del agua de las pastas, c) Preparación de las muestras, d) aparato Mettler TOLEDO TGA-2 .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 2.37. a) Difractómetro de rayos X BRÜKER ADVANCE D8, b) detalle del cambiador de muestras del equipo.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 3.2. Proceso de obtención de los bio-agregados del tallo de girasol.....</b>	<b>94</b>

<b>Figura 3.3. Proceso de molienda de los tallos de girasol, a) Reducción de tamaño, b) Molienda, c) Resultado.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 3.4. Proceso de obtención de los bio-agregados del tallo de girasol: a) Alimentación del sistema, b) Sistema de almacenamiento, c) Resultado del primer proceso de separación, d) Separación de la corteza de la médula, e) Médula de girasol separada y, f) Corteza separada.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 3.5. Tamizaje de los bio-agregados del tallo de girasol: a) Tamizador mecánico, b) Tamizaje con malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura de la corteza, c) Tamizaje con malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura de la médula, d) Tamizaje con malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura de la corteza, e) Tamizaje con malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura de la médula, f) Fragmentos de corteza mayores a 4 mm y, g) Fragmentos de médula mayores a 4 mm.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 3.6. Proceso de obtención de los bio-agregados del tallo de maíz.....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 3.7. Molienda de los tallos de maíz, a) Tallos de maíz, b) Resultado de la molienda.....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 3.8. Proceso de tamizaje de los bio-agregados del tallo del maíz: a) Presencia de un alto volumen de corteza en la médula, b) Tamizaje a través de la malla de 1 milímetro de abertura, c) Tamizaje a través de la malla de 8 milímetros de abertura, d) Tamizaje a través de la malla de 6 milímetros de abertura, e) Tamizaje a través de la malla de 4 milímetros de abertura y, f) Zona nodular del tallo de maíz.....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 3.6. Partículas de médula adheridas en la corteza.....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 3.7. Bio-agregados obtenidos del tallo de girasol: a) Cáñamo (H), b) Corteza de girasol (SB), c) Médula de girasol (SP), d) Mezcla de corteza y médula de girasol (SM).....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 3.11. Bio-agregados obtenidos del tallo de girasol: a) Cáñamo (H), b) Corteza de maíz (SB), c) Médula de maíz (SP), d) Mezcla de corteza y médula de maíz (SM).....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 3.9. Diagrama de flujo del proceso de separación de los bio-agregados.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 3.10. Proceso de preparación de la materia prima: a) limpieza del tallo, b) separación manual, c) separación manual de la corteza y médula.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 3.11. Proceso de preparación de la materia prima: a) secado de la corteza, b) secado de la médula, c) molienda, d) tamizaje.....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 3.12 molienda de los tallos completos: a) molienda, b) almacenaje.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 3.12. a) Corteza de maíz (CB-mx), b) Médula de maíz (CP-mx) y c) Mezcla de corteza y médula de maíz (CM-mx).....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 3.13. a) Magnificación a 50x de una partícula de cáñamo, b) Magnificación a 175x de una partícula de cáñamo.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 3.14. a) Magnificación a 50x de una partícula de corteza de girasol, b) Magnificación a 175x de una fibra de médula.....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 3.15. a) Magnificación a 50x de una partícula de médula de girasol, b) Magnificación a 175x de una fibra de médula de girasol.....</b>	<b>125</b>

<b>Figura 3.16. a) Magnificación a 50x de una partícula de corteza de maíz, b) Magnificación a 175x de una partícula de corteza de maíz .....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 3.17. Magnificación a 50x de una partícula de la médula de maíz, b) Magnificación a 175x de una partícula de la médula de maíz .....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 3.18. Micrografías de una partícula de cáñamo: a) Corte longitudinal y, b) corte transversal (x50, 15kV) .....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 3.19. Micrografías de una partícula de corteza de girasol a) Corte longitudinal y, b) corte transversal (x100, 15kV). .....</b>	<b>129</b>
<b>Figura 3.20. Micrografías de una partícula de médula de girasol a) Corte longitudinal, b) corte transversal (x100, 15kV), c) ortotetraedro.....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 3.21. Micrografías de una partícula de corteza de maíz a) Corte longitudinal y b) corte transversal (x100, 15kV) .....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 3.22. Micrografías de una partícula de médula de maíz a) Corte longitudinal y b) corte transversal (x100, 15kV). .....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 3.30. a) Micrografía de un fragmento de corteza de maíz (x100), b) Micrografía de un fragmento de médula de maíz (x100).....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 3.31 Estructura de las partículas a granel.....</b>	<b>136</b>
<b>Figura 3.32 densidades aparentes promedio obtenidos en los bio- agregados Cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM).....</b>	<b>137</b>
<b>Figura 3.33 formas de transmisión de calor entre los bio-agregados [238] .....</b>	<b>140</b>
<b>Figura 3.34. Conductividad térmica de los bio-agregados: Cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM).....</b>	<b>141</b>
<b>Figura 3.35 Absorción de agua de los bio-agregados Cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM).....</b>	<b>143</b>
<b>Figura 3.32. Absorción de agua de los bio-agregados Cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM).....</b>	<b>145</b>
<b>Figura 3.33 Distribución del tamaño de partícula: cáñamo (ED-H), corteza de girasol (ED-SB), médula de girasol (ED-SP), mezcla de corteza y médula de girasol (ED-SM).....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 3.34. Intervalo de circularidad y morfología de las partículas: cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP) y mezcla de corteza y médula de girasol (SM) .....</b>	<b>150</b>
<b>Figura 3.35 Distribución del tamaño de partícula: cáñamo (ED-H), corteza de maíz (ED-CB), médula de maíz (ED-CP), mezcla de corteza y médula de maíz ED-CM).....</b>	<b>151</b>
<b>Figura 3.36. Intervalo de circularidad de las partículas: cáñamo (H), corteza de maíz (CB), médula de maíz (CP) y mezcla de corteza y médula de maíz (CM) .....</b>	<b>152</b>
<b>Figura 3.33. Distribución del tamaño de partícula, corteza de maíz (ED- CB-mx) de maíz (ED-CP), mezcla de corteza y médula de maíz ED-CM). .....</b>	<b>153</b>

<b>Figura 3.34. Intervalo de circularidad de las partículas: cáñamo (H), corteza de maíz (CB-mx), médula de maíz (CP-mx) y mezcla de corteza y médula de maíz (CM-mx).....</b>	<b>155</b>
<b>Figura 3.35 Masas secas compactadas.....</b>	<b>158</b>
<b>Figura 4.1. Secuencia para el diseño de mezclas de concreto vegetal.....</b>	<b>165</b>
<b>Figura 4.2. Proceso de fabricación de las mezclas de concreto vegetal y de las probetas .....</b>	<b>171</b>
<b>Figura 4.3. a) mezcladora de la marca Hobart, b) prensa instron, modelo 600Dx series M47-14276-EN.....</b>	<b>173</b>
<b>Figura 4.3. Densidades de los concretos vegetales de 22 x 11 cm.....</b>	<b>175</b>
<b>Figura 4.4 Densidades de los concretos vegetales de 16 x 7.5 cm.....</b>	<b>175</b>
<b>Figura 4.5. Mecanismos de transferencia de calor a través de medios porosos .....</b>	<b>178</b>
<b>Figura 4.6. Densidad aparente y conductividad térmica a) estado seco y b) temperatura y humedad relativa ambientes. ....</b>	<b>179</b>
<b>Figura 4.7 Transmisión del flujo de calor en las mezclas de concreto vegetal .....</b>	<b>181</b>
<b>Figura 4.9. Ensayos de resistencia a compresión de los concretos vegetales, a) Mezclas elaboradas con los bio-agregados obtenidos del tallo del girasol, b) mezclas elaboradas con el tallo de maíz, y c) mezclas elaboradas con el cementante comercial con el cáñamo y la corteza de girasol.....</b>	<b>183</b>
<b>Figura 4.10. Tipos de fallas obtenidas después de realizar el ensaye a compresión de los concretos vegetales de: cáñamo puzolánico (HP), corteza de girasol puzolánico (SBP), médula de girasol puzolánico (SPP), mezcla de corteza y médula de girasol puzolánico (SMP), corteza de maíz puzolánico (CBP), médula de maíz puzolánico (CPP), mezcla de corteza y médula de maíz puzolánico (CMP), cáñamo puzolánico (HP), cáñamo con cementante comercial (HL), corteza de girasol con cementante comercial (SBL) .....</b>	<b>185</b>
<b>Figura 4.11 Esfuerzo máximo con respecto a la deformación promedio obtenida al 1% .....</b>	<b>188</b>
<b>Figura 4.11 Modelo de la deformación de las mezclas: a) CBP comportamiento dúctil y b) SPP comportamiento frágil.....</b>	<b>189</b>
<b>Figura 4.12. Resistencia a compresión de cubos de mortero .....</b>	<b>191</b>
<b>Figura 4.13. a) Gráfica del calor acumulado de las mezclas puzolánicas, b) Gráfica de la calorimetría isotérmica de las mezclas puzolánicas .....</b>	<b>193</b>
<b>Figura 4.14. a) Gráfica del calor acumulado de las mezclas elaboradas con el cementante comercial, b) Gráfica de la calorimetría isotérmica de las mezclas elaboradas con el cementante comercial.....</b>	<b>195</b>
<b>Figura 4.15. Análisis termogravimétrico a 2 días de hidratación de: A) mezclas elaboradas con cementantes puzolánicos, mezcla de referencia (REF-PZ), cáñamo (HP), corteza de girasol (SBP), médula de girasol</b>	

(SPP) y corteza de maíz (CBP). b) mezclas elaboradas con cementante comercial REF-CB, cáñamo (HL) y corteza de girasol (SBL).....	197
Figura 4.16. Análisis termogravimétrico a 60 días de hidratación de: A) mezclas elaboradas con cementantes puzolánicos, mezcla de referencia (REF-PZ), cáñamo (HP), corteza de girasol (SBP), médula de girasol (SPP) y corteza de maíz (CBP). B) mezclas elaboradas con cementante comercial REF-CB, cáñamo con cementante comercial (HL) y corteza de girasol con cementante comercial (SBL). .....	201
Figura 4.17. Difracción de rayos X a 2 días de hidratación en: A) mezclas elaboradas con cementantes puzolánicos, mezcla de referencia (REF-PZ), cáñamo (HP), corteza de girasol (SBP), médula de girasol (SPP) y corteza de maíz (CBP). B) mezclas elaboradas con cementante comercial REF-CB, cáñamo (HL) y corteza de girasol (SBL). .....	204
Figura 4.18. Difracción de rayos X a 60 días de hidratación en: A) mezclas elaboradas con cementantes puzolánicos, mezcla de referencia (REF-PZ), cáñamo (HP), corteza de girasol (SBP), médula de girasol (SPP) y corteza de maíz (CBP). B) mezclas elaboradas con cementante comercial REF-CB, cáñamo (HL) y corteza de girasol (SBL).....	206
Figura 4.19. Micrografías de los concretos vegetales seleccionados a) HP, b) SBP, c) CBP, d) SPP, e) CPP, f) HL y g) SBL .....	209
Figura 4.20. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla HP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio	211
Figura 4.21. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla SBP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio	212
Figura 4.22. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla SPP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio	214
Figura 4.23. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla CBP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio	216
Figura 4.24 Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla CPP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio	217
Figura 4.25 Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla HL, b) aluminio, c) silicio, d) calcio	219
Figura 4.26. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla SBL, b) aluminio, c) silicio, d) calcio	220
Figura A.1 Zonas climáticas de la República Mexicana.....	238

## **Résumé**

### **1. Introduction**

Depuis plus de deux décennies, l'industrie de la construction oriente ses pas vers la mise en œuvre de matériaux durables pour certains systèmes de construction. En France, l'un des matériaux de construction qui avait jusqu'à présent un large champ d'opportunité a été le béton de chanvre. Depuis les années 90 ce matériau fait l'objet d'études, ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques sont explorées. En parallèle, dans différentes zones climatiques, les constructeurs sont obligés d'apporter des solutions pour améliorer le confort des usagers et la performance énergétique des bâtiments, cependant, certaines solutions de climatisation ou enveloppes thermiques ont un coût économique et environnemental élevé. Dans certains cas, le ou les matériaux ou systèmes utilisés induisent par exemple une forte consommation d'énergie pour leur fabrication et, par conséquent, laissent un impact environnemental élevé. Dans ce contexte, l'industrie de la construction dans le monde a un taux de consommation d'énergie élevé qui avoisine les 36%, elle est également responsable de 39% des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde. L'utilisation de matériaux alternatifs biosourcés dans la construction aide à stocker le carbone, ces matériaux présentent un fort potentiel pour le remplacement de certains matériaux conventionnels, qui sont principalement utilisés pour l'isolation thermique ou comme fonction esthétique.

#### **1.1 Programme expérimental**

Le programme expérimental a été proposé en 5 phases, qui sont développées à l'Université Toulouse III – Paul Sabatier au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) et à l'Université Autonome de Nuevo León, à la Faculté de Génie Civil. Il convient de mentionner que, pour des raisons indépendantes du projet, induites par la crise sanitaire sans précédent à laquelle nous avons été confrontés pendant le déroulement de ces travaux de thèse, la séquence qui serait développée à l'Universidad Autónoma de Nuevo León n'a été réalisée que partiellement jusqu'à la phase 3, où seuls les mélanges à utiliser ont été formulés et les tests de compression du cube pâtes 5 x 5 x 5 cm ont été effectués. Le programme expérimental est présenté dans le tableau 1.

**Tableau 1. Programme expérimental**

Phase	<i>Expérimentation au LMDC (France)</i>	<i>Expérimentation à IIC-UANL (Mexique)</i>
	Essai	
1 Obtention des bio-agrégats	Trituration Séparation	Trituration Séparation
2 Caractérisation physique des bio-agrégats	Absorption de l'eau Densité Répartition granulométrique Conductivité thermique La microscopie électronique à balayage microscopie vidéo	Absorption de l'eau Densité Répartition granulométrique
3 Fabrication de béton végétal et conservation des éprouvettes	Fabrication de 9 mélanges Durcissement des spécimens Préservation	Formulation des mélanges* Fabrication de 3 mélanges* Durcissement des spécimens* Préservation*
4 Caractérisation physique des bétons vegetaux	Densité Conductivité thermique sèche et ambiante Résistance à la compression La microscopie électronique à balayage microscopie vidéo Spectroscopie à dispersion d'énergie	Densité* Résistance à la compression* La microscopie électronique à balayage*
5 Caractérisation minéralogique des bétons vegetaux	Diffraction des rayons X Microcalorimétrie Thermogravimétrie	Diffraction des rayons X Thermogravimétrie

Les essais marqués avec \* devaient être réalisés au Mexique, mais ils n'ont pas été effectués en raison de situations indépendantes de la volonté du projet (en raison de la contingence globale causée par COVID-19, pour laquelle les installations ont été fermées).

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Bio-agrégats

L'un des premiers bétons végétaux fabriqués a été le béton avec du chanvre, comme mentionné précédemment, ce matériau a été largement accepté en France, où divers travaux de recherche ont été développés, dans lesquels l'objectif principal est d'analyser les propriétés multiphysiques et chimiques des particules de chanvre, déchet issu de la récolte nationale en France et présentant une grande variabilité dans ses propriétés physiques et chimiques. Pourtant, la disponibilité du chanvre en France est limitée, c'est pourquoi divers chercheurs recherchent des granulats végétaux alternatifs qui pourraient remplacer le chanvre en cas de pénurie. Dans des études préliminaires, certains auteurs ont exploré le potentiel des tiges de tournesol, lavande, colza, lin, manioc, fibres d'agave, et récemment tige de maïs comme bio-agrégats dans la production de bétons végétaux. En effet, les propriétés multiphysiques offertes par ces bio-agrégats, telles que la densité apparente et la conductivité thermique, sont généralement similaires ou meilleures que celles obtenues avec la chènevotte de chanvre.

Les tiges des plants de tournesol et de maïs utilisés pour l'élaboration des bétons végétaux en France proviennent de la région Occitanie, située dans le sud du même pays. Dans le cas du Mexique, la tige de maïs provient de l'État de Guerrero, de la municipalité de Quechultenango, qui appartient à la zone centrale du même État. Un point important à souligner est que l'utilisation de la plante de maïs est proposée car c'est l'une des principales cultures dans les deux pays ; De plus, ce sous-produit est dans certains cas jeté, utilisé comme fourrage ou comme nourriture pour le bétail ou les animaux de ferme.

## **2.2 Liants**

Les ciments utilisés dans ces travaux de recherche sont de 3 types, le premier est un liant à base de métakaolin, de chaux et de sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ), qui va permettre d'accélérer certaines réactions chimiques ayant un effet sur la prise et la résistance à la compression ; le second est un liant commercial, dont le composant principal est la chaux composée à un ajout minimal de liant hydraulique. Ces deux ciments ont été utilisés pendant le séjour en France. La troisième était une série de 4 propositions dont la base est du ciment portland ordinaire (OPC) avec des substitutions partielles de cendres volantes de type F dans des proportions différentes. Cependant, pour des raisons indépendantes du projet, cette phase des travaux expérimentaux a dû être suspendue.

## **2.3 Obtention de bio-agrégats à partir de plants de tournesol et de maïs**

### **2.3.1 Méthodologie appliquée en France**

Dans cette partie, les tiges sont broyées à travers un broyeur à marteaux de marque Electra, type BC-P (figure 1). Le processus de séparation a été réalisé avec une bande mécanique, un ventilateur et un système d'aspiration et de stockage qui sont illustrés à la figure 2. En partie a) la matière est déposée, la flèche b) indique le sens de déplacement du tapis, la partie c) marque l'accès au système d'aspiration et de stockage, sur le d) En raison de la faible densité de la moelle, l'utilisation d'un ventilateur a été mise en place pour aider la moelle à descendre vers le système d'aspiration, tandis que l'écorce, en raison de sa densité et de sa rugosité, reste sur la bande, et, enfin, au niveau du e) il y a un récipient pour récupérer l'écorce.



**Figure 1. Moulin utilisé pour broyer les tiges de tournesol et de maïs**



Figure 2. Système de séparation des bio-agrégats

### 2.3.2 Méthodologie appliquée au Mexique

La séparation de l'écorce et de la moelle de la tige de maïs se faisait manuellement. Dans la méthodologie appliquée en France, nous avons observé que l'un des principaux enjeux de la transformation était la séparation, des tiges à l'état sec. Au Mexique, il a été décidé de séparer ces bio-agrégats lorsque la tige était humide, cette séparation s'est effectuée plus facilement et ils ont ensuite été séchés en les exposant au soleil (figure 3). Le broyage a été réalisé avec un broyeur à fourrage avec un moteur à essence de la marque Honda de 13 CV (figure 4).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

**Figure 3. Processus de préparation des matières premières: a) nettoyage de la tige, b) séparation manuelle, c) séchage de l'écorce, d) séchage de la moelle, e) broyage, f) résultat du broyage.**



a)



b)

**Figure 4. a) Moulin à fourrage, moteur à essence, moteur Honda de 13 CV. b) Tamis Swequipos , modèle LS30C666 de ½ hp et 1140 RPM**

## **2.4 Caractérisation des granulats**

Afin de connaître les propriétés multiphysiques des bio-granulats utilisés dans ce travail doctoral, les recommandations émises par le comité technique RILEM TC-236 BBM "Bio-based Building Materials" ont été utilisées, ces recommandations visent à fournir une description des procédures d'essai établies pour connaître la masse volumique, la conductivité thermique, la distribution granulométrique et le pourcentage d'absorption d'eau à 1, 15, 240 et 2880 minutes. Les recommandations susmentionnées sont le fruit d'une intense coopération entre les laboratoires participants du comité technique RILEM BBM. De plus, lesdites techniques de caractérisation suggérées dans le document peuvent être utilisées dans le lin, le tournesol, la lavande, le miscanthus, le pin, le tournesol, le bambou, la noix de coco, la balle de riz, le palmier ou le totora (typhaceae), entre autres types de plantes qui peuvent être utilisées comme bio-agrégats ou matériaux primaires pour la construction. En plus de ce qui précède, pour observer la morphologie des particules de bio-agrégats à différents grossissements, l'utilisation du microscope vidéo et du microscope électronique à balayage a été appliquée; et enfin, l'essai de masse volumétrique compactée a été réalisé. L'objectif de cet essai est de déterminer la valeur de la masse des bio-agrégats lorsqu'ils se retrouvent soumis au compactage à l'état humide, comme c'est le cas lors de la fabrication des béton végétaux.

## **2.5 Caractérisation des bétons végétaux**

Comme dans les bio-agrégats, les observations ont été réalisées au microscope électronique à balayage, et combinées à des analyses par spectroscopie de dispersion d'énergie (EDS). Dans la première technique appliquée, l'interface entre les biogranulats et la matrice pouzzolanique et cimentaire a été analysée et dans la seconde technique appliquée, une analyse élémentaire a été réalisée par rayons X. Les propriétés physiques étudiées correspondent à la masse volumique à température et humidité relative ambiantes et à l'état anhydre. D'autre part, les conductivités thermiques ont également été obtenues par rapport à la température ambiante et à l'humidité relative, ainsi qu'à l'état anhydre.

La résistance à la compression des composite a également été évaluée, les essais ont été réalisés sous chargement cyclique, pendant lequel la contrainte et la déformation des éprouvettes sont mesurées au cours de 4 cycles. De plus, pour savoir comment se déroule le processus d'interaction entre les composés hydrosolubles présents dans les bio-agrégats et les matrices cimentaires, des essais de calorimétrie isotherme ont été réalisés, dans lesquels l'évolution des réactions chimiques peut être étudiée grâce au suivi du flux de chaleur qu'elles produisent. En parallèle, à différentes échéances, une analyse thermogravimétrique et une analyse par diffraction des rayons X ont été réalisées, afin de combiner les résultats obtenus et d'identifier l'impact des hydrosolubles issus des différents granulats végétaux sur les mécanismes de prise et de durcissement des liants minéraux étudiés.

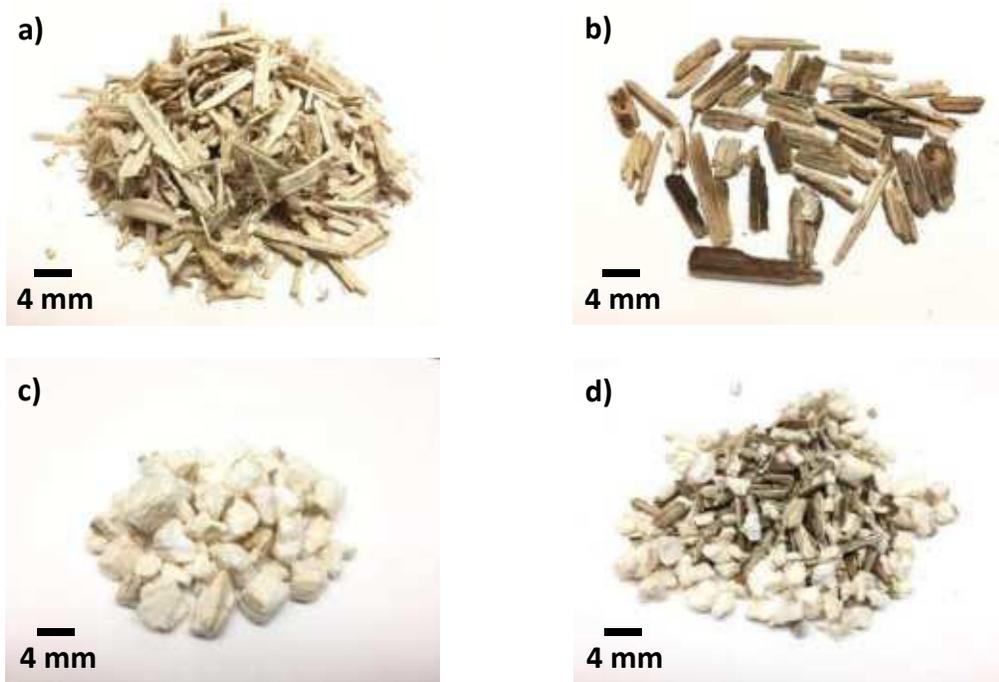
## **3. Résultats**

### **3.1 Synthèse de bio-agrégats obtenus en France**

Le tableau 2 montre une synthèse des quantités obtenues à partir des bio-agrégats de la tige de tournesol, dans ce tableau les quantités correspondant aux totaux sont indiquées, les pourcentages de rendement sont calculés par rapport au poids initial. D'autre part, l'image 5 montre les bio-agrégats obtenus à partir de la tige de la plante de tournesol.

**Tableau 2. Quantités obtenues à partir des bio-agrégats de la tige de tournesol *Matériel utile (entre 1 et 4 millimètres)***

bio-agrégat	kilogrammes	pourcentage de rendement
Écorce	40,53	72,76
Moelle	2,60	4,67
Mélanger	5. 40	87,60



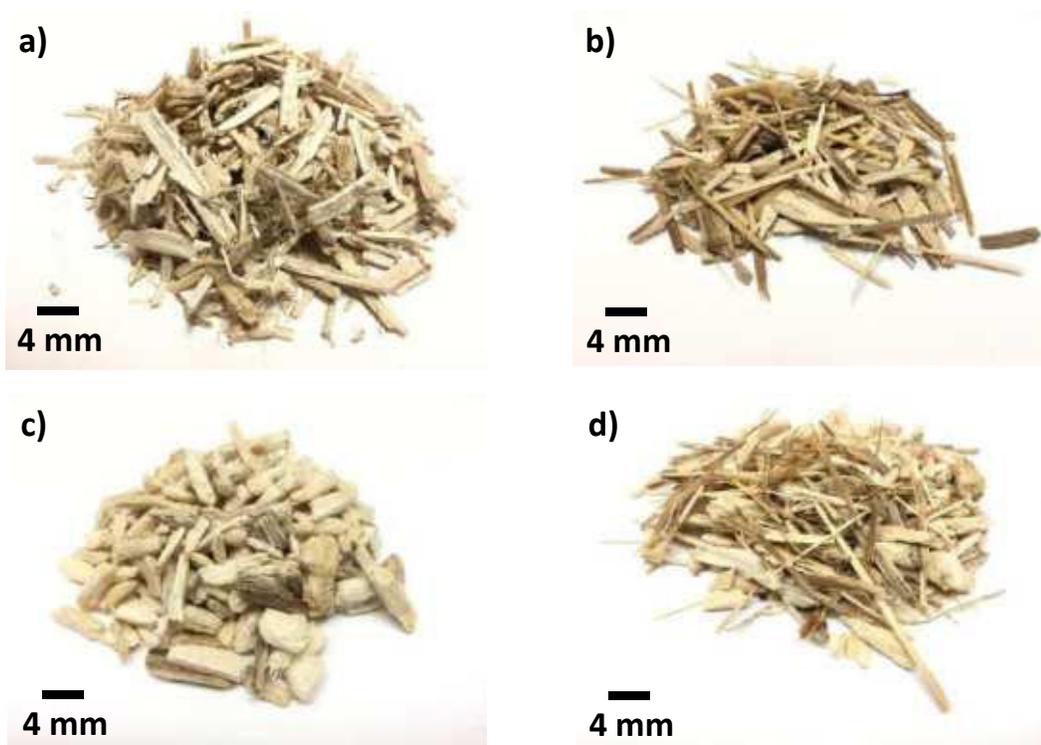
**Figure 5 Bio-agrégats obtenus à partir de tige de tournesol : a) Chanvre (H), b) Écorce de tournesol (SB), c) Moelle de tournesol (SP), d) Mélange d'écorce et de moelle de tournesol (SM).**

Le tableau 3 résume les quantités de bio-agrégats obtenus à partir de la tige du plant de maïs, dans lequel les quantités utiles et non utiles sont indiquées, le total initial était de 24,10 kilogrammes, ce qui signifie 100 % du total de la matière. De même, la figure 6 montre les bio-agrégats obtenus à partir de la tige du plant de maïs.

**Tableau 3 Quantités obtenues à partir des bio-agrégats de la tige de maïs**

<i>Matériel utile (entre 1 et 4 millimètres)</i>		
bio-agrégat	Kilogrammes	Pourcentage
Écorce	13.10	54,40
Moelle	0,70	2,90
Mélanger	2,50	10h20

Le processus d'obtention des bio-agrégats à partir de la tige de maïs a nécessité une série de modifications, dues au fait que la moelle adhère fortement à l'écorce; Ces modifications comprenaient des séparations manuelles, ainsi que l'utilisation de 2 tamis (ouverture de 6 et 8 mm<sup>2</sup>) afin de séparer les bio-agrégats par taille; ainsi que d'aider à se débarrasser des feuilles mortes, des racines, des pierres et de la terre. Les pourcentages indiqués dans le tableau reflètent que la performance du matériau est faible (proche de 67 %); Cela est dû à la difficulté du processus de séparation et au fait que dans certains cas il y avait des déchets (pierres, terre et litière). Les bio-agrégats obtenus sont présentés dans la figure 6.



**Figure 6. Bio-agrégats obtenus à partir de la tige de tournesol : a) Chanvre (H), b) Enveloppe de maïs (SB), c) Moelle de maïs (SP), d) Mélange d'enveloppe et de moelle de maïs (SM)**

### **3.2 Synthèse de bio-agrégats obtenus au Mexique**

D'autre part, il est important de souligner les grandes différences qui sont obtenues lorsque les bio-agrégats sont séparés à sec par rapport à l'obtention

des bio-agrégats obtenus avec de l'humidité. Le tableau 4 montre une comparaison des quantités obtenues.

**Tableau 4 Quantités obtenues à partir des bio-agrégats de la tige de maïs**

<i>Matériel utile (entre 1 et 4 millimètres)</i>		
<b>bio-agrégat</b>	<b>Kilogrammes</b>	<b>Pourcentage</b>
<b>Bio-granulats de tige de maïs obtenus en France</b>		
Écorce	13.10	54,40
Moelle	0,70	2,90
Mélanger	2,50	10h20
<b>Bio-agrégats de tige de maïs obtenus au Mexique</b>		
Écorce	11.17	51,74
Moelle	4.51	56.28
Mélanger	4.45	55,62

C'est à ce stade que la méthodologie appliquée pour obtenir les bio-agrégats devient plus importante. L'un des points les plus importants à souligner est que dans les bio-agrégats obtenus au Mexique, des rendements proches de 50% sont obtenus. Des résultats décrits dans le tableau précédent, on peut déduire que les limitations rencontrées lors de l'obtention des bio-agrégats étaient :

Lors du broyage des tiges de tournesol et de maïs, il était nécessaire de faire une réduction préalable de la tige ; Le but de la réduction de taille est d'éviter les obstructions dans la buse du broyeur, cela aide également à rendre les temps de broyage plus efficaces.

La vitesse de rotation : Le broyeur utilisé en France dispose d'un moteur électrique à la vitesse la plus élevée, 3000 RPM est atteint en permanence (cela servait au broyage de la matière), le seul inconvénient est l'obstruction de la buse d'alimentation de celle-ci. D'autre part, la vitesse de rotation du broyeur utilisé au Mexique est variable, car il dispose d'un moteur à essence et, à son tour, il est nécessaire de réguler la vitesse en accélérant manuellement le moteur, jusqu'à atteindre les révolutions nécessaires pour broyer le matériau de manière efficace.

La figure 7 montre les résultats des matériaux obtenus à partir de ces bio-agrégats de la tige du plant de maïs au Mexique.

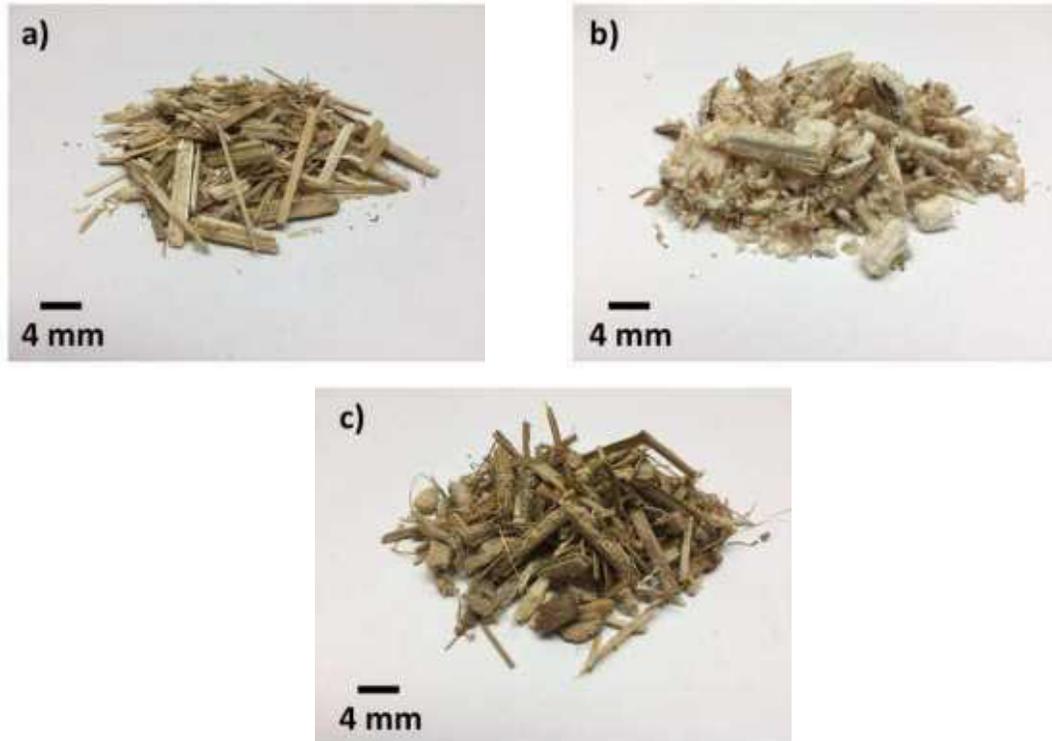
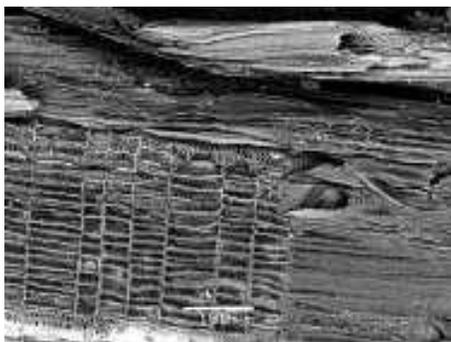


Figure 7 a) Ecorce de maïs (CB), b) Moelle de maïs (CP) et c) Mélange d'écorce et de moelle de maïs (CM).

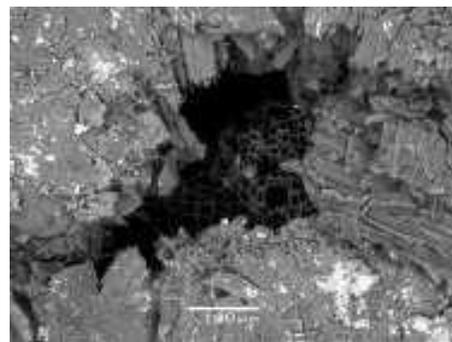
### 3.3 Caractérisation des bio-agrégats obtenus en France

#### 3.3.1 Microscopie électronique à balayage appliquée aux bio-agrégats

La figure 8 résume les observations faites sur les différents bio-agrégats utilisés dans cette recherche.



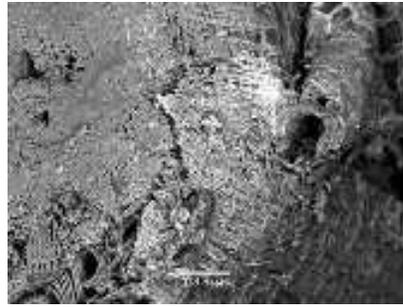
a)



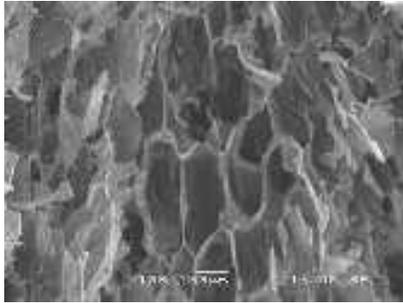
b)



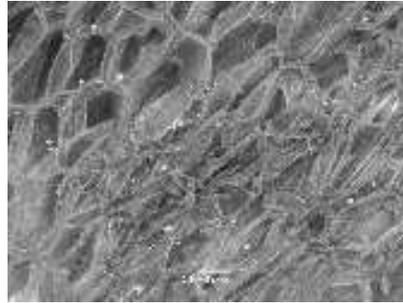
c)



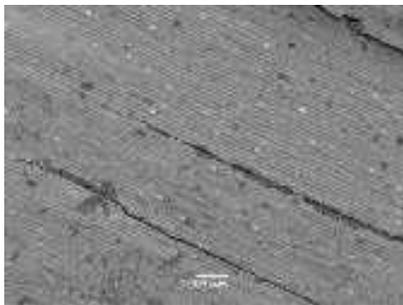
d)



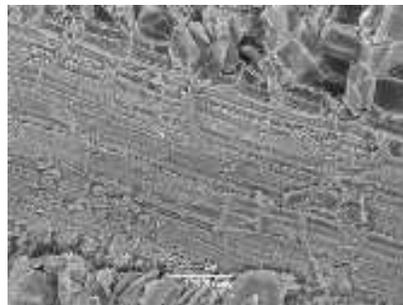
e)



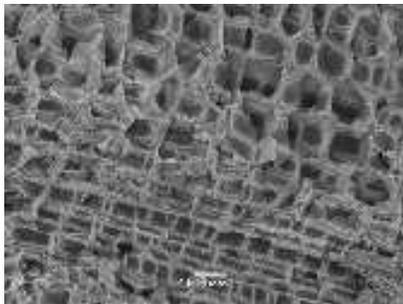
f)



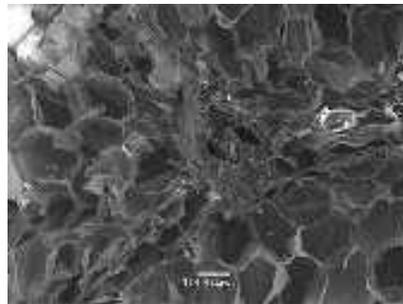
g)



h)



i)



j)

**Figure 8. a) Particule de chanvre en coupe longitudinale, b) Particule de chanvre en coupe transversale, c) Particule d'écorce de tournesol en coupe longitudinale, d) Particule d'écorce de tournesol en coupe transversale, e) Particule de moelle de tournesol en coupe longitudinale, f) Particule de moelle de tournesol en coupe transversale, g) Particule d'écorce de maïs en coupe longitudinale, h) Particule d'écorce de maïs en coupe transversale, i) Particule de moelle de maïs en coupe longitudinale, j) Particule de moelle de maïs en coupe transversale, toutes les observations ont été faites à x100, 15kV**

Les observations au microscope électronique à balayage permettent de mettre en évidence des différences marquées entre la chènevotte et les particules d'écorce d'une part et les particules de moelle d'autre part. Tandis que les premières présentent une structure que l'on pourrait qualifier de tubulaire avec une forte anisotropie, l'analyse des secondes permet d'identifier une structure très aérée, plutôt alvéolaire, pour laquelle les différences entre les vues longitudinales et transversales sont peu visibles. ; Il convient de noter que le diamètre des alvéoles de la moelle de maïs est plus petit que celui de la moelle de tournesol, cela peut avoir un effet positif sur l'absorption d'eau, mais un effet négatif sur la densité apparente et la conductivité thermique. Dans tous les cas, le diamètre des pores tubulaires des particules d'écorce et de chènevotte est largement inférieur, de l'ordre de la dizaine de micromètres, aux alvéoles de la moelle qui peuvent atteindre 200  $\mu\text{m}$ .

### 3.3.2 Densité apparente et conductivité thermique

La figure 9 présente le graphique correspondant à la conductivité thermique en fonction de la densité apparente. Il est important de mentionner que ces deux propriétés sont étroitement liées, puisque dans les bio-agrégats, une plus grande porosité entraîne une densité apparente plus faible et par conséquent une conductivité thermique plus faible.

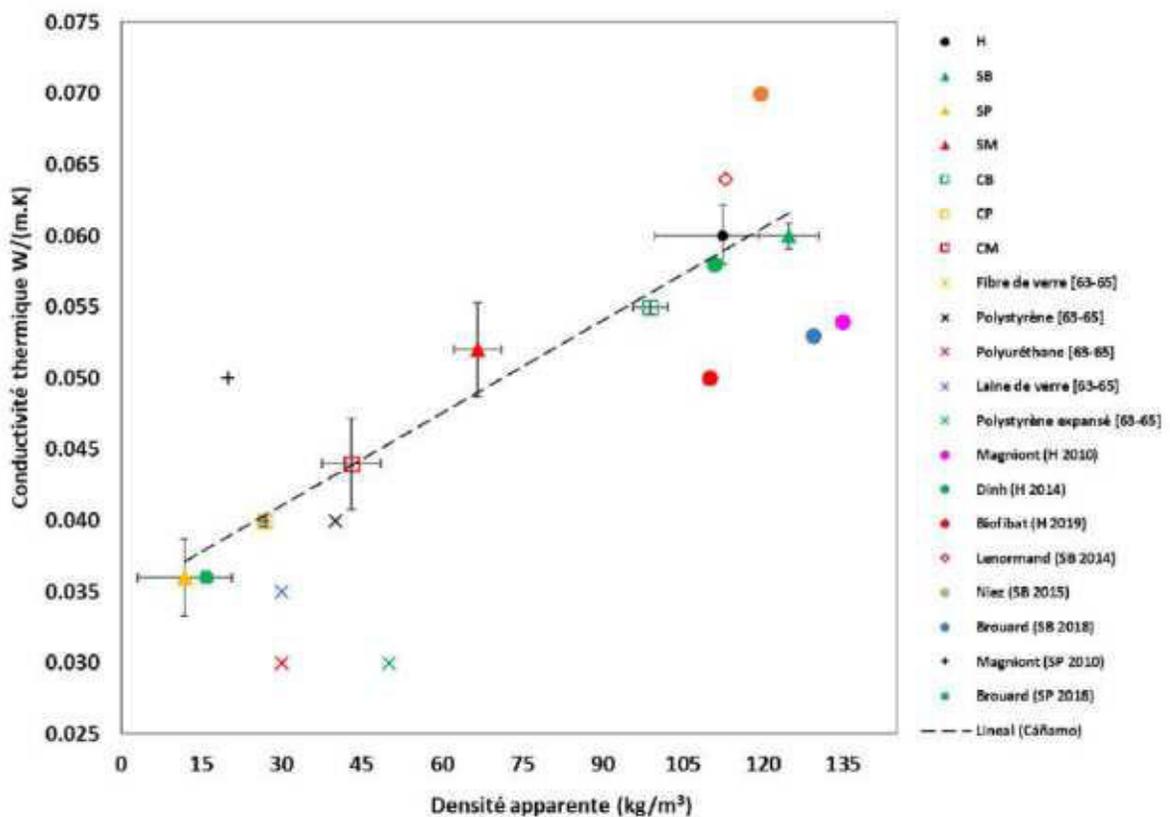


Figure 9. Conductivité thermique des bio-agrégats

Sur le graphique, on peut observer une similitude entre la chènevotte de chanvre (H), l'écorce de tournesol (SB) et l'écorce de maïs (CB), ceci est le résultat de la similitude de leur microstructure ; Dans le cas de la moelle de tournesol et de maïs (CP), grâce à la structure alvéolaire précédemment décrite, la conductivité thermique mesurée est largement inférieure. La meilleure performance est atteinte pour la moelle de tournesol (SP). Enfin, dans les arrangements de particules issues du broyage des tiges entières et associant écorce et moelle de tournesol (SM) et de maïs (CM), on observe, de manière prévisible, une conductivité thermique intermédiaire entre moelle et écorce. Nos résultats sont cohérents avec ceux de la littérature obtenue sur des arrangements de chènevotte ou d'écorce de tournesol. En comparant à la performance thermique d'isolants conventionnels d'origine minérale ou polymère, on observe que les mélanges de granulats de maïs et de tournesol en vrac, en particulier ceux de moelle sont largement compétitifs face à ces produits.

### 3.3.3 Absorption d'eau

Le tableau 5 montre quelques valeurs représentatives trouvées dans la revue de la littérature, ces valeurs ont été obtenues grâce à la méthode établie par RILEM 236 Matériaux de construction biosourcés.

**Tableau 5 Valeurs d'absorption d'eau trouvées dans la littérature**

bio-agrégat	IRA (%)	K1 (%.log(min) <sup>-1</sup> )	Référence
H	122 - 218	19,5 - 50,0	[1–5]
SB	141 - 148	17.8 – 18.5	[120-173]
SP	223	--	[165,166]
SM	--	--	--
CB	98,00	19.8	[5]
CP	450 - 550	11.69 – 19.49	[10]
CM	--	--	--

La figure 10 montre le graphique de l'absorption d'eau des bio-agrégats étudiés dans nos travaux.

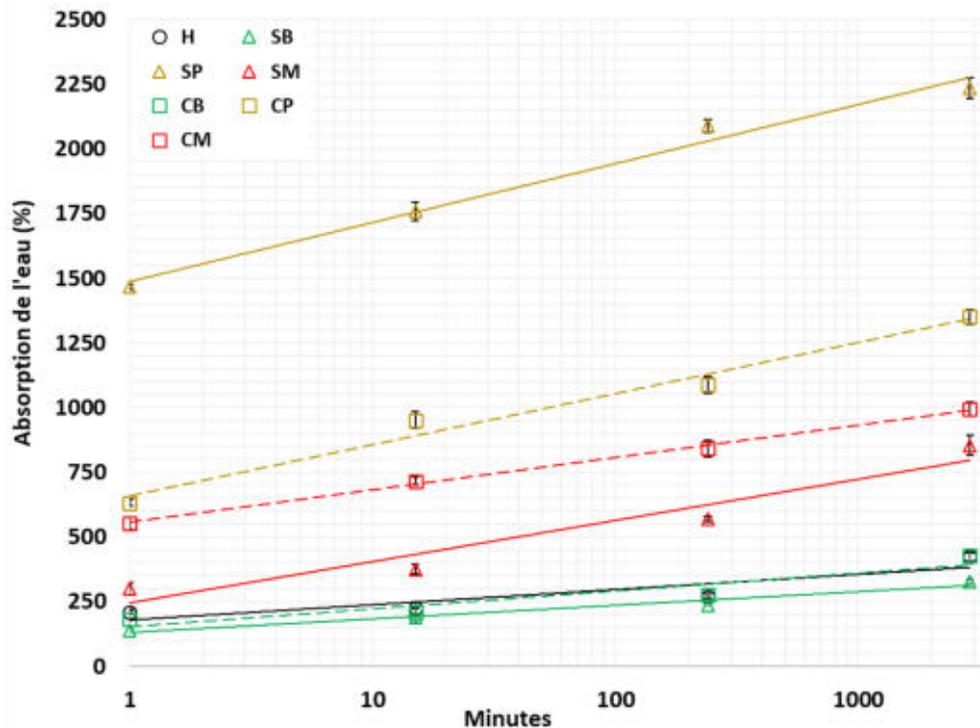


Figure 10 Absorption d'eau des bio-agrégats

Dans le cas du chanvre (H), de l'écorce de tournesol (SB) et de l'écorce de maïs (CB), les résultats de ce test montrent une cinétique d'absorption rapide durant la première minute. Les valeurs d'absorption d'eau pour ces bio-agrégats sont très similaires. Ces résultats montrent que le chanvre a une forte absorption d'eau pendant la première minute (209%), de la même manière, l'écorce de tournesol (139%) et de maïs (183%), en raison de leur porosité tubulaire. Les particules de moelle de tournesol (SP) et de maïs (CP) ont une absorption massique plus élevée que la chènevotte de chanvre et l'écorce de tournesol et de maïs, en raison de leur plus forte porosité, permettant de retenir une grande quantité d'eau. Néanmoins, ce résultat serait à nuancer en considérant une absorption volumique en  $\text{kg/m}^3$  et non massique en  $\text{kg/kg}$  comme c'est le cas ici. En effet, la masse volumique des particules de moelle étant beaucoup plus faible que celle des écorces, leur absorption volumique sera plus limitée. Il est à noter que le taux d'absorption à une minute pour la moelle de tournesol est de 1466 %, par rapport à la moelle de maïs qui est de 632 %. Le mélange de maïs (CM) continue d'avoir une absorption relativement élevée (554 %) par rapport au mélange de tournesol (SM) (301 %). Des écarts peuvent être observés avec la bibliographie consultée, ceci est généralement dû aux différents types de bio-agrégats, à la taille des particules, à la teneur en fibres et poussières, ainsi qu'à la manière dont l'essai est réalisé, notamment concernant la taille de l'échantillon et le procédé d'élimination de l'eau de surface.

### 3.3.4 Répartition granulométrique

Les figures 11 et 12 montrent la distribution granulométrique des bio-agrégats obtenus respectivement à partir de tige de tournesol et de maïs ; selon les trois principaux paramètres de dimension dans les particules que sont le grand axe, le petit axe et le diamètre équivalent.

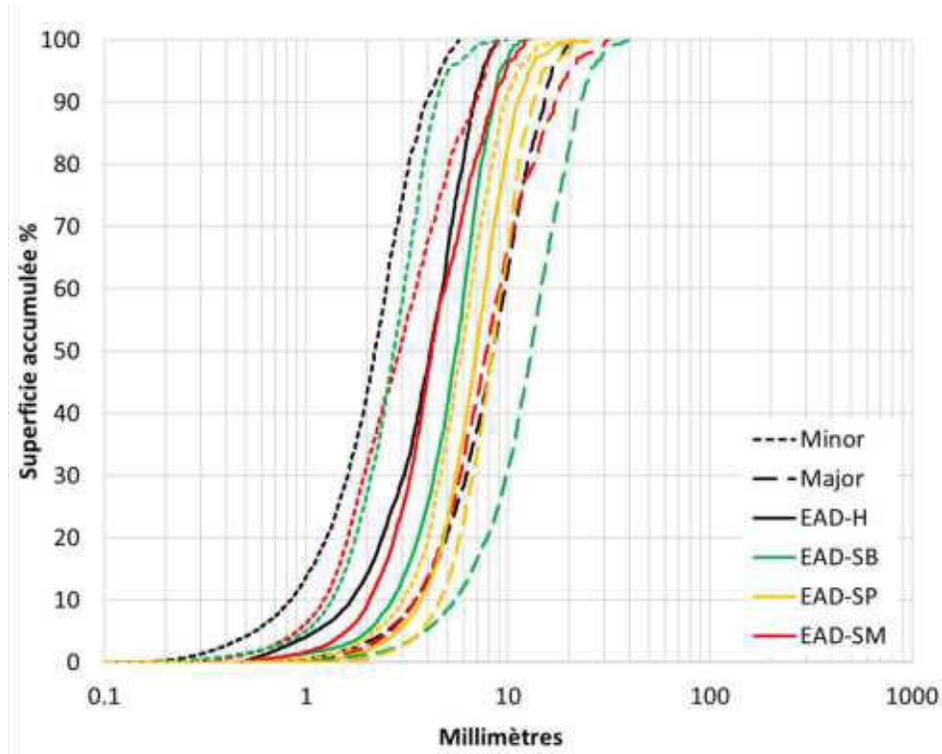
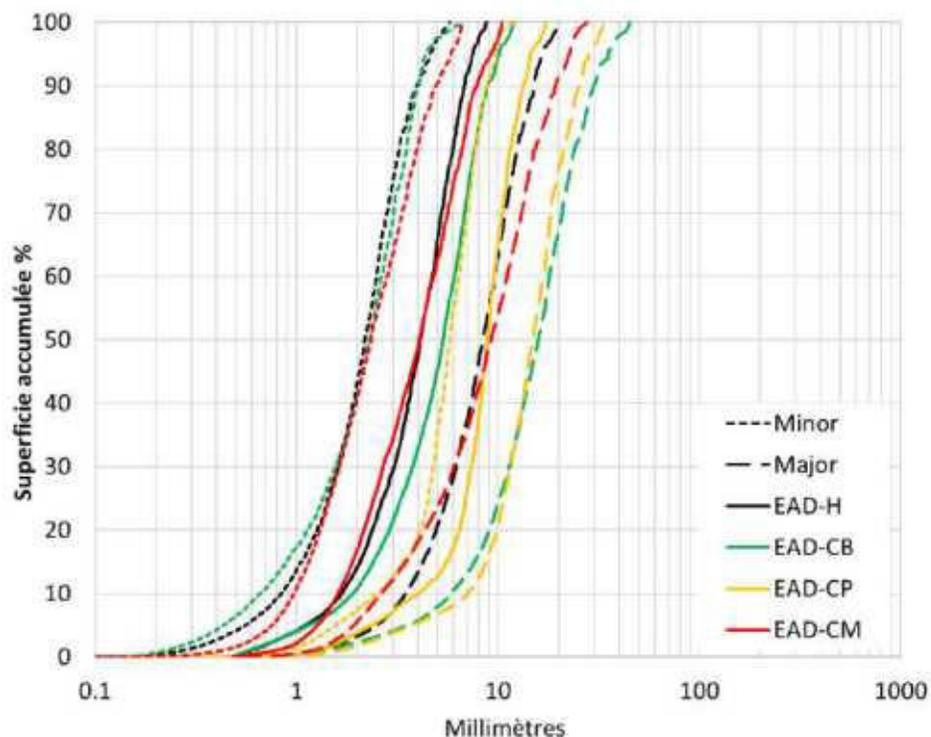


Figure 11. Répartition granulométrique : chanvre (ED-H), enveloppe de tournesol (ED-SB), moelle de tournesol (ED-SP), mélange d'enveloppes et d'enveloppes de tournesol (ED-SM)

L'écorce de tournesol (SB) dans le diamètre équivalent a une gamme de particules de 0,4 à 13 millimètres, comme cela se produit avec le chanvre (H), cette dispersion granulométrique peut être résolue en tamisant à nouveau et en vérifiant soigneusement que les particules ne traversent pas l'ombre verticalement. Dans la moelle de tournesol (SP), le diamètre équivalent a une gamme de particules de 0,5 à 22 millimètres ; dans ce cas, elles ont des tailles différentes car les particules retenues et passées au tamis de 4 mm<sup>2</sup> se sont regroupées. Dans le mélange d'écorce et de moelle de tournesol, dans le diamètre équivalent, il existe une gamme de particules de 0,5 à 20 millimètres, et dans le grand axe, une gamme de 0,7 à 100 millimètres.



**Figure 12 Plage de circularité des particules de chanvre (H), coque de maïs (CB), moelle de maïs (CP), mélange de moelle et d'écorce de maïs (CM)**

L'enveloppe de maïs (CB), le diamètre équivalent avait une gamme de particules de 0,5 à 15 millimètres, la moelle de maïs (CP), le diamètre équivalent avait une gamme de particules de 0,5 à 12 millimètres, et dans le mélange d'écorce et de moelle de maïs (CM), le diamètre équivalent avait une gamme de particules de 0,5 à 17 millimètres. Ces valeurs élevées sont dues au fait que lors du processus de tamisage avec la maille d'ouverture de 4 mm<sup>2</sup>, les particules traversaient le tamis verticalement.

### **3.4 Caractérisation des bio-agrégats obtenus au Mexique**

#### **3.4.1 Microscopie électronique à balayage**

La figure 13a) montre une particule avec une coupe longitudinale de l'enveloppe de maïs, on observe qu'il n'y a pas de rugosité à sa surface ; Par conséquent, ces fragments absorbent moins d'eau que les particules de chanvre, qui possèdent un réseau de pores interconnectés. La figure 13b) montre la coupe en coupe de la moelle de maïs, les alvéoles ont une forme cylindrique comme dans la moelle de tournesol, en moyenne, le diamètre moyen des alvéoles est de 50-200 µm, cela explique sa faible densité apparente, sa faible conductivité thermique et sa haute absorption.

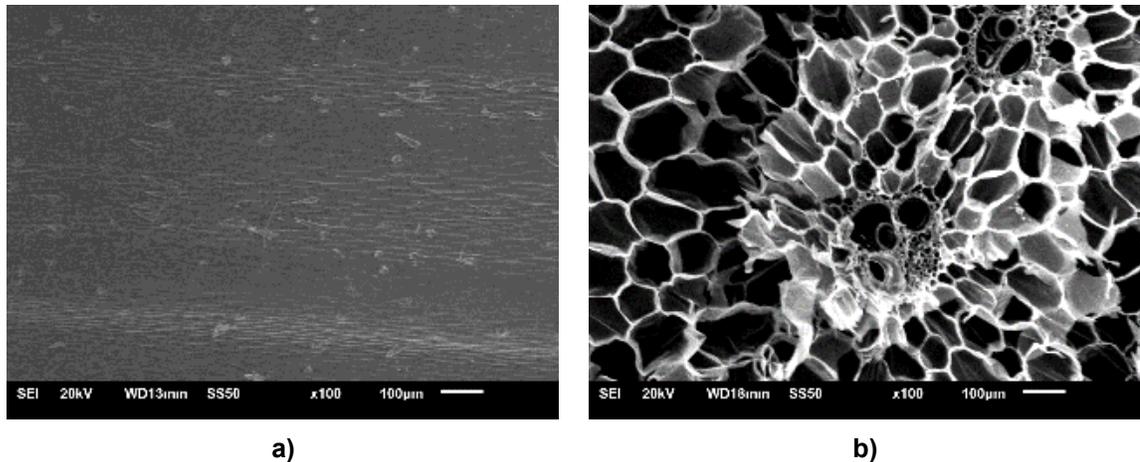


Figure 13. a) Microscopie d'un fragment d'écorce de maïs (x100), b) Microscopie d'un fragment de moelle de maïs (x100)

### 3.4.2 Densité apparente

Les résultats de densité apparente des différents granulats de maïs produits en France et au Mexique pendant nos travaux sont présentés sur la figure 14. Ils mettent en évidence l'impact du broyage et de la granulométrie des particules sur la compacité de l'arrangement granulaire et donc de la masse volumique apparente des granulats végétaux en vrac.

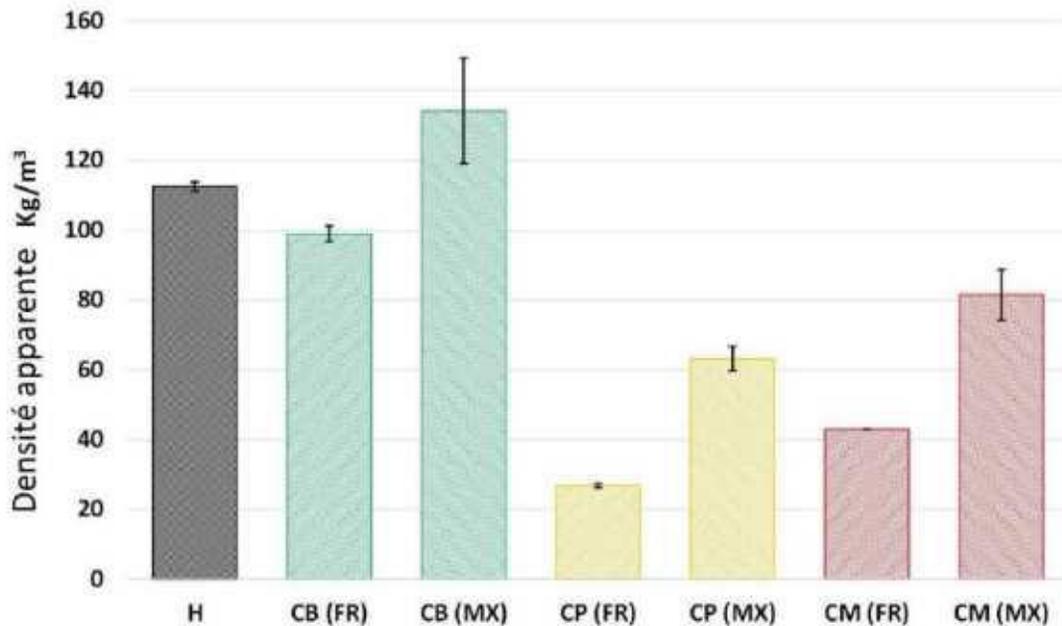


Figure 14. Comparaison des densités apparentes des bio-agrégats de maïs (FR = France) (MX = Mexique).

Les granulats de maïs présentent des masses volumiques apparentes comprises entre XX et XX. Une différence importante peut être observée entre la moelle et l'écorce en raison de la très forte porosité intraparticulaire des particules de moelle.

Les différences observées entre les granulats obtenus au Mexique et en France sont principalement liés à la taille du bio-agrégat. Les procédés de séparation et de criblage ayant été distincts au Mexique et en France, les fragments obtenus au Mexique sont de dimensions réduites (1-4 millimètres) par rapport aux particules obtenues en France, où les particules avaient une longueur comprise entre 4 et 20 millimètres. Ces dimensions influencent grandement la porosité interparticulaire de l'arrangement et donc la densité apparente. Les particules obtenues au Mexique, plus petites, induisent un arrangement granulaire plus compact et par conséquent une masse volumique apparente plus élevée.

### 3.4.3 Absorption d'eau

La figure 15 montre les taux d'absorption d'eau des biogranulats qui auraient dû être utilisés dans la fabrication des bétons végétaux au Mexique.

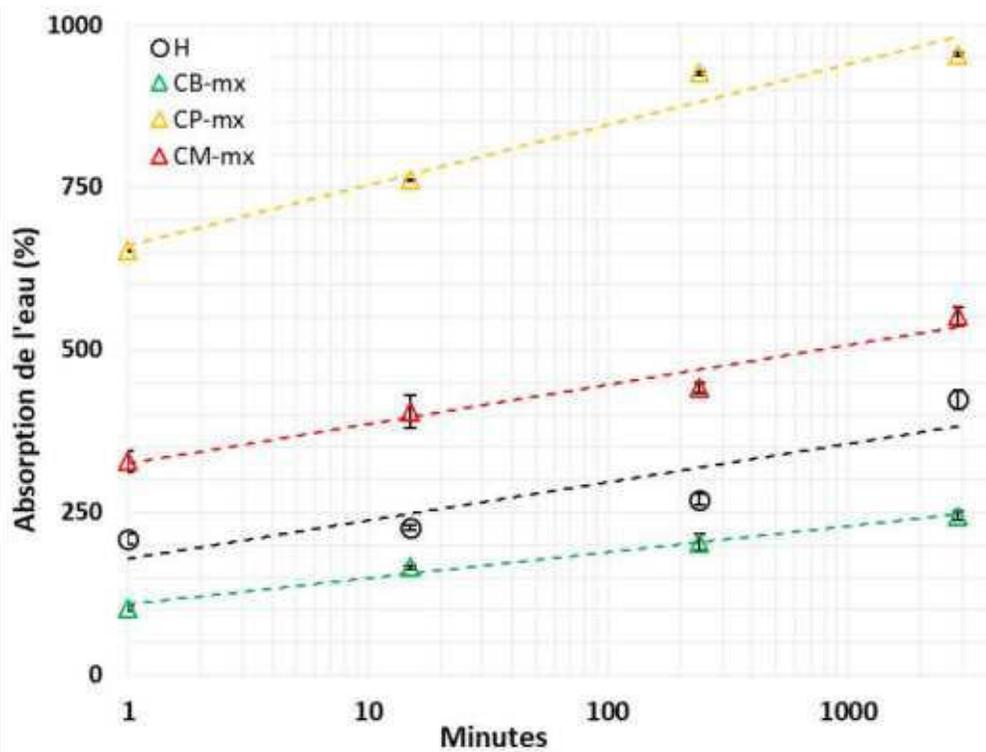


Figure 15. Absorption d'eau des bio-agrégats

Dans la première minute d'immersion, l'écorce de maïs a obtenu une absorption moyenne de 102,50 %. Contrairement au biogranulat utilisé en France, les

fragments d'écorce de maïs n'ont pas de particules de moelle adhérentes ; cependant, cette augmentation est due à la granulométrie plus petite par rapport aux biogranulats utilisés en France.

Dans la moelle de maïs, la valeur moyenne obtenue à la première minute d'immersion était de 652,70 %, augmentant l'absorption d'eau de 225,20 % par rapport au chanvre. Le mélange de l'écorce et de la moelle de maïs présente une absorption de 328,30 % à la première minute d'immersion, qui a une augmentation relative de 157,40 % par rapport au chanvre ; à 2880 minutes d'immersion, une valeur de 551,70% a été obtenue, ce qui a une augmentation relative de 130,20% par rapport au chanvre. Les valeurs présentées ci-dessus reflètent une augmentation de la capacité d'absorption des bio-agrégats, cela est dû au fait que lorsque la taille des particules est plus petite, la surface augmente, augmentant la capacité d'absorption d'eau.

#### 3.4.4 Répartition granulométrique

La figure 16 montre les distributions granulométriques des bio-agrégats obtenus, au Mexique, à partir de la tige de maïs.

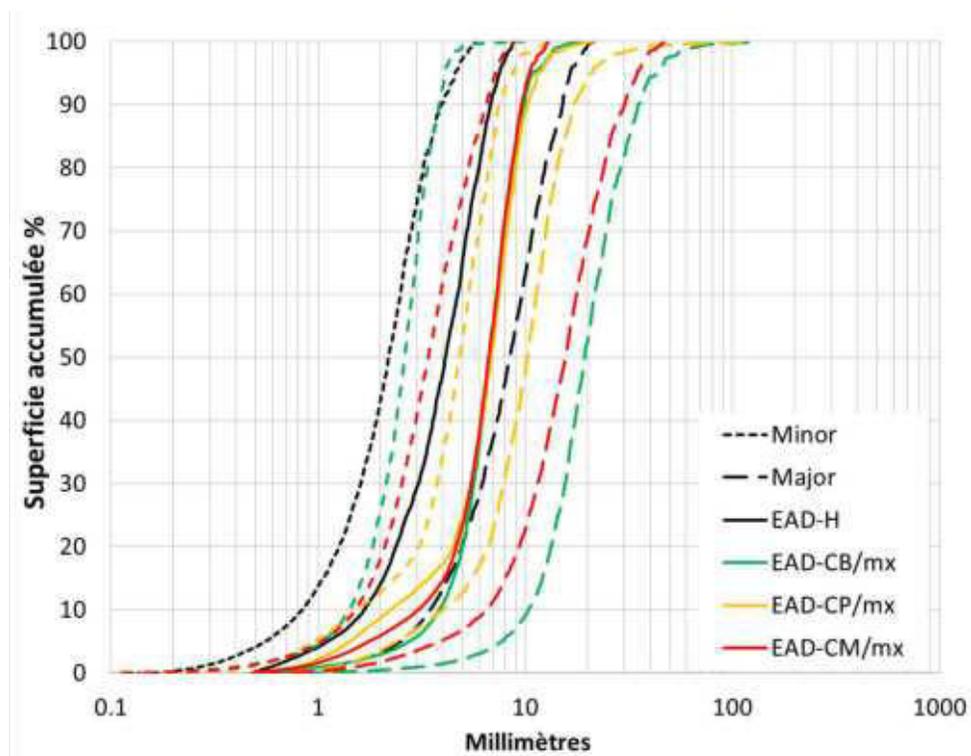


Figure 16. Distribution granulométrique, écorce de maïs (ED- CB), moelle de maïs (ED- CP), mélange écorce et moelle de maïs ED-CM).

Au diamètre équivalent, l'écorce de maïs (CB), avait une gamme de particules de 0,5 à 10,9 millimètres, dans ce cas la morphologie des particules (qui est majoritairement rectangulaire) empêchait leur passage à travers le tamis de 4 mm

<sup>2</sup> d'ouverture. Dans la moelle de maïs (CP), le diamètre équivalent a obtenu une gamme de particules de 0,4 à 11 millimètres, et dans le mélange d'écorce et de moelle de maïs (CM), le diamètre équivalent avait une gamme de particules de 0,5 à 10,3 millimètres, bien qu'il y ait été un contrôle plus strict dans le tamisage, certaines particules sont passées à travers un tamis d'ouverture de 4 mm<sup>2</sup> verticalement; cependant, la distribution granulométrique était meilleure par rapport à celles obtenues en France.

### **3.5 Formulation et caractérisation physique, mécanique et chimique des bétons végétaux**

Dans la conception du béton végétal, deux paramètres principaux sont pris en compte, le premier est la densité apparente des granulats, car cela indique la quantité de bio-granat à utiliser, le second est l'absorption d'eau qui régule la quantité d'eau présente dans le mélange. La procédure de conception et de préparation du mélange est illustrée à la figure 17. De même, le tableau 6 montre les quantités de matériaux utilisés dans la fabrication des différents bétons végétaux. Les quantités de matières utilisées dans la fabrication du béton végétal sont basées sur le travail de thèse de doctorat de The Manh Dinh intitulée « Contribution Aie développement du béton de chanvre j'ai préfabriqué utiliser un liant pouzzolanique innovant Contribution », où grâce à un mélange optimisé de liant pouzzolanique, 70 % de métakaolin, 30 % de chaux hydraulique, ainsi que l'ajout de sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ) et d'un additif superplastifiant, on obtient une matrice pouzzolanique aux propriétés mécaniques et des caractéristiques physiques qui lui permettent de concurrencer une chaux formulée commerciale composée de chaux, de ciment hydraulique et d'ajouts minéraux.

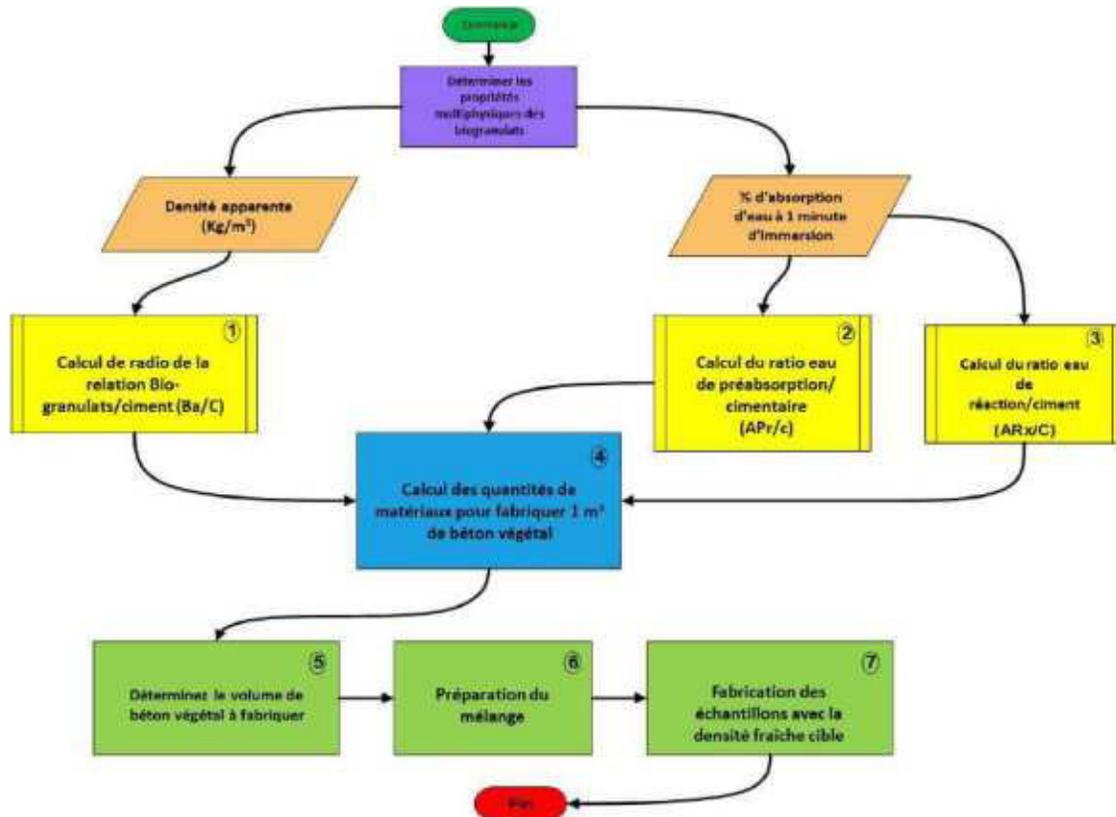


Figure 17. Séquence de conception des mélanges de béton végétal

Tableau 6 Quantités de matériaux pour réaliser 1 m<sup>3</sup> de béton végétal

Béton légume	cimentaire	K2SO4	bio-agrégat	eau de préabsorption	eau de réaction	Additif superplastifiant
HP		---	161,9	364,9	112,3	
SBP			179,6	336,3	83,6	
SPP			17	338,1	85,5	
SMP		11,2	95,8	338,1	101,8	252,6
CBP	374,3		142,3	351,9	99,3	
CPP			38,6	331,2	78,5	
CMP			61,9	509,1	256,4	
HL		--	161,9	524	112,3	411,7
SBL		--	179,6	495,3	83,6	

La conception des mélanges de bétons végétaux est réalisée avec une interpolation entre la masse volumique apparente et l'absorption d'eau à 1 minute du chanvre et des bio-granulats utilisés, ceci afin de connaître la quantité de matériaux et d'eau à utiliser.

### 3.5.1 Densité apparente et conductivité thermique

Le tableau 7 montre les conductivités thermiques des différents bétons végétaux élaborés dans cette campagne expérimentale. La conductivité thermique est directement liée à la densité apparente, de plus on observe une différence dans les mesures faites à l'état sec et à l'équilibre avec l'humidité relative ambiante.

**Tableau 7. Conductivité thermique des bétons végétaux (Chanvre (H), Écorce de Tournesol (SB), Moelle de Tournesol (SP), Mélange d'écorce et de moelle de Tournesol (SM), Feuille de Maïs (CB), Moelle de Maïs (CP) et Mélange d'écorce et de moelle (CM)) avec une matrice pouzzolanique (P) ou un liant commercial (L)**

Mélanger	Masse volumique sèche (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda_{sec}$	Masse volumique en équilibre ambiance (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda_{ambiant}$	Teneur en eau (%)
HP	385,3 ± 2,9	0,90 ± 0,005	396,8 ± 5,1	0,098 ± 0,006	3.0
SBP	420,5 ± 0,3	0,095 ± 0,006	438,4 ± 4,6	0,115 ± 0,005	4.3
SPP	579,1 ± 9,8	0,098 ± 0,009	584,7 ± 1,2	0,120 ± 0,005	1.0
SMP	597,3 ± 0,4	0,121 ± 0,007	616,6 ± 8,2	0,132 ± 0,008	3.2
CBP	438 ± 19,8	0,091 ± 0,005	443,4 ± 17,7	0,105 ± 0,006	1.2
CPP	404.4 ± 3	0,118 ± 0,005	412,7 ± 3,2	0,129 ± 0,008	2.1
CMP	461,6 ± 4,7	0,103 ± 0,004	469,9 ± 5,3	0,113 ± 0,006	1.8
HL	428,6 ± 2,2	0,123 ± 0,008	441,1 ± 6,3	0,138 ± 0,009	2.9
SBL	440 ± 55,7	0,135 ± 0,009	472,5 ± 21	0,153 ± 0,010	7.4

Comme mentionné ci-dessus, la conductivité thermique est liée à l'humidité relative ambiante qui conditionne la teneur en eau à l'équilibre du matériau. La conductivité thermique la plus faible est obtenue lorsque les bétons végétaux sont séchés au four, car il n'y a pas d'humidité dans les pores qui interfère avec la diffusion de la chaleur. La meilleure conductivité thermique à l'état sec et à température et humidité relative ambiantes est le mélange à base de chanvre et de métakaolin (HP), néanmoins le mélange à base d'écorce de tournesol et de métakaolin (XX) présente également de bonnes propriétés thermiques, ce qui en fait l'un des bio- granulats à fort potentiel thermique.

### 3.5.2 Résistance à la compression

Le tableau 8 montre les différentes résistances moyennes à la compression des mélanges réalisés dans cette étude.

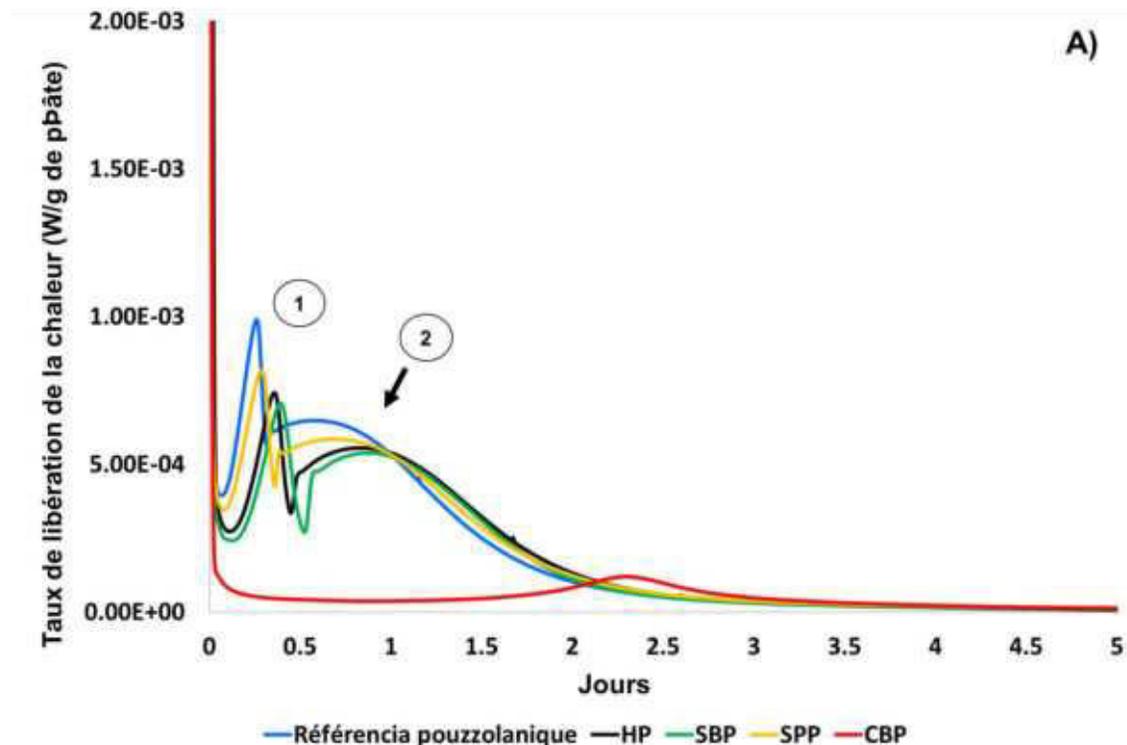
**Tableau 8. Valeurs de contraintes et de déformation maximales moyennes**

	HP	SBP	SPP	SMP	CBP	CPP	CMP	HL	SBL
$\sigma_{max}$	0.3 ± 0.10	0.2 ± 0.03	0.9 ± 0.01	0.4 ± 0.02	0.1 ± 0.03	0.1 ± 0.01	0.2 ± 0.02	0.7 ± 0.07	1.1 ± 0.12
$\epsilon (\sigma_{max})$	8.4 ± 2.02	11.3 ± 0.69	1.4 ± 0.28	4.4 ± 0.32	9.8 ± 0.07	2.2 ± 0.07	5.7 ± 0.62	5.0 ± 0.65	8.5 ± 1.07
$\sigma (\epsilon=1\%)$	0.02 ± 0.02	0.03 ± 0.03	0.7 ± 0.15	0.2 ± 0.02	0.01	0.1 ± 0.01	0.05	0.4 ± 0.12	0.5 ± 0.03
$\sigma (\epsilon=1,5\%)$	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.8 ± 0.10	0.2 ± 0.02	0.02	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.01	0.5 ± 0.08	0.7 ± 0.04
$\sigma (\epsilon=5\%)$	0.2 ± 0.04	0.2 ± 0.01	0.4 ± 0.12	0.4 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.2 ± 0.02	0.7 ± 0.07	1.0 ± 0.10
$\sigma (\epsilon=7,5\%)$	0.2 ± 0.07	0.2 ± 0.02	0.4 ± 0.14	0.3 ± 0.03	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.2 ± 0.02	0.6 ± 0.09	1.1 ± 0.12

Le comportement mécanique des bio-composites est régi principalement par le type de liant utilisé lors de sa préparation, de la même manière, les interstices influencent grandement ce comportement. L'enrobé HP a obtenu une résistance à la compression de 0,30 MPa et un module d'Young de 23,1 MPa. Dans le mélange SBP, une résistance à la compression de 0,20 MPa a été obtenue, ainsi qu'un module d'Young de 23,4 MPa. Le mélange SPP a enregistré une résistance à la compression de 0,9 MPa et un module de Young de 160,5 MPa. Le mélange SMP a obtenu une résistance à la compression de 0,40 MPa, qui est la plus faible de l'étude, ainsi qu'un module d'Young de 71,8 MPa. En revanche, le mélange CBP a obtenu une résistance à la compression de 0,1 MPa, ainsi qu'un module d'Young de 6,3 MPa. Dans le mélange CPP, il s'agit d'une résistance à la compression de 0,1 MPa et d'un module d'Young de 10,2 MPa. Dans le mélange CMP, une résistance à la compression de 0,2 MPa a été obtenue, ainsi qu'un module d'Young de 9,8 MPa.

### 3.5.3 Calorimétrie isotherme

La figure 18 montre les analyses effectuées sur les différents mélanges élaborés dans l'étude.



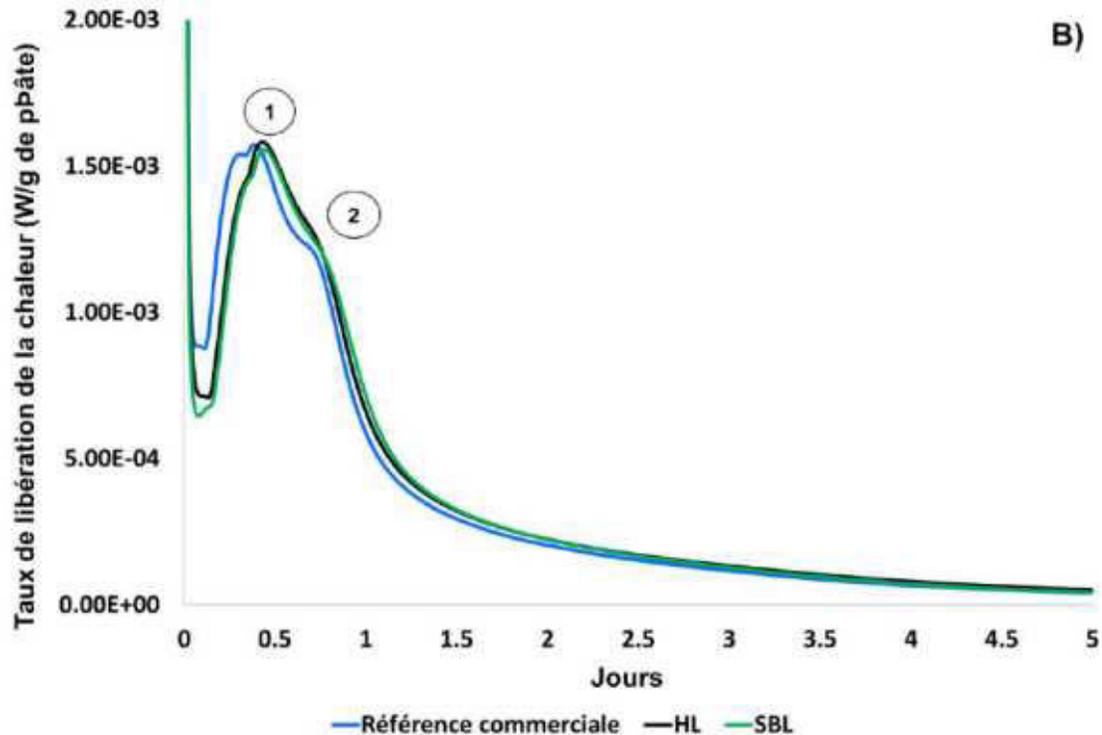


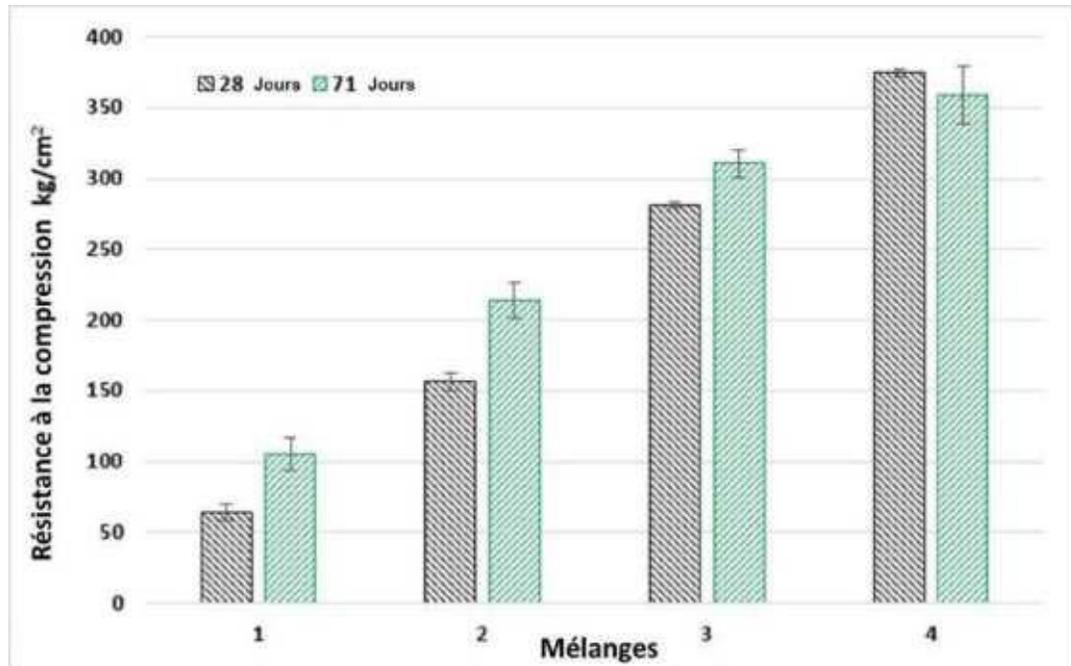
Figure 18. a) Graphique de la calorimétrie isotherme des mélanges pouzzolaniques, b) Graphique de la calorimétrie isotherme des mélanges réalisés avec la chaux formulée commerciale

Le mélange à base de chanvre (HL), donne lieu à une réaction exothermique environ 10 heures après le contact du liant avec l'eau. Dans le mélange à base d'écorces de tournesol (SBL), la réaction exothermique a lieu environ 11 heures après le démarrage du ciment processus d'hydratation. De la figure 18a), on peut déduire que l'effet retardateur et inhibiteur des mécanismes de prise des mélanges pouzzolaniques est classé comme suit : **SPP < HP < SBP < CBP < REF-PZ**. De la figure 18b), on peut conclure que l'impact délétère des hydrosolubles est classée comme suit : **HL < Référence commerciale < SBL**. En général, les bio-agrégats obtenus à partir de la tige de tournesol n'ont pas d'impact significatif lors du processus de prise des liants. Au contraire dans le mélange à base d'écorce de maïs (CBP), on observe non seulement un retard de réaction du liant pouzzolanique de plus de deux jours mais également une forte chute du flux de chaleur, traduisant une forte limitation des réactions. Ces observations permettant d'expliquer les performances mécaniques quasi nulles de ce dernier mélange.

### 3.6 Formulation et analyse des pâtes fabriquées au Mexique

La figure 19 montre les résultats de résistance en compression des différentes pâtes analysées ; Il est à noter que les mélanges dans lesquels les apports de chaux sont élevés (mélange 1), la résistance à la compression est plus faible,

même à 71 jours elle atteint  $105 \text{ kg/cm}^2$  ; d'autre part, à partir du mélange 2, vous commencez à voir l'impact que la quantité d'ajout de cendres volantes a sur le mélange de béton.



**Figure 19. Résistance à la compression des cubes de mortier**

Il est intéressant de voir dans la diminution de résistance qui se produit dans le mélange 4, cette diminution de résistance peut être due à l'activité pouzzolanique qui se produit par rapport au temps ; ce qui signifie que la réaction est toujours en cours, ce qui peut affecter la résistance à la compression souhaitée ; de même, un autre des facteurs qui peut être déduit, comme le type de ciment, les différences dans la teneur des composés chimiques de la chaux hydraulique et des cendres volantes.

## **4. Conclusions**

### **4.1 Bio-agrégats**

L'écorce de tournesol a un grand potentiel pour être incorporée à une formulation de béton végétal. D'autre part, les bio-agrégats obtenus dans la tige du plant de maïs, en particulier, l'écorce de maïs (CB), a une absorption d'eau à 1 minute similaire à celle de l'écorce de tournesol (SB), cependant, la conductivité est impactée. Dans le cas de l'écorce de maïs obtenue au Mexique, la densité est plus élevée par rapport au tournesol et à l'écorce de maïs en France. Différentes techniques de caractérisation appliquées aux différents bio-agrégats, permettent de déduire que les bio-agrégats obtenus à partir de la tige de la plante de tournesol ont une bonne réponse et un bon comportement en propriétés physiques.

## 4.2 Béton végétal

Les techniques de caractérisation appliquées aux bétons végétaux ont montré que l'un des bétons végétaux qui a une résistance à la compression similaire au béton au chanvre est celui correspondant au mélange pouzzolanique à l'écorce de tournesol (SBP). D'autre part, les mélanges réalisés avec la chaux formulée commerciale, le mélange à base d'écorce de tournesol (SBL) a développé la résistance à la compression la plus élevée de toute l'étude. En revanche, le mélange à base d'écorce de maïs (CBP) avait la plus faible résistance à la compression de toute l'étude; inférieure à 0,1 MPa. Ce niveau de performance traduit une absence de résistance de la phase liante et un comportement mécanique similaire à celui d'un empilement de particules fortement déformables.

A partir de ce comportement, la décision a été prise d'étudier par calorimétrie isotherme les différentes pâtes modèles contenant liant et hydrosolubles issus des différents granulats. Ces essais ont permis de mettre en évidence une interaction chimique entre les liants réactifs et les composés hydrosolubles présents dans les bio-agrégats, principalement dans l'écorce de maïs (CBP). Dans ce mélange, les faibles résistances mécaniques ont ainsi pu être expliquées par une inhibition quasi-totale des mécanismes de prise et de durcissement du liant.

# **“FORMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE CONCRETOS VEGETALES ELABORADOS CON MAÍZ Y GIRASOL”**

## **Resumen**

### **1. Introducción**

Desde hace más de dos décadas la industria de construcción ha ido orientando sus pasos hacia la implementación de materiales sustentables para algunos sistemas constructivos. En Francia, uno de los materiales de construcción que hasta el momento ha tenido un área de oportunidad amplia ha sido el concreto con cáñamo. Desde los años 90's este material ha sido sujeto de estudio, se han analizado sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. En otro orden de ideas, una problemática presente en zonas donde existen climas extremos, los constructores están obligados a brindar soluciones para mejorar el desempeño energético de las edificaciones, sin embargo, algunas soluciones de climatización o envolventes térmicos tienen un costo elevado y en algunos casos, los materiales empleados tienen un alto consumo de energía y por consiguiente, dejan un impacto ambiental elevado; en este contexto, la industria de la construcción a nivel mundial tiene un alto índice de consumo de energía el cual es cercano al 36%, también es responsable del 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial. Los materiales alternativos que se emplean en la construcción, ayudan a reducir el ciclo del carbono, estos materiales presentan una alta viabilidad para el reemplazo de algunos materiales convencionales, que principalmente son utilizados para el aislamiento térmico o bien como una función del tipo estético.

#### **1.1 Programa experimental**

El programa experimental se planteó con 5 fases, mismas que se desarrollarían en la Université Toulouse III – Paul Sabatier dentro del Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) y en la Universidad Autónoma de Nuevo León, en la Facultad de Ingeniería Civil. Cabe hacer mención que, por cuestiones ajenas al proyecto, la secuencia que se desarrollaría en la Universidad Autónoma de Nuevo León, se realizó de manera parcial hasta la fase 3 donde solo se formularon las mezclas a utilizar y se realizaron los ensayos a compresión de cubos de pasta de 5 x 5 x 5 cm. El programa de experimentación se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1. Programa experimental**

Fase	<i>Experimentación en LMDC (Francia)</i>	<i>Experimentación en IIC-UANL (México)</i>
	Ensaye	
1. Obtención de los bio-agregados	Trituración Separación	Trituración Separación
2. Caracterización física de los bio-agregados	Absorción de agua Densidad Distribución del tamaño de partícula Conductividad térmica Microscopía electrónica de barrido Videomicroscopía	Absorción de agua Densidad Distribución del tamaño de partícula
3. Fabricación de concreto vegetal y preservación de especímenes	Fabricación de 9 mezclas Curado de los especímenes Preservación	Formulación de las mezclas* Fabricación de 3 mezclas* Curado de los especímenes* Preservación de los especímenes*
4. Caracterización física de los concretos vegetales	Densidad Conductividad térmica seca y ambiente Resistencia a la compresión Microscopía electrónica de barrido Videomicroscopía Espectroscopía de dispersión de energía	Densidad* Resistencia a la compresión* Microscopía electrónica de barrido*
5. Caracterización mineralógica de los concretos vegetales	Difracción de rayos X Microcalorimetría Termogravimetría	Difracción de rayos X* Termogravimetría*

Los ensayos marcados con \*, fueron propuestos para realizarse en México, sin embargo, no se realizaron debido a situaciones ajenas al proyecto (debido a la contingencia mundial provocada por el COVID-19, por tal motivo, las instalaciones fueron cerradas).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Bio-agregados

Uno de los primeros concretos vegetales elaborados fue el concreto con cáñamo, como se mencionó antes, este material ha tenido una amplia aceptación en Francia, donde se han desarrollado diversos trabajos de investigación, donde el principal objetivo es analizar las propiedades multifísicas y químicas del cáñamo, pues al ser un material residuo de la cosecha que se da a nivel nacional en Francia, tiene una gran variabilidad en sus propiedades físicas y químicas. Por otro lado, la disponibilidad del cáñamo en Francia es limitada, por ello diversos investigadores buscan alternativas para sustituir al cáñamo, esto debido a que su disponibilidad es limitada. En estudios preliminares, algunos autores han explorado el potencial del tallo de girasol, lavanda, canola, lino, yuca, lechuguilla de maguey, y recientemente el tallo de maíz como bio-agregados en la

elaboración de concretos vegetales; pues en algunos casos las propiedades multifísicas que ofrecen estos bio-agregados, como la densidad aparente y la conductividad térmica suelen ser similares o mejores que las obtenidas en el cáñamo.

Los tallos de las plantas de girasol y de maíz utilizadas en el desarrollo de los concretos vegetales en Francia, provienen de la región de Occitania, ubicada al sur del mismo país. En el caso de México, el tallo de maíz proviene del estado de Guerrero, del municipio de Quechultenango, el cual pertenece a la zona centro del mismo estado. Un punto importante a recalcar, es que se propone el uso de la planta de maíz porque es uno de los principales cultivos en ambos países; además este subproducto es en algunos casos desechado, utilizado como forraje o como alimento para el ganado o animales de granja.

## **2.2 Cementantes**

Los cementantes empleados en esta investigación son de 3 tipos, el primero es un cementante elaborado con metacaolín, cal y sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ), el cual ayudará a acelerar algunas reacciones químicas que tienen un efecto en el fraguado y la resistencia a compresión; el segundo es un cementante comercial, cuyo componente principal es la cal y una adición mínima de cemento hidráulico; estos dos cementantes fueron utilizados durante la estancia realizada en Francia. El tercero, fue una serie de 4 propuestas cuya base es el cemento portland ordinario (CPO) con sustituciones parciales de ceniza volante tipo F en diferentes proporciones. Sin embargo, por cuestiones ajenas al proyecto, esta fase del trabajo experimental tuvo que ser suspendida.

## **2.3 Obtención de los bio-agregados de las plantas de girasol y maíz**

### **2.3.1 Metodología aplicada en Francia**

En esta parte se realiza la trituración de los tallos a través de un molino de martillos de la marca Electra, tipo BC-P (figura 1). El proceso de separación se realizó con una banda mecánica, un ventilador y un sistema de aspiración y almacenamiento los cuales se muestran en la figura 2. En parte a) se deposita el material, la parte b) muestra el sentido de giro de la banda, la parte c) marca el acceso del sistema de aspiración y almacenamiento, en la parte d) debido a la baja densidad de la médula se implementó el uso de un ventilador que ayuda a la médula descender hacia el sistema de aspiración, mientras la corteza se mantiene en la banda, y, por último, en la parte e) se dispone de un recipiente de recuperar la corteza.



Figura 1. Molino utilizado para la trituración del tallo de girasol y maíz

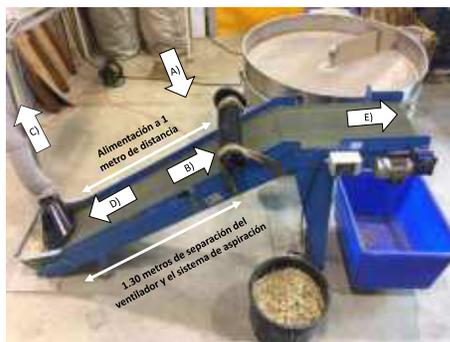


Figura 2. Sistema de separación de bio-agregados

### 2.3.2 Metodología aplicada en México

La separación de la corteza y la médula del tallo del maíz se realizó de manera manual; ya que en la metodología aplicada en Francia se observó que uno de los principales problemas fue la separación, ya que el tallo en estado seco, la corteza se mantenía fuertemente adherida. En México se optó por separar estos bio-agregados cuando el tallo presentaba humedad, dicha separación se llevó a cabo con mayor facilidad y posteriormente se secaron exponiéndolas al sol (figura 3). La trituración se realizó con un molino forrajero con motor a gasolina de la marca honda de 13 HP (figura 4)



a)



b)



c)



d)



e)



f)

**Figura 3. Proceso de preparación de la materia prima: a) limpieza del tallo, b) separación manual, c) secado de la corteza, d) secado de la médula, e) molienda, f) resultado de la molienda.**



a)



b)

Figura 4. a) Molino forrajero, de motor a gasolina, motor honda de 13 HP. b) Tamiz Swequipos, del modelo LS30C666 de ½ hp y de 1140 RPM

## 2.4 Caracterización de los agregados

Para conocer las propiedades multifísicas de los bio-agregados utilizados en este trabajo doctoral, se recurrió a las recomendaciones emitidas por el comité técnico RILEM TC-236 BBM “Bio-based Building Materials”, dichas recomendaciones tienen como objetivo brindar un material de apoyo, así como una descripción de los procedimientos de prueba establecidos para conocer la densidad, conductividad térmica, distribución de tamaño de partícula, porcentaje de absorción de agua a 1, 15, 240 y 2880 minutos. Las recomendaciones antes mencionadas son el resultado de una intensa cooperación entre los laboratorios participantes del comité técnico mencionado. Además, dichas técnicas de caracterización sugeridas en el documento pueden emplearse en lino, girasol, lavanda, miscanthus, pino, maíz girasol, bambú, coco, cáscara de arroz, palma, cola de gato o totora (typhaceae), entre otros tipos de plantas que pueden ser utilizadas como bio-agregados o materiales primordiales para la construcción. Aunado a lo anterior, para observar la morfología de las partículas de los bio-agregados a diferentes magnificaciones, se aplicó el uso del videomicroscopio y del microscopio electrónico de barrido; y por último, realizó la prueba de masa volumétrica compactada, El objetivo de esta prueba es determinar el valor de la masa de los bio-agregados cuando estos se encuentran con una cantidad de agua.

## 2.5 Caracterización de los concretos vegetales

Al igual que en los bio-agregados, se llevaron a cabo observaciones con el microscopio electrónico de barrido, a la par se aplicó el análisis de espectroscopía de energía dispersiva; en el primera técnica aplicada, se analizaron la interfaz entre los bio-agregados y la matriz puzolánica y cementante y en las segunda

técnica aplicada, se realizó un análisis elemental a través de rayos X. Las propiedades físicas estudiadas corresponden a la densidad en estado fresco, a temperatura y humedad relativa ambiental y por último en estado seco al horno. Por otro lado, también se obtuvieron las conductividades térmicas con respecto a la temperatura y humedad relativa ambiental, así como en estado seco al horno.

Otro de los ensayos realizados fue la resistencia a compresión, este ensayo se realizó con cargas cíclicas, en las que se mide el esfuerzo y la deformación de las probetas durante 4 ciclos. Además, para conocer cómo es el proceso de interacción los compuestos hidrosolubles presentes en los bio-agregados y las matrices cementantes, se llevó a cabo la prueba de calorimetría isotérmica, en la cual se pueden observar cómo es la evolución de las reacciones químicas mientras transcurre el tiempo y para complementar el análisis mineralógico, se efectuó un análisis termogravimétrico y la difracción de rayos X, con el fin de cotejar los resultados obtenidos.

### 3. Resultados

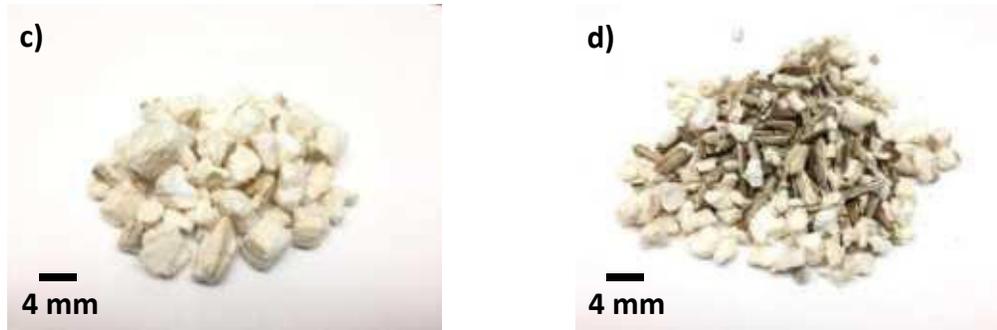
#### 3.1 Síntesis de los bio-agregados obtenidos en Francia

En la tabla 2 se muestra una síntesis de las cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de girasol, en dicha tabla se muestran las cantidades correspondientes a los totales, los porcentajes de rendimiento se calculan tomando como el peso inicial (55.70 kg) como el 100%. En el caso de los bio-agregados de la mezcla, se tiene un rendimiento del 87.60% porque se tomó una fracción de tallos para observar el comportamiento del molino. Por otro lado, en la imagen 5 se muestran los bio-agregados obtenidos del tallo de la planta de girasol.

**Tabla 2. Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de girasol *Material útil (entre 1 y 4 milímetros)***

Bio-agregado	Kilogramos	Porcentaje de rendimiento
Corteza	40.53	72.76
Médula	2.60	4.67
Mezcla	5.40	87.60





**Figura 5 Bio-agregados obtenidos del tallo de girasol: a) Cáñamo (H), b) Corteza de girasol (SB), c) Médula de girasol (SP), d) Mezcla de corteza y médula de girasol (SM).**

En la tabla 3 se resumen las cantidades de los bio-agregados obtenidos del tallo de la planta de maíz, en la cual se muestran las cantidades útiles y los no útiles, el total inicial fue de 24.10 kilogramos lo que significa el 100% del total del material. De igual manera, en la figura 6 se muestran los bio-agregados obtenidos del tallo de la planta de maíz.

**Tabla 3 Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de maíz**

<i>Material útil (entre 1 y 4 milímetros)</i>		
Bio-agregado	Kilogramos	Porcentaje
Corteza	13.10	54.40
Médula	0.70	2.90
Mezcla	2.50	10.20

El mismo proceso se repite para el caso de la médula, así como para la cantidad de material no útil, y para la mezcla de corteza y médula de maíz. Los porcentajes mostrados en la tabla indican el rendimiento de los bio-agregados del tallo del maíz; es decir qué cantidad de material útil puede obtenerse después del proceso de transformación y separación de los bio-agregados. La separación de la corteza y la médula fue un proceso similar al de los bio-agregados del tallo de girasol, sin embargo, en la mezcla de la corteza y la médula de maíz significó un proceso complicado y además que lleva un poco más de tiempo, pues el desarrollo de esto al ser manual permite poder separar los diferentes fragmentos obtenidos de la hojarasca, las raíces y la tierra. Los bio-agregados obtenidos se muestran en la figura 6.



Figura 6. Bio-agregados obtenidos del tallo de girasol: a) Cáñamo (H), b) Corteza de maíz (SB), c) Médula de maíz (SP), d) Mezcla de corteza y médula de maíz (SM)

### 3.2 Síntesis de los bio-agregados obtenidos en México

Por otro lado, es importante recalcar las grandes diferencias que se obtienen cuando los bio-agregados son separados secos contra la obtención de los bio-agregados obtenidos con humedad. En la tabla 4 se muestra una comparación de las cantidades obtenidas.

Tabla 4. Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de maíz

<i>Material útil (entre 1 y 4 milímetros)</i>		
Bio-agregado	Kilogramos	Porcentaje
<b>Bio-agregados del tallo de maíz obtenidos en Francia</b>		
Corteza	13.10	54.40
Médula	0.70	2.90
Mezcla	2.50	10.20
<b>Bio-agregados del tallo de maíz obtenidos en México</b>		
Corteza	11.17	51.74
Médula	4.51	56.28
Mezcla	4.45	55.62

Es en este punto donde cobra una mayor importancia la metodología aplicada para la obtención de los bio-agregados. Uno de los más importantes puntos a

destacar es que en los bio-agregados obtenidos en México se obtienen valores cercanos a la mitad del peso total. De los resultados descritos en la tabla anterior se deduce que las limitaciones encontradas durante la obtención de los bio-agregados fueron:

La alimentación del molino, al igual que en Francia, es necesario hacer una reducción previa del tallo.

La velocidad de giro.

El sistema de recolección.

Por otro lado, es importante recalcar las grandes diferencias que tiene el

En la figura 7 se muestra el resultado de los materiales obtenidos de estos bio-agregados del tallo de la planta de maíz en México.

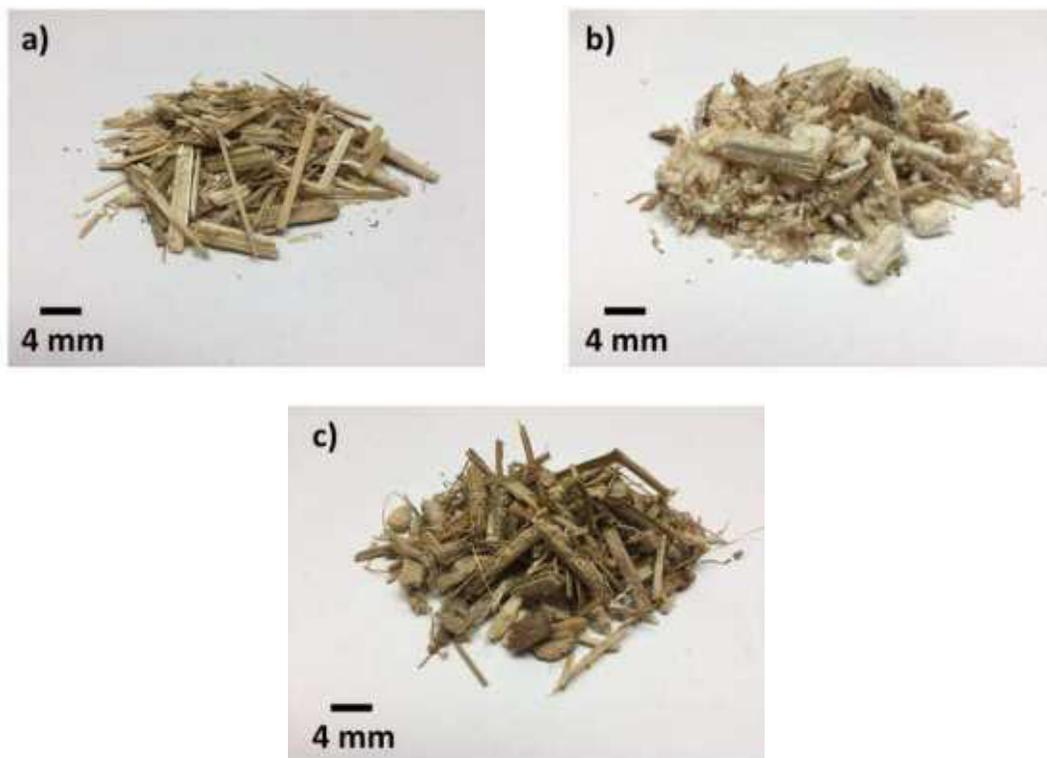


Figura 7. a) Corteza de maíz (CB), b) Médula de maíz (CP) y c) Mezcla de corteza y médula de maíz (CM).

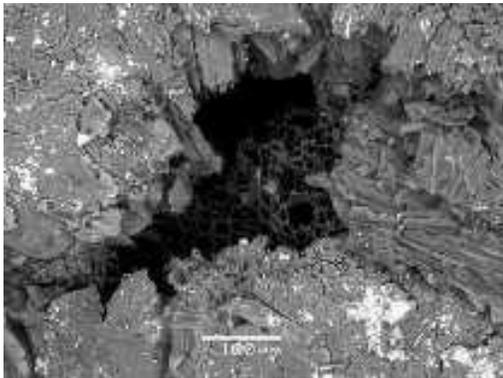
### 3.3 Caracterización de los bio-agregados obtenidos en Francia

#### 3.3.1 Microscopía electrónica de barrido aplicada a los bio-agregados

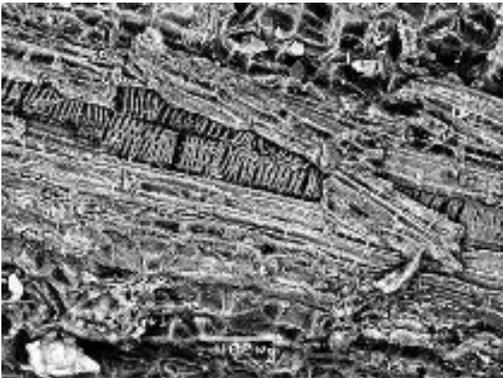
En la figura 8, se resumen las observaciones realizadas a los diferentes bio-agregados empleados en esta investigación.



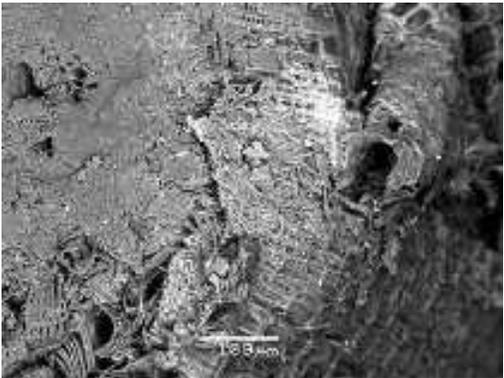
a)



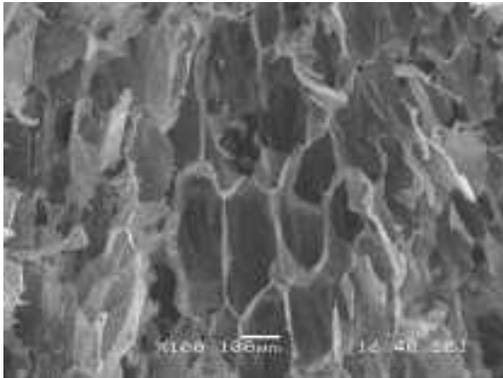
b)



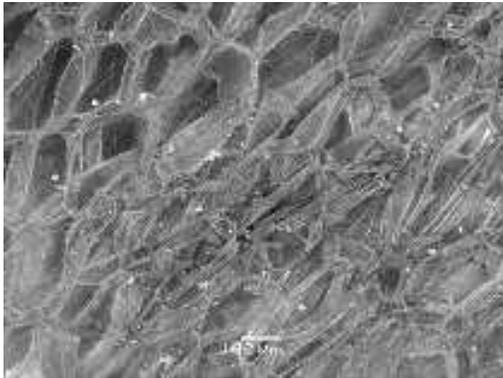
c)



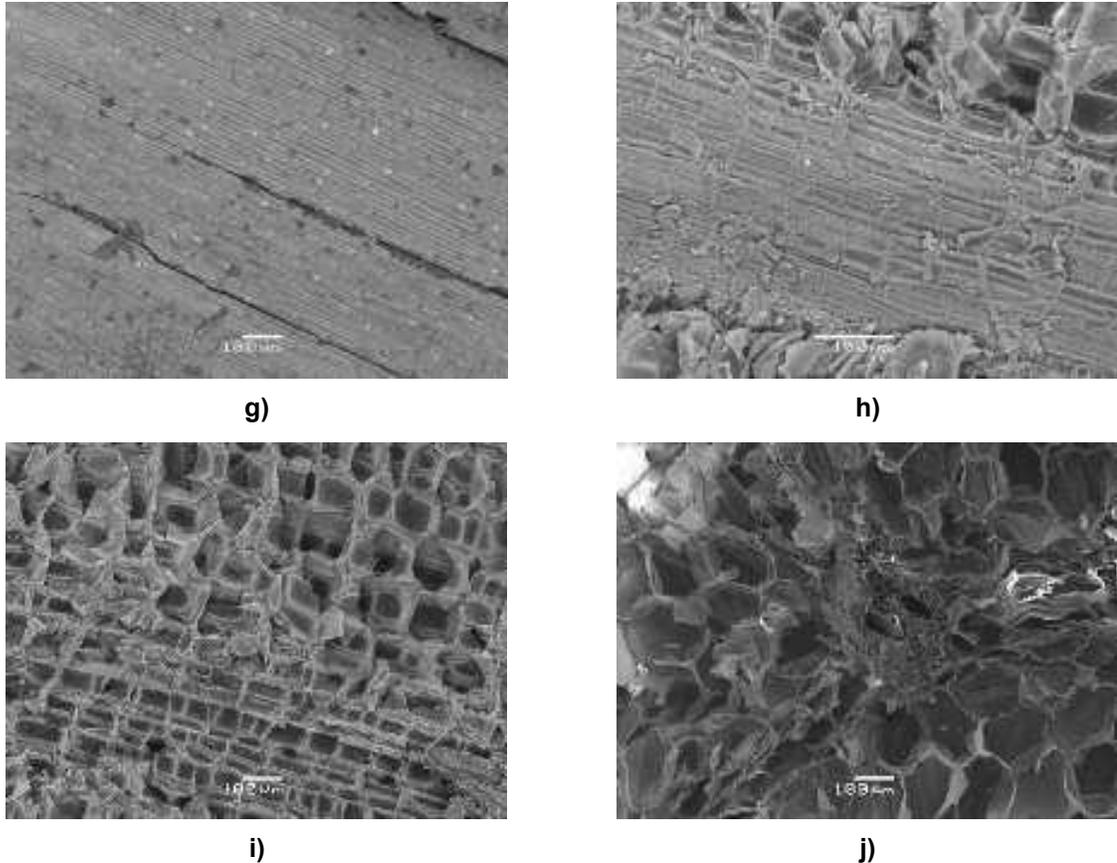
d)



e)



f)



**Figura 8. a) Partícula de cáñamo en corte longitudinal, b) Partícula de cáñamo en corte transversal, c) Partícula de corteza de girasol en corte longitudinal, d) Partícula de corteza de girasol en corte transversal, e) Partícula de médula de girasol en corte longitudinal, f) Partícula de médula de girasol en corte transversal, g) Partícula de corteza de maíz en corte longitudinal, h) Partícula de corteza de maíz en corte transversal, i) Partícula de médula de maíz en corte longitudinal, j) Partícula de médula de maíz en corte transversal, todas las observaciones fueron realizadas a x100, 15kV**

El cáñamo (H) posee una microestructura definida, en los bio-agregados del tallo de la planta de girasol también se observa una microestructura definida; no obstante, en los bio-agregados del tallo de la planta de maíz, la microestructura es amorfa, ya que a pesar de que si presentan un patrón semicircular en el centro de la médula de la planta, los alveolos no reflejan una geometría definida como se observó en la médula del girasol; cabe señalar que el diámetro de los alveolos de la médula de maíz son más pequeños en comparación a los de la médula de girasol, esto puede tener un efecto positivo en la absorción de agua, pero negativo en la densidad aparente y la conductividad térmica.

### **3.3.2 Densidad aparente y Conductividad térmica**

En la figura 9, se presenta el gráfico correspondiente a la conductividad térmica con respecto a la densidad aparente, es importante mencionar que estas dos propiedades están íntimamente ligadas, pues en los bio-agregados, una mayor

porosidad da como resultado una menor densidad aparente y por consiguiente, una menor conductividad térmica.

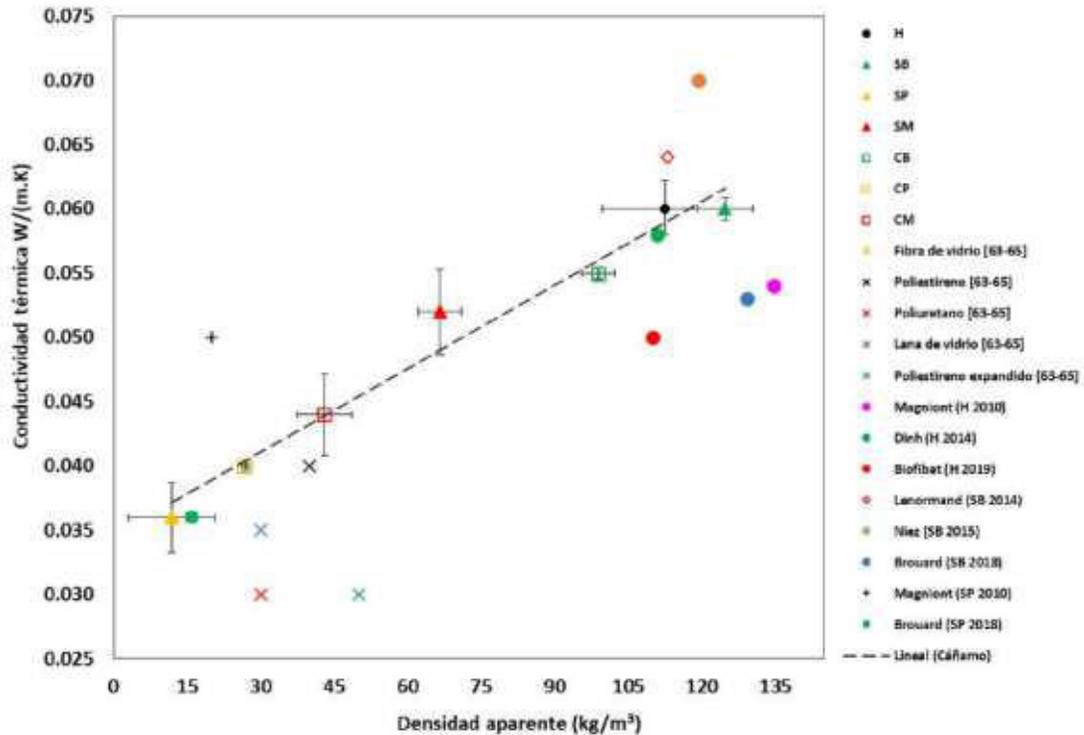


Figura 9. Conductividad térmica de los bio-agregados

En la gráfica se puede observar una similitud entre el cañamo (H), la corteza de girasol (SB), y la corteza de maíz (CB), esto es resultado del parecido que tienen su microestructura; en el caso de las médula de girasol y maíz (CP), la conductividad térmica más baja se da en la médula de girasol (SP), pues en este bio-agregado la limitación de la transferencia del calor entre los alveolos se ve mermada debido a su diámetro es decir a la porosidad intraparticular; lo anterior justifica el hecho de tener una medida de conductividad térmica menor en comparación a la médula de girasol. Por último, en las mezclas de corteza y médula de girasol (SM) y maíz (CM), la conductividad térmica más baja se registra en la mezcla de corteza y médula de maíz (CM), pues en este caso entran en juego la porosidad intraparticular, la cual por la diferencia de tamaños en los bio-agregados, la distribución del flujo de calor es eficiente, disipando flujo entre los poros.

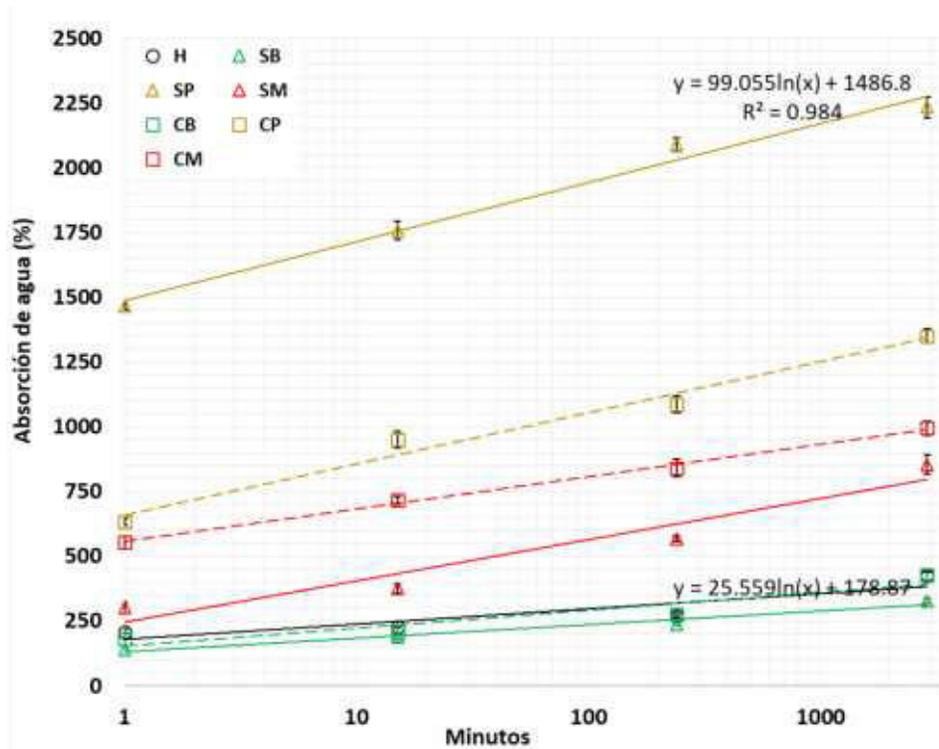
### 3.3.3 Absorción de agua

En la tabla 5 se presentan algunos valores representativos encontrados en la revisión bibliográfica, estos valores han sido obtenidos a través del método establecido por el RILEM 236 Bio-based building materials.

**Tabla 5 Valores de absorción de agua encontrados en la bibliografía**

Bio-agregado	IRA (%)	K1 (%.log(min) <sup>-1</sup> )	Referencia
H	122 - 218	19.5 - 50.0	[1-5]
SB	141 - 148	17.8 - 18.5	[5,6]
SP	223	--	[165,166]
SM	--	--	--
CB	98.00	19.8	[5]
CP	450 - 550	11.69 - 19.49	[10]
CM	--	--	--

En la figura 10 se muestra la gráfica de absorción de agua de los bio-agregados,



**Figura 10 Absorción de agua de los bio-agregados**

En el caso del cáñamo (H), la corteza de girasol (SB) y de maíz (CB), los resultados de esta prueba muestran una rápida cinética de absorción al primer minuto. Los valores de absorción de agua para estos bio-agregados son muy similares. Como puede observarse, los resultados obtenidos en esta prueba muestran que el cáñamo tiene una alta absorción de agua durante el primer minuto (209%), de igual manera, la corteza de girasol (139%) y de maíz (183%), debido a la porosidad que presenta en su microestructura. Las médulas de girasol (SP) y de maíz (CP) tienen una absorción mayor que el cáñamo y las cortezas de girasol y de maíz esto se debe a que las microestructuras de ambos tipos de

médula están compuestas por una extensa red de poros, la cual pueden retener una gran cantidad de agua. Es de notar que la tasa de absorción a un minuto para la médula de girasol es del 1466%, en comparación a la médula de maíz la cual es de 632%. La mezcla de maíz (CM) sigue teniendo una absorción relativamente alta (554%), en comparación de la mezcla de girasol (SM) (301%) Como se ha observado este comportamiento se repite en la densidad aparente y la conductividad térmica. De manera general, los resultados obtenidos pueden diferir de la bibliografía consultada, esto generalmente se debe a los diferentes tipos de bio-agregado, el tamaño de las partículas, el contenido de fibra y polvo, así como también de la forma en cómo se realiza el ensayo, el tamaño de la muestra y la eliminación del agua superficial.

### 3.3.4 Distribución del tamaño de partícula

Las figuras 11 y 12 muestran la distribución del tamaño de partícula de los bio-agregados obtenidos del tallo de girasol y del maíz respectivamente; de acuerdo a los tres principales parámetros de dimensión en las partículas los cuales son el eje mayor, el eje menor y el diámetro equivalente.

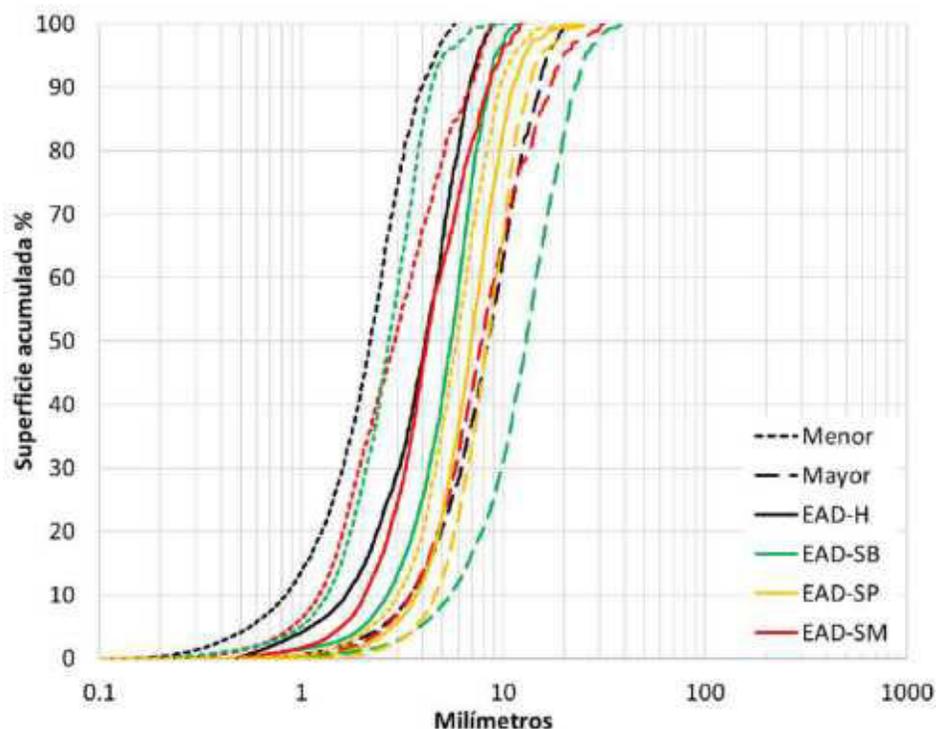
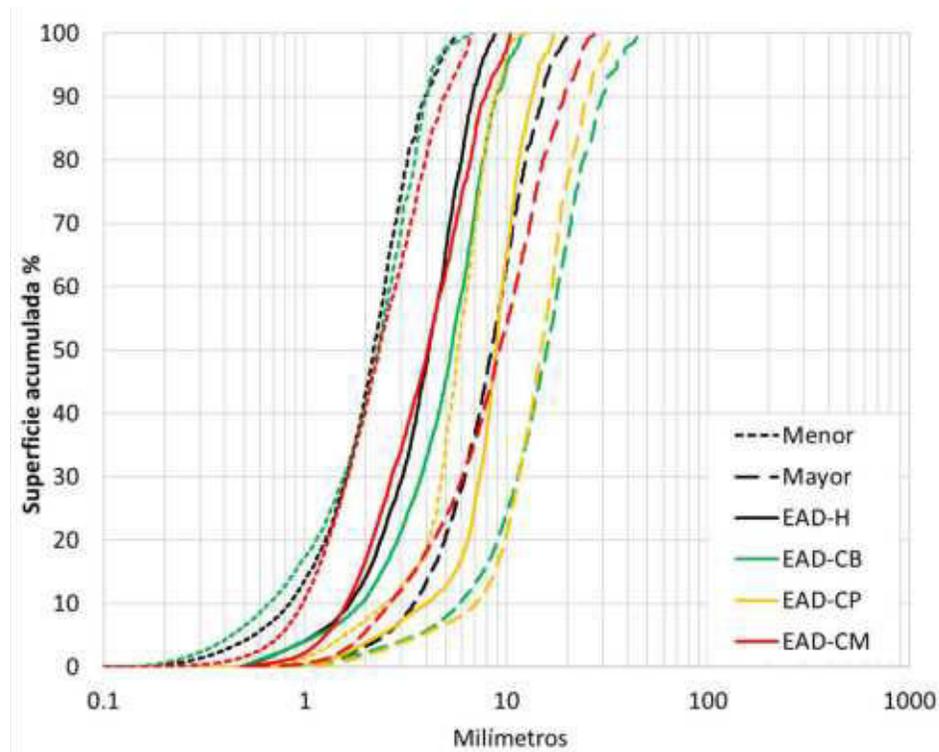


Figura 11. Distribución del tamaño de partícula: cáñamo (ED-H), corteza de girasol (ED-SB), médula de girasol (ED-SP), mezcla de corteza y médula de girasol (ED-SM)

La corteza de girasol (SB) en el diámetro equivalente se tiene un rango partículas de 0.4 a 13 milímetros, como sucede con el cáñamo (H), esta dispersión del tamaño de las partículas puede solucionarse realizando nuevamente el tamizaje,

y verificar cuidadosamente que las partículas no atraviesen el matiz de manera vertical. En la médula de girasol (SP), en el diámetro equivalente se tiene un rango partículas de 0.5 a 22 milímetros; en este caso, se tienen diferentes tamaños debido a que se juntaron las partículas que se retuvieron y pasaron el tamiz de 4 mm<sup>2</sup>. En la mezcla de corteza y médula de girasol, en el diámetro equivalente se tiene un rango de partículas de 0.5 a 20 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.7 a 100 milímetros.



**Figura 12 intervalo de circularidad de las partículas de cáñamos (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM)**

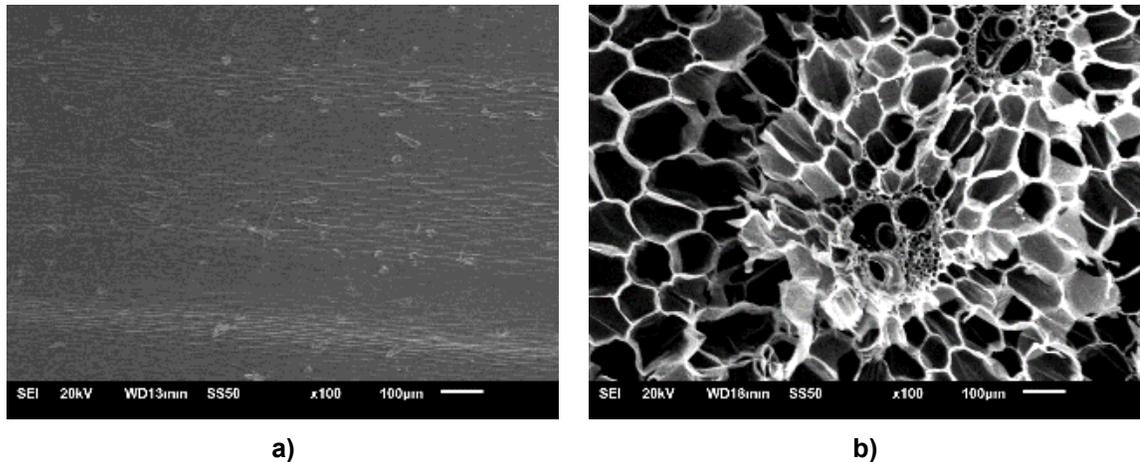
La corteza de maíz (CB), el diámetro equivalente tuvo un rango de partículas de 0.5 a 15 milímetros, la médula de maíz (CP), el diámetro equivalente tuvo un rango de partículas de 0.5 a 12 milímetros, y en la mezcla de corteza y médula de maíz (CM), el diámetro equivalente tuvo un rango partículas de 0.5 a 17 milímetros. Estos valores altos se deben a que durante el proceso de tamiza con la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura, las partículas pasaban a través del tamiz de manera vertical.

### **3.4 Caracterización de los bio-agregados obtenidos en México**

#### **3.4.1 Microscopía electrónica de barrido**

En la figura 13a) se muestra una partícula con un corte longitudinal de la corteza de maíz, se observa que no existe rugosidad en su superficie; por lo que estos fragmentos absorben una menor cantidad de agua con respecto a las partículas

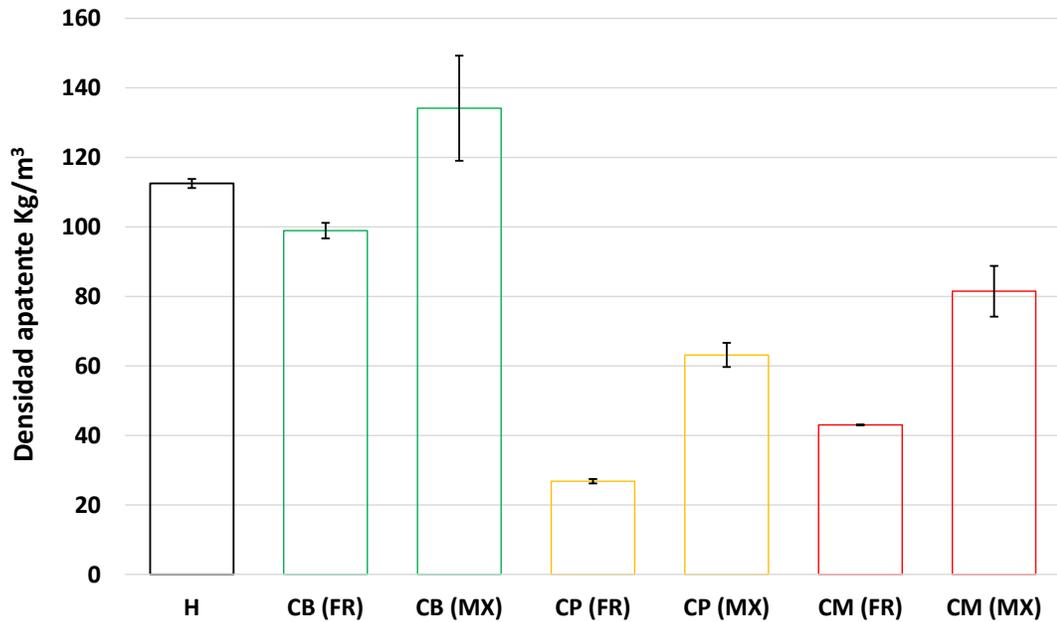
de cáñamo, las cuales tienen una red de poros interconectados. En la figura 13b) se muestra el corte en sección de la médula de maíz, los alveolos tienen una forma cilíndrica al igual que en la médula de girasol, en promedio, el diámetro promedio de los alveolos es de 50-200  $\mu\text{m}$ , esto explica su baja densidad aparente, su baja conductividad térmica y su alta absorción.



**Figura 13. a) Micrografía de un fragmento de corteza de maíz (x100), b) Micrografía de un fragmento de médula de maíz (x100)**

### **3.4.2 Densidad aparente**

Una de las principales características que se puede observar en esta propiedad, es la diferencia la densidad aparente de los bio-agregados. Esto es producto de la molienda, ya que algunos fragmentos transformados de la molienda en México, tienen menor dimensión en comparación de los fragmentos obtenidos en la trituración realizada en Francia. En la figura 14, se muestran los resultados de esta prueba. Se puede observar el impacto que tiene la disminución del tamaño de partículas en la densidad aparente de los bio-agregados.



**Figura 14. Comparativa de las densidades aparentes de los bio-agregados de maíz (FR = Francia) (MX = México).**

Estos resultados están relacionados con el tamaño del bio-agregado, ya que, al tener un proceso de separación y tamizaje más controlados, los fragmentos que se obtienen están dentro de los parámetros establecidos en la investigación (1-4 milímetros); en comparación a las partículas de obtenidos en Francia, donde las partículas tenían una longitud de entre 4 y 20 milímetros; estas medidas influyen ampliamente en la densidad aparente.

### **3.4.3 Absorción de agua**

En la figura 15 se muestran las tasas de absorción de agua de los bio-agregados empleados en la fabricación de concretos vegetales.

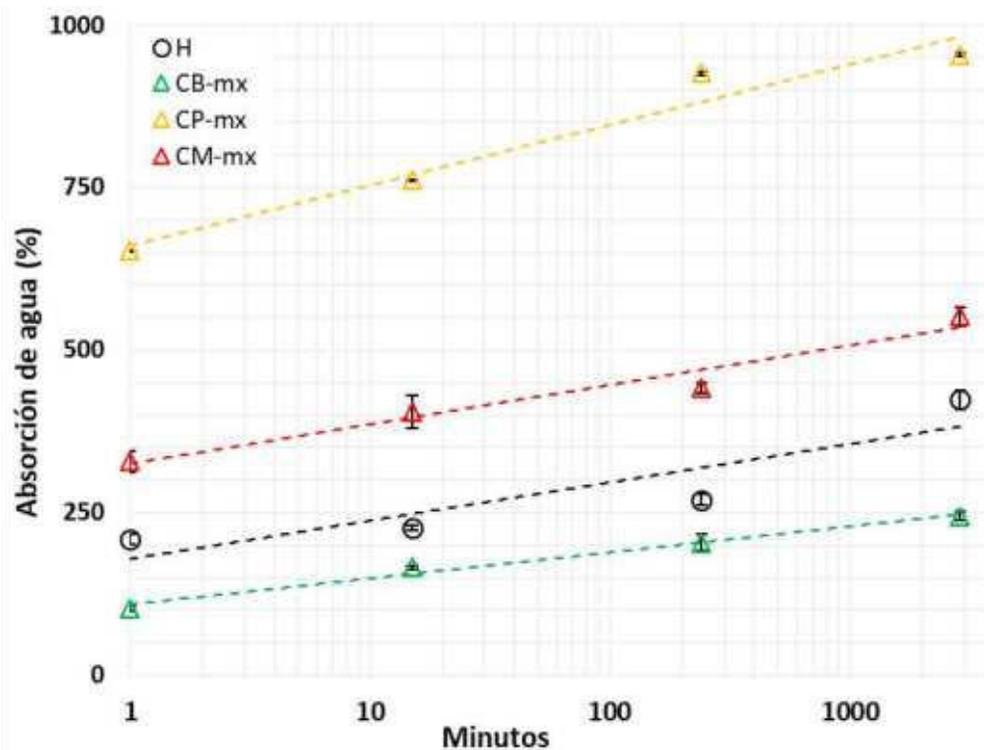


Figura 15. Absorción de agua de los bio-agregados

La corteza de maíz en el primer minuto de inmersión se obtuvo una absorción promedio de 102.50%, A diferencia del bio-agregado utilizado en Francia, los fragmentos de corteza de maíz no tienen partículas de médula adheridas; sin embargo, este aumento se debe al tamaño más reducido de partículas en comparación a los bio-agregados utilizados en Francia.

En la médula de maíz, el valor promedio obtenido al primer minuto de inmersión fue de 652.70% aumentando relativamente un 225.20% la absorción de agua con respecto al cáñamo. La mezcla de la corteza y la médula de maíz presentan una absorción de 328.30% al primer minuto de inmersión, lo cual tiene un incremento relativo del 157.40% con respecto de al cáñamo; a los 2880 minutos de inmersión, se obtuvo un valor de 551.70%, lo cual tiene un aumento relativo del 130.20% con respecto al cáñamo. Los valores presentados anteriormente, reflejan un aumento en la capacidad de absorción de los bio-agregados, esto se debe a que al se menor el tamaño de las partículas, el área superficial aumenta, incrementando la capacidad de absorción de agua.

#### 3.4.4 Distribución del tamaño de partículas

En la figura 16 se muestran las distribuciones de tamaño de partícula de los bio-agregados obtenidos del tallo de maíz.

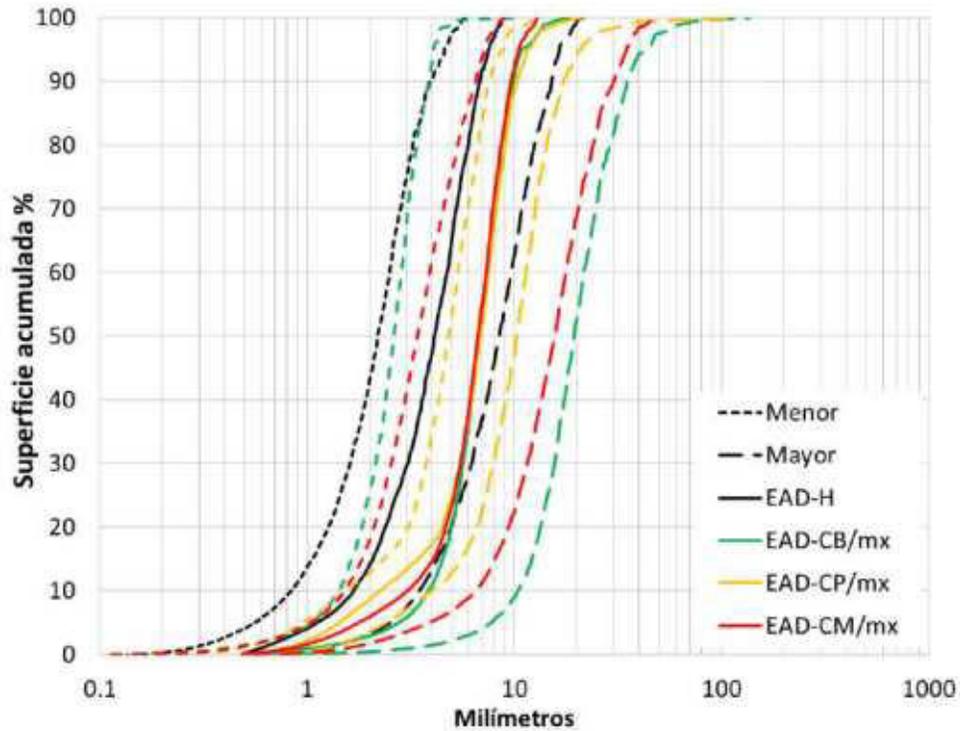


Figura 16. Distribución del tamaño de partícula, corteza de maíz (ED-CB)de maíz (ED-CP), mezcla de corteza y médula de maíz ED-CM).

En el diámetro equivalente, la corteza de maíz (CB), tuvo un rango de partículas de 0.5 a 10.9 milímetros, en este caso la morfología de las partículas (que en su mayoría es rectangular) impedía su paso por el tamiz de 4 mm<sup>2</sup> de abertura. En la médula de maíz (CP), el diámetro equivalente obtuvo un rango de partículas de 0.4 a 11 milímetros, y en la mezcla de corteza y médula de maíz CM), el diámetro equivalente tuvo un rango de partículas de 0.5 a 10.3 milímetros, a pesar de que se tuvo un control más estricto en el tamizaje, algunas partículas pasaron a través de tamiz de 4 mm<sup>2</sup> de abertura de manera vertical; sin embargo, la distribución del tamaño de partículas fue mejor en comparación a las obtenidas en Francia.

### 3.5 Formulación y caracterización física, mecánica y química de los concretos vegetales

En el diseño de concretos vegetales hay dos parámetros principales que se toman en cuenta, el primero es la densidad aparente de los agregados, pues este indica la cantidad de bio-agregado a utilizar, el segundo es la absorción de agua el cual regula la cantidad de agua presente en la mezcla. El procedimiento del diseño y la elaboración de mezcla se ejemplifica en la figura 17. Así mismo, en la tabla 6 se muestran las cantidades de materiales utilizadas en la fabricación de los diferentes concretos vegetales. Las cantidades de materiales empleados en la fabricación de concreto vegetal están basadas en el trabajo de tesis doctoral de The Manh Dinh titulado "Contribution au développement de béton de chanvre

préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant Contribution”, donde a través de una mezcla optimizada de cementante puzolánico, de 70% de metacaolín, 30% de cal hidráulica, así como la adición de sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ) y aditivo superplastificante se logra una matriz puzolánica con propiedades mecánicas y físicas que le permiten competir con un cementante comercial que está compuesto por cal, cemento hidráulico y adiciones minerales.

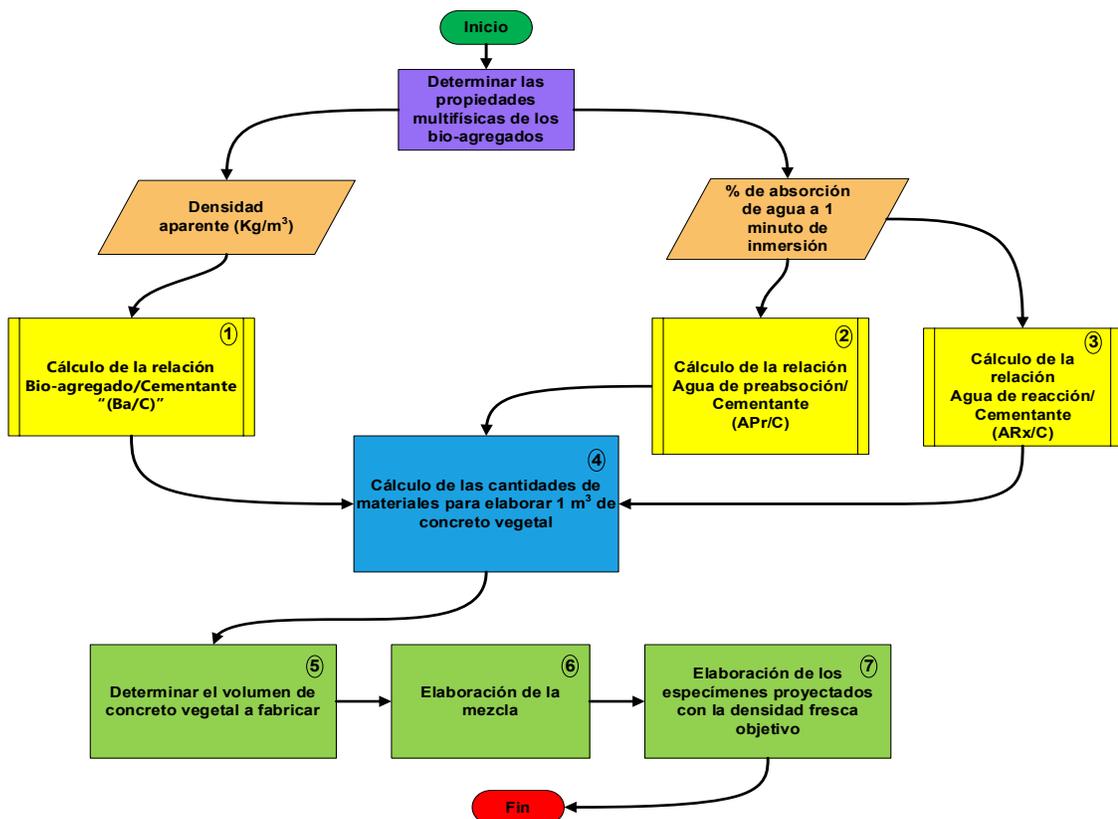


Figura 17. Secuencia para el diseño de mezclas de concreto vegetal

Tabla 6 Cantidades de materiales para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal

Concreto vegetal	Cementante	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Bio-agregado	Agua de preabsorción	Agua de reacción	Aditivo Superplastificante
HP			161.9	364.9	112.3	
SBP			179.6	336.3	83.6	
SPP			17	338.1	85.5	
SMP		11.2	95.8	338.1	101.8	252.6
CBP	374.3		142.3	351.9	99.3	
CPP			38.6	331.2	78.5	
CMP			61.9	509.1	256.4	
HL		--	161.9	524	112.3	
SBL		--	179.6	495.3	83.6	411.7

El diseño de las mezclas de concreto vegetal se lleva a cabo con una interpolación entre la densidad aparente y la absorción de agua a 1 minuto del cáñamo y los bio-agregados utilizados, esto con la finalidad de conocer la cantidad de materiales y de agua a utilizar.

### 3.5.1 Densidad aparente y conductividad térmica

En la tabla 7 se muestran las conductividades térmicas de los diferentes concretos vegetales elaborados en esta investigación. La conductividad térmica se encuentra relacionada directamente con la densidad aparente, pues existe una diferencia en las mediciones realizadas en estado seco y en equilibrio con la humedad relativa ambiente.

**Tabla 7. Conductividad térmica de los concretos vegetales (Cáñamo (H), Corteza de girasol (SB), Médula de girasol (SP), Mezcla de corteza y médula de girasol (SM), Corteza de maíz (CB), Médula de maíz (CP) y Mezcla de corteza y médula de maíz (CM)) con una matriz puzolánica (P) o un ligante comercial (L)**

Mezcla	Seco al horno	$\lambda$ promedio	Temperatura ambiente	$\lambda$ promedio	Contenido de agua (%)
HP	385.3 ± 2.9	0.090 ± 0.005	396.8 ± 5.1	0.098 ± 0.006	3.0
SBP	420.5 ± 0.3	0.095 ± 0.006	438.4 ± 4.6	0.115 ± 0.005	4.3
SPP	579.1 ± 9.8	0.098 ± 0.009	584.7 ± 1.2	0.120 ± 0.005	1.0
SMP	597.3 ± 0.4	0.121 ± 0.007	616.6 ± 8.2	0.132 ± 0.008	3.2
CBP	438 ± 19.8	0.091 ± 0.005	443.4 ± 17.7	0.105 ± 0.006	1.2
CPP	404.4 ± 3	0.118 ± 0.005	412.7 ± 3.2	0.129 ± 0.008	2.1
CMP	461.6 ± 4.7	0.103 ± 0.004	469.9 ± 5.3	0.113 ± 0.006	1.8
HL	428.6 ± 2.2	0.123 ± 0.008	441.1 ± 6.3	0.138 ± 0.009	2.9
SBL	440 ± 55.7	0.135 ± 0.009	472.5 ± 21	0.153 ± 0.010	7.4

Como se mencionó anteriormente, la conductividad térmica se encuentra relacionada con la humedad relativa ambiental, en este punto, la menor conductividad térmica se obtiene cuando los concretos vegetales se encuentran secos al horno, pues en los poros no existe humedad que interfiera con la difusión del calor. La mejor conductividad térmica en estado seco y a temperatura y humedad relativa ambiental es la mezcla elaborada con cáñamo y metacaolín (HP), y posteriormente la mezcla elaborada con corteza de girasol y metacaolín tiene buenas propiedades térmicas, lo cual le hace uno de los bio-agregados con un gran potencial térmico.

### 3.5.2 Resistencia a compresión

En la tabla 8, se muestran las diferentes resistencias a compresión promedio de las mezclas elaboradas en esta investigación.

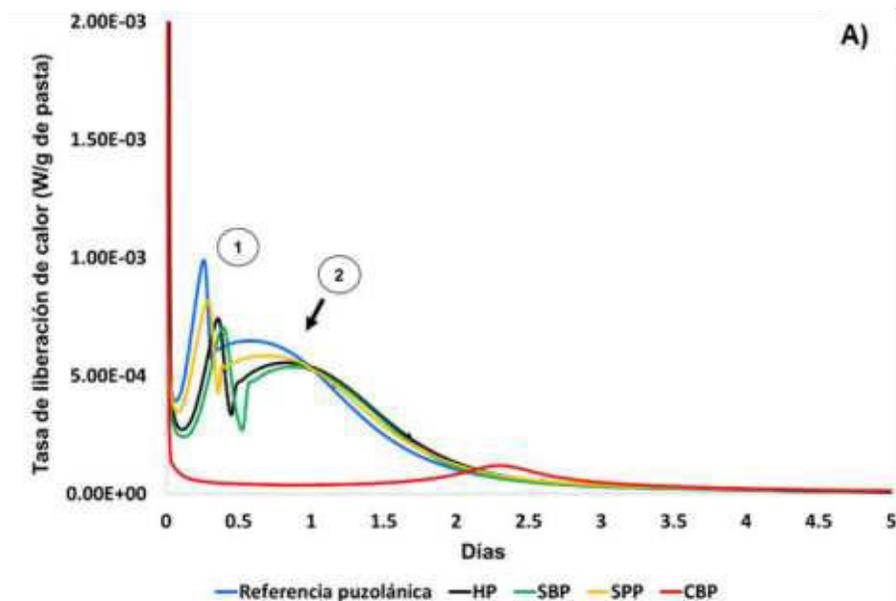
Tabla 8. Valores de esfuerzo y deformación máximos promedio

	HP	SBP	SPP	SMP	CBP	CPP	CMP	HL	SBL
$\sigma$ max	0.3 ± 0.10	0.2 ± 0.03	0.9 ± 0.01	0.4 ± 0.02	0.1 ± 0.03	0.1 ± 0.01	0.2 ± 0.02	0.7 ± 0.07	1.1 ± 0.12
$\epsilon$ ( $\sigma$ max)	8.4 ± 2.02	11.3 ± 0.69	1.4 ± 0.28	4.4 ± 0.32	9.8 ± 0.07	2.2 ± 0.07	6.7 ± 0.62	6.0 ± 0.65	8.5 ± 1.07
$\sigma$ ( $\epsilon=1\%$ )	0.02 ± 0.02	0.03 ± 0.03	0.7 ± 0.16	0.2 ± 0.02	0.01	0.1 ± 0.01	0.05	0.4 ± 0.12	0.5 ± 0.03
$\sigma$ ( $\epsilon=1,5\%$ )	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.8 ± 0.10	0.2 ± 0.02	0.02	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.01	0.5 ± 0.08	0.7 ± 0.04
$\sigma$ ( $\epsilon=5\%$ )	0.2 ± 0.04	0.2 ± 0.01	0.4 ± 0.12	0.4 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.2 ± 0.02	0.7 ± 0.07	1.0 ± 0.10
$\sigma$ ( $\epsilon=7,5\%$ )	0.2 ± 0.07	0.2 ± 0.02	0.4 ± 0.14	0.3 ± 0.03	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.2 ± 0.02	0.6 ± 0.09	1.1 ± 0.12

El comportamiento mecánico de los bio-compuestos se rige principalmente por el tipo de ligante utilizado durante su elaboración, de igual manera, los intersticios influyen en gran medida en este comportamiento. La mezcla HP obtuvo una resistencia a compresión de 0.30 MPa y un módulo de Young de 23.1 MPa. En la mezcla SBP, se obtuvo una resistencia a compresión de 0.20 MPa, así como un módulo de Young de 23.4 MPa. La mezcla SPP registró una resistencia a compresión de 0.9 MPa y un módulo de Young de 160.5 MPa. La mezcla SMP obtuvo una resistencia a compresión de 0.40 MPa, siendo esta la más baja en el estudio, así como un módulo de Young de 71.8 MPa. Por otro lado, la mezcla CBP obtuvo una resistencia a compresión de 0.1 MPa, así como un módulo de Young de 6.3 MPa. En la mezcla CPP refiere una resistencia a compresión de 0.1 MPa y un módulo de Young de 10.2 MPa. En la mezcla CMP se obtuvo una resistencia a compresión de 0.2 MPa, así como un módulo de Young de 9.8 MPa.

### 3.5.3 Calorimetría isotérmica

En la figura 18 se muestran los análisis realizados en las diferentes mezclas elaboradas en la investigación.



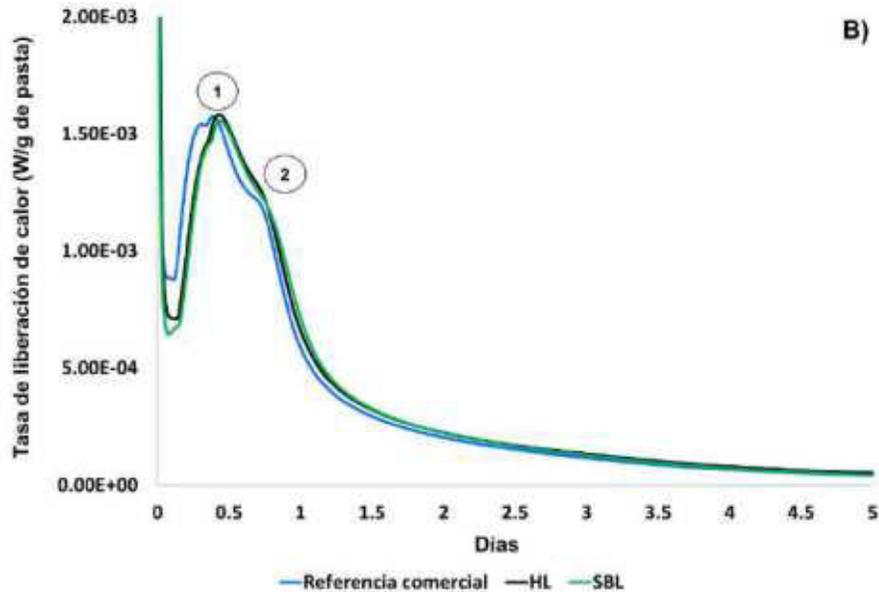
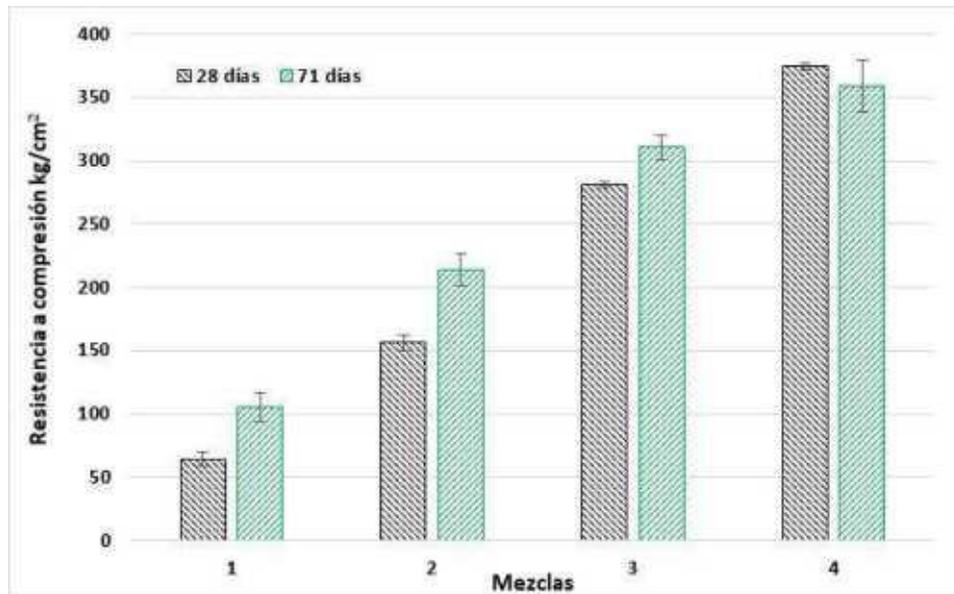


Figura 18. a) Gráfica de la calorimetría isotérmica de las mezclas puzolánicas, b) Gráfica de la calorimetría isotérmica de las mezclas realizadas con cal comercial formulada

La mezcla realizada con el cáñamo (HL), da lugar reacción exotérmica aproximadamente a las 10 horas después de que el cementante entra en contacto con el agua, En la mezcla elaborada con la corteza de girasol (SBL), la reacción exotérmica tiene lugar aproximadamente a las 11 horas después de haber iniciado el proceso de hidratación del cementante. De la *figura 4.14b*), se puede deducir que el efecto del deterioro en las mezclas puzolánicas se clasifica de la siguiente manera: **SPP < HP < SBP < CBP < REF-PZ**. De la *figura 4.14b*), se puede concluir que el deterioro de se clasifica de la siguiente manera: **HL < Referencia comercial < SBL**. De manera general, los bio-agregados obtenidos del tallo de girasol no tienen un impacto significativo durante el proceso de hidratación del cementante, caso contrario se ve en la mezcla elaborada con la corteza de maíz (CBP), donde el retraso de las reacciones es importante, hipotéticamente puede asociarse al nulo rendimiento mecánico de esta última mezcla.

### 3.6 Formulación y análisis de las pastas elaboradas en México

En la figura 19 se muestran los resultados a compresión de las diferentes pastas analizadas; es de resaltar que las mezclas en las cuales las adiciones de cal son altas (mezcla 1), la resistencia a compresión es menor, incluso a los 71 días se alcanzan los 105 kg/cm<sup>2</sup>; por otro lado, a partir de la mezcla 2, comienza a ver el impacto que tiene la cantidad de la adición de la ceniza volante en la mezcla de concreto.



**Figura 19. Resistencia a compresión de cubos de mortero**

Es interesante ver en la reducción de la resistencia que se presenta en la mezcla 4, esta reducción de la resistencia puede deberse a la actividad puzolánica que se produce con respecto al tiempo; lo que significa que la reacción aún se lleva a cabo, lo que puede afectar en la resistencia a compresión deseada; así mismo, otro de los factores que pueden inferir como el tipo de cemento, las diferencias en el contenido de los compuestos químicos de la cal hidráulica y la ceniza volante.

## **4 Conclusiones**

### **4.1 Bio-agregados**

La corteza de girasol tiene un gran potencial para poder ser implementado en el uso de los concretos vegetales. Por otro lado, los bio-agregados obtenidos en el tallo de planta de maíz, de manera particular, la corteza de maíz (CB), tiene una absorción de agua a 1 minuto similar a la corteza de girasol (SB), sin embargo, la conductividad se ve impactada. En el caso de la corteza de maíz obtenida en México, la densidad es mayor en comparación a la corteza de girasol y de maíz en Francia. A partir de las diferentes técnicas de caracterización aplicados a los diferentes bio-agregados, se puede deducir que los bio-agregados obtenidos del tallo de la planta de girasol, tienen una buena respuesta y un buen comportamiento en las propiedades físicas.

### **4.2 Concretos vegetales**

Las técnicas de caracterización aplicados a los concretos vegetales, demostraron que en uno de los concretos vegetales que tiene una resistencia a compresión similar al concreto con cáñamo es el correspondiente a la mezcla puzolánica con corteza de girasol (SBP). Por otro lado, las mezclas elaboradas con el cementante comercial, la mezcla elaborada con la corteza de girasol (SBL)

desarrolló la resistencia a compresión más alta en todo el estudio. En contra parte, la mezcla elaborada con la corteza de maíz (CBP), tuvo la resistencia a compresión más baja de todo el estudio; pues en este caso no se desarrolla una resistencia a compresión de 0.1 MPa; este comportamiento se puede deducir que no hay una resistencia a compresión como tal, sino que el bio-agregado desarrolla una alta deformación.

A partir de este comportamiento, se tomó la decisión de realizar técnicas de caracterización mineralógicas, las cuales determinaron que existe una interacción química entre los compuestos hidrosolubles presentes en los bio-agregados, principalmente en la corteza de maíz (CBP), donde se determinó que dichos hidrosolubles tienen un efecto negativo en la resistencia a compresión, donde no se realiza la reacción química que permite endurecer a la pasta y como resultado, la pasta se pulverizaba cuando se aplicaba el esfuerzo en la probeta.

# **Capítulo 1**

## ***Marco referencial***

## **Introduction**

Depuis plus de trois décennies, certains pays européens ont mis en œuvre l'utilisation de déchets agro-industriels pour la fabrication de divers biocomposites, dans lesquels des matrices pouzzolaniques à base de chaux ou d'un matériau cimentaire supplémentaire à faible teneur en CO<sub>2</sub> sont utilisées. L'un de ces biocomposites est le béton de chanvre, qui est un matériau respectueux de l'environnement, puisque, comme nous l'avons mentionné plus haut, son principal constituant provient d'une matière renouvelable [11]. L'un des principaux objectifs de ce matériau est d'assurer l'isolation thermique d'un bâtiment. L'un des premiers bio-agrégats utilisés a été le chanvre, dont certaines propriétés sont la capture et le stockage temporaire de CO<sub>2</sub> (45,8 - 52,2 kg CO<sub>2e</sub>, dans une section de 1 m<sup>2</sup> et une épaisseur de 5 cm d'un mur en béton fabriqué avec du chanvre [12], sa faible conductivité thermique (0,150 et 0,080 W/(m.K), sa grande capacité de régulation hygroscopique [13], sa faible densité apparente (110 ± 6 kg/m<sup>3</sup>) et sa grande capacité de régulation hygroscopique. De plus, ce bio-agrégat a une disponibilité très limitée dans certaines régions du monde, ce qui constitue une contrainte pour le développement de ce type de bétons végétaux.

Différents types de bio-agrégats, comme les tiges de tournesol, la lavande, le colza, la paille, la paille de blé, la pulpe de betterave, les balles de riz, le miscanthus, entre autres, ont été utilisés dans divers projets de recherche [14], qui ont montré des résultats physico-mécaniques intéressants. L'objectif de l'utilisation de ce type de matériaux dans la construction est la préservation des ressources naturelles et la nécessité de disposer d'intrants efficaces pour les appliquer dans la fabrication de bâtiments durables, réduisant ainsi l'impact environnemental, l'empreinte carbone générée par l'industrie agricole et la consommation d'énergie pendant le processus de construction et la durée de vie utile d'un bâtiment.

### **Contexte français**

L'objectif de ce travail est d'utiliser le sous-produit de la récolte du tournesol et du maïs comme bio-agrégat dans la production de bétons d'origine végétale. Ces bio-agrégats sont obtenus par un processus de transformation, qui consiste à broyer les tiges des plantes susmentionnées et à les séparer en écorce et moelle par des moyens mécaniques et manuels. Ensuite, les matériaux obtenus à l'aide des techniques mentionnées précédemment sont soumis à une série de caractérisations physiques (microstructure, densité apparente, absorption d'eau, conductivité thermique et distribution granulométrique) ; ceci est réalisé à l'aide des recommandations émises par le RILEM, dans le chapitre sur les biomatériaux pour la construction [15].

D'autre part, les bétons à base de plantes ont été fabriqués avec de l'écorce, de la moelle et un mélange des deux bio-agrégats obtenus à partir de tiges de tournesol et de maïs. Deux types de matériaux cimentaires pouzzolaniques ont également été utilisés ; le premier est une chaux formulée, qui est utilisée exclusivement pour la fabrication de bétons végétaux, dont le principal bio-

agrégat est le chanvre. Le second consiste en un mélange de chaux aérienne, de métakaolin, d'un activateur alcalin et d'un additif superplastifiant. Ces bétons ont été caractérisés physiquement et mécaniquement afin d'obtenir, d'analyser et de comparer ces propriétés.

D'autre part, l'industrie de la construction au Mexique est un secteur dynamique, c'est donc l'un des plus importants, puisqu'il fournit une importante source de revenus économiques aux autres secteurs, ainsi qu'au développement technologique de nouveaux matériaux, méthodologies et avancées scientifiques pour mener à bien cette activité essentielle. Cependant, dans ce secteur, il existe une attitude réticente à l'inclusion de nouveaux matériaux ou systèmes de construction. Cela est dû au fait que les constructeurs ont tendance à utiliser des matériaux très polluants pour l'environnement, comme la fabrication du ciment, l'utilisation de polyuréthane et de polystyrène expansé comme matériaux d'isolation thermique. En outre, il faut inclure la méconnaissance du fait que certains matériaux peuvent offrir des caractéristiques physiques ou mécaniques identiques ou meilleures, sans dépenser plus de ressources économiques ou sans générer un fort impact environnemental.

### **Contexte mexicain**

Le présent travail vise l'utilisation des tiges de maïs, car il s'agit de la culture la plus présente au Mexique. Lorsque le maïs a été récolté, les tiges sont parfois jetées et, dans les cas favorables, elles sont utilisées comme nourriture ou comme fourrage pour les animaux de ferme. L'utilisation de ces déchets est proposée pour obtenir une série de 3 bio-agrégats, l'écorce, la moelle et le mélange des deux, qui seront évalués à travers une série de caractérisations physiques (microstructure, densité apparente, absorption d'eau, conductivité thermique et distribution granulométrique), avec l'aide des recommandations émises par le RILEM pour la caractérisation physique du chanvre [15].

Pour la fabrication des bétons à base de plantes, on utilise du ciment Portland ordinaire, avec des ajouts de cendres volantes et de chaux hydraulique. Une fois qu'ils sont fixés, la résistance à la compression, la densité, la conductivité thermique, les contraintes de compression maximales et le module d'Young sont évalués. L'utilisation de bio-agrégats alternatifs au chanvre est proposée, en fonction de l'importance de la disponibilité de ce matériau. Dans les bétons à base de plantes, l'objectif est de trouver un mélange qui offre des caractéristiques mécaniques et physiques similaires à celles du béton à base de plantes fabriqué avec du chanvre [4–6].

### **Introducción**

Desde hace más de tres décadas, en algunos países del continente europeo se han implementado el uso de los residuos provenientes de la agroindustria, esto para la fabricación de diversos biocompuestos, en los cuales, se emplean matrices puzolánicas a base de cal, o de algún material cementante suplementario bajo en CO<sub>2</sub>. Uno de estos biocompuestos es el concreto elaborado con cáñamo, este es un material amigable con el ambiente, pues como se mencionó anteriormente, su principal constituyente proviene de materia

renovable [11]. Uno de los principales objetivos de este material es brindar aislamiento térmico dentro de una edificación. Uno de los primeros bio-agregados en ser utilizado fue cáñamo, algunas propiedades este bio-agregado son la captura y almacenamiento temporal de CO<sub>2</sub> (45.8 - 52.2 kg CO<sub>2e</sub>, en una sección de 1 m<sup>2</sup> y un espesor de 5 cm de un muro de concreto elaborado con cáñamo [12]), su baja conductividad térmica (0.150 y los 0.080 W/(m.K) su alta capacidad de regulación higroscópica [13], su baja densidad aparente (110 ± 6 kg/m<sup>3</sup>) y su alta capacidad de regulación higroscópica. Así mismo, este bio-agregado tiene una disponibilidad muy limitada en ciertas regiones del mundo, lo cual plantea una limitante para desarrollar este tipo de concretos vegetales.

En diversas investigaciones se han utilizado diferentes tipos de bio-agregados, como lo son el tallo de la planta de girasol, lavanda, colza, paja, paja de trigo, pulpa de remolacha, cáscara de arroz, miscanthus, entre otros [14]; los cuales han demostrado tener interesantes resultados físico-mecánicos. La finalidad de emplear este tipo de materiales en la construcción, es la preservación de los recursos naturales y la necesidad de insumos eficientes para aplicarlos en la fabricación de edificaciones sustentables; logrando con esto, disminuir el impacto ambiental, la huella de carbono generada por la industria la agrícola y el consumo de energía durante el proceso de construcción y en la vida útil de una edificación.

### **Contexto francés**

El presente trabajo tiene como finalidad utilizar el subproducto de la cosecha del girasol y del maíz, como un bio-agregado en la elaboración de concretos vegetales. Estos bio-agregados se obtienen través de un proceso de transformación, que consiste en triturar el tallo de las plantas antes mencionadas y separarlos, en corteza y médula, a través de medios mecánicos y manuales. Después, los materiales obtenidos con las técnicas señaladas previamente, son sometidos a una serie de caracterizaciones físicas (microestructura, densidad aparente, absorción de agua, conductividad térmica y distribución del tamaño de partícula); lo anterior se realiza con la ayuda de las recomendaciones emitidas por el RILEM, en el capítulo de bio-materiales para la construcción [15].

Por otro lado, los concretos vegetales fueron elaborados con la corteza, la médula y la mezcla de ambos bio-agregados obtenidos del tallo de girasol y del maíz. Asimismo, se utilizaron 2 tipos de cementantes puzolánicos; el primero es una cal formulada, la cual es empleada exclusivamente para la fabricación de concretos vegetales, cuyo bio-agregado principal es el cáñamo. El segundo, consiste de una mezcla de cal aérea, metacaolín, un activador alcalino y un aditivo superplastificante. Estos concretos fueron caracterizados física y mecánicamente, con la finalidad obtener, analizar y comparar dichas propiedades.

Por otro lado, la industria de la construcción en México es un sector dinámico, por consecuente es uno de los más importantes, ya que aporta una fuente importante de ingresos económicos hacia otros sectores, así como al desarrollo tecnológico de nuevos materiales, metodologías y avances científicos para realizar esta primordial actividad. Sin embargo, dentro de este sector, existe una actitud reacia a la inclusión de nuevos materiales o sistemas constructivos. Se

hace alusión de lo anterior, debido a que los constructores suelen emplear materiales que tienen un alto índice de contaminación al ambiente, como lo es la fabricación del cemento, el uso de poliuretano y poliestireno expandido como materiales de aislamiento térmico. Además, se debe incluir el desconocimiento de que algunos materiales pueden brindar las mismas o mejores características físicas o mecánicas, sin gastar más recursos económicos o bien sin generar un fuerte impacto ambiental.

### **Contexto mexicano**

El presente trabajo tiene como finalidad el empleo del tallo de maíz, ya que este es el cultivo con mayor presencia en México. Cuando la cosecha del maíz se ha realizado, a veces el tallo suele ser desechado y en el caso favorable, se emplean como alimento o forraje para animales de granja. Se plantea el uso de este desecho para obtener una serie de 3 bio-agregados, corteza, médula y la mezcla de ambos, mismos que serán evaluados a través de una serie de caracterizaciones físicas, (microestructura, densidad aparente, absorción de agua, conductividad térmica y distribución del tamaño de partícula), con ayuda de las recomendaciones emitidas por el RILEM para la caracterización física del cáñamo [15].

Para la fabricación de los concretos vegetales, se utiliza cemento portland ordinario, con adiciones de ceniza volante y cal hidráulica. Una vez fraguado, se evalúa la resistencia a compresión, densidad, conductividad térmica, esfuerzos máximos de compresión y el módulo de Young. Se propone el uso de bio-agregados alternativos al cáñamo, partiendo de la importancia de la disponibilidad de este material. Y en los concretos vegetales, el objetivo es, encontrar aquella mezcla que proporcione características mecánicas y físicas similares que el concreto vegetal elaborado con cáñamo [4–6].

## **Capítulo 1. Antecedentes**

### **1.1 Hipótesis**

La sinergia entre las propiedades multifísicas de los bio-agregados obtenidos de los tallos de girasol, maíz y dos matrices puzolánicas producirán concretos vegetales, los cuales tendrán una microestructura, comportamiento térmico y mecánico igual o superior a los concretos vegetales elaborados con cáñamo.

### **1.2 Objetivo general**

Fabricar y analizar concretos vegetales constituidos por matrices puzolánicas compuestas y mediante una metodología innovadora obtener bio-agregados de maíz y girasol, los concretos podrán tener un comportamiento térmico y mecánico, y una microestructura que le permita ser una alternativa viable a los concretos vegetales elaborados con cáñamo.

### 1.3 Objetivos específicos

Desarrollar una propuesta metodológica innovadora para la obtención de los bio-agregados de los tallos de girasol y maíz.

Evaluar las características multifísicas microestructurales entre los bio-agregados y la matriz puzolánica.

Establecer las proporciones optimizadas para elaborar concretos vegetales con girasol y maíz tomando como referencia el comportamiento mecánico y térmicos de los concretos vegetales con cáñamo.

Formular y elaborar una serie concretos vegetales con la corteza, la médula y la mezcla del tallo de la planta de maíz en México con la finalidad de analizar y comparar sus propiedades físicas y mecánicas.

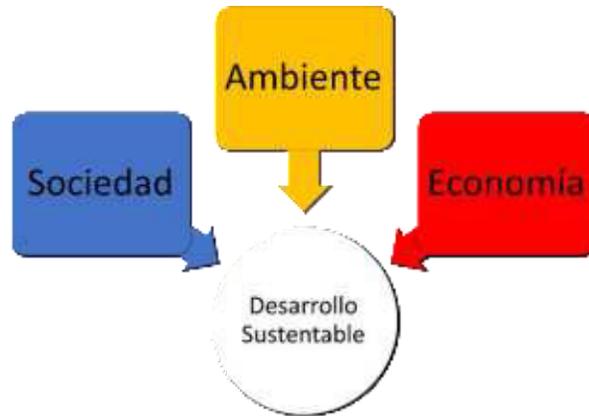
Identificar los mecanismos de interacción entre los compuestos hidrosolubles de los bio-agregados y su efecto en el proceso de fraguado, y en el desarrollo de la resistencia mecánica de los concretos vegetales.

Proponer una alternativa vegetal al uso del cáñamo con subproductos agrícolas comunes en Francia y México.

### 1.4 Desarrollo sustentable

El incremento exponencial en la población a nivel mundial genera la demanda de servicios básicos, como educación, salud, seguridad, abastecimiento de agua y vivienda digna; para cubrir este último rubro, se echa mano de diferentes técnicas de construcción, las cuales requieren de la implementación de diferentes materiales; se utilizan un sin fin de recursos que generalmente provienen del ambiente. Durante los últimos 30 años, los principales organismos internacionales protectores del ambiente han abogado por la preservación de los recursos naturales, así como la aplicación de métodos que permitan el desarrollo de las actividades industriales y al mismo tiempo aporten a la mitigación del impacto ambiental.

En 1987 la Organización de las Naciones Unidas, dio un paso importante al definir una estrategia para vincular el desarrollo industrial y el ambiente. Dentro del Brundtland Report *“Our common future”* propuso una definición sobre el significado del desarrollo sustentable: *“El desarrollo sustentable satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”* [16,17]. La sustentabilidad tiene como objetivo hacer uso y preservación de los recursos naturales equilibradamente, lo mencionado anteriormente puede ser comprendido de diferentes maneras, ya que es multidisciplinario y envuelve diversas ramas del conocimiento humano [18]. La sustentabilidad cuenta con 3 pilares fundamentales los cuales se muestran en la figura 1.1.



**Figura 1.1. Componentes del desarrollo sustentable**

La figura anterior, desglosa los tres componentes principales, la sustentabilidad social es el principal enfoque, pues la base son los derechos y obligaciones de la sociedad, así mismo tiene los siguientes principios:

Satisfacer las necesidades básicas a las poblaciones como lo son: salud, educación y vivienda.

Elevar la calidad de vida.

Transformar a la población en una sociedad incluyente, donde los individuos con capacidades diferentes tengan un rol dentro de la misma.

Proteger el derecho de la vida a las siguientes generaciones.

El ambiente busca que las generaciones próximas tengan acceso a los recursos naturales, sus objetivos primordiales son:

- Proteger los ecosistemas.
- Mantener el agua y el aire limpios.
- Reducir el consumo de energías no renovables.
- Promover el uso de materiales renovables.
- Impulsar el empleo de ecotecnias.
- Minimizar el calentamiento global.
- Proteger los ambientes culturales e históricos.

En el aspecto económico, se busca que las sociedades tengan a bien, el desarrollar un consumo responsable, es decir, la actividad económica y el poder adquisitivo deben crecer mutuamente, y aminorar las necesidades de los individuos de la sociedad, el desarrollo económico busca entre otras cosas:

- Crear un balance de producción y consumo.
- Crear nuevos mercados y oportunidades de comercialización.
- Disminuir los costos al proporcionar servicios eficientes al disminuir el consumo de energía y recursos naturales en la producción de algún servicio.
- Proveer el valor agregado.

La aplicación de los lineamientos antes mencionados asegura y protege los recursos naturales, económicos y sociales para las futuras generaciones; de igual manera se plantea que la convivencia entre los individuos y las poblaciones sea armónica. Así mismo, el sector de la construcción debe planificar y desarrollar estrategias donde las construcciones se adapten al desarrollo sustentable. [19,20].

### **1.5 Construcción sustentable**

Hoy en día, la industria de la construcción está obligada a mejorar el desempeño energético de las edificaciones, algunas de las soluciones propuestas pueden tener un alto costo económico y, en algunos casos, para fabricar los materiales que se emplearán para resolver algún problema en específico, requieren de un alto consumo de energía. Este sector es responsable del 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, así como del consumo final del 36% de energía a nivel mundial (ver figura 1.2) [21,22]. El empleo de materiales alternativos durante el proceso constructivo se ve influenciado por diferentes factores, principalmente, los gases de efecto invernadero, el consumo de los recursos naturales y la producción de residuos [23,24]; así mismo, el uso de materiales alternativos tiene un impacto positivo en el ahorro de energía, la economía y la salud de las personas que habitan los espacios construidos con los mismos [24–30].

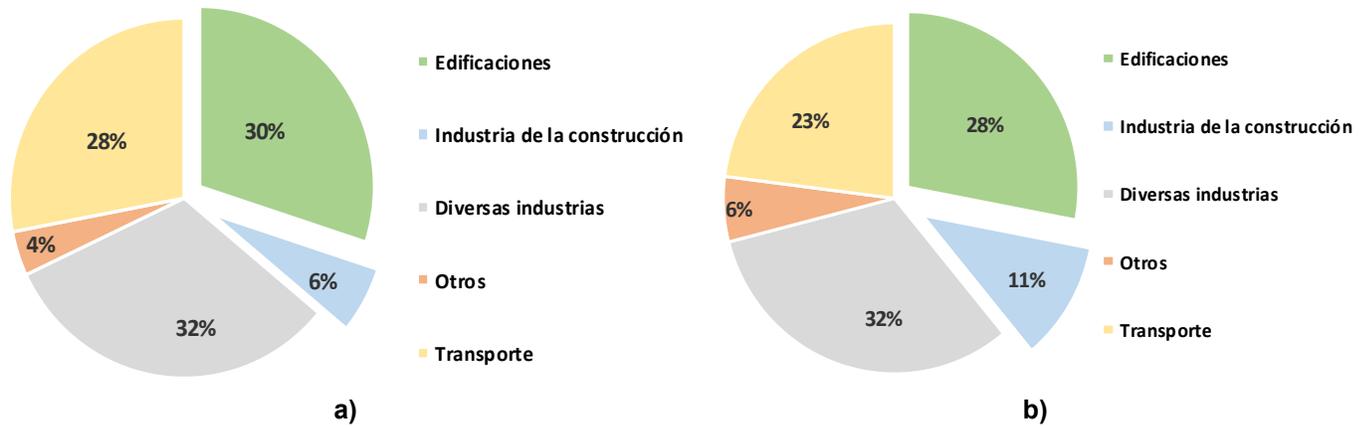


Figura 1.2. a) Consumo de energía a nivel mundial. b) Emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial [21,22]

En la figura 1.3a, se observan los diferentes niveles de consumo de energía por sectores en México hasta el 2020, así mismo, en la figura 1.3b se muestran las cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> [31] Es importante recalcar que, la construcción está relacionada con los sectores industrial y de transporte lo cual implica un impacto indirecto en ambas ramas.

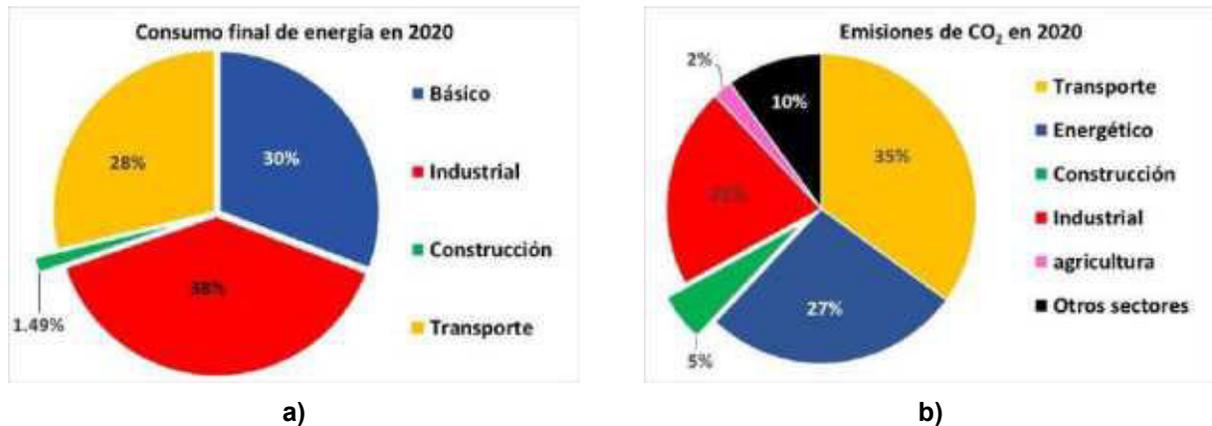


Figura 1.3. a) Consumo de energía por sectores en México, b) Cantidades de consumo de energía [24,26,32]

## 1.6 Materiales de base biológica en la construcción

Los materiales de base biológica, son el resultado de procesos donde se utiliza la biomasa; ejemplo de estos materiales son: papel, madera, productos animales, subproductos agrícolas, entre otros. El término se refiere a materiales contemporáneos que son sometidos a procesos de transformación para ser utilizados. Algunas de las ventajas de estos materiales son: su bajo costo de adquisición, la estética que proporcionan en el diseño arquitectónico, el bajo CO<sub>2</sub> emitido durante su fabricación o transformación, y la similitud de las propiedades físicas y mecánicas con respecto a los materiales convencionales, estos son positivos para el ambiente y la sociedad. [33]. En el caso del concreto vegetal con

cáñamo; algunas investigaciones refieren que las emisiones de CO<sub>2e</sub> (dióxido de carbono equivalente), ronda entre 1.6 y 79 kg CO<sub>2e</sub>/m<sup>2</sup>. Cabe señalar que, esto solo se ha cuantificado para los diferentes tipos de métodos en la construcción de muros con el concreto vegetal. Lo anterior se ha observado a través del análisis del ciclo de vida, y con el estudio detallado del ciclo de carbono en la industria de la construcción (ver figura 1.4) [11,34–39].



Figura 1.4. Ciclo del carbono en la industria de la construcción [40]

Las características de los materiales de base biológica en la construcción son:

- Disminución del consumo de energía, de recursos renovables y no renovables, para mitigar la generación de gases de efecto invernadero y reducir el ciclo de carbono.
- Alta disponibilidad: Debido a que son productos agrícolas, la disposición de los subproductos es amplia, además por ser un deshecho, el costo de adquisición es bajo o en algunos casos nulo.
- Disminución de los costos totales de construcción, mantenimiento y demolición.
- Aseguramiento de la calidad: La edificación debe cumplir con los requerimientos o estándares establecidos en las normas de construcción.
- Durabilidad: Además de ser económicos, los ecomateriales deben ser durables, por ello es necesario realizar un análisis del ciclo de vida, así como diversas pruebas físico-mecánicas para determinar la resistencia.

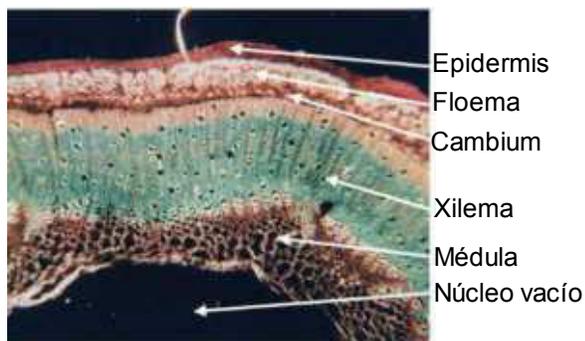
Lo mencionado anteriormente, también involucra 6 pasos básicos, los cuales se ajustan en el concepto de la economía circular, la cual busca minimizar la producción y por ende ayudar a economizar todo tipo de costos (ver figura 1.5).



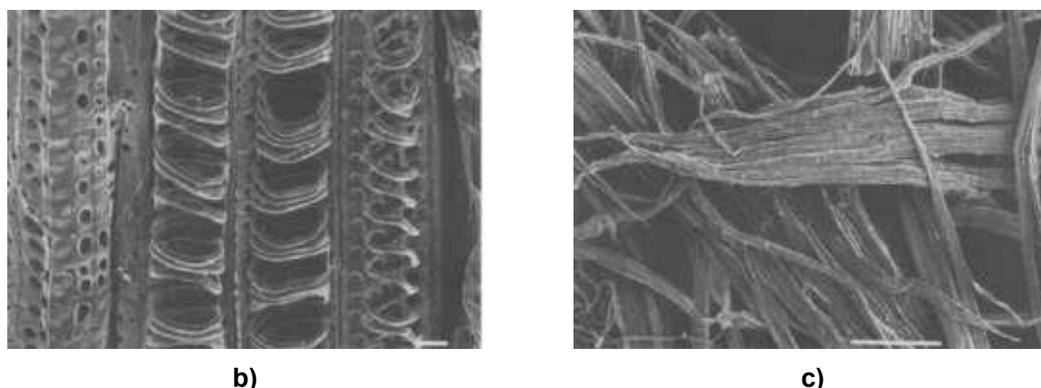
Figura 1.5. Economía circular del aprovechamiento de los recursos [41]

### 1.7 Bio-agregados

Francia ha sido el país pionero en la utilización del cáñamo como un bio-agregado en la fabricación del concreto vegetal. La investigación científica del cáñamo comenzó a realizarse en 1995 por Vignon et al; en su estudio se analizó la microestructura (ver figura 1.6), la composición química y algunos métodos para realizar la deslignificación [42]. Actualmente, diversos investigadores buscan alternativas para sustituir al cáñamo, esto debido a que su disponibilidad es limitada. En estudios preliminares, algunos autores han explorado el potencial del tallo de girasol, lavanda, lino, yuca, lechuguilla de maguey, y recientemente el tallo de maíz, como bio-agregados en la elaboración de concretos vegetales; pues en algunos casos las propiedades multifísicas que ofrecen estos bio-agregados, como la densidad aparente y la conductividad térmica suelen ser similares o mejores que las obtenidas en el cáñamo [11,43–45].



a)



**Figura 1.6. Microscopía electrónica de barrido de una partícula de cáñamo, a) Micrografía óptica de una sección transversal de cáñamo (90x) b) 10  $\mu\text{m}$ , c) 100  $\mu\text{m}$  [42].**

En la tabla 1.1 se muestran las cantidades de los cultivos de girasol, maíz y cáñamo cosechadas y cultivadas en Francia y México, es posible realizar una comparativa acerca de las cantidades cultivadas y cosechadas en el año 2020. En México, el principal cultivo y cosecha es el maíz, es por ello que esta planta fue seleccionada para la elaboración de los concretos vegetales. Como se mencionó anteriormente, el manejo de los residuos de la cosecha depende de la zona donde esta se realice, por lo general, en la zona urbana se desecha o se incinera, por otro lado, en zona rural se emplea como alimento para los animales de granja.

**Tabla 1.1. Disponibilidad del cáñamo, girasol y maíz [46]**

Francia	Cáñamo	Girasol	Maíz
Área cosechada ha	17,284	552,647	1,444,417
Producción total ton	126,645	1,247,936	13,122,988
Rendimiento de cosecha hg/ha	92,529	22,581	292,004
México	Cáñamo	Girasol	Maíz
Área cosechada ha	--	6,826	7,190,335
Producción total ton	--	14,285	28,228,957
Rendimiento de cosecha hg/ha	--	9,751	194,742

ha: Hectárea, ton: Toneladas, hg/ha: Hectogramos por hectárea.

En la tabla 1.2, se muestran algunas propiedades físicas de los bio-agregados utilizados en algunas investigaciones realizadas en la formulación y elaboración de los concretos vegetales. La principal característica de los bio-agregados, es su baja densidad aparente, su baja conductividad térmica, estas características se deben a su compleja microestructura (las cuales se detallan en el capítulo 3).

**Tabla 1.2. Propiedades físicas y térmicas de diferentes bio-agregados**

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/(m.K))	Referencia
H	130	0.048-0.058	[47]
H	100-120	--	[48]
H	127	--	[49]
H	113	--	[50]
SP	20	0.050	[51]
H	134.8	0.054	
H	191	0.072	
SB	296	0.056	[52]
SP	20.1	--	
H	112	0.058	[53]
H	103.5	--	[54]
H	120.04	--	[55]
SB&P	119.5	0.064	
SB&P	103.6	0.062	[56]
SP	21.1	0.052	
H	100-130	--	[57]
L	64	0.06	[58]
SP	15.9	0.036	
SB	129.3	0.053	[59]
RS	64.9	0.043	
SB	120.3	--	[43]
CB	168.2	--	

H: Cáñamo, SP: Médula de girasol, SB: Corteza de girasol, SB&P: Corteza y médula de girasol, L: Lavanda, RS: Paja, CB: Corteza de maíz.

El bio-agregado que será empleado como referencia es el cáñamo, el distribuidor Biofibat [60], menciona que tiene una densidad aparente de 110 kg/m<sup>3</sup>, así como una conductividad térmica de 0.050 W/m.K, como se comentó en la introducción de este trabajo de investigación, este bio-agregado ha sido objeto de diversas investigaciones, en las cuales se han realizado una serie de caracterizaciones físicas; como resultado se muestra que la densidad aparente ronda entre los 100 y los 134 kg/m<sup>3</sup>.

La médula de girasol tiene una densidad aparente entre los 15.9 y los 20.1 kg/m<sup>3</sup>, así como una conductividad térmica entre los 0.036 y los 0.056 W/m.K. Por otro lado, la corteza de girasol tiene una densidad aparente entre los 120 y los 296 kg/m<sup>3</sup>. Otro de los bio-agregados analizados es la lavanda, la cual tiene una densidad aparente de 64 kg/m<sup>3</sup> y una conductividad térmica de 0.060 W/m.K, estas características son similares a la paja, la cual tiene una densidad aparente similar a la lavanda y una conductividad térmica de 0.043 W/m.K.

Los bio-agregados tienen variaciones importantes, las cuales deben de tomarse en cuenta antes y durante el desarrollo de las mezclas, dichas variaciones provienen de: La edad de la planta, el tipo de planta (variedad y/o especie),

condiciones del suelo donde fueron sembradas, métodos de obtención, procesamiento, clima, y localización geográfica. Por otro lado, el origen orgánico de los bio-agregados puede tener efectos negativos en las matrices cementantes de los concretos vegetales, esto debido a la presencia de compuestos hidrosolubles [45], los cuales se muestran en la tabla 1.3.

**Tabla 1.3. Composición química en porcentaje de diferentes bio-agregados**

Tipo de bio-agregado*	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Pectina	Cera	Proteínas	Ceniza	Referencia
SS	42.1	29.7	13.4	5.9	1	--	7.9	[61]
SP	47.4	9.4	3.5	6	--	--	20.4	[61]
H	44	18	28	4	1	3	2	[42]
H	37.7	26.8	22.1	--	--	--	--	[62]
H	48	12	28	6	4	--	2	[63]
H	34-44	31-37	19-28	4	1	--	1-2	[64]
H	48	12	28	6	6	--	--	[65]
H	50-60	15-20	20-30	--	--	--	5-4	[48]
CS	49	37.9	13.1	--	--	--	--	[66]
SS	71.6	12.3	16.1	--	--	--	--	[66]
H	58.7	14.2	6	16.8	4.3	--	--	[67]
H	44.3	27.2	22	--	--	--	--	[68]
H	36-41	31-37	19-21	--	--	--	--	[69]
H	44	25	23	0.6	1.8	1.6	1.2	[70]
H	47-49	18-21	21-23	--	--	--	2-3	[71]
H	52	9	18	--	--	--	2	[72]
H	50.3	17.9	17.2	--	--	--	2.1	[73]
H	49.9	21.4	9.5	--	--	--	0.7	[74]
H	70	17.9	3.7	0.9	0.8	--	--	[75]
H	53-55	11-12	17-19	--	--	--	--	[76]

\* SS: Tallo de Girasol, SP: Médula de Girasol, CS: Tallo de maíz, H: Cáñamo

## 1.8 Cementantes

En la actualidad, se lleva a cabo un número importante de estudios relacionados con el desarrollo y análisis de nuevos materiales cementantes suplementarios. Como es sabido, la industria cementera es una de las principales consumidoras de recursos naturales y energéticos; también es una de las principales emisoras de gases de efecto invernadero (entre el 5 y 7% a nivel mundial) [77]. Además de que se estima que el consumo de energía a nivel global es del 3% [78]. Dentro de los materiales cementantes suplementarios, se encuentran aquellos que requieren de una activación alcalina de aluminosilicatos, como arcillas, y algunos subproductos industriales como escorias de alto horno o cenizas volantes (ver figura 1.7). Los concretos elaborados con materiales cementantes suplementarios, tienden a mejorar algunas propiedades del concreto, como lo son: bajo calor de hidratación, aumento de la resistencia a compresión, así como aumento de la durabilidad ante agentes químicos que suelen ser muy agresivos [78–80].

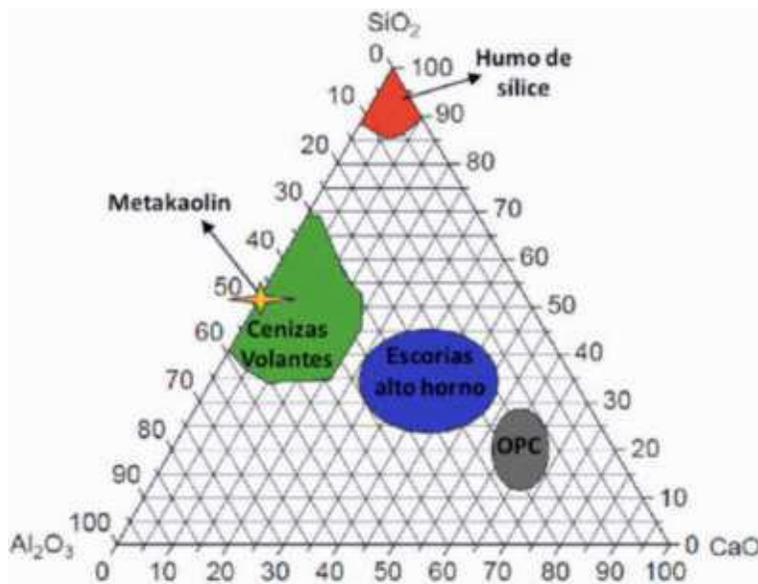


Figura 1.7. Diagrama ternario de los materiales cementantes suplementarios [78]

### 1.8.1 Cemento portland

El cemento portland es el material de construcción más utilizado en el mundo, de igual manera, dependiendo de la aplicación o clase de obra a realizar, existen diversos tipos de cementos, en su mayoría presentan adiciones minerales y/o puzolánicas que ayudan a mejorar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del concreto. Actualmente, la mejora del cemento portland deriva de años de análisis, estudios y sinergia entre la academia y la industria que resulta en un cemento portland de mejor calidad día a día [81].

Sin embargo, la obtención las materias primas para la fabricación del cemento causan un daño irreversible al ambiente (ver figura 1.8). Hoy en día, la industria cementera ha realizado diversas mejoras para que, durante el proceso de calcinación de los diferentes ingredientes del cemento, las emisiones de  $\text{CO}_2$  sean menores, esto gracias a la implementación de técnicas que ayudan a que la elaboración del cemento ser menos agresivo con el ambiente.



**Figura 1.8. Cantera de piedra caliza (grupo ciment Català)**

Por otro lado, a pesar de las mejoras antes mencionadas, el consumo de energía continua siendo elevado, pues para la producción de clinker se calcinan rocas calizas, compuestas principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y arcillas, las cuales proporcionan óxidos de silicio, aluminio y hierro; aproximadamente a los  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , se da la formación de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), silicato dicálcico “belita” ( $\text{C}_2\text{S}$ ), hepta-aluminato de dodecacalcio ( $\text{C}_{12}\text{A}_7$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A partir de este punto, la liberación de este compuesto es constante y representa aproximadamente el 40% del resultado final de la calcinación y clinkerización. Conforme se incrementa la temperatura, incrementa la masa de la belita, del óxido de calcio, y disminuyen las masas del carbonato de calcio, del cuarzo, la arcilla y el óxido de hierro. Al llegar a los  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente, se inicia la formación de silicato tricálcico “alita” ( $\text{C}_3\text{S}$ ), y, a los  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente, la mezcla se vuelve líquida (ver figuras 1.9 y 1.10) [82–85].

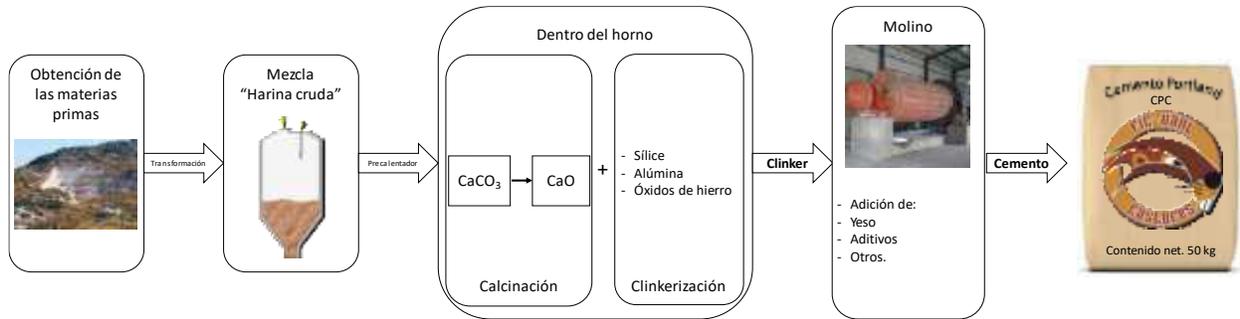


Figura 1.9. Proceso sintetizado de la producción de cemento [85]

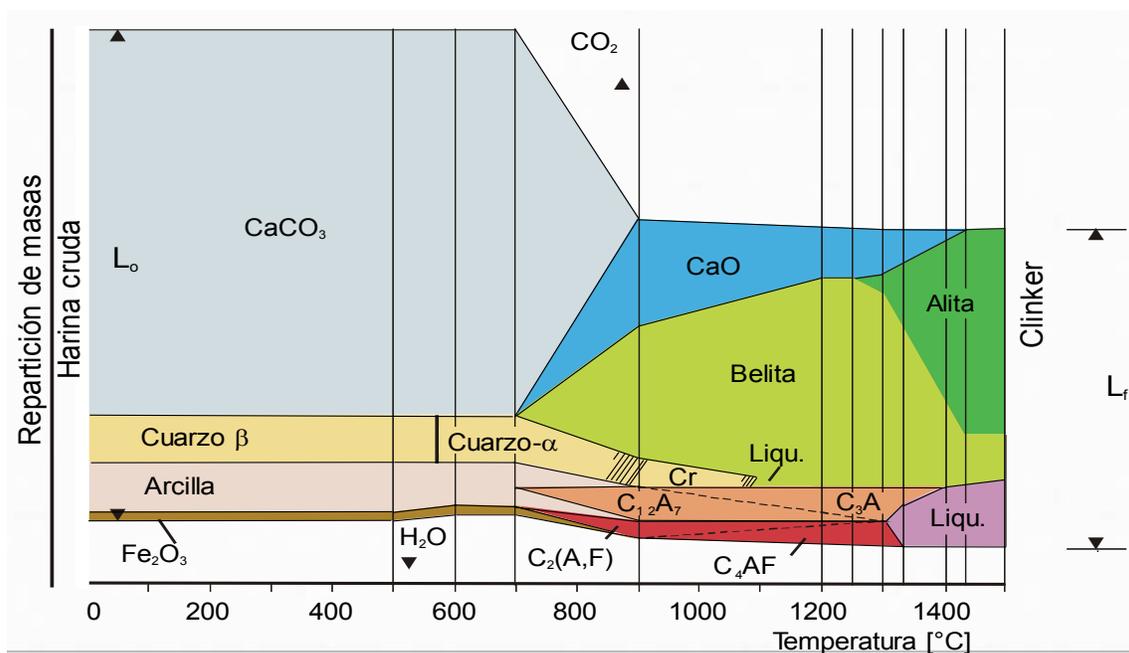


Figura 1.10. Diagrama de fases de la fabricación del cemento [85]

### 1.8.2 Cal

Es un producto de la calcinación de las piedras calizas constituidas principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (ver figura 1.11 y 1.12) y, según la composición de las calizas calcinadas se puede obtener diversos tipos de cales, algunas de ellas pueden ser muy puras, cálcicas, con un alto contenido de hidróxido de calcio, y otras con óxido de silicio altamente hidráulicas [86].

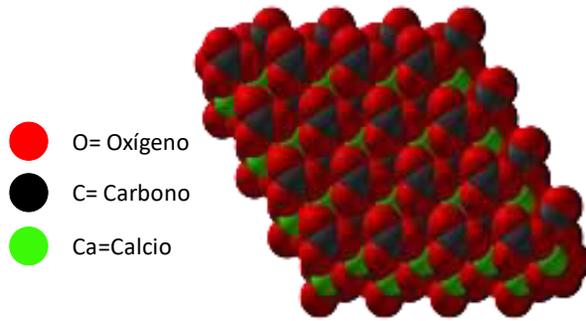


Figura 1.11. Estructura del carbonato de calcio [86]

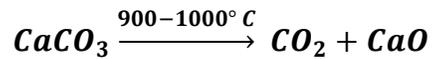


Figura 1.12 Proceso de transformación del carbonato de calcio en cal aérea [86].

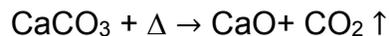
Los diferentes tipos de cal que se pueden obtener según el tipo de caliza son las siguientes [87]:

**Cal aérea:** Es el resultado de la descomposición por el calor de las piedras calizas, y está compuesto principalmente de óxido cálcico. Es precursor en la fabricación de otro tipo de cales. Los principales usos de este material son la preparación de morteros y estucos, por su carácter altamente alcalino este material resulta ser irritante para la piel, los ojos y las vías respiratorias.

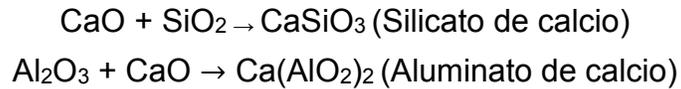
**Cal hidráulica:** Está compuesta de roca caliza con un contenido entre 8 y 20% de arcillas a este tipo de cal se le conoce como cal hidráulica natural. Así mismo, está compuesta por una parte de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Su principal característica es su capacidad para fraguar en ambientes aéreos, así como en lugares con escasez de  $\text{CO}_2$ . La hidraulicidad se debe a la presencia de silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos, que al hidratarse forman sustancias insolubles y estables químicamente (silicatos cálcicos hidratados, aluminatos cálcicos hidratados y silicoaluminatos cálcicos hidratados).

En el proceso de fabricación de la cal hidráulica se distinguen 3 fases de cocción la primera se produce entre los  $500 - 750^\circ \text{C}$ , donde se produce la deshidroxilación de los componentes arcillosos de la roca caliza.

La segunda fase se realiza entre los  $750 - 850^\circ \text{C}$  en el cual la roca caliza se descompone produciéndose la siguiente reacción:



La tercera fase se efectúa entre los  $1000 - 1100^\circ \text{C}$ , en el cual la sílice y la alúmina de las arcillas reaccionan con el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) para formar silicatos de calcio y aluminatos de calcio:



Después de la cocción de la caliza, se extrae la cal viva así como los silicatos y el aluminato de calcio. El apagado de la cal viva se realiza rociando agua sobre ella, con esta acción se obtiene el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), con ello los terrones se deshacen y se obtiene la cal hidráulica natural en polvo. En la cal hidráulica, también se observa un alto contenido de  $\text{CaO}$ , así como también existe la presencia en minoría de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , y la pérdida por ignición está entre el 15 y 24%. Por otro lado, el principal componente mineral de la cal apagada es el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), así como otros tipos de fases como:  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$  [88].

Los diferentes tipos de cal hidráulica se enumeran a continuación:

**Cales hidráulicas formuladas (FL):** Están constituidas principalmente por cal aérea y/o cal hidráulica natural con material hidráulico y/o puzolánico añadido.

**Cales hidráulicas artificiales (HL):** Contienen sustancias añadidas antes o después de la cocción, como polvo de roca volcánica, cenizas volantes de la combustión de carbón mineral, escorias siderúrgicas, etc., que reaccionan con el hidróxido de calcio a temperatura ambiental formando compuestos hidráulicos.

**Cal Apagada:** Este es el resultado de la reacción química de la cal viva con el agua,  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ , y dependiendo de la cantidad de agua esta tendrá forma de polvo, de pasta o lechada. En este caso, la reacción de carbonatación se lleva a cabo con el  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera, o bien con alguna adición puzolánica.

**Cal grasa:** Si la caliza tiene un contenido máximo de 5% de óxido de magnesio, la cal que se produce al calcinarse se denomina cal grasa y al apagarse da una pasta con una trabajabilidad moderada y viscosa.

**Cal magra:** Este tipo de cales presentan un porcentaje de óxido magnesio, que al añadirles agua forman una pasta de color gris, con una trabajabilidad moderada y desprende más calor que las cales grasas. Al secarse al aire se produce polvo y en el agua se disuelven. Por ello no se utilizan en la construcción.

En la figura 1.13 se muestra el proceso de fabricación de la cal. La cal aérea (ver figura 1.14) tiene una densidad aparente de 900-1200  $\text{kg/m}^3$ , y una densidad absoluta de entre 2210 y 3340  $\text{kg/m}^3$ , y en el caso de la cal apagada la densidad aparente ronda entre los 1000-1300  $\text{kg/m}^3$  y la densidad absoluta entre los 2200-

3400 kg/m<sup>3</sup>. La composición típica de la cal viva se muestra en la tabla 1.4 [45,86,88].

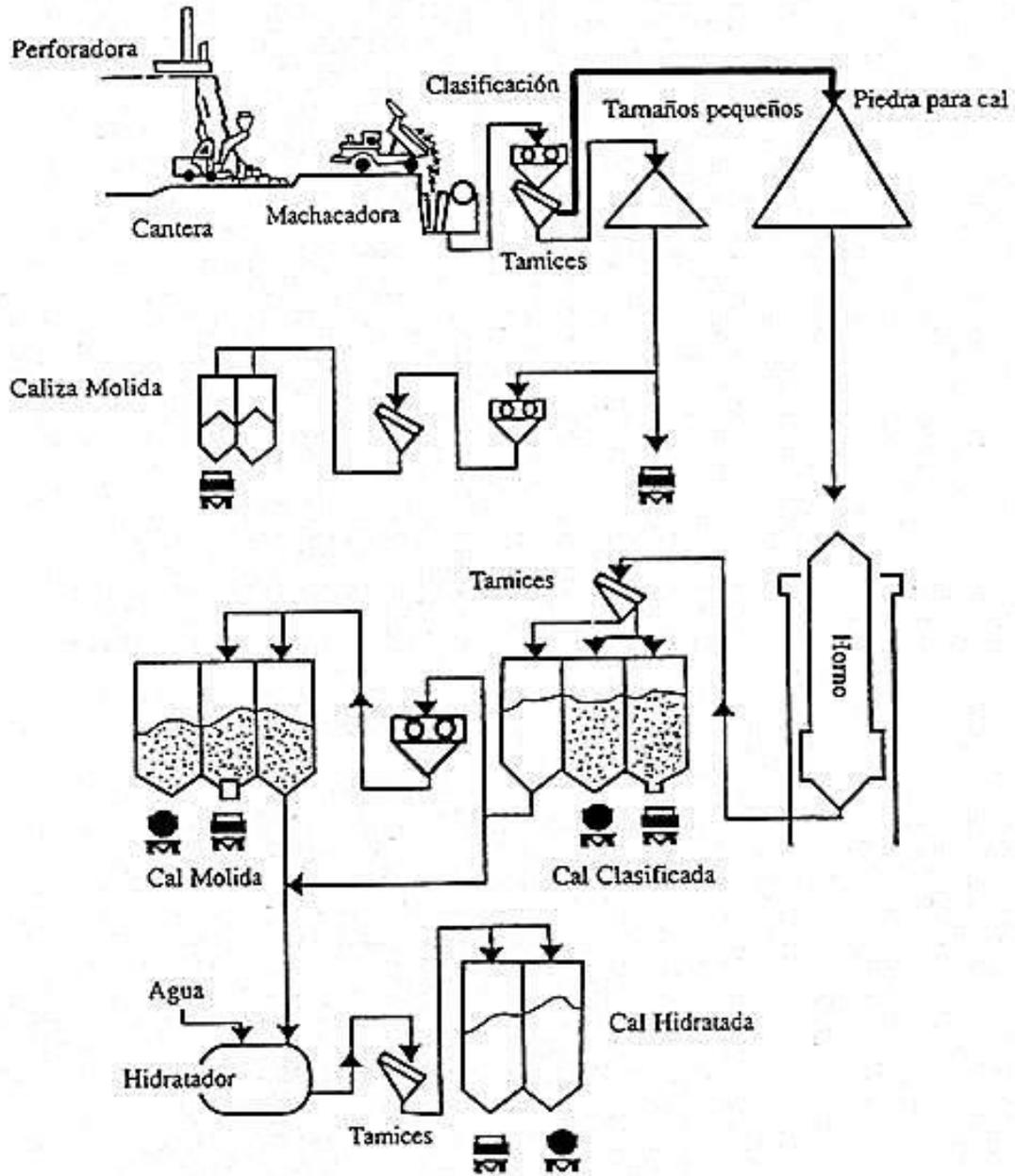


Figura 1.13. Proceso de la transformación de la cal [87]



**Figura 1.14. Cal hidráulica [87]**

**Tabla 1.4. Composición química de la cal apagada [88]**

Elemento	% en peso
Hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ )	80 - 90
Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ )	60 - 70
Óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ )	0.30
Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ )	0.40 - 0.50
Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0.10 - 0.15
Óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	0.05 - 0.10

El impacto ambiental que genera la transformación de la cal es menor en comparación a la producción del cemento, es necesario el uso de combustibles para realizar la calcinación y la descarbonización de las materias primas; pero las emisiones de  $\text{CO}_2$  (600-800 kg) son menores en comparación a las del cemento (860 kg por tonelada de cemento producida) [89], esto debido a que se requiere de una menor temperatura para llevar a cabo la transformación de cal (600-900 °C), en comparación de los 1400-1500 °C que requiere el cemento [34,88].

### 1.8.3 Metacaolín

El metacaolín es el resultado de la activación térmica del caolín, debido a sus características cementantes, este material fue utilizado por primera vez en 1962 en una mezcla de concreto en Brasil y desde entonces es catalogado como un material cementante suplementario [90]. La caolinita (figura 1.15) es un aluminosilicato hidratado, cuya fórmula química es  $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ , es estable en condiciones ambientales, pero al ser sometido a un proceso de calcinación, esta sufre una transformación en su estructura cristalina. A los 100 y 200° C los materiales arcillosos pierden la mayor parte del agua que ha sido absorbida en su estado natural, posteriormente, entre los 500 y 800 °C, la caolinita pierde el agua en su totalidad por la deshidroxilación [91]. Este proceso de activación térmica rompe la estructura del caolín donde las capas de sílice y alúmina se doblan y pierden su orden de largo enlace, lo cual da como resultado el desordenamiento de la estructura transformándolo en metacaolín (ver figura 1.16) [91,92].

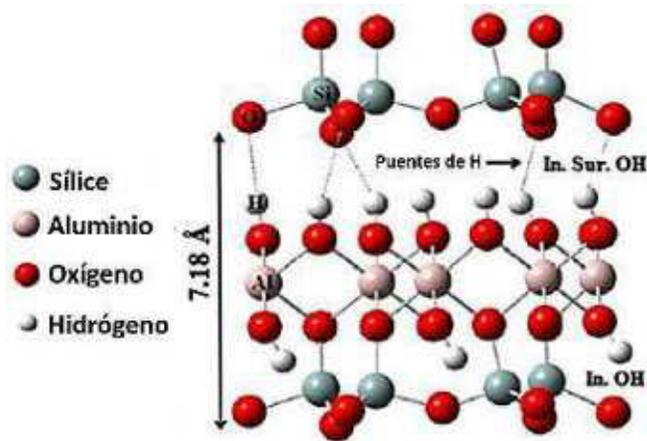


Figura 1.15. Estructura de la caolinita [93]

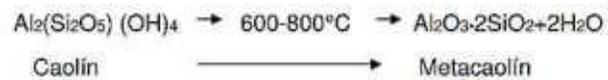


Figura 1.16. Transformación de la caolinita a metacaolín

La clave para producir metacaolín para su uso como un cementante suplementario, es lograr la deshidroxilación sin el sobrecalentamiento de la caolinita. El proceso de cocción adecuado da como resultado un estado amorfo desordenado y altamente puzolánico. La exposición térmica más allá de un punto definido dará como resultado la síntesis y la formación de mulita, que se quema y no es reactiva. En otras palabras, la caolinita, para ser alterada de manera óptima a un estado de metacaolín, requiere que esté completamente tostada pero nunca quemada (ver figura 1.17).

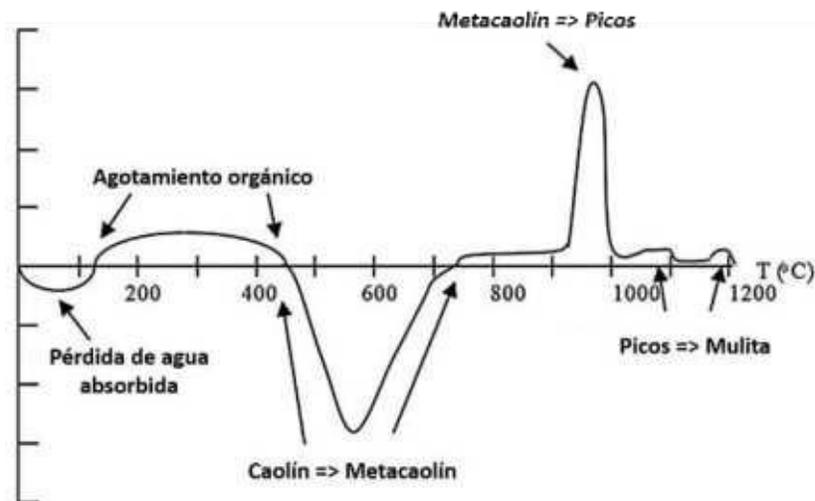
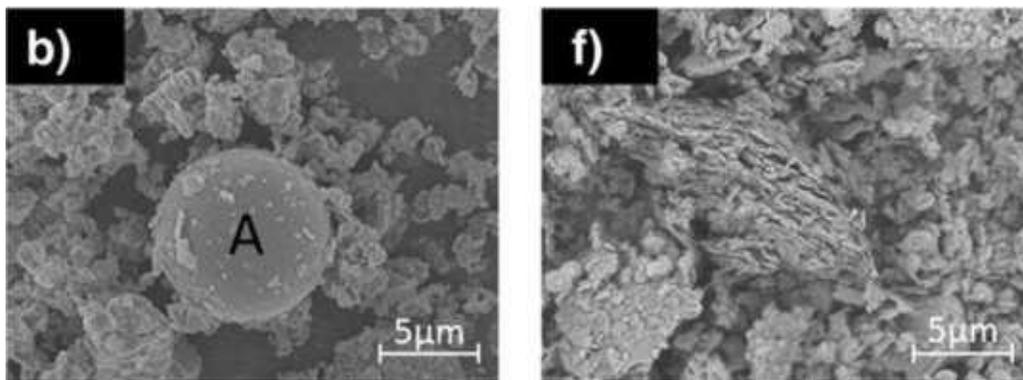


Figura 1.17. Termograma del caolín [91,92]

La producción del metacaolín puede realizarse de dos maneras, en horno rotatorio y en calcinación rápida. En el primer método se realiza un proceso similar a la producción del cemento, el cual tiene una duración aproximada de 5 horas a una temperatura alrededor de 600 y 800 °C y da como resultado un material con un contenido de caolinita del 75%, y las partículas obtenidas tienen diámetro de 5 a 10 milímetros y se pulveriza hasta alcanzar la finura deseada [94].

El segundo método, se efectúa calcinando la arcilla en polvo, el cual pasa por flama alcanzando una temperatura entre 1500 y 1200 °C en décimas de segundo, posteriormente el metacaolín obtenido se enfría a 100 °C; después, se almacena en silos donde se deja enfriar hasta lograr la temperatura ambiente; el metacaolín obtenido en este caso presenta una mayor reactividad debido a la morfología de las partículas, las cuales son esferas vítreas (ver figura 1.18) [95].



**Figura 1.18** Morfología de una partícula de metacaolín calcinada por el método flash (b) y de una partícula calcinada por el método convencional [95]

Es importante resaltar que, en ambos procesos de transformación de la caolinita, el consumo de energía es un 80% menor en comparación a la producción del cemento. El metacaolín es considerado como un eco-material debido a que la producción del CO<sub>2</sub> es menor en comparación al proceso de fabricación del cemento y la cal, sin embargo, necesita de estos últimos para poder ser utilizado [94,96].

#### **1.8.4 Cal formulada**

De manera general, las matrices puzolánicas y cementantes que se utilizan en la elaboración de los concretos vegetales están compuestas principalmente por cal apagada y cemento; cabe hacer mención que en años recientes, algunos investigadores han optado por el uso de cementantes suplementarios, principalmente el metacaolín, esto debido a la baja emisión de CO<sub>2</sub> durante su transformación en comparación al cemento [97]. Se han hecho adiciones de algunos activadores, los cuales aceleran los procesos de fraguado.

En esta investigación se utilizó una cal comercial llamada “batichanvre”, el cual es un tipo de cal que tiene una adición de cemento portland, este producto se vende en presentaciones de 25 kilogramos (ver figura 1.19), este cementante es

ampliamente utilizado en la elaboración de morteros aislantes, cuyo bio-agregado es el cáñamo (ver figura 1.20). La resistencia a la compresión de este material ronda entre los 3 y los 4 MPa y tiene un nivel de deformación alto. Los componentes de este material se muestran en la tabla 1.5 [56].



Figura 1.19. Batichanvre [98]



Figura 1.20. Concreto vegetal aislante [99]

Tabla 1.5. Composición química y mineralógica de la cal comercial [56]

Compuesto	Porcentaje en peso
CaO	30-60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-1.5
SiO <sub>2</sub>	≥ 20
Ca(OH) <sub>2</sub>	≥ 3
CaCO <sub>3</sub>	10-30
Cementante hidráulico	5-10

### 1.8.5.5 Cenizas volantes

Proviene de la combustión de carbón mineral (figura 1.21 y 1.22), el cual alimenta las calderas en las plantas termoeléctricas (figura 1.23), este residuo es atrapado por filtros ubicados en las chimeneas. Al ser un subproducto, debe tenerse un especial cuidado en la calidad del material, debe cuidarse su regularidad, esto con la finalidad de que no existan variaciones que afecten al concreto. Actualmente, se ha hecho evidente que existen diferencias entre las cenizas volantes, en las que se reflejan el proceso de combustión y el origen. La Asociación Canadiense de Standards reconoce 2 clases generales de cenizas volantes, la primera (clase C), se produce a partir de lignito de carbones sub bituminosos y, la segunda, (clase F), se produce a partir de carbones bituminosos [92,100–102].



Figura 1.21 Carbón mineral [73]



Figura 1.22 Cenizas volantes [73]

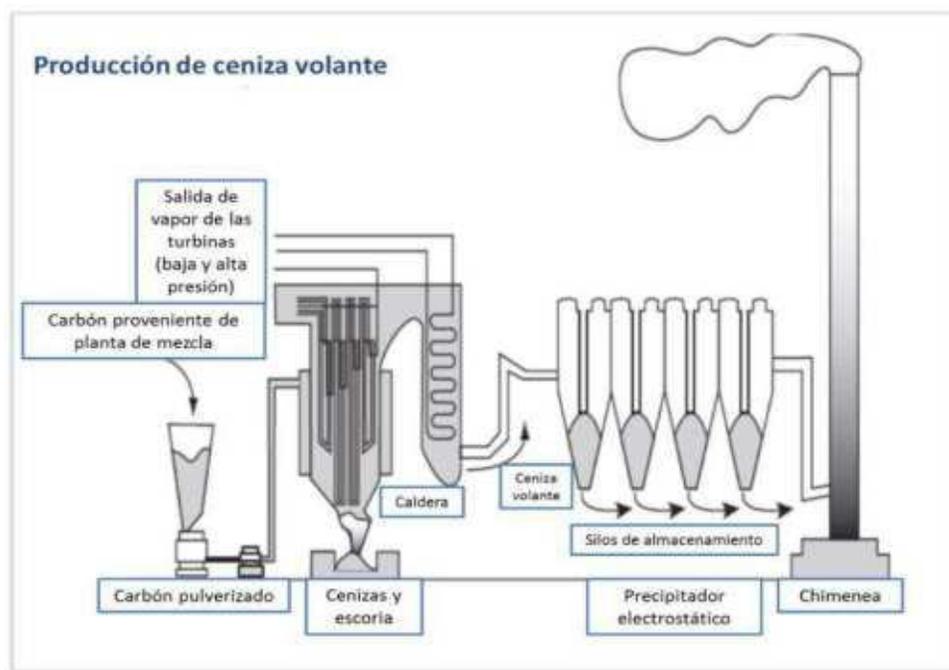


Figura 1.23. Planta termoeléctrica [103]

Las partículas de cenizas volantes son de una morfología esférica (ver figuras 1.24 y 1.25), las cuales tienen un diámetro  $< 1 \mu\text{m}$ , hasta los  $150 \mu\text{m}$ , este tamaño de partícula está plenamente definido por el equipo que se utilice en la recolección de la ceniza. Las cenizas volantes de las calderas en algunas plantas más antiguas que usan solo colectores mecánicos son más gruesas que las plantas que usan precipitadores electrostáticos. La densidad aparente ronda entre los  $700$  y los  $890 \text{ kg/m}^3$  y su densidad real esté entre los  $2000$  y los  $2900 \text{ kg/m}^3$  [96,100,101].

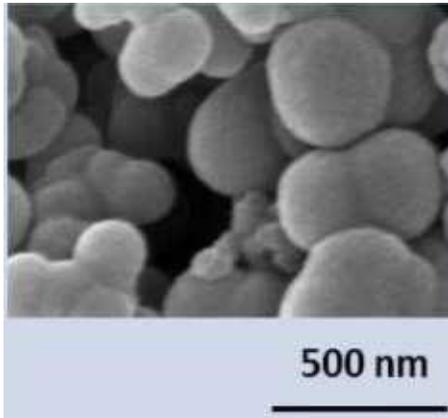


Figura 1.24. Cenizas de carbón bituminoso (clase F) [73]

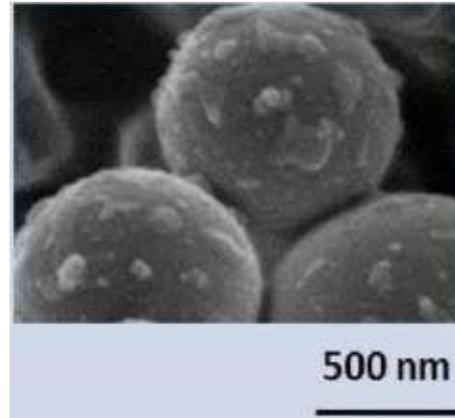


Figura 1.25. Cenizas de carbón sub-bituminoso (clase C) [73]

### 1.9 Concreto de cáñamo

La aplicación moderna de los concretos vegetales inicia a mediados de 1980, cuando restauradores de edificaciones buscaban alternativas para reemplazar el bahareque deteriorado de algunos edificios medievales ubicados en Francia. El material elegido para este fin fue el “*hempcrete*” o “*concreto con cáñamo*”, en el cual, se forma a partir de la mezcla de cáñamo con agua y cal. La naturaleza liviana del cáñamo, en conjunto con la cal y el agua, ayudan a reducir de manera considerable el peso de una estructura; también uno de sus principales beneficios es la captura de CO<sub>2</sub> presente en el ambiente, ya que esto permite que la cal endurezca, baja difusividad y efusividad térmica, un excelente amortiguamiento de humedad, masa térmica (almacenamiento del calor), es biodegradable y presenta buena calidad del aire interior (ventilación) y resistencia al fuego [33,104,105]. Su principal cualidad es su comportamiento higrotérmico. Así mismo este material tiene diferentes aplicaciones (muro, techo y piso). Sin embargo, el concreto con cáñamo tiene una baja resistencia a compresión [106]. Actualmente existe una gran diversidad de estudios donde se ha experimentado con diferentes matrices puzolánicas y cementantes; esto con la finalidad de mejorar las propiedades físicas de este material.

En abril del 2007, cuando se realizó el documento “*Ouvrages en béton de chanvre*” (“*estructuras de concreto de cáñamo*”) [107], el cual introduce y refiere recomendaciones profesionales para la fabricación de concreto con cáñamo. Estas recomendaciones no tienden a ser una norma, pero en algunos casos, las compañías de seguros piden que las obras hechas con el concreto vegetal tengan un nivel mínimo de calidad. El concreto de cáñamo puede ser empleado en diferentes tipos de estructuras, en la tabla 1.6 se muestran los diferentes tipos proporciones que se pueden emplear para los 4 tipos de obras que pueden elaborarse con el concreto de cáñamo [108].

**Tabla 1.6. Proporciones de materiales para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de concreto de cáñamo (kg) [108]**

Aplicación	Cáñamo	Cementante	Arena	Agua
Techo		110	--	225
Muro	130	220	--	350
Piso		275	--	500
Recubrimiento		485	160	650

En las dos décadas recientes, diversos autores han desarrollado una serie de investigaciones con diferentes tipos de bio-agregados, como la lavanda, el lino, el sisal, la lechuguilla de agave, la fibra de coco, entre otros. En estos casos, las diferentes formulaciones fueron analizadas de distintos puntos, siempre aplicando los conocimientos y técnicas científicas para poder cimentar la compresión de las propiedades de los materiales obtenidos [86,109,110].

El principal objetivo de la aplicación del concreto con cáñamo es brindar un envolvente térmico a la edificación. En el caso de los techos, el material se vierte en cimbras de madera para formar un panel y a este, posteriormente se le realiza un “calafateo” para sellar las uniones (ver figura 1.26a). En los muros, este material se emplea como un sistema constructivo similar a la mampostería, y en otros casos, se elabora a través del colado de secciones, o bien como un concreto lanzado (ver figura 1.26b); sin embargo, el concreto con cáñamo se caracteriza por tener una baja resistencia mecánica, por lo que generalmente, su colocación se hace con un marco de madera, el cual le brinda estabilidad. El concreto con cáñamo necesita ser revestido para tener una mayor protección para el medio de exposición donde será puesto en servicio, por lo que el recubrimiento de muros se lleva a cabo con una mezcla compuesta por cáñamo, arena, agua y cementantes (ver figura 1.26c). El empleo del concreto vegetal en el suelo ayuda a mejorar las condiciones de aislamiento térmico del mismo [108].



a)



b)



c)

Figura 1.26 a) Colocación de concreto de cáñamo en el sistema de techado, b) Colocación de concreto de cáñamo en muros, c) Recubrimiento con mortero de cáñamo en muros [99].

## 1.10 Aspectos relacionados con las propiedades físico-mecánicas de los concretos vegetales

En este apartado, se hace un especial énfasis en las propiedades físicas, mecánicas e higrotérmicas del concreto vegetal elaborado con cáñamo, dichas propiedades se establecen como una referencia en este trabajo de investigación; sin embargo, al tener una gran variabilidad en los resultados encontrados en la literatura, resulta difícil realizar una distinción de la información obtenida; la variabilidad de los resultados presentados en la mayoría de estudios tienen que ver con decisiones tomadas arbitrariamente debido a la falta de unificación de criterios; por mencionar un ejemplo, en el caso de la determinación del módulo elástico, existen diferentes métodos, pero estas técnicas presentan una gran dispersión en los resultados obtenidos [44]. Sin embargo, los diversos autores citados concluyen que este material tiene buenas propiedades higrotérmicas, pero en la resistencia a compresión, los estudios han demostrado que su capacidad de carga es limitada.

### 1.10.1 Efectos del bio-agregados en los cementantes

Al añadir el agua a la mezcla, inicia una competencia entre el bio-agregado y los cementantes por la absorción del agua, posteriormente, el agua absorbida por los bio-agregados disuelve los compuestos hidrosolubles presentes en el mismo; y, por otro lado, se comienza el proceso de hidratación del cementante. Posteriormente se produce una interacción la cual toma lugar de la siguiente manera [45]:

**Edades tempranas:** se ven afectados los procesos de fraguado (retraso) y endurecimiento de los cementantes.

**En el concreto endurecido:** puede alterar las propiedades mecánicas (modificando la adhesión entre las partículas de los bio-agregados y la matriz cementante).

**A largo plazo:** influye en la durabilidad del concreto vegetal.

Como se ha mencionado anteriormente, el concreto elaborado con cáñamo desarrolla grandes deformaciones cuando se ensaya a compresión, esto gracias a la sinergia del bio-agregado (tomando en cuenta el acomodo de las partículas y la porosidad entre ellas), el cementante que se emplea y el agua. En el estudio desarrollado por Kashtanjeva [111], el comportamiento mecánico de los concretos vegetales fabricados con cáñamo, se atribuye principalmente al cementante utilizado en la mezcla; pues al tener una porción considerable de cal, esta contribuye en gran medida a resistir esfuerzos de compresión y menor medida a mantener unidas las partículas del bio-agregado.

De igual manera, esto sucede con la contracción por secado, ya que en algunas probetas donde el contenido de cal es alto, este fenómeno se produce en menor medida. Sin embargo, cuando la cantidad de bio-agregado es mayor, el comportamiento mecánico se asocia hacia el bio-agregado; por lo anterior la dosificación de los materiales (especialmente del cementante) juega un papel importante para evitar problemas de contracción por secado. Durante el proceso de mezclado y el fraguado de la mezcla se da un proceso de hidratación y evaporación respectivamente, la evaporación tiene 2 efectos, la pérdida de la masa de los concretos vegetales y la contracción por secado. Por lo anterior, es necesario encontrar un balance entre los cementantes y el agua, pues estas dos variables pueden tener una influencia muy importante en las propiedades que pueden desarrollar los concretos vegetales.

Para resarcir el deterioro causado por la absorción del bio-agregado y los compuestos hidrosolubles presentes en él, algunos autores han propuesto realizar diversos tratamientos previos al mezclado, los cuales pueden ayudar a reducir la absorción de agua durante el proceso de mezclado. Algunos autores han estudiado el efecto que tiene la adición de sustancias como aceites, solución de hidroxilo de calcio, lechadas de cemento, de cal entre otros; los efectos positivos que se han observado son: la reducción de la absorción de agua de un 80% a un 40% [112], de igual manera, la resistencia a compresión se ve beneficiada, pues en algunos casos la resistencia a compresión aumenta a 2.5 MPa, en comparación a los 0.44 MPa a los bio-agregados no tratados [70–72].

### **1.10.2 Densidad, conductividad térmica e higroscopia**

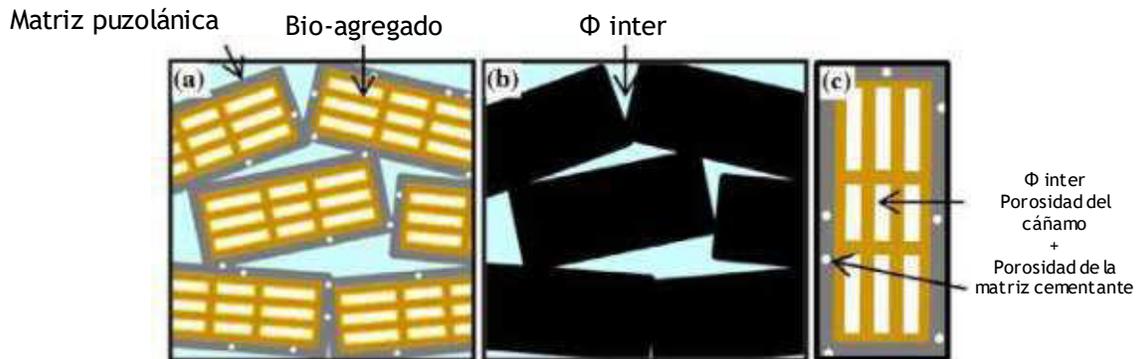
El concreto de cáñamo tiene una gran red de poros interconectada, la cual le otorga algunas ventajas con respecto a algunos materiales convencionales, como lo son su densidad la cual ronda entre los 200 y los 600 kg/m<sup>3</sup>, y depende el tipo de dosificación y el uso. Algunos autores han llevado a cabo varios estudios con respecto a la porosidad de los concretos vegetales elaborados con cáñamo, esta ronda entre el 72% y el 78% del total del material; esto resulta en benéfico para la densidad y por consecuente, para la conductividad térmica (ver tabla 1.7) [116].

**Tabla 1.7. Porosidad de diferentes concretos vegetales**

Referencia	Porosidad total (%)	Porosidad abierta (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/(m.K))
HC [117]	76.5-78.4	--	390-425	0.105 – 0.108
HC [118]	76.5	--	440	--
HC [47]	77-80	67-85	256-661	0.060 – 0.190
HC [57]	77.43-79.52	53.02-74.71	290-440	--
HM [86]	--	58.5-73.5	593-951	0.085 – 0.180
H [119]	78-78.40	--	490-495	--
H [106]	72.2-78.9	54-60.2	421-460	--
H [120]	--	70-79	351-410	0.095 – 0.198
LS [43]	--	68.6	539-590	0.127 – 0.136
MS [43]	--	71.5	511-572	0.128 – 0.137
MM [43]	--	69.2	534-616	0.112 – 0.118

(HC) Cáñamo con cal comercial, (HM) Cáñamo con metacaolín, (LS) Corteza de girasol con cal comercial, (MS) Corteza de girasol con metacaolín, (MM) Corteza de maíz con metacaolín

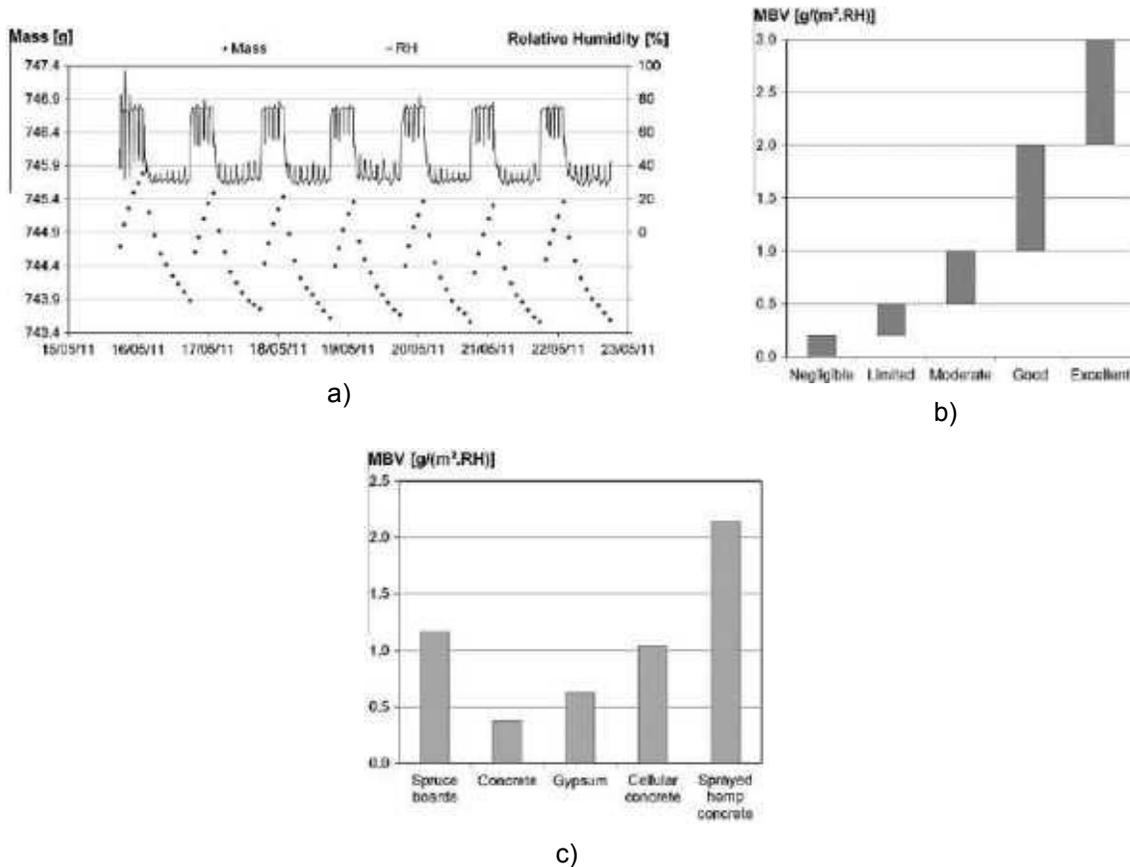
La conductividad térmica de los concretos vegetales es influenciada por los vacíos formados por los bio-agregados (ver figura 1.27), esto brinda conductividades térmicas bajas que van de entre los 0.150 y los 0.080 W/(m.K). Así mismo, las características de los cementantes y el tipo de partículas juegan un papel importante en la densidad y la conductividad.



**Figura 1.27. Porosidad intraparticular de los concretos vegetales y porosidad interparticular de los bio-agregados [121]**

La porosidad del concreto vegetal, permite almacenar y realizar la transferencia de humedad, haciéndolo capaz de regular la humedad relativa del lugar donde esté puesto en servicio, lo cual trae beneficios como el confort y un ambiente saludable para los ocupantes de la edificación. Las características hígricas del material son la permeabilidad a la humedad y las curvas de absorción que son representativas del estado estacionario. Estudios realizados han demostrado que el concreto de cáñamo es altamente higroscópico, con alta capacidad de transferencia y almacenamiento de humedad (permeabilidad al vapor de agua de aproximadamente  $3.2 \text{ E}^{-11} \text{ kg}/(\text{m s Pa})$  [118,122] (ver figura 1.28).

Esta propiedad puede ser medida con un ensayo llamado “valor de amortiguamiento de humedad” conocido como MBV (“Moisture Buffer Value” por sus siglas en inglés) el cual a través de diversos ciclos de mediciones que simulan jornadas laborales, u horarios de alta concentración de personas, donde existen variaciones de humedad relativa, pero se mantiene una temperatura constante (8 horas a 23 °C y una humedad relativa de 75% y 16 horas a 23 °C y una humedad relativa del 33%) (ver figura 1.28a). Este ensayo clasifica al concreto de cáñamo con una regulación higroscópica de buena a excelente con un valor promedio de 2 g/(m<sup>2</sup>.%RH) (ver figura 1.28b), caso contrario al concreto celular, el cual tiene una medida de 1 g/(m<sup>2</sup>.%RH) (Ver figura 1.28c) [123].



**Figura 1.28. Ensayo de amortiguamiento de humedad (a) Valores de regulación higroscópica (b) Valores de regulación higroscópica de algunos materiales de construcción (c) [124,125].**

Otros estudios mencionan que el concreto con cáñamo manifiesta una alta sorción/desorción o bien una condensación/evaporación; esto se traduce en un impacto en el balance energético y por ende un ahorro de energía para mantener la edificación con un clima confortable, pero esto depende de la ventilación empleada [126,127].

### 1.10.3 Resistencia a compresión y módulo elástico

El concreto de cáñamo es un material no apto para soportar grandes cantidades de carga, esto debido a la alta porosidad y a la compresibilidad de las partículas con las que está hecho; lo cual, da como resultado un comportamiento elastoplástico. En todos casos se necesita de la ayuda de un bastidor de madera para brindar una mayor capacidad de carga. Los factores principales en el rendimiento de los concretos vegetales son [34,128]:

- Naturaleza de los bio-agregados.
- Tamaño del bio-agregado.
- Homogeneización del bio-agregado.
- Tipos de aglutinantes empleados.
- Formulaciones utilizadas en la fabricación.
- Metodología de elaboración.
- Energía de compactación empleada.
- Métodos de moldeo.

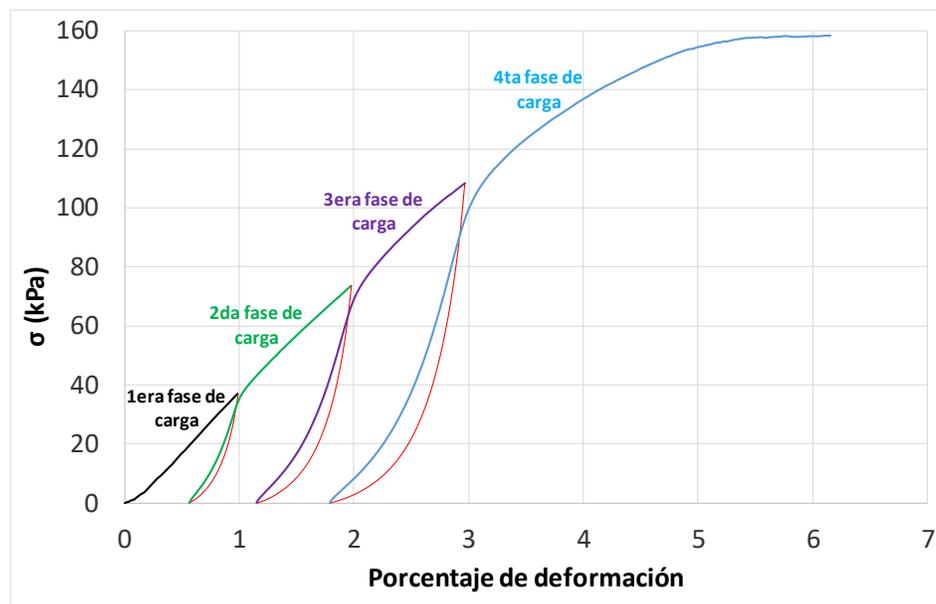
El concreto con cáñamo tiene un comportamiento altamente deformable, lo que hace difícil poder distinguir en algunas fases de carga los picos de tensión porque esta es absorbida en la fase dúctil. Cerezo [129] atribuye este comportamiento a la red de hidratos, que en edades tempranas aún no se han formado. Por otro lado, el comportamiento mecánico se ve influenciado por las partículas del bio-agregado. El primer efecto es ocasionado por la orientación y el tamaño de las partículas utilizadas durante la fabricación del concreto vegetal, pues esto genera diferentes tipos vacíos, los cuales durante el ensayo a compresión se compactan, al mismo tiempo, se realiza el acomodo de las partículas y con ello la deformación del concreto vegetal aumenta. El segundo efecto es del orden químico, pues las partículas de cáñamo interfieren con el proceso de fraguado, así como la competencia por el agua de reacción y el agua de preabsorción del bio-agregado, pero principalmente por la inhibición de las reacciones de hidratación de la matriz cementante, debido a la presencia de extractos hidrosolubles; en este último caso, existe un amplio campo de investigación, pues cada tipo de cáñamo presenta una gran variabilidad en el contenido de estos extractos [64,77,105,113,128,130].

Por otro lado, las reglas profesionales de la construcción con cáñamo muestran los valores mínimos que deben de cumplir las tres aplicaciones más comunes (tabla 1.8); sin embargo, estas son solo recomendaciones y dan una pauta sobre los valores mínimos que las construcciones con cáñamo deben tener [34]. Una de las primeras pruebas mecánicas en llevarse a cabo en los concretos vegetales fue la

propuesta por Cerezo [47], en la cual se realizaba el llenado de cilindros de 16x32 cm, con ello se realiza un ensayo a compresión de las probetas, cuyo objetivo es evaluar el comportamiento elastoplástico del concreto vegetal y sus diferentes variaciones. En este análisis, se llevó a cabo un ensayo a compresión cíclico (ver figura 1.29).

**Tabla 1.8 Valores mínimos a cumplir según las reglas profesionales de construcción con cáñamo [34]**

Aplicación	Resistencia a compresión (MPa)	Módulo elástico (MPa)	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )
Muro	> 0.20	> 15	420
Techo	> 0.05	> 3	250
Pisos	--	> 20	500



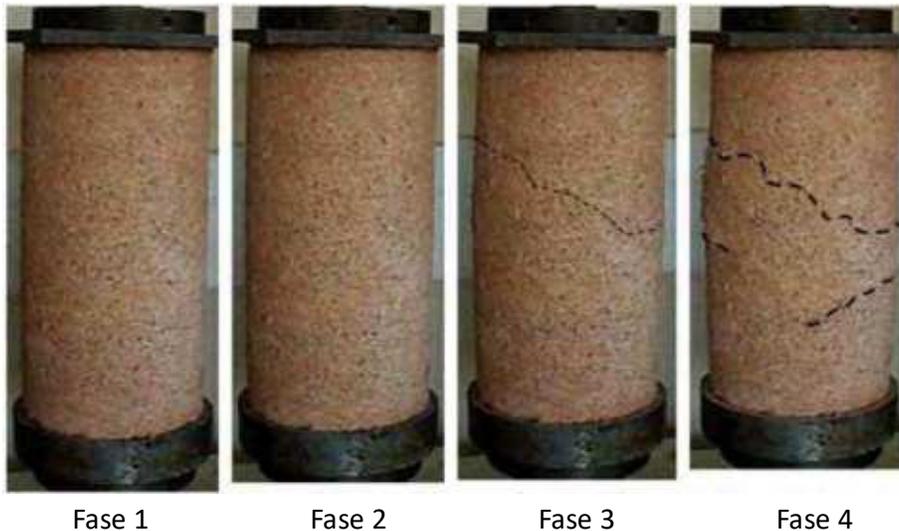
**Figura 1.29. Ensayo cíclico [47]**

En un estudio realizado por Nguyen [131], analizó y determinó que el comportamiento de los concretos vegetales se divide en 4 fases distintas según la correlación de la curva esfuerzo-deformación (ver figura 1.30):

- **Fase 1:** Comportamiento elástico homogéneo. En esta fase la curva de esfuerzo-deformación es lineal, con pequeñas deformaciones que van de 0 al 1%.
- **Fase 2:** Zona elastoplástica: Se comienzan a presentar los daños en la matriz cementante y la interfaz entre las partículas del cáñamo y la matriz. La

deformación es más grande y el aumento de la resistencia a compresión es más lento.

- **Fase 3:** Distribución de la tensión en las partículas de cáñamo y comienzo de su compactación (cierre de los poros en las partículas y los intersticios del concreto vegetal, y el acomodamiento de las partículas de bio-agregado es posible observar una gran deformación).
- **Fase 4:** Posible ruptura de la probeta.



**Figura 1.30. Etapas destructivas del concreto con cáñamo durante el ensaye a compresión [88].**

El principal objetivo de esta prueba es estudiar el comportamiento de la deformación con respecto al esfuerzo de compresión de los concretos vegetales, a diferencia de los concretos convencionales, se notan 3 niveles de comportamiento dependiendo del nivel de deformación observado durante el ensaye (ver figura 1.31). En la tabla 1.9, se muestran los rangos de las diferentes propiedades físicas y mecánicas que se presentan en las reglas profesionales de construcción con cáñamo [105,109,131,132]:

**Bajo nivel de deformación:** Se obtienen deformaciones alrededor del 3%, los esfuerzos de compresión inducidos son bajos y el ensaye por lo general termina en el segundo ciclo del ensaye (figura 1.31a).

**Nivel moderado de deformación:** Se caracteriza por alcanzar una deformación cercana al 5%, los esfuerzos de compresión aplicados son un poco más elevados en comparación al bajo nivel de deformación (figura 1.31b).

**Alto nivel de deformación:** Los especímenes muestran un alto nivel de deformación, la compresión permite desarrollar cerca del 20% el cual es el máximo permitido (figura 1.31c).

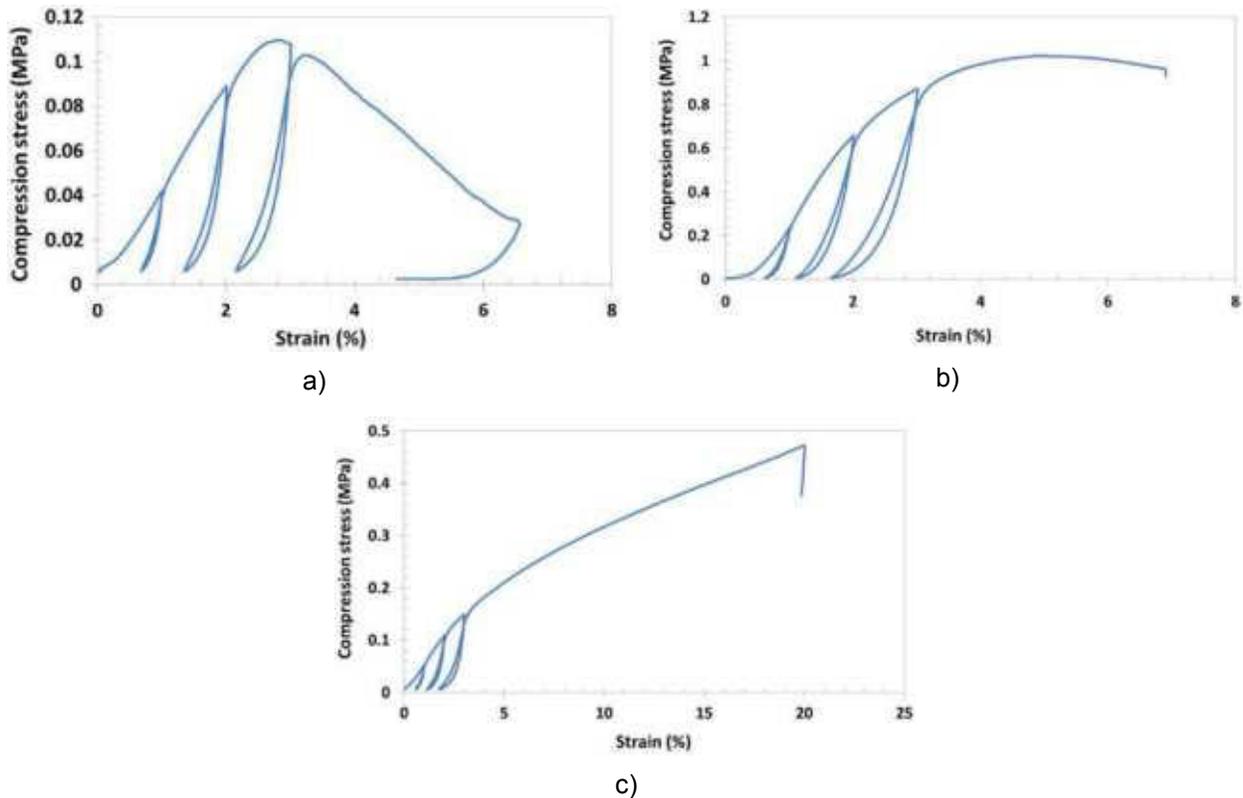


Figura 1.31. (a) Bajo nivel de deformación, (b) nivel de deformación moderada y, (c) nivel de alta deformación [128]

**Tabla 1.9. Características mecánicas del concreto con cáñamo a los 28 días [134]**

Tipo	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/(m.K))	$\sigma$ (MPa)	E (MPa)	$E_{max}$ (MPa)
Muro	420	0.06	0.3	20	0.07
Piso	500	0.09	0.3	20	0.04
Techo	250	0.01	0.1	3	0.15
Recubrimiento	800	0.15	0.4	25	0.15

$\rho$ = Densidad,  $\lambda$  =Conductividad térmica,  $\sigma$ = esfuerzo a compresión, E módulo de elasticidad

La tabla 1.10 muestra los valores determinados a través de diversos estudios y análisis realizados al concreto vegetal con cáñamo. Es importante observar la variabilidad de los resultados dependiendo de la utilización del material, cabe señalar que la densidad más baja es empleada en las partes críticas de la casa-

habitación por ejemplo la losa. Esta propiedad está ligada con la conductividad térmica, ya que, en este caso, los diferentes gradientes de temperatura tienen una gran incidencia en este elemento estructural.

**Tabla 1.10. Propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los concretos vegetales**

Autor	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (MPa)	E (MPa)	$\lambda$ (W/(m.K))	Referencia
Cáñamo					
Construire en Chanvre	250-500	0.10-0.40	3-25	--	[133]
Collet	425	--	--	0.45-0.51	[135]
Cerezo	356-661	0.25-1.15	4-160	0.06-0.19	[47]
Elfordy	291-485	0.18-0.85	5-35	0.18-0.48	[136]
Evrard	530	--	--	0.11-0.12	[48]
de Bruijn	1590	0.15-0.83	4.42-39.19	--	[49]
Nguyen	684-963	1.92-3.60	39-147	0.07-0.11	[131]
Niyigena	452-514	0.32-0.48	30-44	0.075-0.124	[128]
Magniont	560-900	0.20-2.30	--	0.10-0.18	[137]
Nozahic (Hemp)	483	0.06-0.16	5.60-20.00	0.09-0.10	
Nozahic (Hemp-Lime)	491	0.20-0.28	21.90-36.80	0.10	[138]
Nozahic (Hemp-Oil Line)	494	0.28-0.45	29.60-53.20	0.10-0.11	
Dinh (Pozzolanc-hemp)	585-619	0.77-1.14	46.79-71.69	0.09-0.12	[2]
Dinh (Comercial-binder-hemp)	619-630	1.99-2.14	115.76-156.98	0.12-0.14	
Chabannes	456-468	0.22-0.44	42.00-73.00	--	[139]
Niez	310	0.04	0.61	0.08	[56]
Chamoïn	409-428	0.56-0.76	59.39-95.22	--	[140]
Girasol					
Magniont (Sunflower-Pith)	580-1100	1.10-5.50	--	0.11-0.22	[141]
Nozahic (Sunflower)	455	0.07-0.14	7.70-18.90	0.09-0.10	
Nozahic (Sunflower-Lime)	459	0.21-0.30	22.80-42.70	0.10	[138]
Nozahic (Sunflower-Oil Lime)	465	0.31-0.47	34.00-60.40	0.10	
Niez (Sunflower)	457	0.14	0.65	0.07-0.11	[55]
Brouard (Sunflower pith)	235	3.00-6.00	3.5	0.05	
Brouard (Sunflower Bark)	512-714	0.39-2.10	5.5-6.1	0.08-0.15	[7]
Lagouïn (Lime-sunflower)	539	0.2	26.6	0.127	
Lagouïn (Metakaolin-sunflower)	511	0.32	55.1	0.128	[5]

Paja de colza					
Brouard (Rape straw)	438	0.15-5.43	3.2	0.07	[7]
Maíz					
Lagouin (Metakaolin-maiz)	534	--	14.7	0.112	[5]

A pesar de que se han realizado diversas investigaciones en las que se involucran las propiedades físico-mecánicas de los concretos vegetales, aún no se ha establecido una norma referente su caracterización mecánica. Lo anterior demuestra que diferentes autores han desarrollado sus investigaciones con diversos métodos para evaluar la deformación y la compresión de este tipo de concretos, lo cual a su vez, deriva en que los resultados obtenidos tienen una gran discrepancia entre ellos [142]. La tabla anterior muestra los resultados de diversas investigaciones, sin embargo, en el caso de los concretos vegetales elaborados con cáñamo, existe una amplia dispersión, esto se refiere a diferentes factores:

**El tipo de bio-agregado utilizado:** En este caso, las diferencias entre los bio-agregados utilizados en las investigaciones, presentan distintas cualidades tanto en su morfología los cuales dan lugar a los intersticios, mismos que tienen un impacto en el desempeño de la conductividad térmica y de la densidad de las mezclas, así como en el contenido de los compuestos hidrosolubles. Estas características afectan principalmente en el fraguado y en la resistencia a compresión.

**Tipo de cementante utilizado:** En algunos estudios se ha utilizado la cal formulada, como se mencionó en párrafos anteriores, este cementante es empleado exclusivamente para construcciones con bio-agregados como el cáñamo, el cual le ayuda en el desarrollo de resistencias a compresión un poco más elevadas, en otros estudios se emplean cementantes que son resultado de mezclar el metacaolín, cal hidratada, activadores alcalinos como el  $K_2SO_4$ , así como de aditivos superplastificantes, en algunos casos se necesitan hasta 2 meses para que las mezclas fragüen en su totalidad.

**Elaboración de las mezclas:** La cantidad de los materiales que se utilizan durante la fabricación de las mezclas tienen consecuencias principalmente en la resistencia compresión, un ejemplo claro es la compactación que se realiza al momento de realizar las mezclas, esto puede influir ampliamente en la resistencia a compresión y en la conductividad térmica.

### 1.11 Durabilidad en los concretos vegetales

De manera general el Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés) define como durabilidad a la capacidad del concreto de resistir la acción de los agentes meteorológicos, agentes químicos, abrasión y otras condiciones de servicio [143]. La durabilidad de los materiales de construcción está en función de diferentes parámetros como lo son [45]:

- Las propiedades de iniciales del material.
- La alcalinidad del cementante usado.
- La naturaleza de los bio-agregados utilizados.
- El ambiente y condiciones de uso.

Existen diversas investigaciones con respecto al estudio de la durabilidad en los concretos vegetales [144]. Las principales pruebas para evaluar el deterioro de los concretos vegetales se muestran a continuación (ver figura 1.32):

**Deterioro ambiental:** Los protocolos desarrollados para evaluar el deterioro ambiental contemplan ciclos de variaciones de humedad donde la temperatura puede variar, se realizan ciclos de hielo y deshielo, de inmersión y secado, almacenamiento en condiciones estáticas de temperatura y humedad relativa, así como aceleramiento de la carbonatación. Estos ciclos pueden durar hasta 3 meses, pero el número de variaciones puede tener un efecto en las propiedades del concreto vegetal [145].

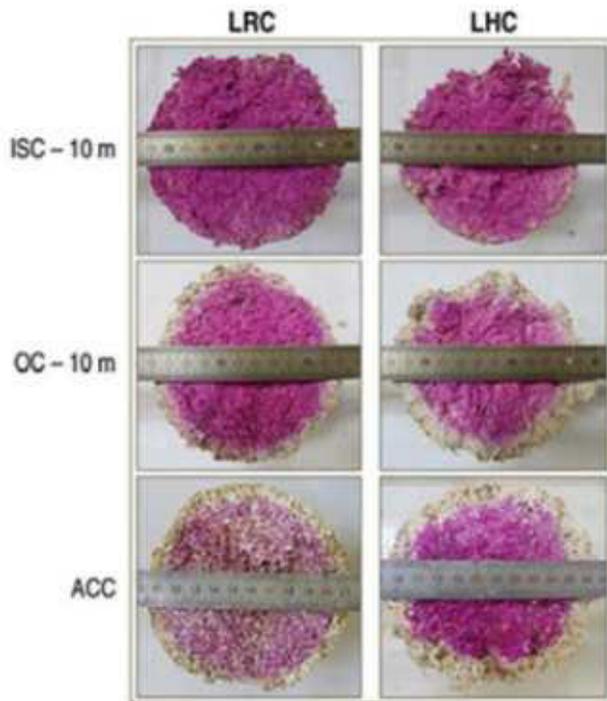
**Deterioro biológico:** Este deterioro se lleva a cabo de manera física y química. En la forma física se desarrollan hifas, los cuales son filamentos fúngicos a partir de esporas en el concreto vegetal, mismas que puede llevar a su deterioro; en la forma química, se debe a la producción de diversos metabolismos que actúan por asimilación o disimilación. La inoculación puede realizarse por medios de depósito de microorganismos, por spray o incubación en especímenes [145].

Una de las investigaciones realizada por Walker [146], destaca que el concreto con cáñamo resiste:

**Ciclos de congelación y deshielo:** En su estudio no hubo aparición de grietas en ninguno de los concretos que analizó, sin embargo, hubo cambios en la consistencia de la mezcla antes de secado y presentaban desmoronamiento, pero la microestructura de la matriz cementante no presentaba ninguna modificación. La carbonatación de la cal contribuyó al mejoramiento de las propiedades mecánicas del mortero de cal, por lo que la carbonatación contribuye a la durabilidad de los concretos vegetales. Así mismo, ayuda a la reducción de la porosidad de la mezcla, pues aumenta el tamaño del carbonato de calcio en comparación del hidróxido de calcio, contribuyendo a reducir la absorción de agua, minimizando la vulnerabilidad del congelamiento. Por otro, en comparación a la cal, los concretos elaborados con metacaolín tienen una reducción considerable en la resistencia a compresión y una mayor pérdida de peso [146].

**Ataque de cloruros:** Los concretos analizados mostraron un aumento en su densidad, esto debido a que la formación de cristales de cloruro dentro de los poros, depositándose en capas, al igual que en el caso de los ciclos de congelación y deshielo; la mezcla se blandeció debido a la absorción y por consecuente la saturación de la mezcla y endureciéndose después del secado, así mismo el concreto vegetal elaborado con el cementante comercial obtuvo mayores resistencias a compresión, esto debido a la hidratación adicional que tuvo mientras se realizaba la prueba [146].

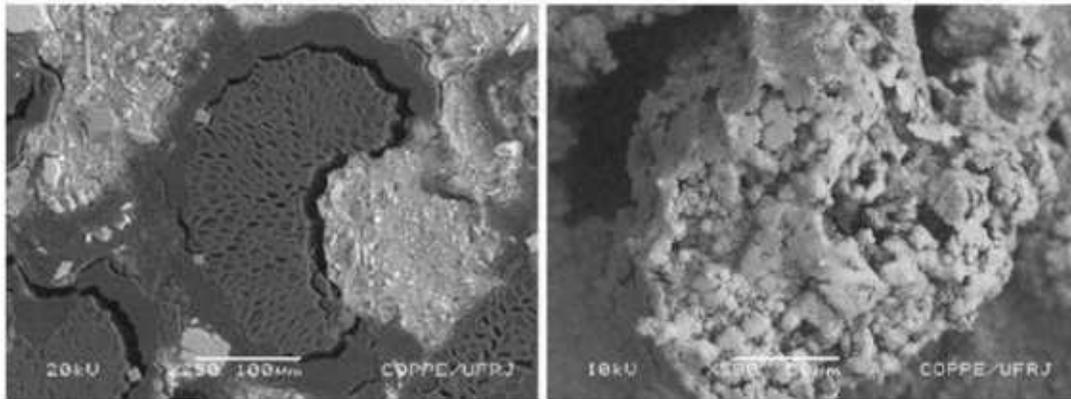
**Resistencia al deterioro biológico:** La alcalinidad de la cal juega un papel importante en la resistencia contra algunos hongos e insectos. En el estudio desarrollado por Walker [146], las altas cantidades de microorganismos que inoculó en los especímenes del concreto vegetal murieron tras varios intentos para mantenerlos húmedos durante 7 meses; ninguno de los concretos que analizó tuvo signos de deterioro, lo cual se debe a la falta de nutrientes para el crecimiento o bien, por el medio alcalino al que estuvieron expuestos. Los resultados obtenidos en su investigación sugieren que el concreto vegetal es resistente al bio-deterioro, aún cuando las condiciones de uso tienen una alta humedad [146].



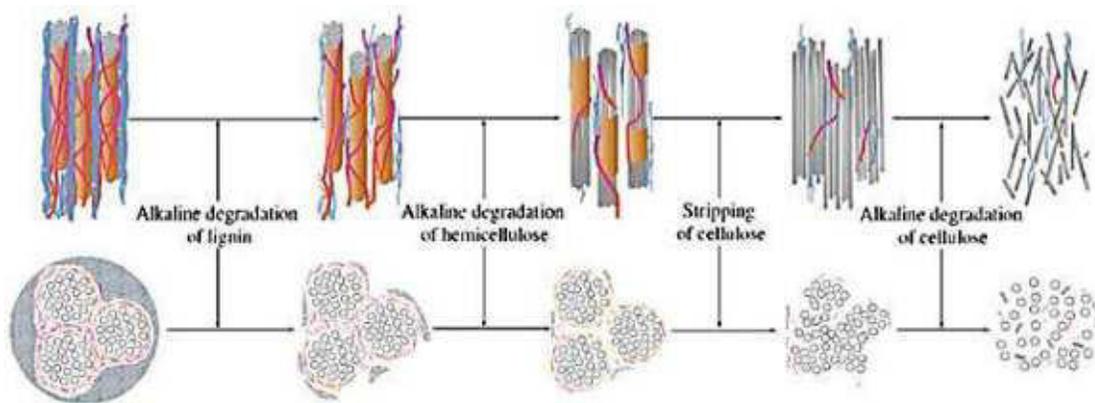
a)



b)



c)



d)

Figura 1.32. a) Carbonatación de los concretos vegetales, b) Hongos en los concretos vegetales, c) Cristalización de cloruros en los poros y d) Degradación de los las fibras por el medio alcalino [45].

## 1.12 Conclusion

Le domaine de la connaissance de la technologie des bétons à base de plantes, en particulier ceux fabriqués avec du chanvre, a considérablement progressé et a montré qu'ils constituent une alternative viable dans l'industrie de la construction ; ceci est dû à leurs propriétés mécaniques, ainsi qu'à leurs diverses applications qui reflètent un bon comportement du point de vue énergétique, car ils contribuent à réduire la consommation d'énergie thermique grâce à leurs propriétés de conductivité thermique et de régulation hygroscopique. Cependant, l'étude des bétons végétaux présente un large champ d'opportunités, car bien que la plupart des recherches abordées dans ce chapitre fassent allusion à certains traitements aux particules de chanvre et à leurs avantages, l'interaction entre la matrice cimentaire ou pouzzolannique n'a pas été complètement comprise, car cela affecte considérablement le processus de prise et le développement potentiel de la résistance à la compression.

D'un point de vue écologique, les bétons végétaux à base de chanvre apportent une contribution considérable à la réduction du cycle du carbone, car ce bio-agrégat, en

plus d'être un sous-produit de l'industrie agricole, a la capacité de stocker le CO<sub>2</sub>, tout en étant très peu coûteux et léger. D'autre part, la disponibilité de ce bio-agrégat dans certaines régions du monde est limitée.

Alors que les prétraitements avec une boue composée du même matériau cimentaire que celui utilisé dans le mélange, de la résine ou de l'huile réduisent l'absorption d'eau du bio-agrégat pendant le processus de mélange. Certaines études ont également montré que l'utilisation de matériaux cimentaires pouzzolaniques formulés avec des géopolymères, tels que le métakaolin avec de la chaux, développe de faibles résistances à la compression aux premiers âges ; mais l'utilisation de certains additifs minéraux tels que le sulfate de potassium (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) peut améliorer le processus d'acquisition de la résistance à la compression et réduire le retrait de séchage de la matrice cimentaire.

Dans le présent travail, une série de bio-agrégats alternatifs au chanvre sont expérimentés, qui sont obtenus à partir de tiges de tournesol et de maïs par une série de processus de transformation innovants. Les bio-agrégats sont soumis à une série d'essais pour déterminer et évaluer leurs propriétés multiphysiques, la méthodologie d'analyse est établie dans le chapitre 2. Ensuite, avec les données obtenues et discutées dans le chapitre 3, on détermine les paramètres pour la conception des bétons végétaux, leur formulation, leur préparation et l'évaluation des résultats obtenus à partir des différents mélanges proposés. Dans le chapitre 4, on évalue les propriétés physiques et mécaniques des bétons d'origine végétale réalisés avec les bio-agrégats obtenus à partir de tiges de tournesol et de maïs, qui seront étudiés et comparés au chanvre, qui est le bio-agrégat de référence.

### **1.13 Conclusión**

El campo del conocimiento de la tecnología de los concretos vegetales, especialmente los elaborados con cáñamo, ha avanzado considerablemente y ha demostrado que son una alternativa viable en la industria de la construcción; esto debido a sus propiedades mecánicas, así como también sus diversas aplicaciones que reflejan un buen comportamiento desde el punto de vista energético, pues ayuda a reducir el consumo de energía calorífica debido a sus propiedades de conductividad térmica y de regulación higroscópica. Sin embargo, el estudio de los concretos vegetales tiene un amplio campo de oportunidad, pues a pesar de que, en la mayoría de las investigaciones abordadas en este capítulo, hacen alusión a algunos tratamientos a las partículas de cáñamo y sus ventajas, no se ha comprendido en su totalidad la interacción entre la matriz cementante o puzolánica, pues esto afecta considerablemente el proceso de fraguado y el desarrollo potencial de la resistencia a compresión.

Desde el punto de vista ecológico, los concretos vegetales elaborados con cáñamo aportan de manera considerable a la reducción del ciclo de carbono, pues este bio-agregado aparte de ser un subproducto de la industria agrícola, tiene la capacidad de almacenar CO<sub>2</sub>, además de tener un costo muy bajo, y un peso ligero. Por otro lado, la disponibilidad de este bio-agregado en algunas regiones del mundo es limitada.

Si bien los pretratamientos con una lechada elaborada con el mismo cementante empleado en la mezcla, resina, o aceite reducen la absorción de agua del bio-agregado durante el proceso de mezclado. También en algunos estudios se muestra que el uso de cementantes puzolánicos formulados con geopolímeros como el metacaolín con cal, desarrollan bajas resistencias a compresión a edades tempranas; pero con el empleo de algunos aditivos minerales como el sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ) se puede mejorar el proceso de la ganancia de la resistencia a compresión y reducir la contracción por secado de la matriz cementante.

En el presente trabajo se experimenta con una serie de bio-agregados alternativos al cáñamo, los cuales son obtenidos del tallo del girasol y del maíz a través de una serie de procesos de transformación innovadora. Los bio-agregados se someten a una serie de ensayos para conocer y evaluar sus propiedades multifísicas, la metodología de análisis se establece en el **capítulo 2**. Posteriormente, con los datos obtenidos y discutidos de los bio-agregados en el **capítulo 3**, se determinan los parámetros del diseño de los concretos vegetales, su formulación, elaboración y evaluación de los resultados obtenidos de las diferentes mezclas propuestas. En el **capítulo 4**, se evalúan las propiedades físicas y mecánicas de los concretos vegetales elaborados con los bio-agregados obtenidos de los tallos de girasol y maíz, las cuales serán estudiadas y comparadas con respecto al cáñamo, el cual, es el bio-agregado de referencia

# Capítulo 2

## *Materiales y métodos*

## Capítulo 2 Materiales y métodos

### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente les techniques de caractérisation utilisées pour chacune des matières premières, ainsi que les méthodes d'essais physiques et mécaniques appliquées aux mélanges de béton végétal. Le programme expérimental est présenté dans le tableau 2.1, qui établit deux étapes expérimentales, divisées en cinq phases. La première étape expérimentale a été réalisée dans son intégralité à l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier en France. La deuxième phase d'expérimentation a été réalisée à l'Universidad Autónoma de Nuevo León, cependant, il n'a été possible de réaliser que la deuxième phase, les autres ayant été suspendues en raison de situations indépendantes de la volonté du projet. Il convient de mentionner que la phase 1, correspondant au broyage, à la séparation et à l'obtention des bio-agrégats, est détaillée au chapitre 3, où une analyse détaillée de l'obtention des bio-agrégats est effectuée.

Tableau 2.1. Programme expérimental

Phase	Expérimentation au LMDC (France)	Expérimentation à IIC-UANL (Mexique)
	Essai	
1 Obtention des bio-agrégats	Trituration Séparation	Trituration Séparation
2 Caractérisation physique des bio-agrégats	Absorption de l'eau Densité Répartition granulométrique Conductivité thermique La microscopie électronique à balayage microscopie vidéo	Absorption de l'eau Densité Répartition granulométrique
3 Fabrication de béton végétal et conservation des éprouvettes	Fabrication de 9 mélanges Durcissement des spécimens Préservation	Formulation des mélanges* Fabrication de 3 mélanges* Durcissement des spécimens* Préservation*
4 Caractérisation physique des bétons végétaux	Densité Conductivité thermique sèche et ambiante résistance à la compression La microscopie électronique à balayage microscopie vidéo Spectroscopie à dispersion d'énergie	Densité* résistance à la compression* La microscopie électronique à balayage*
5 Caractérisation minéralogique des bétons végétaux	Diffraction des rayons X microcalorimétrie thermogravimétrie	Diffraction des rayons X thermogravimétrie

Les essais marqués avec \* devaient être réalisés au Mexique, mais ils n'ont pas été effectués en raison de situations indépendantes de la volonté du projet (en raison de la contingence globale causée par COVID-19, pour laquelle les installations ont été fermées).

## Introducción

En este capítulo, se muestran las técnicas de caracterización empleadas para cada una de las materias primas, así como los métodos de pruebas físicas y mecánicas aplicadas en las mezclas de concretos vegetales. El programa de experimentación se muestra en la tabla 2.1, en la cual se establece realizar 2 etapas de experimentación, divididas en 5 fases, la primera etapa de experimentación se llevó a cabo en su totalidad en la Universidad Toulouse III - Paul Sabatier en Francia. La segunda etapa de experimentación se realizó en la Universidad Autónoma de Nuevo León, sin embargo, solo fue posible culminar hasta la segunda fase, el resto fueron suspendidas debido a situaciones ajenas al proyecto. Cabe hacer mención que la fase 1 correspondiente a la trituración, separación y obtención de los bio-agregados, se detalla en el capítulo 3 donde se realiza un análisis detallado sobre la obtención de los bio-agregados.

**Tabla 2.1. Programa experimental**

Fase	<i>Experimentación en LMDC (Francia)</i>	<i>Experimentación en IIC-UANL (México)</i>
	Ensaye	
1 Obtención de los bio-agregados	Trituración Separación	Trituración Separación
2 Caracterización física de los bio-agregados	Absorción de agua Densidad Distribución del tamaño de partícula Conductividad térmica Microscopía electrónica de barrido Videomicroscopía	Absorción de agua Densidad Distribución del tamaño de partícula
3 Fabricación de concreto vegetal y preservación de especímenes	Fabricación de 9 mezclas Curado de los especímenes Preservación	Formulación de las mezclas* Fabricación de 3 mezclas* Curado de los especímenes* Preservación de los especímenes*
4 Caracterización física de los concretos vegetales	Densidad Conductividad térmica seca y ambiente Resistencia a la compresión Microscopía electrónica de barrido Videomicroscopía Espectroscopía de dispersión de energía	Densidad* Resistencia a la compresión* Microscopía electrónica de barrido*
5 Caracterización mineralógica de los concretos vegetales	Difracción de rayos X Microcalorimetría Termogravimetría	Difracción de rayos X* Termogravimetría*

Los ensayos marcados con \*, fueron propuestos para realizarse en México, sin embargo, no se realizaron debido a situaciones ajenas al proyecto (debido a la contingencia mundial provocada por el COVID-19, por tal motivo, las instalaciones fueron cerradas).

## 2.2 Materiales

### 2.2.1 Bio-agregados

El cáñamo es una planta que tiene diversas aplicaciones industriales, sin embargo su disponibilidad en algunos países es limitada [147], a través de diversos estudios, se ha hecho notar que la estructura bifásica del tallo de las plantas de girasol y maíz, pueden ser una alternativa viable para sustituir al cáñamo en la fabricación de concretos vegetales.

El nombre científico del girasol es *Helianthus annuus* (ver figura 2.1a), pertenece a la familia *Asteraceae* la cual es de las más diversas, ya que tiene entre 950 a 1,450 géneros y cerca de 30,000 especies en todo el mundo. Tiene su origen en Mesoamérica, estudios arqueológicos han descubierto una especie de semilla (aquenio) en el estado de Tabasco y otro en el estado de Morelos (ver figura 2.1b); el primero, data de entre los años 2,875 a 2,575 a. C. y el segundo entre los años 330 a 250 a. C [148]. El girasol es un cultivo de gran importancia económica, por lo general se trata de una planta de tipo silvestre [148], además es uno de los principales cultivos en Europa y el cuarto cultivo en el mundo después de la soya, la palma y la canola. A su vez, el 13% del aceite vegetal que se produce en el mundo es de esta planta [149].



a)

b)

Figura 2.1. a) Planta de girasol, b) aquenios de girasol [148]

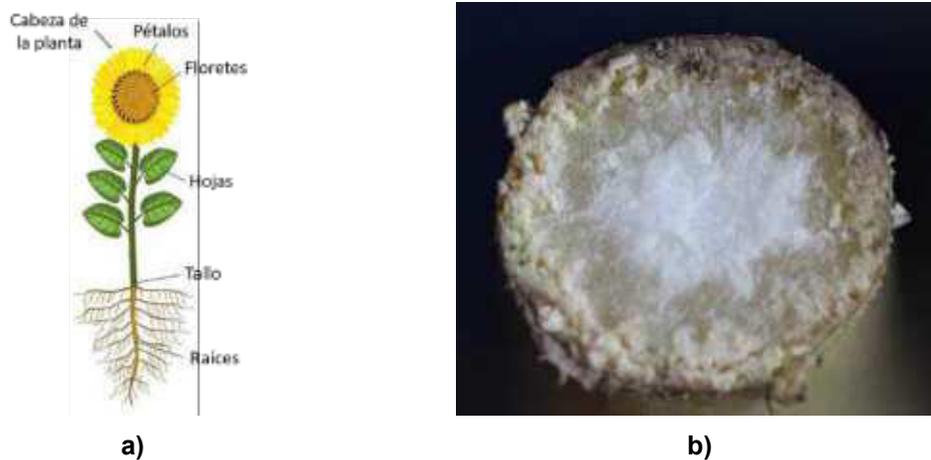
Esta planta tiene una altitud entre 2 y 3 metros, y debido al clima que caracteriza a esta región europea el ciclo de siembra y cosecha entre abril y octubre; así mismo tiene la vida del girasol ronda entre los 160 días. La estructura de la planta es la siguiente (ver figura 2.2) [150]:

**Cabeza:** Su diámetro varía de 15 a 30 centímetros cuando se encuentra en plena floración entre los meses de julio y agosto. Esta parte es el aparato

reproductor de la planta. Las flores liguladas tienen una corola que rodea la cabeza, los pétalos presentes en estas plantas son estériles. La cabeza de la planta de girasol está compuesta por 2,000 flores tubulares llamadas floretes las cuales contienen los órganos reproductores.

**Aparato vegetativo (tallo):** Este tiene un diámetro entre 2 y 8 centímetros, el cual es rígido y de una apariencia recta, es ella tiene entre 20 y 30 hojas, los cuales tienen un papel importante en la producción de las reservas de lípidos en las semillas.

**Raíces:** La raíz principal puede tener una longitud de 2 metros de profundidad, lo cual hace a la planta resistente a la sequía.



**Figura 2.2. a) Estructura de la planta de girasol, b) corte transversal del tallo de girasol**  
[150]

La flor y las semillas de girasol son partes de la planta que tienen diversos usos, desde la preparación de aceite vegetal, hasta la elaboración de medicamentos que ayudan a reducir enfermedades cardiovasculares. Sin embargo, el tallo de esta planta no tiene una utilidad y es desechado. Por otro lado, la eficiencia del consumo de agua es muy baja, por cada metro cúbico de agua consumida, se producen de entre 2 a 3 kilogramos de flor y semillas, el girasol, es una planta que tiene un control deficiente con respecto a la pérdida de agua por transpiración; pero esta planta posee una gran capacidad de recuperación tras un periodo de sequía, cuando se le aporta agua en abundancia; además, a diferencia del cáñamo, no necesita el uso de abonos químicos que causen un daño severo a la tierra donde se le cultiva [151].

De igual manera, la composición bifásica del tallo de girasol ayuda a poder tener 2 tipos de bio-agregados, el primero es la corteza y el segundo es la médula, y dependiendo de los requerimientos del constructor, se puede hacer una mezcla de ambos materiales. Por otro lado, la estructura microestructura de ambos bio-agregados, permite tener 2 características principales: densidad aparente y absorción de agua.

El nombre científico del maíz es planta es *Zae Mays* (figura 2.3a), pertenece a la familia de las gramíneas, de esta planta se estiman que hay alrededor de 69 especies diferentes. el origen del maíz data desde 8,700 años a. C. era [152], tras años de estudios arqueológicos se ha encontrado que el teocintle (figura 2.3b) es el ancestro directo del maíz, cuya aparición se registra en la región norte del estado de Guerrero en el municipio de Iguala de la Independencia en la localidad de Tlaxmalac [153]. En este estudio se utilizó maíz francés y mexicano, al igual que en el caso de la planta de girasol, el maíz tiene una alta disponibilidad en ambos países, y en el caso de México los tallos adquiridos no tuvieron algún costo.

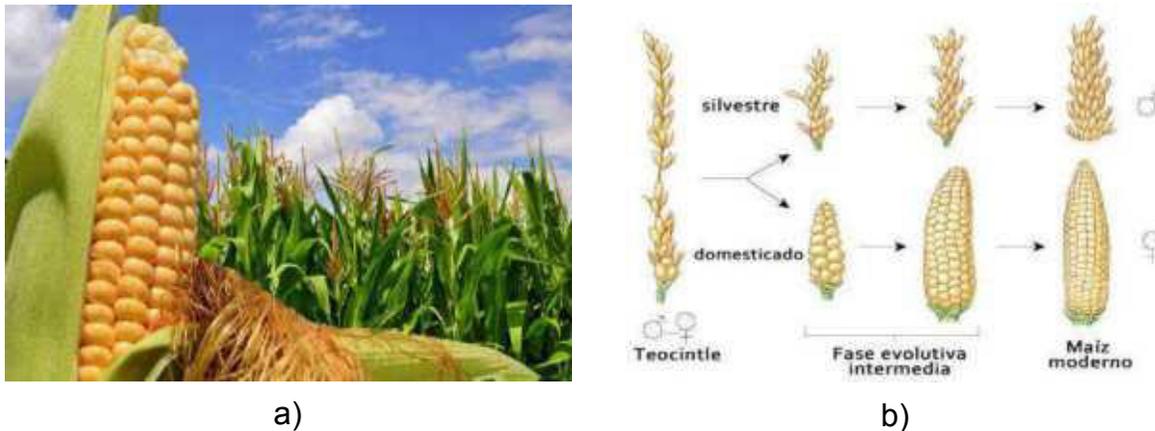


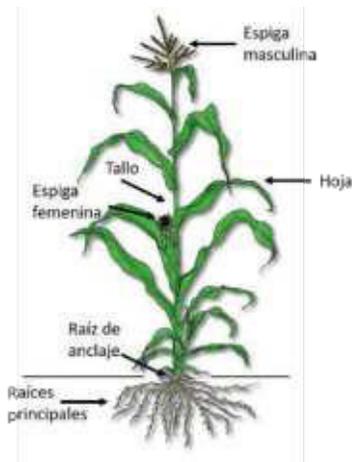
Figura 2.3. a) maíz, b) evolución del teocintle [152]

En la planta de maíz, se observan 3 puntos principales (figura 2.4) [154]:

**Espigas:** Estas tienen la función de órganos reproductores masculinos y femeninos los cuales liberan y reciben el polen respectivamente.

**Aparato vegetativo (tallo):** Este está compuesto por tres capas, una epidermis exterior, la cual es impermeable y transparente, una pared por donde circulan las sustancias y nutrientes y la médula, donde se almacenan las reservas alimenticias y principalmente azúcares, este tiene una altura de entre 2.5 a 3 metros, según la especie de maíz.

**Raíces:** Esta planta tiene dos tipos de raíces, las primarias que son las raíces de anclaje y se forman en los nudos primarios de la planta, y las secundarias cuales son las raíces principales de la planta y se entierran a una profundidad de 40 a 60 centímetros.



a)



b)

**Figura 2.4. a) Estructura de la planta de maíz, b) Sección transversal de la planta de maíz [154]**

La estructura del tallo de maíz tiene similitud al del tallo de girasol, se compone de una corteza que, en comparación del girasol, la corteza del maíz tiene un menor grosor, y la médula tiene la misma forma, pero en la microestructura, la principal diferencia es el tamaño de sus poros y la morfología de estos. Al igual que en el caso del tallo de girasol, el tallo de maíz cuenta con una estructura bifásica, por lo que podemos obtener dos tipos de bio-agregados (corteza y médula), así mismo, dependiendo de los requerimientos del constructor se puede tener una mezcla de ambos bio-agregados. Por otro lado, el tallo del maíz es una planta que después de ser cosechada, es utilizada en la elaboración de forraje, el cual es materia prima para la elaboración del alimento para ganado, o bien, este material es desechado a través de la incineración o como abono para los nuevos cultivos de maíz, por lo que algunas emisiones de CO<sub>2</sub> pueden ser elevadas.

El nombre científico del cáñamo es *Cannabis sativa* (ver figura 2.5), existen 3 géneros de esta planta, se especula que esta planta ha sido cultivada por el hombre desde el año 4,000 a. C. y se cree que es originaria de China. Esta planta, que tiene una baja disponibilidad en Francia, crece en un periodo de entre 4 a 5 meses, alcanzando una altura de entre 1 a 6 metros, y dependiendo la genética de la planta puede aprovecharse desde una altura de 30 cm del suelo y, puede crecer entre 2 y 11 centímetros diarios en condiciones ideales [155].



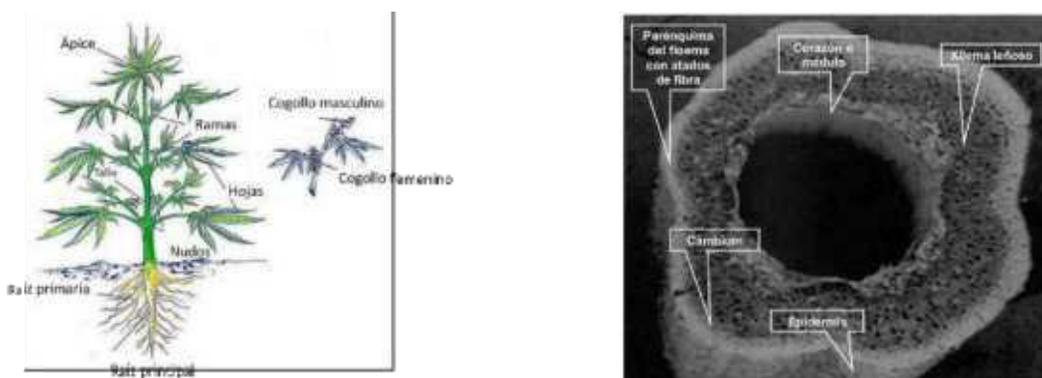
**Figura 2.5. Cáñamo** [156]

El cáñamo se compone de la siguiente manera (*figura 2.6*) [156]:

**Ápice:** Es la parte superior de la planta, en la que se desarrolla el tallo y las hojas.

**Tallo:** Esta parte se compone de corteza (epidermis) y cambium, constituyen el 40% del peso del tallo seco, el floema que compone el 30% del peso del tallo seco, así como de un núcleo leñoso llamado xilema que rodea a la médula que representa el 30% del peso seco del tallo. A su vez la xilema está compuesto por fibras que son variables en longitud (20 a 40 mm).

**Raíces:** Está compuesto por las raíces primarias las cuales absorben una parte de la humedad del suelo. Así mismo la raíz principal tiene la función de dar estabilidad a la planta.



**Figura 2.6. a) Estructura de la planta de cáñamo b) corte transversal del tallo de cáñamo** [155]

El tallo de esta planta pasa por una serie preparaciones para poder ser empleado como un bio-agregado, de igual manera, cuando esta planta está recién cortada, se puede apreciar que tiene una médula en el interior, pero en el proceso de obtención del bio-agregado, le médula se separa y solo se comercializa la corteza del tallo.

Por otro lado, las semillas de esta planta tienen se utilizan dar inicio nuevamente al cultivo de esta planta.

### 2.2.1.1 Origen de los bio-agregados en Francia

Los tallos de las plantas de girasol y maíz utilizados en esta investigación provienen de la región de Hautes Pyrénées, el cual se encuentra localizado en la región de Occitania, que limita al norte del departamento de Gers (ver figura 2.7a encerrada con círculo color rojo), el cual colinda con Landes, Lot y Garona, Tarn y Garona, Alto Garona y los Pirineos atlánticos. Esta población se caracteriza por ser una de las regiones productivas de cereales, maíz y girasol.



a)



b)



c)

Figura 2.7. a) Ubicación del departamento de Gers, b) Plantío de girasol y b) plantío de maíz

Por otro lado, el cáñamo utilizado en esta investigación, es de la marca Biofibat (ver figura 2.8), el cual es un bio-agregado de origen francés, compuesto por fragmentos de virutas de cáñamo (fibras de celulosa) calibradas y limpias, el cual es resultado de la desfibración de la paja del cáñamo, y en cuyo proceso de transformación no se ha utilizado agua o algún disolvente, este bio-agregado tiene una certificación de calidad emitida por Construire en Chanvre [60]. Este bio-agregado proviene de la empresa CAVAC en Sainte-la-Plaine.



a)



b)

**Figura 2.8. a) Cáñamo comercial “biofibat” b) Cáñamo comercial tamizado con una malla de 1 y 4 milímetros de abertura [50]**

### **2.2.1.2 Origen de los bio-agregados en México**

Los tallos de la planta de maíz utilizados en este estudio provienen de la zona centro del estado de Guerrero, del municipio de Quechultenango (ver figura 2.9a encerrada en el círculo color rojo) y 2.9b), el cual se localiza a 860 metros sobre el nivel mar. Se sitúa en la vertiente interior de la sierra Madre del Sur y es parte de los municipios que conforman la región centro del estado. Colinda al norte con Chilapa de Álvarez y Atlixac, al sur con Ayutla de los Libres, Tecoaapa y Juan R. Escudero, al este con Acatepec y al oeste con Mochitlán. Dicha población se caracteriza por ser uno de los principales productores de maíz, frijol, grano y forraje de sorgo, así como jitomate y mango ataulfo [157].



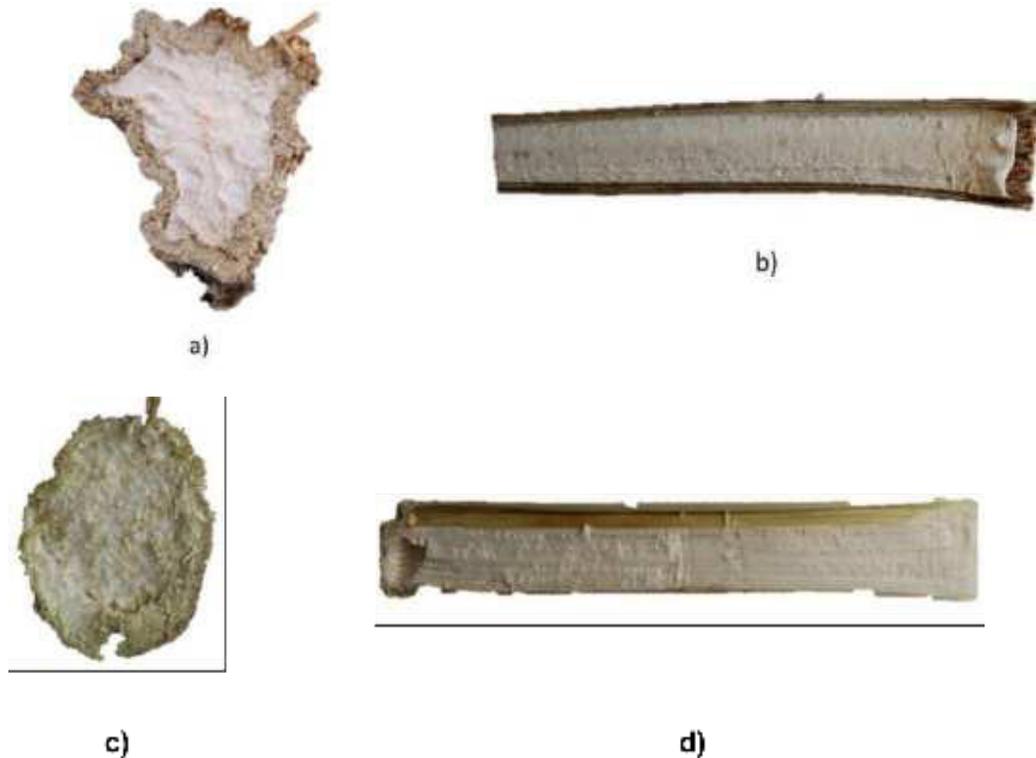
a)



b)

Figura 2.9. a) Ubicación del municipio de Quechultenango, b) Plantío de maíz en la zona de Quechultenango Guerrero [157]

Por otro lado, la disponibilidad de los cultivos de maíz en Francia y en México es mayor con respecto al girasol y también en comparación del cáñamo (*ver la figura 2.10*).



**Figura 2.10. a) Corte transversal del tallo de girasol, b) Corte longitudinal del tallo de girasol, c) Corte transversal del tallo de maíz y d) Corte longitudinal del tallo de maíz**

## **2.2.2 Cementantes**

Como es sabido, en la industria de la construcción, el cemento es el material más utilizado a nivel mundial, sin embargo, en la fabricación de concretos vegetales se han propuesto diversos materiales cementantes, entre los materiales cementantes más utilizados se encuentran la cal formulada (este es el material comúnmente utilizado en la fabricación de concreto con cáñamo), también, se encuentra el metacaolín y la cal apagada. En algunos estudios se ha demostrado que la mezcla elaborada con metacaolín y cal en ciertos porcentajes tienen una respuesta mecánica y físicamente favorable, además de que el efecto negativo al ambiente es menor con respecto a las mezclas elaboradas con cemento portland [92,119,131,158,159]

### **2.2.2.1 Cementantes empleados en Francia**

La cal formulada que se utilizó en este estudio fue “batichanvre”, la cual es una cal preformulada, está compuesta por un 70% de cal hidráulica y cal apagada, así como un 30% de cementante hidráulico y adición puzolánica. La composición química se muestra en la tabla 1.3 del capítulo 1 [56,92,104]. La difracción de rayos X (ver figura 2.11), muestra sus componentes mineralógicos [159]. Por otro lado, el silicato dicálcico y el silicato tricálcico presente en grandes cantidades son los responsables del carácter hidráulico de este cementante.

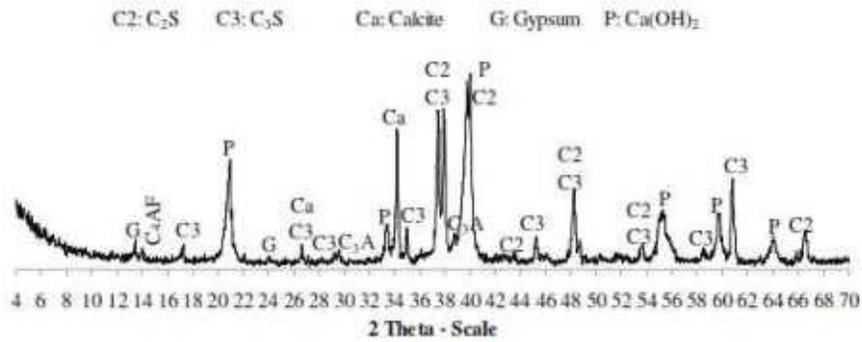


Figura 2.11. Difracción de rayos X aplicado en la cal formulada [159]

Tabla 2.2. Composición química y mineralógica de cal formulada en porcentaje [98].

Ca(OH) <sub>2</sub>	Ca <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Si	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cementante hidráulico	Otros
30-60	5-20	1	0.5-5	10-50	>20	<1

La cal apagada utilizada en la formulación del cementante puzolánico fue cal apagada de la marca calcinor, esta se vende en una presentación de 25 kg. Esta cal apagada tiene un peso volumétrico aparente de 700 kg/m<sup>3</sup>, así como una densidad absoluta de 2200 kg/m<sup>3</sup>. Su composición mineralógica se detalla en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química y mineralógica de cal apagada Calcinor [160].

Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	SO <sub>3</sub>
94.00	1.60	0.70	0.60	0.20	0.10	0.02	0.10

Por otro lado, en la figura 2.12 se muestra la composición mineralógica a través de la difracción de rayos X, en la cual se detectó la presencia de portlandita (P) y , calcita (Ca) [161]

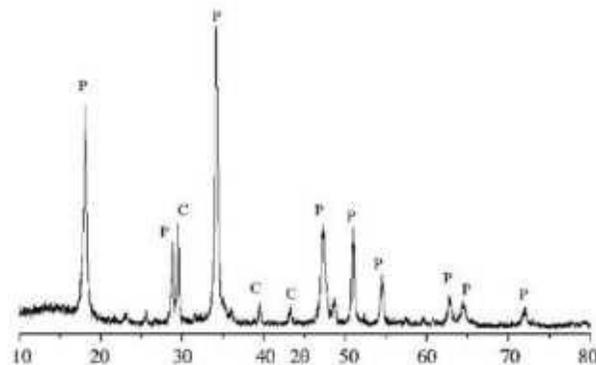


Figura 2.12. Difracción de rayos X aplicado a la cal apagada (P, Portlandita, y C, Calcita) [161]

### 2.2.2.2 Cementantes empleados en México

El cemento utilizado para el desarrollo experimental fue un cemento Portland ordinario, de clase resistente 40 R (CPO 40 R) de la marca CEMEX. Este cemento fue seleccionado debido a que no contiene alguna adición de puzolanas, así mismo por la compatibilidad química que presenta con los aditivos superplastificantes [162,163]. La norma ASTM C-150-12 establece que el contenido de trióxido de azufre no debe ser mayor al 3%. El análisis de difracción de rayos X aplicado al cemento, (ver figura 2.13), destaca que está compuesto por C<sub>2</sub>S (silicato dicálcico), cuyos picos más altos se reflejan en los ángulos 30 y 60. También, se observan los picos característicos de C<sub>3</sub>S (silicato tricálcico), la mayor intensidad de dichos picos se refleja en los ángulos 29 y 42; por otro lado, se muestra un pico de C<sub>3</sub>A (aluminato tricálcico), la mayor intensidad se refleja en los ángulos 35 y 63; y por último se presentan picos de Ca(OH)<sub>2</sub> (portlandita denotado con la letra C) en el ángulo 43.

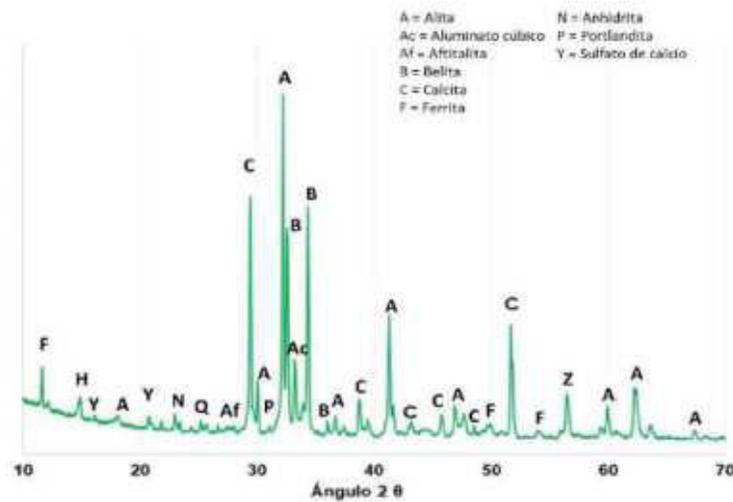


Figura 2.12. Difracción de rayos X aplicado en cemento CPO 40-R

En la tabla 2.4 se muestra la composición química del cemento CPO 40-R.

Tabla 2.4. Composición química del cemento CPO 40-R

Material	Composición química en porcentaje							
CPO 40-R	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Otros	LOI
	66.78	20.71	1.42	2.77	6.08	1.35	0.89	2.54

De acuerdo con la NMX-C-414-ONNCCE, este cemento presenta un excedente de 4.20% de SO<sub>3</sub> puede deberse a la adición de yeso que se hace durante el proceso de molienda para regular el tiempo de fraguado del cemento. Al compararse con la norma ASTM-C-150, el contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se encuentra dentro de los porcentajes requeridos por dicha norma [162,163].

La cal hidratada utilizada fue de la marca Rebas. En la figura 2.13 se muestra un difractograma de la cal hidráulica, en la cual se observan los picos correspondientes

al hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (representantes de la portlandita, denotado con la letra P) los picos más fuertes de esta fase se presentan a los 18, 35, 48 y 53 grados y del carbonato del carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ) de calcio cuyo pico más alto se presenta a 29 grados [164].

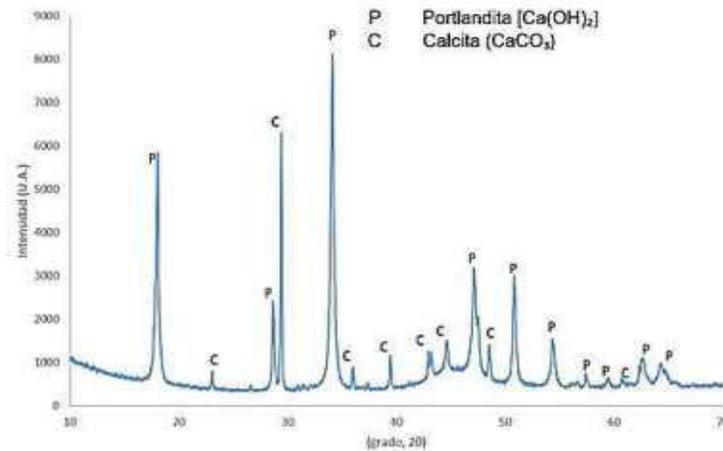


Figura 2.13. Difracción de rayos X de la cal hidratada [164]

En la tabla 2.5 se muestra la composición química de la cal hidratada utilizada en México. La ficha técnica de este material muestra una composición química del 95% en contenido de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Así como un contenido de 1.5% de agua libre y un contenido máximo de óxido de calcio de 1.5% [165].

Tabla 2.5 Composición química de la cal hidratada REBASA en porcentaje

Material	Composición química en porcentaje		
	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	CaO
Cal Hidratada	90%	1.5%	1.5%

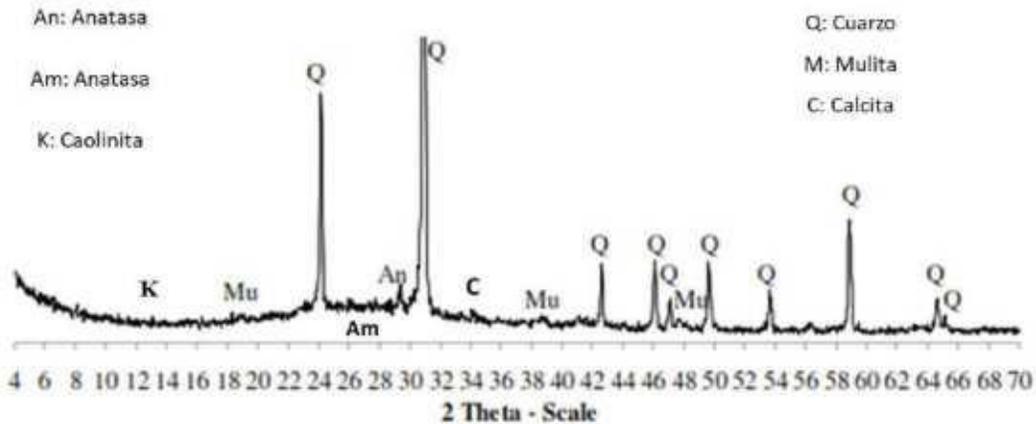
## 2.2.3 Adiciones

### 2.2.3.1 Adiciones utilizadas en Francia

El metacaolín utilizado fue de la marca Argeco, la composición química se detalla en la tabla 2.6. El metacaolín es resultado de una calcinación rápida, es decir, se realiza en décimas de segundo. En la figura 2.14, se muestra el análisis de difracción de rayos X, el cual presenta la composición mineralógica del metacaolín, donde se aprecia que uno de los principales minerales cristalizados que se producen es el cuarzo (Q), algunos picos correspondientes a la anatasa (An), calcita (Ca) y mullita (Mu), este último mineral corresponde a la reestructuración del metacaolín durante la calcinación y no tiene efecto con el hidróxido de calcio [159].

**Tabla 2.6. Composición química de metacaolín [159].**

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
67.10	26.80	1.12	0.11	2.56	0.01	0.12	0.13	--	0.84



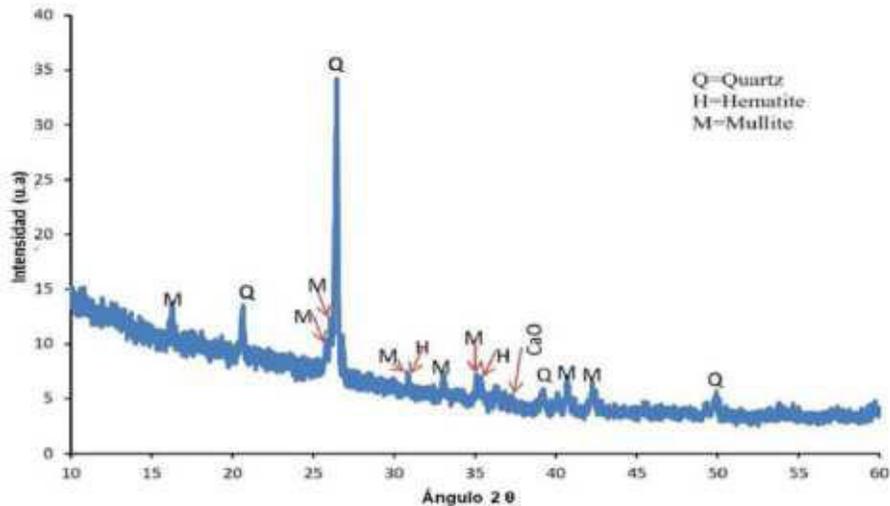
**Figura 2.14. Difracción de rayos X aplicado en el metacaolín [159].**

El metacaolín es un material que tiene diversas ventajas, tanto ambientales como beneficios que tienen un efecto positivo en la fabricación de concreto, siendo un sustituto parcial o adicionado al cemento portland, desarrollando mayores resistencias a compresión, así mismo aporta en la disminución del calor de hidratación en colados masivos, mitiga la reacción álcali-agregado y puede ser un factor de mejora en la durabilidad del concreto al desarrollar matrices de pasta más densas y compactas, y por lo tanto menos porosas. También, disminuye la permeabilidad, evita la formación de la eflorescencia, previene daños por ataques de sulfatos y cloruros y aumenta la resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo. [92,166]. Por otro lado, a diferencia de la fabricación del cemento donde se necesitan entre 1450 y 1500 °C, para realizar la formación del caolín al metacaolín, requiere una menor cantidad de energía de entre 650 a 700 °C en 3 horas aproximadamente; por tal motivo, la emisión de CO<sub>2</sub> es menor en comparación de la fabricación del cemento [92,95].

### **2.2.3.2 Adiciones utilizadas en México**

Las propiedades químicas de la ceniza volante provienen de las propiedades del carbón utilizado, la técnica de la combustión, el manejo y el almacenamiento de este. En el caso del carbón bituminoso, los principales componentes son el silicio, alúmina, óxido de hierro y el calcio; así como carbón no calcinado y ha sido medido por medio de la pérdida por ignición. Las cenizas de lignito se caracterizan por concentraciones más altas de óxido de calcio y magnesio y porcentajes reducidos de sílice y óxido de hierro, así como un menor contenido de carbono, en comparación con las cenizas de carbón bituminoso [92,100,101]. La ceniza volante utilizada en esta investigación proviene de la carboeléctrica “José López Portillo”,

ubicada en Nava Coahuila, esta es una ceniza de tipo F. En la figura 2.15 se muestra un difractograma aplicado a dicho material, en el cual se observa que está compuesta por cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) denotado por la letra Q, también por hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) denotado por la letra H y por mullita ( $2(\text{Al}_2\text{O}_3) \text{SiO}_2$ ) denotado por la letra M [167].



**Figura 2.15. Difracción de rayos X de la ceniza volante [167]**

En la tabla 2.7, se presenta la fluorescencia de rayos X realizada a la ceniza volante. La norma ASTM-C618-22, especifica que en la composición química la suma del óxido de silicio, del óxido de aluminio y del óxido de hierro debe ser mayor al 70%; lo anterior se cumple debido a que en la ceniza analizada se tiene una sumatoria total del 93%.

**Tabla 2.7 Composición química de la ceniza volante**

Material	Composición química en porcentaje							
	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	Otros
Ceniza volante	72.00	2.20	11.20	10.30	0.50	1.30	1.50	1.00

Las cenizas volantes bajas en calcio, que tienen muy pocas propiedades de autocementación, se hidratan cuando se agregan álcalis y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Los productos de hidratación como  $\text{C-S-H}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  y  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  se forman [168–174]. A medida que se suministra más  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , una mayor cantidad de sílice y alúmina se adhiere en la ceniza volante. El grado de hidratación de las cenizas volantes aumenta con la presencia de yeso, debido a que la superficie se activa por la destrucción de la estructura del vidrio y las fases cristalinas causadas por la disociación de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en reacción con  $\text{SO}_4^{2-}$  [92,100,101].

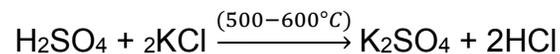
Para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería civil, la decisión de utilizar cenizas volantes en el concreto dependerá de la disponibilidad de los materiales, la práctica en la fabricación del concreto y, por otro lado, el factor económico. Sin embargo,

algunos tipos de concretos especiales, requieren el uso de materiales cementantes suplementarios como la ceniza volante, u otros subproductos minerales para alcanzar propiedades específicas. En particular, los concretos de alta resistencia (60 MPa a 28 días) y los concretos masivos compactados con rodillos dependen del uso de cenizas volantes para su éxito estructural y económico [92,100,101,167,169–172,174,175].

#### 2.2.4 Aditivos

Los aditivos son aquellos materiales que además del cemento portland, el agua y los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. Los aditivos están elaborados para mejorar o dar esas propiedades al concreto en estado fresco o endurecido. Estas cualidades pueden obtener de manera fácil y económica con la selección de los materiales adecuados, sin embargo, ningún aditivo puede sustituir las buenas prácticas en la construcción. En el caso de los concretos vegetales, se utilizan aditivos como plastificantes, los cuales brindan trabajabilidad al concreto vegetal.

El sulfato de potasio está compuesto por sal potásica del ácido sulfúrico, la producción industrial se obtiene atacando el cloruro de potasio con ácido sulfúrico concentrado a elevadas temperaturas (500-600 °C), la reacción produce el sulfato de potasio y libera ácido clorhídrico que deberá ser recuperado ya que es sumamente tóxico y afecta sensiblemente el ambiente, su fórmula química se expresa de la siguiente manera:



El sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) funciona como un activador el cual favorece la formación de ettringita, y por consecuente, mejora la resistencia a compresión de la pasta, así mismo ayuda a mantener la estabilidad volumétrica de la mezcla. Así mismo, la presencia de este compuesto reacciona con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , lo que ayuda a formar yeso [2,159]:



y posteriormente ettringita [2,88]:



##### 2.2.4.1 Aditivo superplastificante utilizado en Francia

El aditivo utilizado en esta investigación es de la marca Sika, del tipo viscocrete 20 HEVP, este aditivo es un reductor de agua de alto rango, el cual ayuda a reducir la porosidad y ayuda en el mejoramiento del desempeño del cementante. En la tabla 2.8, se muestran sus características.

**Tabla 2.8 Características del aditivo superplastificante**

Densidad (20 °C)	1090 kg/m <sup>3</sup>
Valor de pH	4.5
Viscosidad (23 °C)	145 mPa.s
Cloruros	< 0.1%
Contenido de óxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	< 2%
Sólidos	40%
Dosificación	0.2 – 2%

### **2.2.4.2 Aditivo superplastificante utilizado en México**

El aditivo superplastificante (SF) utilizado es de la marca EUCOMEX de nombre Plastol Precast Plus. Es un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante; está diseñado especialmente para dar alta fluidez y alta reducción de agua. Cumple con la norma ASTM 494 tipo A y F como reductor de agua de alto rango, este aditivo no contiene iones cloruros adicionados que puedan promover la corrosión en el concreto. El cual tiene una densidad de 1.11 g/cm<sup>3</sup>.

## **2.3 Obtención de los bio-agregados**

En este apartado se presentan los equipos utilizados para la transformación y obtención de los bio-agregados, así como la separación por estructura: corteza, médula y mezcla de corteza y médula.

### **2.3.1 Obtención de los bio-agregados utilizados en Francia**

#### **2.3.1.1 Molienda de los tallos**

La trituración de los tallos de girasol y maíz en Francia se realizó con un molino de martillos de la marca Electra, tipo BC-P, el cual se muestra en la figura 2.16.



**Figura 2.16. Molino utilizado para la trituración del tallo de girasol y maíz**

### 2.3.1.2 Separación de los bio-agregados

El proceso de separación se realizó con una banda mecánica, un ventilador y un sistema de aspiración y almacenamiento. En la figura 2.17 se muestra la forma de operación de la banda mecánica donde:

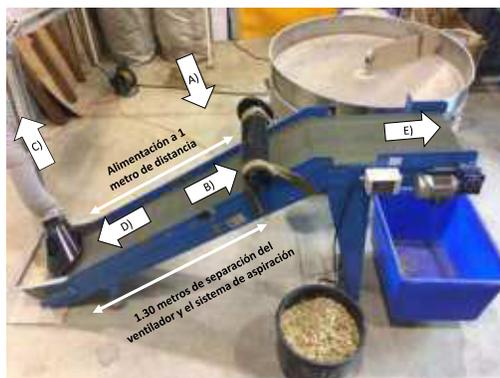


Figura 2.17. Sistema de separación de bio-agregados

- Se deposita el material
- Sentido del giro de la banda
- Sistema de aspiración y almacenamiento
- Debido a la baja densidad de la médula se implementó el uso de un ventilador que ayuda a la médula descender hacia el sistema de aspiración, mientras la corteza se mantiene en la banda; y por último,
- Se dispone de un recipiente de recuperar la corteza

En la misma figura se muestra la distancia de colocación del ventilador, así como la distancia de la alimentación del sistema; la banda tiene una inclinación de 25 grados.

### 2.3.2 Obtención de los bio-agregados utilizados en México

En la figura 2.18, se desglosa la metodología empleada para la transformación del tallo de la planta de maíz en los 3 bio-agregados (corteza de maíz CB, médula de maíz CP y la mezcla de médula y corteza de maíz CM), la confección de los bio-agregados está compuesta por:

- Separación manual de la corteza y la médula
- Molienda
- Tamizaje a través de la malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura
- Tamizaje a través de la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura

La trituración se realizó con un molino forrajero con motor a gasolina de la marca honda de 13 HP (ver 2.20a). El tamizaje se realizó con un tamiz automática de la marca Swequipos, del modelo LS30C666 de ½ hp y de 1140 RPM. En el cual se utilizó un tamiz de 1 mm<sup>2</sup> de abertura (ver figura 2.20B).



a)



b)

**Figura 2.18. a) Molino forrajero, de motor a gasolina, motor Honda de 13 HP. b) Tamiz Swequipos, del modelo LS30C666 de ½ hp y de 1140 RPM**

## **2.4 Métodos de caracterización de los bio-agregados.**

La caracterización de los bio-agregados permite conocer sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales tienen un efecto positivo o negativo durante la vida útil de los materiales. Para determinar dichas propiedades, existen protocolos que delimitan los procesos de análisis. En este trabajo, se analizaron las propiedades físicas de los bio-agregados con el protocolo RILEM TC-236-Biobased Building Materials [23]. El objetivo de este protocolo es conocer las características de los materiales que se emplearán en la fabricación de concreto vegetal, pues los bio-agregados pueden cambiar sus propiedades físicas dependiendo de su origen, es decir, las condiciones climáticas, el tipo de suelo, etc. Esta metodología de análisis es aplicada en materiales alternativos y/o ecológicos como el cáñamo, fibra de coco, lino, paja, entre otros.

### **2.4.1 Muestreo y preparación de los bio-agregados.**

Antes de realizar el muestreo de los bio-agregados es importante mezclar las partículas pues durante el transporte y almacenamiento algunas vibraciones pueden ocasionar que las partículas finas se desplacen al fondo de los recipientes o las bolsas, así mismo la electroestática presente en las partículas causa que el material quede adherido en las paredes de los recipientes o las bolsas.

Para realizar el cuarteo, es necesario un kilogramo del material, esta cantidad puede variar según la densidad el mismo; en la figura 2.19 se muestra el procedimiento de cuarteo. Cabe señalar que después de realizar el cuarteo la cantidad final obtenida no es la misma que la original, esto debido a que existen pérdidas durante el proceso [23]:

- Se coloca el bio-agregado en una superficie plana y limpia, posteriormente, se homogeniza manualmente, colocándolo en forma de cono.
- Posteriormente se hace el cuarteo del material, utilizando una espátula.
- Esto se repite hasta obtener las cantidades necesarias para los ensayos que se realizarán.

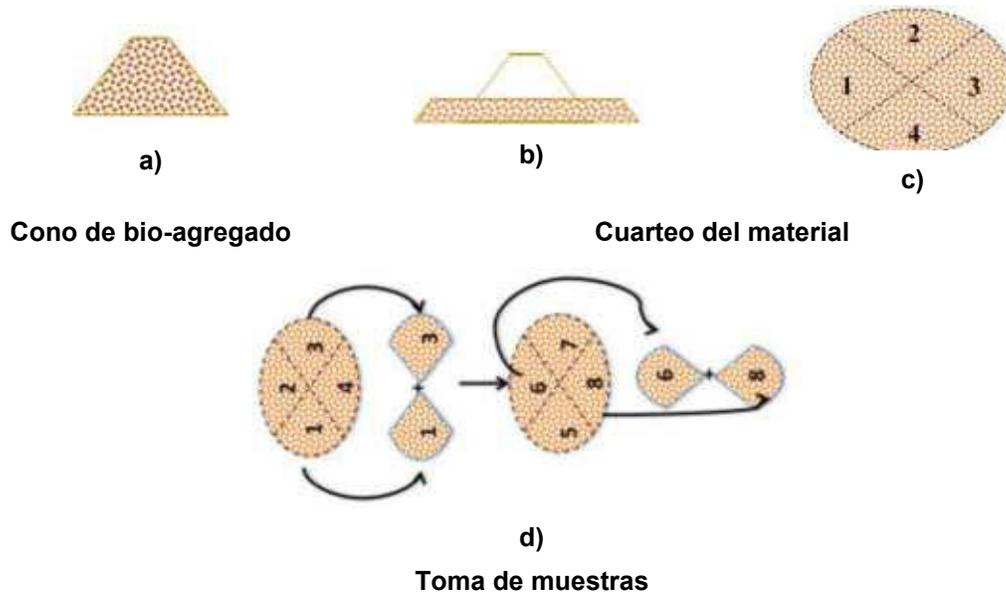


Figura 2.19. Proceso de selección y muestreo, a) Cono de bio-agregado, b) enrase de la superficie del cono, c) separación y cuarteo, d) selección y toma de muestras [15]

### 2.4.1 Videomicroscopía

Esta técnica de caracterización se utiliza para medir la longitud, anchura, espesor y diámetro de las fibras y partículas que componen a los bio-agregados, así mismo se puede observar de manera general la unión entre la médula y la corteza. Para llevar a cabo las mediciones del ancho de los bio-agregados se utilizaron los aumentos de x75 y x150 el aparato utilizado para realizar la videomicroscopía es de la marca Keyence modelo VH-5911 (ver figura 2.20).

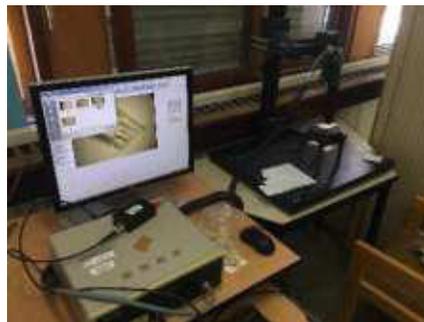


Figura 2.20. Videomicroscopio Keyence modelo VH-5911

### 2.4.2 Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido es una de las técnicas de estudio más poderosas para observar y analizar la microestructura de un material [176]. En este trabajo se analizaron las fracciones de agregado obtenidas a través del proceso de molienda, por medio de un corte longitudinal y en sección (ver figura 2.21a). Las muestras no fueron embebidas en resina, ya que esto puede impedir la observación ante el microscopio electrónico de barrido, el análisis se llevó a cabo con un microscopio electrónico de la marca JEOL JSM-6380LV; las partículas fueron metalizadas y sometidas al vacío durante 30 minutos (60 Pa) con un voltaje de 15 kV (ver figura 2.21b).



a)



b)

**Figura 2.21. a) Preparación de las muestras para la microscopía electrónica de barrido, b) Análisis de la microestructura a través de la microscopía electrónica de barrido**

### 2.4.3 Densidad aparente.

Se denomina densidad aparente a la relación entre el peso seco y el volumen (incluyendo los vacíos) de un material, existen diversos factores que pueden influir en esta característica como lo son la microestructura, su composición o el tamaño de las partículas. En el caso de los bio-agregados, esta propiedad se obtuvo con el peso del bio-agregado seco y dividiéndolo entre la masa de agua correspondiente al volumen de este. Para asegurar un coeficiente de variación, esta prueba debe realizarse como mínimo 3 veces con el mismo número de muestras de bio-agregado. Para ello se utilizó un recipiente de PVC [138].

El proceso para obtener la densidad aparente es el establecido por las recomendaciones del RILEM BBM-236 [15]:

- Secar aproximadamente 500 gramos de materia vegetal a una temperatura entre 50 a 60 °C, hasta que tenga una masa constante y una variación menor a 0.1% durante 24 horas.
- Colocar el bio-agregado en un desecador hasta que se equilibre en la temperatura del laboratorio.

- Pesar el recipiente vacío.
- Colocar el bio-agregado hasta la mitad del recipiente.
- Tapar y girar el recipiente por diez veces.
- Sacudir con suavidad el recipiente con la finalidad de obtener una superficie horizontal.
- Enrasar la superficie de la materia vegetal y se marca el nivel obtenido.
- Posteriormente, pesar el cilindro con el bio-agregado.
- A continuación, llenar de agua hasta la marca hecha anteriormente.
- Pesar el cilindro con el agua.
- Calcular la densidad aparente de la materia vegetal con siguiente la fórmula:

$$\rho = \frac{\text{Masa del bio-agregado}}{\text{Volumen del agua}} \quad (1)$$

Dónde:

$$\text{Volumen del agua} = \frac{\text{Masa}_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}}$$

$\rho_{\text{agua}}$  = Densidad del agua (1,000 kg/m<sup>3</sup>).

#### 2.4.4 Absorción de agua

Esta prueba determina la tasa de absorción de agua de los bio-agregados durante 4 ciclos de inmersión total, los cuales se realizan durante 1, 15, 240 y 2880 minutos. Para asegurar un coeficiente de variación, esta prueba debe realizarse como mínimo 3 veces con el mismo número de muestras de bio-agregado. El bio-agregado se seca en un horno a una temperatura de 60 °C, a dicha temperatura se asegura un secado constante sin quemar o deteriorar el bio-agregado. El proceso para llevar a cabo dicho ensaye es el siguiente [15,23]:

- Secar 200 gramos del bio-agregado a una temperatura entre 50 a 60 °C, hasta que tenga una masa constante y una variación menor a 0.1% durante 24 horas.
- Después de sacar del horno, colocar el bio-agregado en un desecador hasta que se equilibre en la temperatura del laboratorio.
- Introducir en una bolsa con perforaciones de 1 mm<sup>2</sup> en agua asegurándose de que esté inmersa completamente durante 1 minuto.

- Colocar la bolsa antes mencionada en un centrifugador y girar durante 50 segundos a razón de 2 rotaciones por segundo, para el drenado del exceso de agua.
- Pesar la bolsa y, se anota el valor obtenido.
- A continuación, pesar 25 gramos de la muestra seca a ensayar, colocándose dentro de la bolsa húmeda.
- Luego, sumergir la bolsa con el bio-agregado en agua, sumergiéndolo en su totalidad durante un periodo de 1 minuto.
- Al término de este tiempo, colocar la bolsa con el bio-agregado en el salad spinner, y se gira durante 50 segundos a razón de 2 rotaciones por segundo.
- En seguida pesar y anotar el valor obtenido a 1 minuto de inmersión.
- Se repiten los pasos anteriores con la misma muestra con diferentes tiempos de inmersión: 15, 240 y 2880 minutos.
- El porcentaje de absorción de agua se calcula utilizando la fórmula:

$$w = \frac{m_0 - m_D}{m_D} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$w$  = Absorción de agua en porcentaje.

$m_0$  = Es la masa saturada superficialmente seca de la muestra, esto se obtiene restando la masa de la bolsa seca sola (antes de la inmersión) de la bolsa húmeda sola (después de la inmersión).

$m_D$  = Es la masa seca de la muestra.

Así mismo, Nozahic [119] propuso una curva de regresión lineal de la absorción de agua se calcula con la fórmula:

$$W = IRA + K_1 \times \log (t) \quad (3)$$

Donde:

$W$  = absorción de agua en porcentaje,

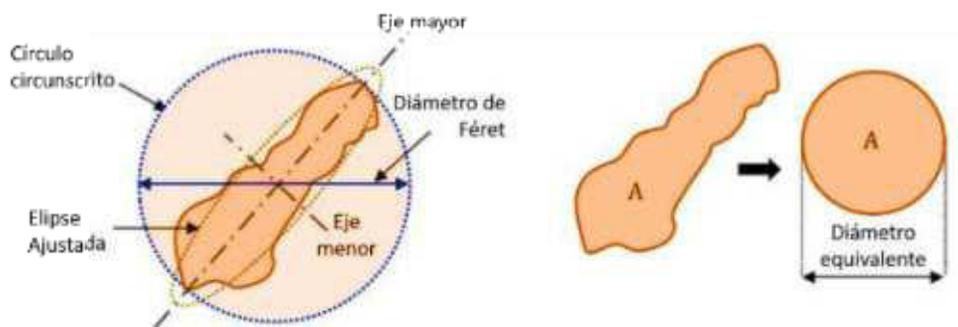
**IRA** (Initial Rate of Absorption) = La tasa de absorción de agua, la cual, está relacionada con la adsorción externa de agua en la superficie del bio-agregado,

**K1** = La velocidad de la propagación del agua en las partículas de bio-agregado, y está ligada con la porosidad intrínseca de los mismos con respecto al tiempo en minutos cuando los bio-agregados se encuentran sumergidos.

#### 2.4.5 Distribución del tamaño de partícula

Esta técnica de caracterización se realizó a través un análisis 2D, el cual brinda acceso a más información en comparación con el método de tamizaje; sin embargo, este método es complejo y solo se requiere de una pequeña cantidad de material. Cabe señalar que el resultado de esta prueba se limita al muestreo y el tamaño de la muestra. Las partículas se colocan de manera que no se superpongan ni se toquen, pues esto daría como resultado un error en la medición. El objetivo de esta prueba es determinar las medidas de longitud, anchura y área de las partículas de bio-agregado y con ello poder determinar el efecto que puede ocasionar en otras propiedades físicas de los bio-agregados.

El análisis se realizó con el software ImageJ, a través de un refinamiento en de las imágenes obtenidas, se puede determinar el número de parámetros de las partículas de bio-agregado como lo son el perímetro, área, longitud, anchura, los ejes mayor y menor, elipse, ángulo de inclinación del eje mayor con respecto a la horizontal y el diámetro de Feret; este último parámetro es el diámetro de un círculo que encierra el contorno en la partícula, el cual significa la dimensión máxima de la partícula. La dimensión del ancho se determina como la dimensión mínima del ancho y la altura del círculo delimitador, como se muestra en la figura 2.22 [23].



**Figura 2.22. Información obtenida a través del análisis de imagen 2D [45]**

La longitud del eje mayor es la línea más larga, esta puede obtenerse dentro de la partícula, la longitud del eje menor es la línea menos larga, esta puede ser dibujada perpendicularmente al eje mayor y dentro de la partícula, y el diámetro equivalente es el diámetro de un círculo, tiene la misma área que el objeto calculado por la ecuación 4, donde "A" es el área del objeto medida como un polígono [145,159].

$$ED = \sqrt{\frac{4.A}{\pi}} \quad (4)$$

Para realizar este proceso se necesitan entre 3 a 6 gramos de material vegetal, así mismo es necesario realizar un proceso de tamizaje por la malla de 1 milímetro, con la finalidad de eliminar los polvos de la muestra. El desarrollo de este estudio se realiza de la siguiente manera [15]:

- La muestra de 3 a 6 gramos debe tener al menos 2000 partículas identificadas que cubran más de 100 píxeles, es decir, con un área superior a 0,18 mm<sup>2</sup> a una resolución de 600 PPP (punto por pulgada).
- Puede utilizarse un escáner plano, este tipo de aparato evita la distorsión de la imagen y asegura una calibración repetitiva. La imagen en escala de grises de 8 bits con una definición de 600 PPP (punto por pulgada).
- Es conveniente utilizar un fondo oscuro para obtener el máximo contraste figura 2.23. Las partículas se pueden colocar sobre una hoja negra o colocar directamente sobre el vidrio del escáner. Extienda las partículas de manera que no se toquen o se superpongan entre sí.

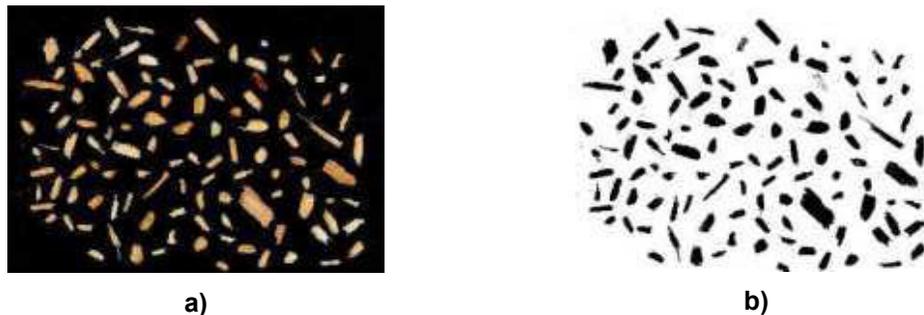


Figura 2.23. a) Colocación de las partículas en el escáner y, b) Binarización de los bio-agregados para el análisis del tamaño de distribución de partícula

#### 2.4.6 Conductividad térmica

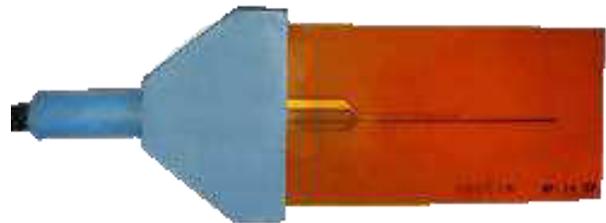
Se define como conductividad térmica a la capacidad de conducir el calor en un material, a través de la cuantificación del calor transferido a través de un espesor hacia la superficie en un área, debido a un gradiente de temperatura. Este método se basa en la transferencia de calor de una fuente controlada a un material, y en la medición de los cambios de temperatura, causados por la disipación de calor en función del tiempo. La conductividad térmica de los bio-agregados está fuertemente

ligada a la densidad aparente, y a su vez se relaciona a los vacíos que existen entre los bio-agregados; también, esta porosidad depende del tamaño y la morfología de las partículas. Esta técnica de caracterización forma parte de un grupo de métodos que utilizan el flujo de calor transitorio para determinar la conductividad térmica de los materiales, siendo esta una ventaja para obtener mediciones en minutos. [11,15,23,132].

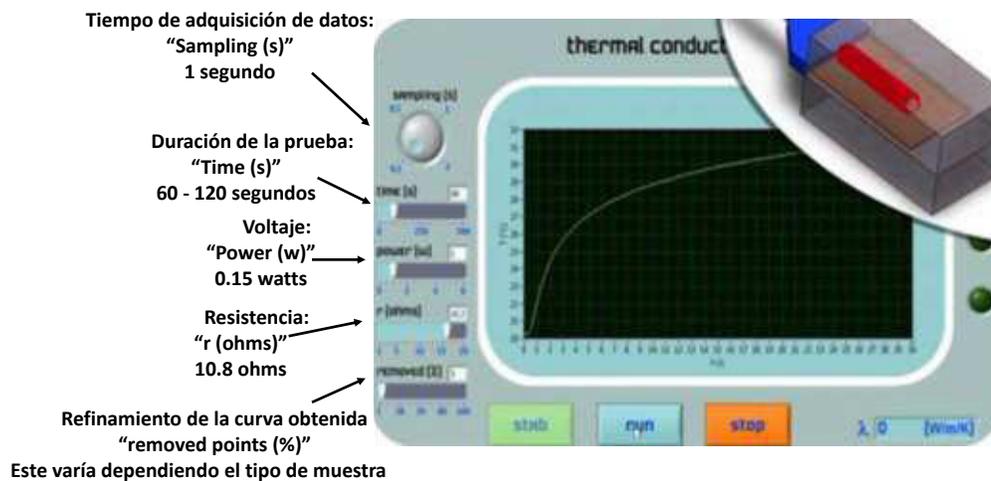
El aparato utilizado es de la marca NEOTIM modelo FP2C (ver figura 2.24a), el cual consta de una sonda de hilo caliente de alta temperatura (100-260 °C); la sonda produce un aumento de temperatura de 10 grados aproximadamente en la zona de contacto con el material, este aumento de temperatura se mide a lo largo de 1 minuto aproximadamente. Después, se realiza un procesamiento matemático de la señal integrada en el software de la centralita, con ello se efectúa la cuantificación de la conductividad térmica. La sonda está embebida en kapton, este protege al hilo emisor del calor y otro elemento mide la temperatura emitida. (figura 2.24b). Este equipo debe de ser calibrado previamente a su utilización (figura 2.24c).



a)



b)



c)

Figura 2.24. a) Equipo, b) Sonda c) Calibración de la sonda y software

La conductividad térmica se midió en estado a temperatura ambiente. La medición se realizó de la siguiente manera:

- Colocar los bio-agregados en el horno entre 50 y 60° C, hasta alcanzar una masa constante con una variación del 0.1% en un intervalo de 24 horas.
- Posteriormente, colocar los bio-agregados en un desecador hasta que alcancen la temperatura del ambiente sin que absorban humedad.
- En un molde (en este caso un molde cilíndrico de cartón) con una abertura para insertar la sonda, se introduce una capa de bio-agregados y se coloca la sonda; para posteriormente colocar una segunda capa que cubra a la sonda.
- Calibrar el software con los siguientes parámetros: Power = 0.15 watts, Resistencia = 10.8 ohms (la cual es la capacidad de la sonda), la duración de la prueba es Time = 120 segundos y la captación de datos es "Sampling" = 1 segundo).
- Repetir los pasos anteriores para un mínimo de 5 muestras de cada bio-agregado (ver figura 2.25).



a)



b)

Figura 2.25. a) Molde para obtener la conductividad térmica y, b) Orientación de la sonda

## 2.5 Métodos de caracterización de los bio-agregados empleados en México.

### 2.5.1 Microscopía electrónica de barrido

El análisis de la microestructura de los bio-agregados se realizó con un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío de la marca Jeol de modelo JSM-6490LV (figura 2.26), equipado con una sonda de microanálisis de dispersión de energía de rayos X (EDS). Las partículas fueron metalizadas y sometidas al vacío durante 30 minutos (60 Pa) con un voltaje de 15 Kv. El objetivo principal del uso de esta técnica de caracterización es, observar y analizar la microestructura de los bio-agregados

obtenidos del tallo de maíz, para ser comparados con los bio-agregados empleados en Francia.



Figura 2.26. Microscopio electrónico de barrido JSM-6490LV

### 2.5.2 Densidad aparente

Esta propiedad se obtuvo con el método mostrado en el apartado 2.4.4, bajo las recomendaciones del RILEM 236-BBM [15]; para ello se utilizó un recipiente de PVC, el cual se muestra en la figura 2.26 [15,23]. El objetivo de esta prueba es obtener los valores de la densidad aparente, para posteriormente, ser empleados en la fabricación de los concretos vegetales, esta propiedad da como resultado la cantidad del bio-agregado a utilizar en el diseño de las mezclas de concreto vegetal.

### 2.5.3 Absorción de agua

El procedimiento de prueba se explica en el apartado 2.4.5 siguiendo las recomendaciones emitidas por el RILEM [177] (ver figura 2.27) [15,23].



a)



b)

Figura 2.27. a) Salad spinner , b) Resultado del proceso de absorción

### 2.5.4 Distribución del tamaño de partícula

Este análisis se realiza conforme se ha mencionado en el apartado 2.4.6 con el software ImageJ [23].

### 2.5.5 Masa volumétrica compactada

El objetivo de esta prueba es determinar el valor de la masa de los bio-agregados cuando estos se encuentran con una cantidad de agua. La metodología empleada es la siguiente [177]:

- Secar los bio-agregados en horno ventilado a una temperatura entre 50 y 60 ° C hasta masa constante (figura 2.28a).
- Colocar los bio-agregados en un desecador hasta que la temperatura se estabilice.
- Sumergir los bio-agregados durante 15 a 30 s en agua dependiendo de la textura de los agregados moldeados (tomar la masa antes y después para tener la tasa de absorción) (ver figura 2.28b).
- Llenar un poco más de un tercio del molde con los bio-agregados húmedos y compactar con la mínima presión posible para que los bio-agregados se mantengan unidos (ver figura 2.28c).
- Escarificar la superficie superior para asegurar la conexión entre las capas.
- Repetir el procedimiento 3 veces hasta el nivel superior del molde / Esperar 1 minuto antes de desmoldar (ver figura 2.28d).
- Desmoldar la probeta y poner a secar en el horno (60 °C a masa constante).
- Pesar la masa seca (ver figura 2.28e).
- Repetir la prueba 3 veces con 3 muestras diferentes.



a)



b)



c)



d)



e)

**Figura 2.28. Masa seca compactada: a) secado al horno de los bio-agregados, b) Inmersión durante 30 segundos, c) elaboración de las probetas, d) desmolde de las probetas, e) probeta seca**

## **2.6 Métodos de caracterización de los concretos vegetales elaborados en Francia**

El objetivo de las pruebas que a continuación se presentan es, obtener las diferentes propiedades multifísicas y multiescalares de los diferentes tipos de bio-agregados que se utilizaron en la fabricación de los concretos vegetales, y con los parámetros obtenidos se establecen las cantidades de los materiales que optimizarán la proporción en las mezclas. También a través de técnicas como la conductividad térmica, se obtienen datos para determinar el rendimiento térmico de los bio-agregados, para clasificarlos como materiales aislantes.

### **2.6.1 Propiedades físicas**

#### **2.6.1.1 Densidad aparente**

Esta propiedad física de los concretos vegetales se obtuvo en estado fresco, al ambiente y seco al horno entre 50 y 60 °C hasta alcanzar una masa constante. Solo

se aplicó a los cilindros de 11x22 cm y 16x7.5 cm. El procedimiento para obtener las densidades fue el siguiente [178]:

- Medir con un vernier 3 alturas, con una diferencia de 120° (figura 2.29a).
- Medir con un vernier 3 diámetros, en la superficie, en al centro y al fondo (figura 2.29b).
- Tomar el peso de los especímenes.
- Obtener el volumen de los cilindros con la ecuación 5:

$$\text{Volumen} = \pi r^2 h / 4 \quad (5)$$

- Posteriormente, obtener la densidad con la ecuación 6:

$$\rho = \left( \frac{M}{V} \right) \quad (6)$$

Donde:

d = Diámetro del cilindro (m)

h = Altura del cilindro (m)

$\rho$  = Densidad (kg/m<sup>3</sup>).

M = Masa del concreto vegetal (kg).

V = Volumen del espécimen (m<sup>3</sup>).

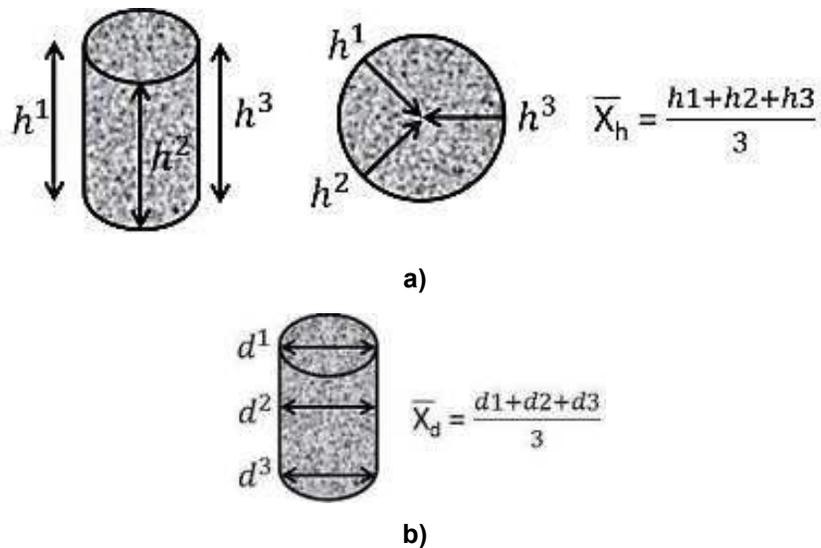


Figura 2.29. a) Obtención de alturas y, b) Obtención de diámetros de los cilindros de concreto vegetal

### 2.6.1.2 Conductividad térmica

Al igual que en el apartado 2.4.6, se utilizó el método del hilo caliente para medir la conductividad térmica de los concretos vegetales. La principal ventaja de este método, en comparación con los métodos de estado estable, es que es un método transitorio el cual no limita la migración de agua durante la prueba, esto permite que, durante el ensayo, se estudie el efecto que tiene la humedad en la conductividad térmica de las probetas. Al ser una medición local, es decir, que se realiza en una sección de concreto vegetal, no permite la distribución de calor de manera homogénea en su superficie [43]. Las mediciones deben realizarse varias veces en diferentes puntos, lo cual también permite obtener una representación del valor de la conductividad térmica. En este estudio el coeficiente de variación obtenido fue menor al 6.5%.

A continuación, se describe el proceso de las mediciones de la conductividad térmica [179]:

- En el caso de las probetas con densidad seca, estas se colocan en el horno entre 50 y 60 °C, monitoreando su peso hasta alcanzar una estabilización en su masa del 0.1%.
- Una vez alcanzada la estabilización de la masa, colocar las probetas dentro de un desecador hasta estabilizar la temperatura con la temperatura del laboratorio. El proceso puede tardar hasta 2 horas. Así mismo esto debe realizarse cuidando que haya el menor desprendimiento del bio-agregado posible.
- La sonda se acomoda entre las dos probetas, colocando una masa con un peso que permita el contacto entre las dos probetas (5 kg aproximadamente) para mantener una presión constante; con ello se asegura una mayor superficie de contacto entre la sonda y las probetas. como lo ilustra la figura 2.30a
- Para este estudio, se configuró el software de adquisición de datos con un 0.17 watts y un tiempo de medición de 90 segundos.
- Posteriormente se anotan los valores de la temperatura de estabilización, el valor de  $\lambda$  (conductividad térmica) obtenido, el porcentaje de puntos suprimidos en el diferencial de temperatura.
- Esto se repite para cada medición, por lo general, deben realizarse un mínimo de 4 mediciones para 2 probetas (ver figura 2.30b), y esta puede variar según la porosidad de la superficie de las probetas; también para asegurar el coeficiente de variación antes mencionado. Cabe hacer mención que la conductividad térmica se ve influenciada por la porosidad del material, por lo que en algunos especímenes se realizaron más de 10 mediciones.

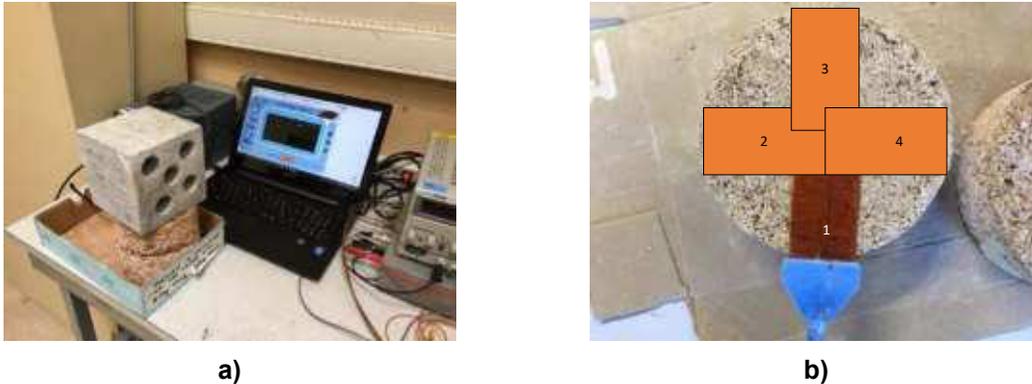


Figura 2.30. a) Obtención de las de las mediciones y, b) Orientación de las medidas

## 2.6.2 Propiedades mecánicas de los concretos vegetales elaborados en Francia

### 2.6.2.1 Ensayo a compresión de los concretos vegetales

Los concretos vegetales son materiales que no pueden soportar grandes cantidades de carga, sin embargo son altamente deformables [43]; de lo anterior se derivan dos parámetros que son de suma importancia en el análisis del desempeño mecánico de este materia. El primero es la resistencia a compresión y el segundo es el módulo de elasticidad; sin embargo, estos parámetros se ven afectados por varios factores, como lo son el tipo de bio-agregado, el tipo de cementante utilizado, el método de elaboración de la mezcla, la fabricación de los especímenes (compactación, moldeo, entre otros) [131,180,181].

Debido a que la baja rigidez del concreto vegetal tiene un comportamiento mecánico dúctil con respecto a la compresión y a la flexión [180]. El estudio desarrollado por Arnaud et. al. [182], demuestra que, cuando las probetas que serán sometidas a compresión se secan a 20 °C y con un 50% de humedad relativa tienen un esfuerzo a compresión mayor en comparación a las que se sometieron a 30%, 75% y 98% de humedad relativa. Lo anterior describe que las condiciones de conservación de las probetas pueden mejorar las propiedades mecánicas de los concretos vegetales.

Para llevar a cabo el ensayo a compresión, se utilizó el protocolo realizado por Niyigena [180]: el cual establece lo siguiente:

- Pesar los especímenes junto con el molde, posteriormente, quitar el molde con un cúter, sin estropear la probeta.
- Pesar las probetas sin los moldes y colocar en el horno a una temperatura entre 50 y 60 °C hasta que tengan una estabilización en su masa de  $\pm 2\%$ .
- Medir 3 diámetros en la probeta (arriba, en medio y abajo), así como las alturas a cada 120 °.

- No se debe realizar algún tipo de cabeceo en las probetas, pues esto afectaría en la obtención de las deformaciones.
- La prueba debe tener un desplazamiento controlado a una velocidad de 3% por minuto. La descarga debe ser de 6 milímetros o libre si no es posible controlarla.
- Se deben aplicar 3 ciclos de carga, los cuales dependen del tamaño de la muestra: En el primer ciclo, la carga se realiza del 0 al 1% de la deformación relativa y se descarga hasta cero o desplazamiento cero. En el ciclo 2, se realiza la carga al 2% y en el ciclo 3, se aplica el 3% de deformación. La carga final (cuarto ciclo) va desde cero hasta la falla total de la probeta (20% de deformación) (ver figura 2.31).

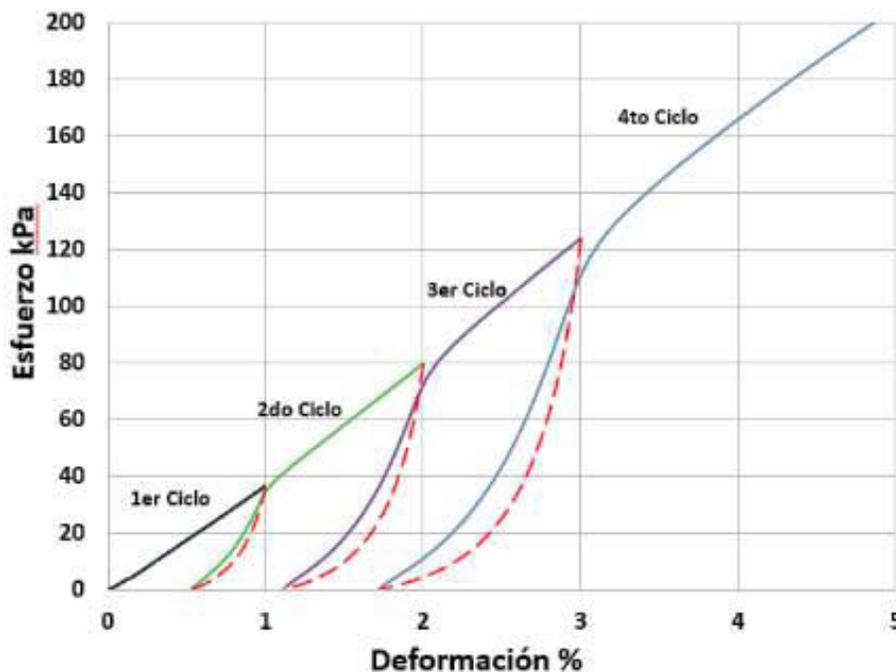


Figura 2.31. Delimitación de los ciclos de carga

El módulo de Young de cada espécimen fue calculado con el método del módulo flotante [180]; para obtener este valor se realizan los siguientes pasos:

- Identificar los valores máximos de cada ciclo de carga.
- Calcular la pendiente en cada carga con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (7)$$

Donde:

E: es el módulo alrededor de un punto dado,  $\Delta\sigma$  y  $\Delta\varepsilon$  son la resistencia y la deformación en porcentaje respectivamente entre -5 y +5 segundos, (es decir 10 datos obtenidos) con respecto al punto considerado en el análisis.

- El cálculo mencionado anteriormente, se repite para cada carga.
- Se determinan los valores máximos obtenidos en las cargas 2, 3 y 4.
- El módulo de Young flotante es el resultado del promedio de los valores máximos obtenidos en las cargas 2, 3 y 4.

### 2.6.3 Microscopía electrónica de barrido

Al igual que en el apartado 2.4.3, esta técnica se utilizó para observar la microestructura y la interface entre la matriz cementante y los bio-agregados en los concretos vegetales. Al mismo tiempo, se realizó la espectroscopia de rayos X dispersivos de energía (EDS), la cual realiza un mapeo de la muestra la orientación de los elementos encontrados en este escaneo. La preparación de la muestra se realizó de la siguiente manera [183,184]:

- Se tomó una muestra representativa de los concretos seleccionados previamente (figura 2.32a).
- Las muestras se colocaron en un molde donde se les vació una resina.
- 24 horas después se procedió a cortar y pulir las muestras (figura 2.32b).



a)



b)

Figura 2.32. a) Preparación de las muestras y, b) Corte de las muestras

## 2.6.4 Interacción química y observaciones

### 2.6.4.1 Obtención de los hidrosolubles

Para llevar a cabo el análisis de las interacciones químicas entre las matrices puzolánicas, es necesario obtener los compuestos hidrosolubles presentes en los bio-agregados, para lo cual se realiza el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra representativa de los bio-agregados (50-100 gramos) es triturada a un tamaño menor a 1 milímetro de longitud en un molino (figura 2.33a y 2.33b).
- Posteriormente, el resultado de esta molienda es sumergido en agua desmineralizada en una relación agua/bio-agregado de 15:1.
- El agua y las partículas son sometidas a una agitación constante durante 24 horas a 400 rpm, debido a dicha agitación el agua tiende a evaporarse por lo que es necesario monitorear la cantidad de agua cada 2 horas (figura 2.33c).
- Después de las 24 horas de agitación, el agua con las partículas de bio-agregado es filtrada con la ayuda de una bomba de vacío (figura 2.33d).
- El agua filtrada con los hidrosolubles se mantiene en un refrigerador hasta su uso, esto ayuda a prevenir la formación de hongos y/o bacterias.



a)



b)



c)



d)

Figura 2.33. Proceso de obtención de los compuestos hidrosolubles: a) Molino, b) Partículas menores a 1 milímetro, c) Agitación de la mezcla, d) Filtración del agua

#### 2.6.4.2 Calorimetría isotérmica

La calorimetría isotérmica es un método que mide la absorción o liberación de calor durante las reacciones de hidratación en los cementantes, esto se realiza a una temperatura constante de 20 °C; la variación del calor mide el consumo de energía necesaria para mantener la muestra a temperatura constante. Este ensayo, requiere de una muestra representativa de pasta elaborada con los cementantes utilizados y agua con los materiales hidrosolubles presentes en los bio-agregados [185–189].

Antes de iniciar con la preparación de los materiales, es necesario realizar el cálculo de las cantidades necesarias para elaborar las pastas, por lo cual es importante calcular el volumen de la pasta a realizar a analizar.

$$C_p \text{ total} = (C_p \text{ del agua})(\text{Masa del agua en g para 5 g de pasta}) + (C_p \text{ del cemento anhidro})(\text{masa del cemento en g por 5 g de pasta})$$

Donde:

$$C_p = \text{Capacidad calorífica específica}$$

- La preparación de la cantidad de agua destilada empleada en las referencias se calcula con la siguiente fórmula

$$M_{ref} = \frac{C_p \text{ total}}{(C_p \text{ del agua } (4.18\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})))} \quad (8)$$

- La cantidad de agua calculada se coloca en un frasco de vidrio (figura 2.34a), el cual se sella herméticamente utilizando una tapa de aluminio al cual se le

añade una chincheta que ayudará a colocar el frasco dentro del calorímetro (figura 2.34b).

- Posteriormente, se procede a realizar la mezcla manual de la pasta (figura 2.34c), cuidando que los tiempos de mezclado, el vaciado en los frascos y la colocación de la muestra en el calorímetro sean siempre los mismos.
- Se debe realizar una cantidad de pasta suficiente para 2 muestras y así mismo realizar los ensayos correspondientes a los análisis termogravimétricos y de la difracción de rayos X (figura 2.34d).

Antes del ensayo, las mezclas de referencias y las mezclas a analizar se introducen en viales (o ampollitas) de 20 ml. Las mezclas sujetas al análisis se introducen en la sección A del equipo, y las mezclas de referencia se colocan en la sección B. La diferencia del flujo de calor entre la sección A y B se mide y se traza en una curva, en dicha curva, si las reacciones son exotérmicas, se mostrará una curva positiva, y, en caso de ser reacciones endotérmicas, se mostrará una curva negativa. [190].



a)



b)



c)



c)

**Figura 2.34. Preparación de las pastas: a) Frascos para mezclas y agua de referencia, b) Calorímetro TAM Air 3116-2, c) Preparación de la pasta, d) Muestras de pasta para ATG y DRX**

El procedimiento para la elaboración de las mezclas se enumera a continuación.

## 1. Mezclas puzolánicas:

- Mezclar el metakaolín, la cal y el  $K_2SO_4$  durante 30 segundos a 140 rpm.
- Añadir el aditivo superplastificante y el agua destilada con los extractos hidrosolubles y mezclar durante 30 segundos a 140 rpm.
- Mezclar nuevamente durante 30 segundos a 280 rpm.

## 2. Mezclas con el cementante comercial:

- Colocar el cementante y mezclar durante 30 segundos a 140 rpm.
- Añadir el agua destilada con los extractos hidrosolubles y mezclar durante 30 segundos a 140 rpm.
- Mezclar nuevamente durante 30 segundos a 280 rpm.

De manera general, el comportamiento de la hidratación se divide en 5 partes (figura 2.35) [185]:

- En la primera fase es donde se inicia la disolución, así como las primeras reacciones rápidas. Así mismo, existe una cantidad de calor que es aportada por la manipulación en la preparación de las mezclas.
- En la segunda fase se realiza el período de inducción. Durante este período, la reacción de hidratación se retrasa.
- En la tercera fase se lleva a cabo el período de aceleración. En este momento tiene lugar la precipitación del C-S-H y el CH.
- La cuarta fase tiene lugar el período de desaceleración.
- Entre las fases cuarta y quinta, la reacción lenta continúa principalmente debido a la difusión de agua entre las capas de hidrato.

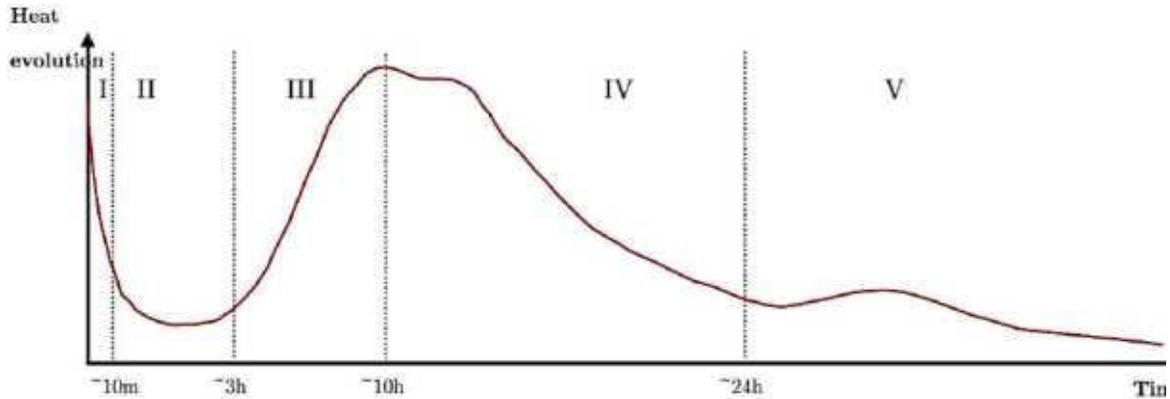


Figura 2.35. Tasa de la evolución del calor durante la hidratación del cemento [191]

### 2.6.4.3 Análisis termogravimétrico

Es una técnica de caracterización ampliamente utilizada en la ciencia del cemento. Las mediciones de agua unida y contenido de portlandita por TGA, a menudo se utilizan para monitorear las reacciones del cemento portland, o, para evaluar la reactividad de materiales cementantes suplementarios, como cenizas volantes, escorias de alto horno, etcétera [183,191,192].

También, se utiliza para medir la descomposición de ciertos elementos bajo el efecto del calor. El aparato consiste en un horno de alta temperatura, junto con una balanza de alta precisión, la medición puede llevarse a cabo bajo una atmósfera no controlada o neutra (generalmente con gas argón o nitrógeno), que evita cualquier recombinación de los elementos previamente descompuestos con oxígeno [191,193]. Los minerales e hidratos pueden sufrir varias reacciones térmicas como: la deshidratación, deshidroxilación, decarbonización, oxidación, descomposición, transición de fase o fusión. Estas reacciones generalmente se asocian con cambios de masa o liberación de calor.

El proceso de preparación de la muestra es el siguiente:

- De la pasta elaborada para la calorimetría se toma una porción de 6 gramos (figura 2.36a).
- Para detener la hidratación de la pasta se utilizó el método de liofilización, el cual consiste en congelar la pasta con nitrógeno líquido y posteriormente llevarla a una temperatura controlada al vacío para crear una sublimación en la pasta (figuras 2.36b).
- 48 horas después, la pasta es triturada en el mortero de ágata y cribada por la malla de 80  $\mu\text{m}$  (figura 2.36c).
- El aparato utilizado para realizar este ensayo es de la marca METTLER TOLEDO TGA-2 el cual se muestra en la figura 2.36d.



a)



b)



c)



d)

**Figura 2.36. Preparación de las muestras para ensayos mineralógicos a) Criogenización de las pastas, b) Sublimación del agua de las pastas, c) Preparación de las muestras, d) aparato Mettler TOLEDO TGA-2**

#### **2.6.4.4 Difracción de rayos X**

Es una de las técnicas analíticas más destacadas para la caracterización de materiales cristalinos de grano fino como los cementos [183,194]. El modo de preparación de las muestras es el mismo que el análisis termogravimétrico, el cual se realizó con un difractómetro de la marca BRÜKER ADVANCE D8 (figura 2.37a y 2.37b). Este instrumento de medición es un sistema con radiación de  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda = 1.541 \text{ \AA}$ ) a 40 kV y 30 mA. Los valores de 2-Theta variaron de 4 a 70 ° y se registraron en 0.04 pasos con un tiempo de conteo de 10 s por paso.



a)



b)

**Figura 2.37. a) Difractómetro de rayos X BRÜKER ADVANCE D8, b) detalle del cambiador de muestras del equipo.**

## 2.7 Conclusiones

### Contexte français

Dans ce chapitre, une description générale des tiges de chanvre, de tournesol et de maïs utilisées dans cette recherche est donnée ; d'autre part, les instruments utilisés pour séparer et obtenir les 6 types de bio-agrégats proposés sont expliqués en détail dans le chapitre 3 ; il est important de souligner que pour atteindre cet objectif il a été nécessaire d'évaluer le fonctionnement du broyeur à marteaux, ainsi que les différentes inclinaisons de la bande transporteuse, et la distance entre le ventilateur et le système d'aspiration pour récupérer le plus de moelle et d'écorce possible.

D'autre part, les propriétés des matériaux cimentaires utilisés ont été caractérisées, en identifiant et en comparant leurs caractéristiques, ce qui aidera à comprendre leurs performances physiques et mécaniques ; l'un des principaux aspects est la présence d'un contenu élevé de silicate dicalcique et tricalcique dans le matériau cimentaire commercial, qui, contrairement au métakaolin et à la chaux éteinte, ont un effet sur le pouvoir cimentaire, qui peut se refléter dans les performances mécaniques ; dans les recherches précédentes, les propriétés thermiques peuvent être affectées positivement. De plus, il est important de souligner que le principal avantage du métakaolin est son faible impact sur l'environnement, puisque, comparé au ciment, ce matériau a une faible consommation d'énergie pendant sa transformation et, par conséquent, une faible émission de CO<sub>2</sub>.

En outre, les propriétés du sulfate de potassium contribueront à accélérer les réactions d'hydratation et à augmenter la résistance à la compression par la formation d'ettringite et à renforcer la stabilité volumétrique ; et l'additif superplastifiant contribuera à donner de la maniabilité au mélange.

Chacun des processus de caractérisation des bio-agrégats est réglementé par le RILEM dans sa section sur les matériaux biosourcés pour la construction [15], cependant, les techniques de caractérisation supplémentaires présentées dans le document sont des recommandations qui aident à déterminer les propriétés physiques des bio-agrégats ; certaines méthodes non conventionnelles y sont utilisées, cependant, l'efficacité de ces méthodes a été démontrée par divers articles et thèses de doctorat.

L'observation de la microstructure du bio-agrégat est importante, car elle permet de prédire la performance thermique, de comprendre la cinétique d'absorption de l'eau et de déduire l'impact de la porosité sur la densité apparente. Les deux derniers paramètres mentionnés sont le point de départ du développement des bétons à base de plantes, car ces paramètres sont utilisés pour calculer les quantités d'eau nécessaires pour maintenir un rapport eau/ciment optimal.

La caractérisation des bétons à base de plantes a été planifiée après l'examen de plusieurs protocoles d'essai, avec un accent particulier sur la résistance à la compression, suivie par la microscopie électronique à balayage pour évaluer la zone d'interaction entre la pâte et les bio-agrégats, ainsi qu'une analyse au moyen de la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS), une caractérisation chimique élémentaire des bétons à base de plantes est effectuée. Il convient de mentionner que cette technique présente certaines limites qui se reflètent principalement dans la quantification des éléments.

D'autre part, afin de savoir comment interagissent les composés hydrosolubles présents dans les bio-agrégats et les agents cimentaires, l'analyse des pâtes est réalisée par microcalorimétrie isotherme, où le comportement des réactions chimiques d'hydratation sera étudié par le biais de la libération de chaleur en temps réel. En outre, afin de pouvoir comparer les données obtenues dans le test susmentionné, l'analyse est complétée par la diffraction des rayons X et la thermogravimétrie (TGA et DTG).

### **Contexte mexicain**

Dans cette section, une brève description de l'origine du bio-agrégat utilisé au Mexique est donnée. D'autre part, les mêmes techniques de caractérisation sont appliquées à l'écorce, à la moelle et au mélange des deux bio-agrégats, dans ce cas, une technique supplémentaire est ajoutée, où la valeur de masse des bio-agrégats est déterminée lorsqu'ils sont avec une quantité d'eau pour maintenir un volume stable. En raison de limitations extérieures au projet, certaines techniques de caractérisation physique n'ont pu être réalisées.

### **Contexto Francés**

En este capítulo se hace la descripción general de los tallos de plantas de cáñamo, girasol y maíz que se emplean en esta investigación, por otro lado, los instrumentos utilizados para la separación y obtención de los 6 tipos de bio-agregados propuestos se explican a detalle en el capítulo 3; es importante recalcar que para lograr este objetivo fue necesario evaluar la forma de operar de molino de martillos, así como varias inclinaciones de la banda transportadora, así como la distancia entre el

ventilador y el sistema de aspirado para recuperar la mayor cantidad de médula y corteza posible.

Por otro lado, se caracterizaron las propiedades de los cementantes empleados, logrando identificar y comparar sus características, las cuales ayudarán a comprender su desempeño físico y mecánico; uno de los principales aspectos, es la presencia de un alto contenido de silicato dicálcico y tricálcico en el cementante comercial, que a diferencia del metacaolín y la cal apagada, tienen un efecto en el poder cementante, lo cual se puede reflejar en el desempeño mecánico; en investigaciones previas, las propiedades térmicas pueden afectarse de manera positiva. También, es importante recalcar que la principal ventaja del metacaolín es su bajo impacto ambiental, ya que, en comparación del cemento, este material tiene un bajo consumo de energía durante su transformación y por consiguiente una baja emisión de CO<sub>2</sub>

Además, las propiedades del sulfato de potasio ayudarán a dar celeridad a las reacciones de hidratación y un aumento en la resistencia a compresión a través de la formación de etringita y fortalecerá la estabilidad volumétrica; y el aditivo superplastificante ayudará a dar trabajabilidad a la mezcla.

Cada uno de los procesos de caracterización de los bio-agregados, están normados por el RILEM en su sección de materiales de base biológica para la construcción [15], sin embargo, técnicas adicionales de caracterización que se presentan en el documento, son recomendaciones que ayudan a determinar las propiedades físicas de los bio-agregados; en ellas se emplean algunos métodos no convencionales, no obstante, a través de diversos artículos y trabajos de tesis doctorales se ha evidenciado la efectividad de dichos métodos.

La observación de la microestructura del bio-agregado es importante, pues a través de ella, se puede predecir el desempeño térmico, también ayuda a comprender la cinética de la absorción de agua, así como a deducir el impacto que tendrá la porosidad en la densidad aparente. Los últimos dos parámetros mencionados, son el punto de partida en el desarrollo de los concretos vegetales, pues con estos parámetros se hace el cálculo de las cantidades de agua necesarias para mantener una relación agua/cementante óptima.

La caracterización de los concretos vegetales, se planeó después de revisar varios protocolos de pruebas, haciendo especial énfasis en la resistencia a compresión, posteriormente, se realiza la microscopía electrónica de barrido para evaluar cómo es la zona de interacción entre la pasta y los bio-agregados; así como un análisis a través de espectroscopía de rayos x de energía dispersiva (EDS), se ejecuta una caracterización química elemental de los concretos vegetales, cabe hacer mención que esta técnica tiene ciertos limitantes que principalmente se reflejan en la cuantificación de los elementos.

Por otro lado, para conocer como es la interacción que existe en los compuestos hidrosolubles presentes en los bio-agregados y los cementantes, se plantea el análisis de las pastas a través de la microcalorimetría isotérmica, donde se estudiará el comportamiento de las reacciones químicas de hidratación mediante la liberación de calor en tiempo real. Además, para poder cotejar los datos obtenidos en el

ensayo mencionado anteriormente, se complementa con el análisis con la difracción de rayos X y la termogravimetría (TGA y DTG).

### **Contexto Mexicano**

En este apartado, se realiza una breve descripción del origen del bio-agregado utilizado en México. Por otro lado, se aplican las mismas técnicas de caracterización en la corteza, médula y la mezcla de ambos bio-agregados, en este caso, se añade una técnica más, donde se determina el valor de la masa de los bio-agregados cuando estos se encuentran con una cantidad de agua para mantener un volumen estable. Debido a limitaciones ajenas al proyecto, algunas técnicas de caracterización física no pudieron ser completadas.

Capítulo 3  
*Obtención y  
caracterización de los bio-  
agregados*

## Capítulo 3 Obtención y caracterización de los bio-agregados

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents processus de transformation et de production des bio-agrégats. En France, la production de bio-agrégats a été réalisée à Tarbes, dans le laboratoire AGROMAT, qui appartient au Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (LCA) dont le siège est à Toulouse. Au Mexique, la transformation et l'obtention des bio-agrégats ont été réalisées sur le lieu de récolte du maïs, par la séparation manuelle de l'écorce et de la moelle de la tige de maïs, le processus est décrit plus en détail dans la section 3.3.

L'objectif principal est d'obtenir 3 types de bio-agrégats à partir de tiges de tournesol et de maïs, qui seront utilisés dans la fabrication de différents bétons végétaux. A partir des tiges des plantes susmentionnées, on obtient : L'écorce, cette partie est le revêtement de la tige, et on la trouve autour de la tige, ce bio-agrégat a la plus grande densité et un taux d'absorption d'eau plus faible. La moelle est la partie centrale de la tige, dans cette partie de la plante passent les nutriments et les minéraux que les racines absorbent du sol ; ce bio-agrégat a une densité apparente plus faible et un taux d'absorption d'eau plus élevé que l'écorce. Enfin, on obtient un mélange d'écorce et de moelle, dans ce type de bio-agrégat, on s'attend à obtenir des valeurs intermédiaires à celles rapportées dans divers articles et thèses, entre la densité et l'absorption d'eau des particules d'écorce et de moelle.

Les propriétés susmentionnées sont liées à la microstructure des bio-agrégats. Le processus d'obtention des bio-agrégats implique une consommation d'énergie, ainsi qu'un coût économique et un temps de préparation, c'est pourquoi il a été décidé de broyer la tige entière et de la séparer ensuite. Dans cette section, les techniques de caractérisation décrites au chapitre 2 sont appliquées afin d'établir les principaux paramètres (absorption d'eau à 1 minute d'immersion et densité apparente) pour la préparation de bétons à base de plantes. Les résultats obtenus seront comparés et corrélés avec les valeurs du chanvre commercial, afin d'établir les quantités optimales d'eau et de bio-agrégats dans chaque mélange. Le tableau 3.1 montre les agrégats obtenus dans cette recherche.

**Tableau 3.1 Nomenclature des bio-agrégats obtenus**

Bio-agrégats	Abréviation
Chanvre	H
Écorce de tournesol	SB
Moelle de tournesol	SP
Mélange de écorce et moelle de tournesol	SM
Écorce de maïs	CB
Moelle de maïs	CP
Mélange de écorce et moelle de maïs	CM

### 3.1 Introducción

En este capítulo, se presentan los diferentes procesos de transformación y obtención de los bio-agregados. En Francia, la producción de los bio-agregados fue realizada en Tarbes, en el laboratorio de AGROMAT, el cual pertenece al Laboratorio de Química Agroindustrial (Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (LCA)) cuya sede principal se encuentra en Toulouse. En México, la transformación y obtención de los bio-agregados se llevó a cabo en el lugar de la cosecha del maíz, a través de la separación manual de la corteza y médula del tallo de maíz, el proceso se describe a mayor profundidad en apartado 3.3.

El objetivo principal es obtener 3 tipos de bio-agregados de los tallos de las plantas de girasol y maíz, los cuales serán empleados en la fabricación de los diferentes concretos vegetales. De los tallos de las plantas antes mencionadas, se obtiene: La corteza, esta parte es la cubierta del tallo, y este se encuentra alrededor del mismo, este bio-agregado tiene la mayor densidad y una menor tasa de absorción de agua. La médula es la parte central del tallo, en esta parte de la planta transitan los nutrientes y minerales que las raíces absorben del suelo; este bio-agregado tiene una menor densidad aparente y una absorción de agua mayor con respecto a la corteza. Por último, se obtiene una mezcla de la corteza y la médula, en este tipo de bio-agregado, se espera obtener valores intermedios a los reportados en diversos artículos y tesis, entre la densidad y la absorción de agua de las partículas de corteza y médula.

Las propiedades mencionadas anteriormente están ligadas a la microestructura de los bio-agregados. El proceso de obtención de los bio-agregados conlleva un consumo de energía, así como un costo económico y tiempo de preparación, por lo cual se tomó la decisión de realizar la trituration del tallo completo y posteriormente, realizar una separación. En este apartado se aplican las técnicas de caracterización descritas en el capítulo 2, a fin de poder establecer los parámetros principales (absorción de agua a 1 minuto de inmersión y densidad aparente) para la elaboración de los concretos vegetales. Los resultados obtenidos serán comparados y correlacionados con los valores del cáñamo comercial, a fin de establecer las cantidades de agua y de bio-agregados óptimos en cada mezcla. En la tabla 3.1 se muestran los agregados obtenidos en esta investigación.

**Tabla 3.1 Nomenclatura de los bio-agregados obtenidos**

Bio-agregado	Abreviatura
Cáñamo	H
Corteza de girasol	SB
Médula de girasol	SP
Mezcla de corteza y médula de girasol	SM
Corteza de maíz	CB
Médula de maíz	CP
Mezcla de corteza y médula de maíz	CM

## 3.2 Bio-agregados empleados en Francia

### 3.2.1 Bio-agregado de cáñamo comercial

El cáñamo utilizado en esta investigación, es de la marca Biofibat, el cual es un bio-agregado de origen francés, compuesto por fragmentos de virutas de cáñamo (fibras de celulosa) calibradas y limpias, el cual es resultado de la desfibración de la paja del cáñamo, y en cuyo proceso de transformación no se ha utilizado agua o algún disolvente, este bio-agregado tiene una certificación de calidad emitida por Construire en Chanvre [60]. Este bio-agregado se vende en presentaciones de 20 kg (ver figura 3.1a y 3.1b), así mismo, el productor establece algunos parámetros físicos del bio-agregado, mismos que se muestran en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Características técnicas del cáñamo comercial [60]**

---

Composición: Cáñamo 100%					
Densidad: 110 kg/m <sup>3</sup>					
Conductividad térmica del producto $\lambda$ : 0.050 W/m.K					
Granulometría					
Tamaño en milímetros	6.30	3.15	2.00	1.00	0.5
En masa en porcentaje	2.5	32	39	24	2
Relación Polvo/fibra (%) Polvo: 0.4 / fibra: 0.1					
Contenido de agua < 15%					

---

Las características mencionadas en la tabla anterior serán las referencias para las diferentes técnicas de caracterización que se emplearán a este bio-agregado; también, dichas propiedades serán comparadas con los diferentes bio-agregados utilizados para la fabricación de los concretos vegetales.

### 3.2.2 Bio-agregados del tallo de girasol

#### 3.2.2.1 Metodología

En la figura 3.2, se desglosa la metodología empleada para la obtención de los bio-agregados del tallo de la planta de girasol (corteza, médula y la mezcla de ambos, SB, SP y SM respectivamente). Cabe hacer mención que, para conocer cómo es el proceso de trituración del molino mencionado en el apartado 2.3.1, se utilizaron 6.80 kilogramos de tallos de girasol, mismos que son cuantificados en el apartado 3.2.4. El objetivo de los procesos de tamizaje es regular el tamaño de los bio-agregados entre 1 y 4 milímetros. La transformación de los bio-agregados está compuesta por:

- Molienda.
- Separación (únicamente en el caso de SB y SP).
- Tamizaje a través de la malla con 1 mm<sup>2</sup> de abertura.
- Tamizaje a través de la malla con 4 mm<sup>2</sup> de abertura.

- Obtención de los bio-agregados.

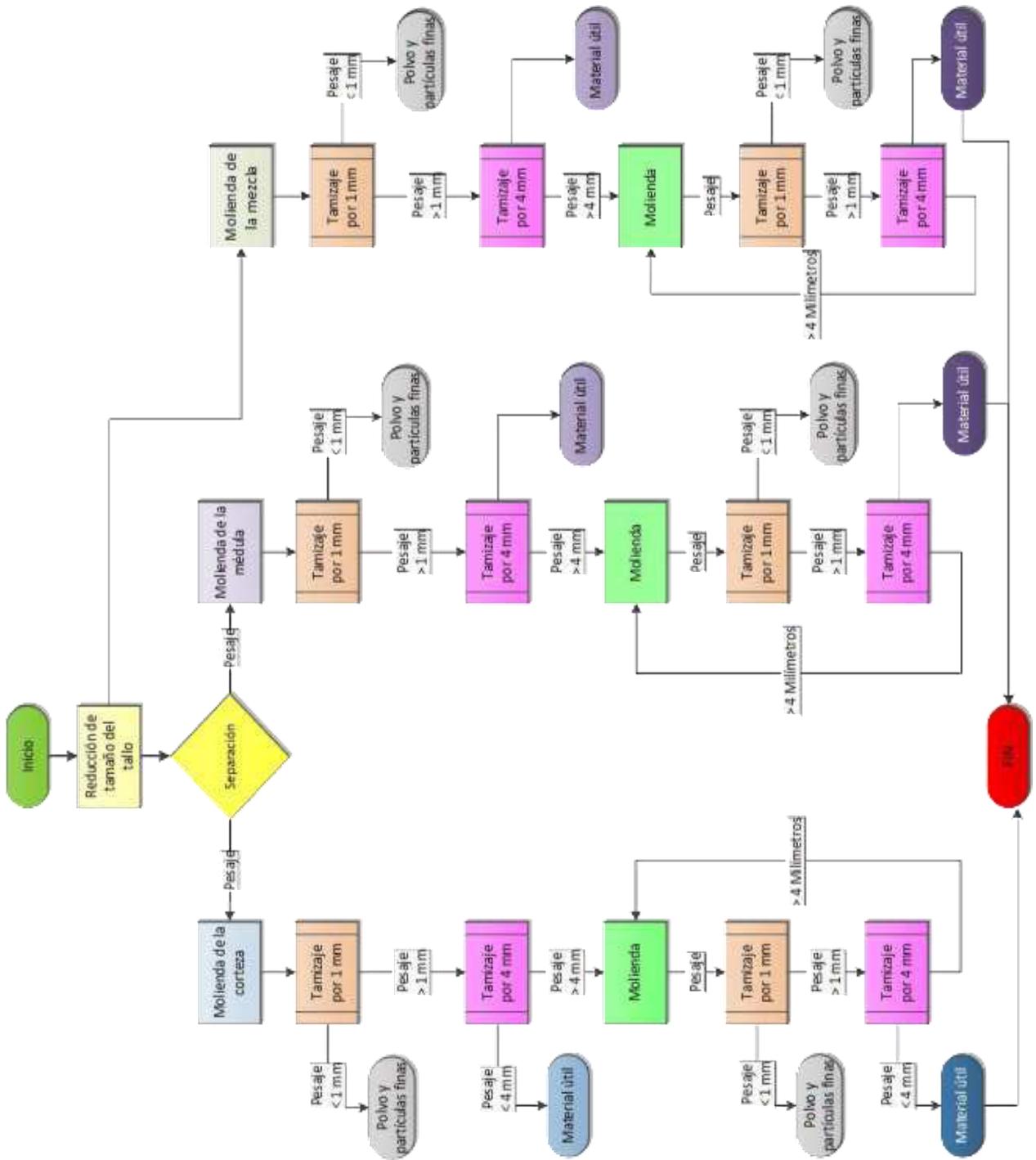


Figura 3.2. Proceso de obtención de los bio-agregados del tallo de girasol

### 3.2.2.2 Molienda

En la figura 3.3, se presenta el equipo y la metodología utilizada para la trituración del tallo de girasol, esta planta proviene del sur de Francia de la región de Occitania. En la *figura 3.3a*) se realiza a mano la reducción de tamaño de los tallos (*de 1.30 metros a fracciones de entre 0.30 a 0.50 metros*), esto con la finalidad de evitar el atasco del material en la boquilla del molino. En la *figura 3.3b*) se efectúa el proceso de trituración; y, por último, en la *figura 3.3c*) se ilustra el resultado de este proceso.



a)



b)



c)

**Figura 3.3. Proceso de molienda de los tallos de girasol, a) Reducción de tamaño, b) Molienda, c) Resultado.**

Durante la trituración, la pérdida de material fue notoria, esto debido a la acción del viento causado por el giro de las aspas y martillos del molino, ya que algunas partículas, se quedaban atrapadas en el interior del molino, por lo que fueron trituradas varias veces hasta quedar reducidas a polvo. También, había material que quedó atascado en el interior del molino, y a esto, se suma el material atrapado por la electricidad estática generada por los contenedores donde se almacenó el material.

### 3.2.2.3 Obtención de los bio-agregados del tallo de girasol

Culminada la primera molienda, se realiza la separación de la corteza y la médula, esto se ejemplifica en la figura 3.4. El proceso consiste en vaciar el resultado de la trituración en la banda transportadora mecánica, (ver figura 3.4a); la médula, es el bio-agregado que tiene una densidad aparente menor, por lo que es atrapado con facilidad por el sistema de aspirado y almacenamiento (ver figura 3.4b).

Por otro lado, la corteza es el bio-agregado con mayor densidad aparente y menor rugosidad, lo anterior ayuda a que se mantenga en la superficie de la banda mecánica, donde es transportado hacia un recipiente para ser almacenado. Al finalizar la separación, ambos bio-agregados se pesan para llevar un control del material útil y la pérdida. Sin embargo, durante el pesaje, se observó la presencia de corteza en el recipiente de la médula, por lo cual, se llevó a cabo un nuevo proceso de separación (ver figura 3.4c y 3.4d); este procedimiento se efectuó hasta que no se observaba restos de corteza entre las partículas de médula (ver figura 3.4e y 3.4f).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

**Figura 3.4. Proceso de obtención de los bio-agregados del tallo de girasol: a) Alimentación del sistema, b) Sistema de almacenamiento, c) Resultado del primer proceso de separación, d) Separación de la corteza de la médula, e) Médula de girasol separada y, f) Corteza separada.**

En la figura 3.5, se expone el tamizaje de los bio-agregados, este se realizó con un tamizador mecánico de la marca Ritec, modelo 600 (ver figura 3.5a), el primer cernido del bio-agregado se hace a través del tamiz con 1 mm<sup>2</sup> de abertura (No. 18 ASTM), con la finalidad de eliminar el polvo y regular el tamaño mínimo de los bio-agregados (ver figura 3.5b y 3.5c). Posteriormente, de manera manual se tamizó el bio-agregado con la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura (No. 5 ASTM) (ver figura 3.5d y 3.5e), con el tamizaje anterior, se regula el tamaño máximo de los bio-agregados; sin embargo, algunos fragmentos de la corteza sobrepasaban la longitud deseada, esto debido a que pasaban a través de la malla de manera vertical (ver figura 3.5f). En el caso de la médula, algunas partículas también sobrepasaban los 4 mm<sup>2</sup> (ver figura 3.5g); dichas partículas han sido nuevamente trituradas y tamizadas.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)

**Figura 3.5. Tamizaje de los bio-agregados del tallo de girasol: a) Tamizador mecánico, b) Tamizaje con malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura de la corteza, c) Tamizaje con malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura de la médula, d) Tamizaje con malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura de la corteza, e) Tamizaje con malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura de la médula, f) Fragmentos de corteza mayores a 4 mm y, g) Fragmentos de médula mayores a 4 mm.**

#### **3.2.2.4 Síntesis, rendimientos y cantidades de bio-agregados de girasol**

Como se mencionó en el apartado 3.2.2.1, para observar y aprender cómo es el funcionamiento del molino, se utilizó 6.80 kilogramos de los tallos de girasol. En el interior del molino, se colocó una malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura, por lo que este material será considerado como la mezcla de corteza y médula de girasol. Estos 6.80 kilogramos de material, no están considerados en el peso total inicial de 55.70 kilogramos, por lo que son cuantificados aparte. En la tabla 3.3, se muestran las cantidades obtenidas en la primera molienda, la cual inicia con un total de 55.70

kilogramos, y una vez finalizado este proceso, se obtuvo un total de 53.10 kilogramos, la pérdida total fue de 2.60 kilogramos.

**Tabla 3.3 Material obtenido en el primer proceso de molienda en kilogramos**

Kilogramos		
Peso inicial	Peso triturado	Pérdida
55.70	53.10	2.60
Porcentaje		
100	95.15	4.67

La pérdida de material se debe a la velocidad de operación del molino, pues al funcionar cerca de las 3,000 RPM ocasiona que algunas partículas sean pulverizadas; este mismo polvo quedaba atascado en los orificios interiores del molino o bien era expulsado al aire. En la tabla 3.4 se muestran las cantidades obtenidas en el primer proceso de separación.

**Tabla 3.4 Separación de los bio-agregados obtenidos del tallo del girasol**

Primera separación			
Kilogramos			
Peso triturado	Corteza obtenida	Médula obtenida	Pérdidas
53.10	43.60	7.50	2.00
Porcentaje			
95.33	78.28	13.46	3.59
Segunda separación			
Kilogramos			
Médula obtenida	Corteza recuperada	Médula recuperada	Pérdidas
7.50	3.00	3.40	1.10
Porcentaje			
13.46	5.39	6.10	1.97

De la tabla anterior, es importante recalcar que en esta etapa de separación, la médula obtenida presentaba partículas de corteza, atribuyéndose principalmente a dos razones: la primera, es porque la corteza fue aspirada accidentalmente; y, la segunda es porque algunos fragmentos tienen dimensiones muy pequeñas, esto ocasiona que iguallen en masa a la médula y por consiguiente sean absorbidos por la aspiradora (debido a la posición del sistema de recuperación de la médula, el cual estaba muy cerca de la banda transportadora).

Por otro lado, al realizar la limpieza de los sacos donde se almacenaba la médula, fueron recuperados 0.90 kilogramos, este material se hallaba fuertemente adherida a la corteza; por lo cual no fue factible separarla incluso de manera manual sin que

dañaran los fragmentos en su totalidad; por lo que se optó desecharlas y considerarlas como una pérdida de material en el pesaje (ver figura 3.6).



**Figura 3.6. Partículas de médula adheridas en la corteza**

Con la finalidad de incrementar la eficiencia en la recuperación de la corteza y la médula, se realizó un ajuste en la distancia entre la boquilla del sistema de aspiración y la banda mecánica. Las adecuaciones hechas, tienen un papel importante, pues conforme aumenta la distancia entre estos elementos, la cantidad de médula recuperada aumenta, esto gracias a la diferencia de las densidades entre la corteza y la médula. También la rugosidad de la banda mecánica es importante, pues los pliegues ayudan a tener un mejor agarre de las partículas de corteza. Por otro lado, la vibración ocasionada por la banda, no generan ninguna sujeción en las partículas de médula, ya que este bio-agregado no presenta rugosidad en su superficie, lo que ocasiona que se deslicen hacia el sistema de aspirado con facilidad.

Como resultado de los ajustes mencionados anteriormente, en el segundo proceso de separación aplicado a la médula, el peso inicial fue de 7.46 kilogramos, de los cuales 3.05 kilogramos corresponden a la corteza y 3.41 kilogramos corresponden a la médula. En la tabla 3.5, se muestran las cantidades totales después de realizarse el cernido de los 3 bio-agregados a través del tamiz de 1 mm<sup>2</sup> de abertura. En esta parte se hace la clasificación por tamaño, el material pasante se considera como material no útil, por lo cual se pesa y se desecha. El material retenido se considera como material útil, posteriormente se pesa y se almacena en bolsas de plástico.

**Tabla 3.5 Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura**

Bio-agregado	Peso triturado	Material retenido	Material pasante	Pérdidas
Kilogramos				
Corteza	46.60	41.00	5.22	0.35
Médula	3.40	2.70	0.50	0.20
Mezcla*	6.80	5.70	0.80	0.30

		Porcentaje		
Corteza	83.66	73.61	9.37	0.63
Médula	6.10	4.85	0.90	0.36
Mezcla*	100	83.82	11.76	4.41

\* Este bio-agregado es cuantificado aparte (ver el 3.2.2.1)

Es importante mencionar que, durante el tamizaje, se desprendía polvo, el cual solo se pudo cuantificar realizando la resta del peso inicial, el peso del material retenido y el material pasante. En el caso de la corteza, la cantidad de material que pasó la malla, pudo haberse originado por 2 razones, la primera, es causada por la trituración del molino, y la segunda, se debe a la fricción entre las partículas durante el proceso de transporte y almacenamiento del material, esta fricción ocasiona que las partículas de corteza disminuyan su tamaño a través de la pulverización.

En el caso de la médula, los fragmentos menores a 1 milímetro son el resultado de la trituración constante del molino, pues debido a que tienen una densidad menor, el viento generado al interior del molino, hacía que estas no salieran y fuesen trituradas varias veces, causando una reducción de tamaño drástica, y con ello, aumentando la cantidad de material pasante. Por último, en el caso de la mezcla de corteza y médula de girasol, el uso de la malla durante el procedimiento de trituración, hacía el mismo efecto que en la médula, pues los fragmentos de médula y corteza que excedían los 4 milímetros quedaban atrapados dentro del molino y fueron triturados en varias ocasiones.

En la tabla 3.6, se muestran las cantidades obtenidas después de tamizar los 3 bio-agregados con la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura. En este caso, se observaron muy pocas pérdidas de material debido al tamizaje previamente realizado. En la corteza, el material pasante fue triturado en varias ocasiones para así aprovechar la mayor cantidad posible de material. Por otro lado, en la médula, la cantidad de material que cumplía con el tamaño máximo y mínimo era menor, (0.70 kilogramos), por ello se decidió juntar ambos tamaños de partículas, con la finalidad de asegurar la cantidad de material suficiente para la fabricación de los concretos vegetales.

**Tabla 3.6 Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y en porcentaje)**

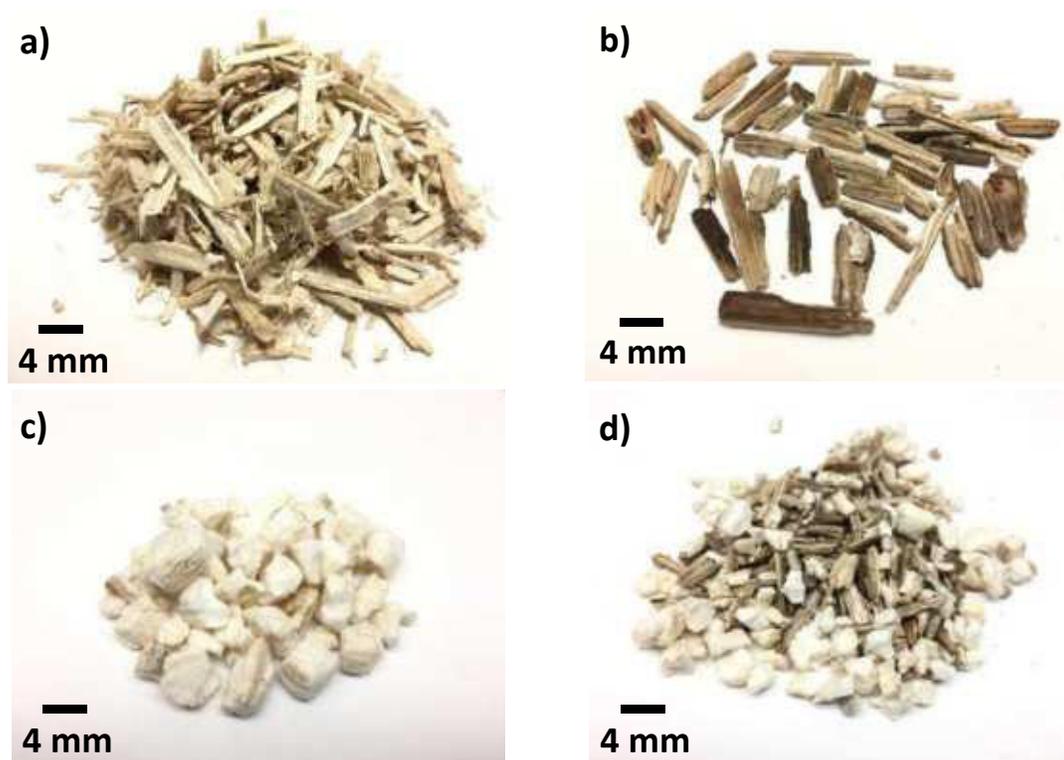
Bio-agregado	Peso obtenido	Material retenido	Material pasante	Pérdidas
<b>Kilogramos</b>				
Corteza	41.00	40.50	0.50	--
Médula	2.60	0.70	1.90	--
Mezcla	5.70	5.10	0.30	0.30
<b>Porcentaje</b>				
Corteza	73.61	72.71	0.90	--
Médula	4.67	1.26	3.41	--
Mezcla	83.82	75.00	4.41	4.41

En la tabla 3.7, se muestran las cantidades correspondientes a los totales, los porcentajes de rendimiento se calculan tomando como el peso inicial (55.70 kg) como el 100%. En la mezcla de corteza y médula, se tiene un rendimiento del 75.00% por lo que se ha detallado en el apartado 3.2.2.1.

**Tabla 3.7 Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de girasol (Material útil entre 1 y 4 milímetros)**

Bio-agregado	Kilogramos	Porcentaje de rendimiento
Corteza	40.53	72.76
Médula	2.60	4.67
Mezcla	5.10	75.00

Los porcentajes mostrados en la tabla anterior, indican el rendimiento de los bio-agregados obtenidos del tallo del girasol; es decir qué cantidad de material útil puede obtenerse después del proceso de transformación y. En la figura 3.7, se muestran los bio-agregados obtenidos del cáñamo (ver figura 3.7a) y del tallo de girasol (ver figuras 3.7b-d).



**Figura 3.7. Bio-agregados obtenidos del tallo de girasol: a) Cáñamo (H), b) Corteza de girasol (SB), c) Médula de girasol (SP), d) Mezcla de corteza y médula de girasol (SM).**

En la imagen anterior, se pueden apreciar las diferencias morfológicas de los diferentes bio-agregados, las cuales son producto del proceso de molienda, así como de la misma naturaliza de la corteza y la médula. El cáñamo, es el bio-agregado que tiene una forma regulada, esta, la adquiere desde el proceso de obtención en su fabricación. Además, es importante observar la similitud que tiene con la corteza de girasol; también se hace evidente que algunas partículas de la corteza de girasol tienen un tamaño mayor a 4 milímetros, por lo que puede ser necesario un proceso mejor controlado de tamizaje.

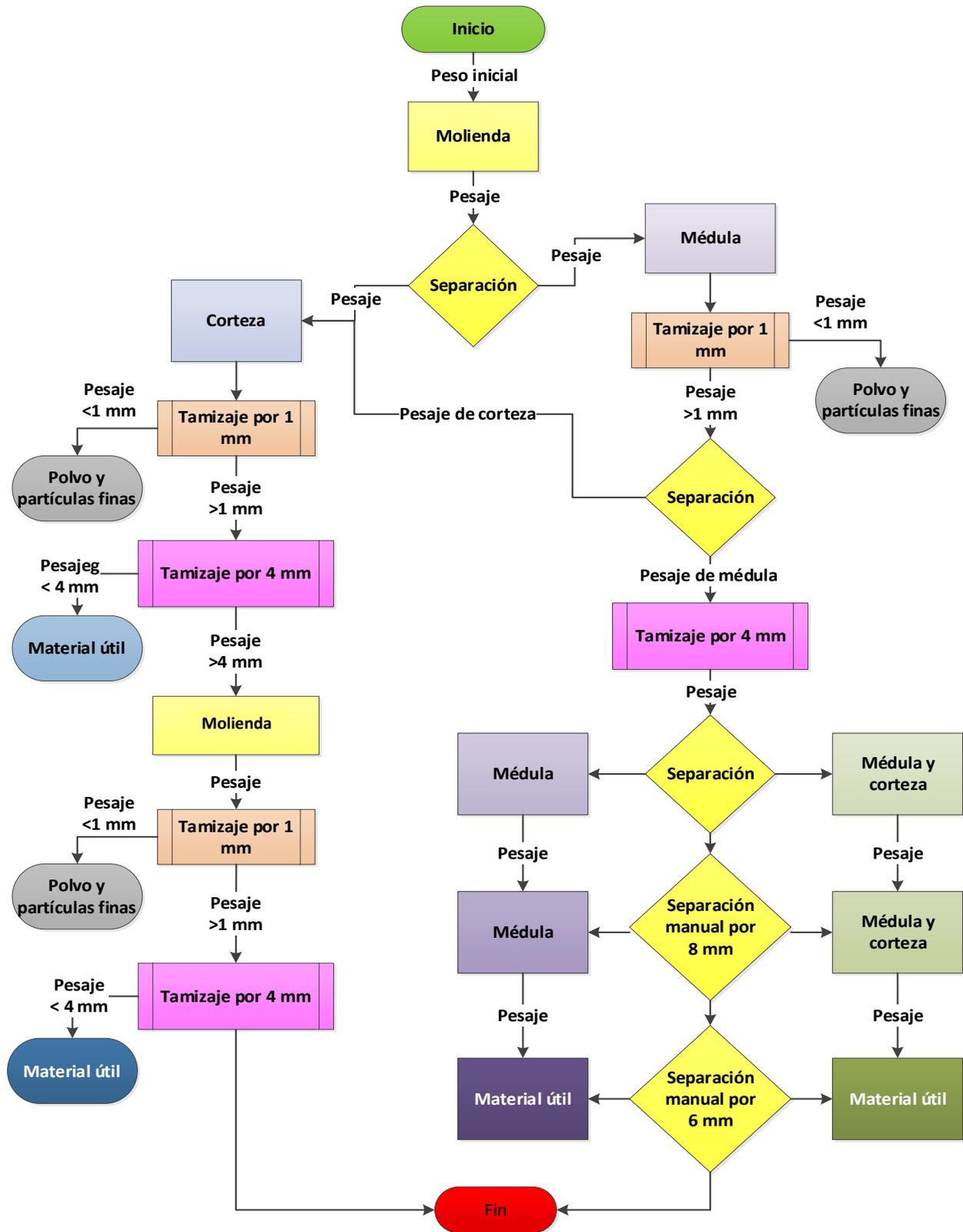
### **3.2.3 Bio-agregados el tallo de maíz**

#### **3.2.3.1 Metodología**

En la figura 3.6, se desarrolla la metodología empleada para la transformación del tallo de la planta de maíz en los 3 bio-agregados, (corteza, médula y la mezcla de ambos, CB, CP y CM respectivamente), la transformación de estos bio-agregados está compuesta por:

- Molienda.
- Separación.
- Tamizaje mecánico a través de la malla con 1 mm<sup>2</sup> de abertura.
- Tamizaje manual a través de la malla con 4 mm<sup>2</sup> de abertura.
- Tamizaje manual a través de la malla con 6 mm<sup>2</sup> de abertura.
- Tamizaje manual a través de la malla con 8 mm<sup>2</sup> de abertura.
- Obtención de los bio-agregados.

A diferencia del proceso mencionado en el apartado 3.2.2.1, las modificaciones realizadas son el implemento de las mallas de 6 y 8 mm<sup>2</sup> de abertura, con la finalidad de limpiar de impurezas (tierra y hojarasca presentes en la mezcla de la corteza y médula de maíz).



**Figura 3.6. Proceso de obtención de los bio-agregados del tallo de maíz**

### **3.2.3.2 Molienda**

En la figura 3.7, se muestra el proceso de molienda del tallo de maíz, en el cual se utiliza la misma metodología explicada en el apartado 3.2.2.2; sin embargo, en este caso no se realizó la reducción del tamaño de los tallos, ya que no tienen la misma dureza que los tallos de girasol, y, por consiguiente, la molienda se realizaba con mayor facilidad. En la figura 3.9a), se muestran los tallos de maíz los cuales provienen del sur de Francia de la región de Occitania, y en la figura 3.9b), se muestra el resultado de la molienda.



**Figura 3.7. Molienda de los tallos de maíz, a) Tallos de maíz, b) Resultado de la molienda**

### **3.2.3.3 Obtención de los bio-agregados del tallo de maíz**

La separación de la médula y la corteza implicó un mayor grado de dificultad, esto se debe a la fuerte adherencia entre médula y la corteza del tallo. En la figura 3.8, se muestran algunas partículas de la médula de maíz, en el cual se observa la presencia de corteza (ver figura 3.8a), por lo que, para separarlas, se llevó a cabo una serie de adecuaciones que a continuación se mencionan:

- Después de tamizar la médula por la malla de 1 mm<sup>2</sup> por medios mecánicos (ver figura 3.8b), se empleó una malla de 8 mm<sup>2</sup> de abertura (No. 5/16” ASTM) (ver figura 3.8c), esto se realiza para retirar la hojarasca y raíces.
- A continuación, se utilizó una malla de 6 milímetros de abertura, esta malla se utilizó para separar corteza, hojarasca y raíces (figura 3.8d).
- Por último, se utilizó el tamiz de 4 milímetros cuadrados de abertura (No. 5 ASTM) (ver figura 3.8e).

Las partículas menores a 1 milímetro principalmente estaban compuestas por fibras, las cuales se desprendían de la corteza; también, en el residuo del tamizaje se

observó la presencia de tierra, la cual probablemente se encontraba alojada en la hojarasca o en alguna raíz presente en el tallo. La mayor parte de las fracciones de corteza, tienen una forma alargada, superior a 4 milímetros. En el caso de la médula, la mayor parte de estas partículas tienen una forma elíptica, lo cual dificultaba el paso en la malla, por lo que se optó por mezclar ambos tamaños. También es importante resaltar que el principal problema en la separación del tallo de maíz, es la fuerte adherencia que existe entre la corteza y la médula, especialmente cerca de la zona nodular (ver figura 3.8f).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

**Figura 3.8. Proceso de tamizaje de los bio-agregados del tallo del maíz: a) Presencia de un alto volumen de corteza en la médula, b) Tamizaje a través de la malla de 1 milímetro de abertura, c) Tamizaje a través de la malla de 8 milímetros de abertura, d) Tamizaje a través de la malla de 6 milímetros de abertura, e) Tamizaje a través de la malla de 4 milímetros de abertura y, f) Zona nodular del tallo de maíz**

### 3.2.3.4 Síntesis, rendimientos y cantidades de bio-agregados de maíz

En la tabla 3.8, se muestran los resultados obtenidos después de realizar la primera molienda del tallo de maíz, a diferencia del tallo de girasol, la pérdida del material es menor. En este caso, se obtuvieron 23.95 kilogramos, por otro lado, se tuvo una pérdida de 0.15 kilogramos.

**Tabla 3.8 Material obtenido en el primer proceso de molienda**

Kilogramos		
Peso inicial	Peso triturado	Pérdida
24.10	23.95	0.15
Porcentaje		
100	99.38	0.62

La pérdida se debe al polvo generado durante el molimiento, y puede que sea producido por la corteza del tallo. Así mismo se observó que cuando se realizó la trituración del tallo, la corteza se encuentra parcialmente unida a la médula, también a simple vista se observa un sistema tubular que circunda a la epidermis del tallo.

En la tabla 3.9, se muestran las cantidades obtenidas durante los cinco procesos de separación. Para obtener los bio-agregados del tallo del maíz, fueron necesarios 5 procesos de separación, los 3 primeros fueron realizados utilizando el sistema de aspiración y la banda automática; el cuarto y quinto proceso se realizaron las modificaciones manuales mencionadas en el apartado 3.2.3.3.

**Tabla 3.9 Separación de los bio-agregados obtenidos del tallo del maíz**

Primera separación				
Kilogramos				
Peso triturado	Corteza obtenida	Médula obtenida	Pérdidas	
23.95	14.80	7.80	1.40	
Porcentaje				
99.38	61.41	32.37	5.81	
Segunda separación				
kilogramos				
Peso obtenido	Corteza recuperada	Médula recuperada	Partículas < 1mm	
7.80	3.40	4.30	0.10	
Porcentaje				
32.37	14.11	17.84	0.41	
Tercera separación				
Kilogramos				
Peso obtenido	Médula recuperada	Mezcla recuperada	Polvos	
4.30	0.50	3.30	0.50	
Porcentaje				
17.84	2.07	13.69	2.07	

<b>Cuarta separación <sup>a</sup></b>				
Kilogramos				
Peso obtenido	Médula recuperada	Mezcla recuperada	Pérdidas	
3.30	0.40	2.50	0.50	
Porcentaje				
13.69	1.66	10.37	2.07	

<b>Quinta separación <sup>b</sup></b>				
Kilogramos				
Peso obtenido	Mezcla pasante	Mezcla retenida	Pérdida	
2.50	1.20	1.30	--	
Porcentaje				
10.37	4.98	5.39	--	

<sup>a</sup> Empleo la malla de 8 mm<sup>2</sup> de abertura.

<sup>b</sup> Empleo la malla de 6 mm<sup>2</sup> de abertura.

Para realizar la cuarta separación, se utilizó una malla de 8 mm<sup>2</sup>, con la finalidad de retirar hojarasca y algunas raíces presentes en el bio-agregado. En la quinta separación, se empleó la malla de 6 mm<sup>2</sup> para realizar la separación de las partículas más pequeñas de hojarasca, raíces y piedras. El número de procesos de separación realizados de manera mecánica, están en función de la cantidad de corteza mezclada en la médula, pues si existe una gran cantidad de corteza presente en la médula, se requiere más procesos de separación. Lo anterior se debe a que la corteza tiene una densidad similar a la médula, lo que ocasiona que el sistema de aspirado las absorba y por consiguiente, se realicen las fases de separación antes mencionadas. En la tabla 3.10, se muestran las cantidades de bio-agregado obtenidas mediante el tamizaje a través de la malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura. En la corteza de maíz, algunas partículas tenían una dimensión menor a 1 milímetro, debido a que fueron trituradas varias veces en el interior del molino, lo que propicia que las partículas reduzcan su tamaño. En este bio-agregado, se presenta la mayor cantidad de material no útil.

**Tabla 3.10 Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y porcentaje)**

Bio-agregado	Peso inicial	Material retenido	Material pasante	Pérdidas
Kilogramos				
Corteza	18.10	15.30	2.80	--
Médula	0.90	0.70	0.20	--
Mezcla	2.50	1.20	1.30	--
Porcentaje				
Corteza	75.10	63.49	11.62	--
Médula	3.73	2.90	0.83	--
Mezcla	10.37	4.98	5.39	--

El cernido de la mezcla de corteza y médula estuvo marcado por la presencia de tierra y hojarasca, la cual fue removida de manera manual, lo que también facilitaba la separación de la corteza y la médula, pero dejaba algunos tamaños de bio-

agregados por arriba de los 6 mm. En este último bio-agregado, no hubo pérdidas de material ya que el proceso al ser de manera manual permitió tener control. En la tabla 3.11 se muestran las cantidades obtenidas después de realizar el cernido del material a través de la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura. En este caso, se observaron muy pocas pérdidas de material, debido al tamizaje previamente realizado.

**Tabla 3.11 Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y en porcentaje)**

Bio-agregado	Peso inicial	Material menor a 4 mm	Material mayor a 4 mm
<b>Kilogramos</b>			
Corteza	15.30	13.10	2.20
Médula	0.70	0.40	0.30
Mezcla	2.50	2.50	0.00
<b>Porcentaje</b>			
Corteza	63.49	54.36	9.13
Médula	2.90	1.66	1.24
Mezcla	10.37	10.37	--

La corteza retenida fue triturada en varias ocasiones para aprovechar la mayor cantidad posible de material. Por otro lado, en la médula, la cantidad de material que cumplía con el tamaño máximo y mínimo era baja (0.40 kilogramos), por ello se decidió juntar ambos tamaños de partículas, para así poder asegurar la cantidad de material suficiente para la fabricación de los concretos vegetales. En la mezcla de corteza y médula de maíz no existía material retenido en el tamiz de 4 mm<sup>2</sup>. En la tabla 3.12 se resumen las cantidades de los materiales útiles y los no útiles, como se mencionó en el inciso 3.2.2.4, el total inicial fue de 24.10 kilogramos lo que significa el 100% del total del material.

**Tabla 3.12 Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de maíz**

<i>Material útil (entre 1 y 4 milímetros)</i>		
Bio-agregado	Kilogramos	Porcentaje
Corteza	13.10	54.36
Médula	0.70	2.90
Mezcla	2.50	10.37

El mismo proceso se repite para caso de la médula, así como para la cantidad de material no útil, y para la mezcla de corteza y médula de maíz. Los porcentajes mostrados en la tabla anterior indican el rendimiento de los bio-agregados del tallo del maíz; es decir, qué cantidad de material útil puede obtenerse después del proceso de transformación y separación de los bio-agregados.

En la figura 3.12, se muestran los bio-agregados obtenidos del tallo de maíz. La separación de la corteza y la médula fue un proceso similar al de los bio-agregados del girasol. Sin embargo, en la mezcla de corteza y médula de maíz significó un proceso complicado y que toma un mayor lapso, pero, al ser un proceso manual,

permite separar los diferentes fragmentos obtenidos de la hojarasca, las raíces y la tierra. Los bio-agregados obtenidos se muestran en la figura 3.13.



**Figura 3.11. Bio-agregados obtenidos del tallo de girasol: a) Cáñamo (H), b) Corteza de maíz (SB), c) Médula de maíz (SP), d) Mezcla de corteza y médula de maíz (SM)**

Una de las principales diferencias que se puede apreciar en estos bio-agregados, es la morfología, pues en la corteza de maíz, se observa que son alargados y planos, caso contrario a las partículas de cáñamo, en las cuales se notan bordes y no tienen una forma rectangular. Por otro lado, la médula presenta formas elípticas y rectangulares, las cuales difieren de la forma circular de la médula de girasol. Así mismo, la apariencia de las partículas de los bio-agregados obtenidos puede afectar de manera significativa a las propiedades físicas, lo que conlleva a su vez, parámetros que puedan influir en el diseño de las mezclas de los concretos vegetales.

### **3.3 Bio-agregados empleados en México**

#### **3.3.1 Bio-agregados del tallo de maíz**

##### **3.3.1.1 Metodología**

En la figura 3.9, se ejemplifica el proceso de transformación de los bio-agregados, dicho procedimiento inicia con el corte, deshoje y limpia del tallo; posteriormente,

con un cuchillo se remueve la corteza del tallo, con la finalidad de separarlo de la médula. Después, la corteza, la médula y algunos tallos completos son colocados al sol para deshidratarlos y posteriormente ser triturados y tamizados. La transformación de los bio-agregados está compuesta por:

- Molienda.
- Separación.
- Tamizaje mecánico a través de la malla con 1 mm<sup>2</sup> de abertura.
- Tamizaje manual a través de la malla con 4 mm<sup>2</sup> de abertura.
- Obtención de los bio-agregados.

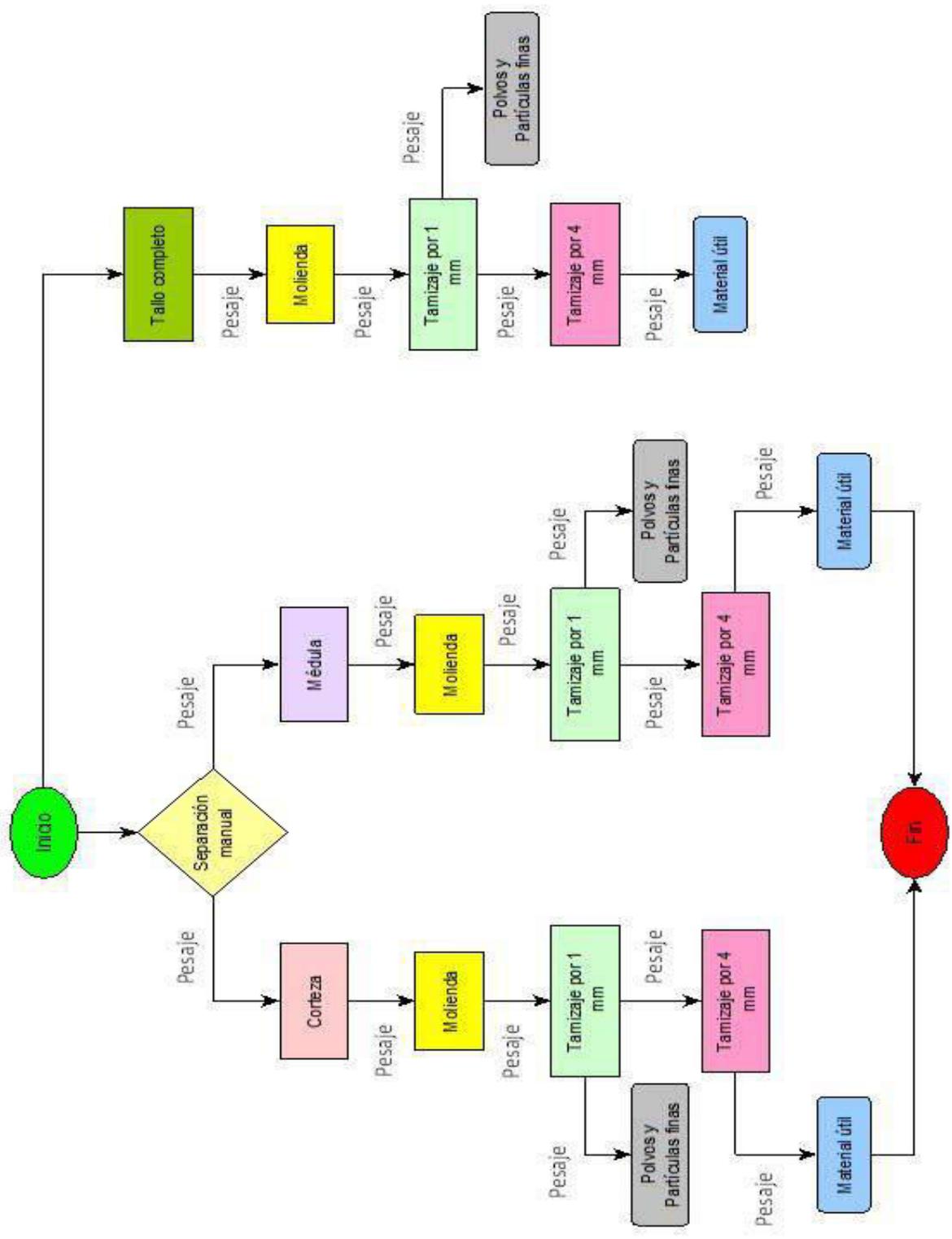


Figura 3.9. Diagrama de flujo del proceso de separación de los bio-agregados

### 3.3.2 Transformación de los bio-agregados

La metodología empleada para la obtención de los bio-agregados, es diferente a los procedimientos empleados en los tallos de maíz en Francia. La separación de la corteza y la médula se realiza cuando el tallo se encuentra recién cortado, es decir, cuando contiene agua. La principal diferencia observada, es que la separación de la corteza se realiza con una mayor facilidad con respecto al método seco.

#### 3.3.2.1 Obtención de los bio-agregados de la corteza de maíz

La transformación de este bio-agregado, inicia con el desenraice de la planta, después se quitan las hojas laminares que están presentes en todo el tallo, y por último, con un cuchillo o navaja, cuidadosamente se separa la corteza y la médula como se muestra en la figura 3.10 a - c.



**Figura 3.10. Proceso de preparación de la materia prima: a) limpieza del tallo, b) separación manual, c) separación manual de la corteza y médula**

Después de haber separado la corteza y la médula, se exponen al sol para realizar un proceso de secado (ver figura 3.11a y b), y posteriormente se trituran y se tamizan (ver figura 3.11c y d), la secuencia de tamizaje se explica a continuación:

- La corteza es cernida a través de la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura. El material pasante se almacena en un costal de plástico, y el retenido es almacenado en una bolsa de plástico para luego ser triturado nuevamente.
- Después, se realiza el tamizaje con la malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura, el material pasante es considerado como desperdicio o pérdida, se almacena y se pesa para tener un control en las cantidades de los materiales. El material retenido es almacenado en un costal de plástico y es considerado como material útil.

- El proceso anterior se repite hasta asegurar que todo el material es aprovechado.



a)



b)



c)



d)

**Figura 3.11. Proceso de preparación de la materia prima: a) secado de la corteza, b) secado de la médula, c) molienda, d) tamizaje**

### **3.3.2.2 Obtención de los bio-agregados de la médula de maíz**

Para obtener la mezcla y la corteza de maíz, se trituraron secciones de tallos completos de 30 a 40 cm de longitud (ver figura 3.12a), los cuales fueron sometidos a la misma secuencia de tamizaje descrita en el apartado 3.3.2.2, posteriormente, el bio-agregado se almacenó en un costal de plástico para su disposición (ver figura 3.12b).



a)



b)

**Figura 3.12 molienda de los tallos completos: a) molienda, b) almacenaje**

La trituración inicia con 20 kilogramos de material, en la tabla 3.13 se muestra el resultado del proceso de la trituración. Para obtener la mayor cantidad de bio-agregado útil, se realizaron 4 procesos de molienda, así como 5 procesos de tamizaje; obteniendo 19.73 kilogramos, así como una pérdida de 0.27 kilogramos.

**Tabla 3.13 Material obtenido en el primer proceso de molienda**

Kilogramos		
Peso inicial	Peso triturado	Pérdida
20	19.67	0.33
Porcentaje		
100	98.35	1.65

De la tabla anterior, se puede observar la mejoría en el rendimiento en la trituración de este bio-agregado, pues al tener un mejor control en el proceso, las pérdidas del material son mínimas. Por lo que el procedimiento tiene mejor un mejor desempeño cuando se obtiene por la vía húmeda. En la tabla 3.14 se muestran los procesos de molienda y tamizaje aplicados para la reducción del tamaño de la corteza. A diferencia del proceso de separación establecido en la sección 3.2.3.3 (separación realizada en Francia), el material solo se tritura y se reduce de tamaño.

**Tabla 3.14 Primer proceso de preparación de la corteza de maíz**

Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Kilogramos)		
Peso triturado	Material retenido	Material pasante
19.67	19.08	0.59
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
98.35	95.40	2.95
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Kilogramos)		

Material obtenido	Material retenido	Material pasante
19.08	15.51	3.57
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)		
95.40	77.22	18.18

En este primer proceso de preparación, se hicieron algunos ajustes al sistema de recolección del material ya triturado; debido a la acción del viento, algunos fragmentos no fueron recolectados, lo que significó parte de la pérdida del material. Uno de los aspectos positivos a resaltar durante el tamizaje fue el control que se llevó a cabo; pues en la malla de 1 milímetro de abertura, se pudo observar que las pérdidas se refieren tanto al polvo que desprendía la corteza, así como al material pasante por dicha malla.

Por otro lado, durante el tamizaje con la malla de 4 milímetros de abertura, fue posible retirar aquellos fragmentos que entraban de manera vertical, reduciendo con ello la cantidad de fragmentos que pueden inducir a algunos errores en los parámetros obtenidos en las pruebas físicas. Una vez obtenido el material retenido en la malla de 4 milímetros de abertura, se procedió a realizar una nueva trituración del bio-agregado; este proceso se muestra en la tabla 3.15.

**Tabla 3.15 Segundo proceso de preparación de la corteza de maíz**

Kilogramos		
Peso obtenido	Material triturado	Pérdida
15.51	15.04	0.53
Porcentaje		
77.22	74.88	2.34
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Kilogramos)		
Material obtenido	Material retenido	Material pasante
15.04	14.51	0.53
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
74.88	72.24	2.64
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Kilogramos)		
14.51	10.20	4.31
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)		
72.24	50.78	21.46

Durante el proceso detallado en la tabla anterior no se observa ninguna novedad, el proceso de reducción de tamaño se mantiene constante; se realizan los respectivos tamizajes y la cantidad retenida en el tamiz de 4 milímetros de abertura es nuevamente triturada; este proceso se muestra en las tablas 3.16 y 3.17.

**Tabla 3.16 Tercer proceso de preparación de la corteza de maíz**

Kilogramos		
Peso obtenido	Material triturado	Pérdida
10.20	9.69	0.51
Porcentaje		
51.78	49.19	2.59
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Kilogramos)		
Material obtenido	Material retenido	Material pasante
9.69	9.26	0.43
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura en porcentaje		
49.19	47.00	2.19
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Kilogramos)		
9.26	5.59	3.67
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura en porcentaje		
47.00	28.37	18.63

**Tabla 3.17 Cuarto proceso de preparación de la corteza de maíz**

Kilogramos		
<b>Peso obtenido</b>	<b>Material triturado</b>	<b>Pérdida</b>
5.59	5.13	0.46
Porcentaje		
28.37	26.03	2.34
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Kilogramos)		
<b>Material obtenido</b>	<b>Material retenido</b>	<b>Material pasante</b>
5.13	4.76	0.37
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
26.03	24.15	1.88
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Kilogramos)		
4.76	3.54	1.22
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)		
24.15	17.96	6.19

Los procesos de trituración y tamizajes mostrados anteriormente se realizan con una mayor rapidez; pero, es importante prestar atención durante los procesos de tamizaje, pues como se ha descrito en párrafos arriba, es en este punto donde se regula el tamaño; y teniendo control en el tamaño de los bio-agregados, se pueden controlar también, los parámetros de absorción, densidad aparente y conductividad térmica.

### 3.3.3.2 Médula

El procedimiento detallado en el punto 3.3.2 se realiza en la médula de maíz, donde se tiene un peso inicial de 8 kilogramos, que representan el 100% después del proceso de trituración, se obtuvieron 7.46 kg, lo que representa el 93.25% y se tuvo una pérdida de 0.54 kg, el cual equivale al 6.75% del total del material. Este proceso se detalla en la tabla 3.18.

**Tabla 3.18 Material obtenido en el primer proceso de molienda en kilogramos**

Peso inicial	Peso triturado	Pérdida
8	7.46	0.54
Material obtenido en el primer proceso de molienda en porcentaje		
100	93.25	6.75

Durante la trituración de este material se observó una gran cantidad de polvo, esta pérdida de material es ocasionada por la velocidad de giro del molino; la cual tuvo que reducirse para tener un proceso más controlado en la obtención de este bio-agregado. En las tablas 3.19 a 3.21 se muestran las cantidades de material obtenidos durante las reducciones de tamaño realizadas en la médula.

**Tabla 3.19 Primer proceso de preparación de la médula de maíz**

Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (kilogramos)		
Peso triturado	Material retenido	Material pasante
7.46	7.28	0.18
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
Material obtenido	Material obtenido	Material obtenido
93.25	91.00	2.25
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (kilogramos)		
7.28	4.65	2.63
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)		
91.00	58.12	32.88

**Tabla 3.20 Segundo proceso de preparación de la médula de maíz**

Segunda molienda (kilogramos)		
Peso obtenido	Material triturado	Pérdida
4.65	4.41	0.24
Tercera molienda (Porcentaje)		
58.12	55.12	3.00
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (kilogramos)		
Material obtenido	Material retenido	Material pasante
4.41	4.05	0.36
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
55.12	50.62	4.5
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (kilogramos)		
4.05	2.43	1.62
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)		
50.62	30.37	20.24

**Tabla 3.21 Tercer proceso de preparación de la médula de maíz**

Tercera molienda (kilogramos)		
Peso obtenido	Material triturado	Pérdida
2.43	1.39	0.23
Tercera molienda (porcentaje)		
30.37	17.37	13.00
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (kilogramos)		
Material obtenido	Material obtenido	Material obtenido
1.39	1.12	0.27
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
17.37	13.99	3.38
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (kilogramos)		
1.12	0.86	0.26
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)		
13.99	10.74	3.25

Durante el tamizado a través de la malla de 1 milímetro de abertura se observa que este material desprende una gran cantidad de polvo, como también la cantidad de partículas que pasan dicha malla es mayor con respecto a la corteza; esto puede estar ligado a la velocidad con la que el molino opera, ya que al bajar la velocidad se puede obtener una mayor cantidad de material útil.

### 3.3.2.3 Obtención de los bio-agregados de la Mezcla de corteza y médula de maíz

En la tabla 3.22 se muestra las cantidades alcanzadas durante la trituración de la médula de maíz; esta se realiza de la misma manera que en las secciones anteriores; en este bio-agregado se tiene un peso inicial de 8 kilogramos, que representan el 100% después del proceso de trituración, se obtuvieron 7.35 kg, lo que representa el 98.37% y se tuvo una pérdida de 0.36 kg, el cual equivale al 1.63% del total del material.

**Tabla 3.22 Material obtenido en el primer proceso de molienda**

Material obtenido en el primer proceso de molienda (Kilogramos)		
Peso inicial	Peso triturado	Pérdida
8	7.35	0.65
Material obtenido en el primer proceso de molienda (Porcentaje)		
100	91.88	8.13

Durante el desarrollo de la molienda se tuvo que reducir el tamaño de los tallos, pues esto representa un problema en la alimentación del molino; también los nodos presentes en el tallo; y un factor importante y que define el tamaño de las partículas

es la velocidad de giro del molino. En las tablas 3.23 a 3.25 se muestran los diferentes procesos de obtención de este bio-agregado

**Tabla 3.23 Primer proceso de preparación de la mezcla de corteza y médula de maíz**

Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (kilogramos)		
Peso triturado	Material retenido	Material pasante
7.35	6.77	0.58
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
91.88	84.63	7.25
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (kilogramos)		
6.77	3.45	3.32
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)		
84.63	43.13	41.50

**Tabla 3.24 Segundo proceso de preparación de la mezcla de corteza y médula de maíz**

Tercera molienda (kilogramos)		
Peso obtenido	Material triturado	Pérdida
3.32	2.95	0.37
Tercera molienda (porcentaje)		
41.50	36.90	4.60
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (kilogramos)		
Peso triturado	Material retenido	Material pasante
2.95	2.70	0.25
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
36.90	33.80	3.10
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (kilogramos)		
2.70	1.74	0.96
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)		
33.80	21.80	12.00

**Tabla 3.25 Tercer proceso de preparación de la mezcla de corteza y médula de maíz**

Tercera molienda (kilogramos)		
Peso obtenido	Material triturado	Pérdida
1.74	0.62	1.12
Tercera molienda (porcentaje)		
21.80	7.7	14.1
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (kilogramos)		
Peso triturado	Peso triturado	Material pasante
0.62	0.45	0.17
Tamizaje con la malla de 1 mm de abertura (Porcentaje)		
7.7	5.6	2.1
Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (kilogramos)		
0.45	0.28	0.17

Tamizaje con la malla de 4 mm de abertura (Porcentaje)

5.6

3.5

2.1

En este bio-agregado se presenta la mayor pérdida de material; durante la molienda del material fue necesario realizar algunos ajustes a la velocidad de trituración, así como en la recolección del material.

### 3.3.3 Síntesis, rendimientos y cantidades de bio-agregados de maíz en México

El proceso de molienda y trituración se realiza de una manera más eficiente cuando los materiales se separan de manera previa. Cuando el tallo de la planta de maíz está recién cortado, facilita la separación de la corteza y la médula; en comparación a que, si el tallo se encuentra seco, pues al separar la corteza, algunos fragmentos de médula se mantienen unidos. El rendimiento del material es mayor utilizando el método del tallo recién cortado, en comparación al tallo seco.

En las tablas 3.26 y 3.27 se muestra una síntesis de las cantidades obtenidas por cada uno de los bio-agregados del tallo de maíz, las tablas están divididas por el tamiz de 1 mm<sup>2</sup> y de 4 mm<sup>2</sup> de abertura respectivamente.

**Tabla 3.26 Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 1 mm<sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y en porcentaje)**

Bio-agregado	Peso inicial	Material retenido	Material pasante	Pérdidas
En kilogramos				
Corteza	20	18.08	1.92	1.33
Médula	8	6.18	0.81	1.01
Mezcla	8	4.86	1.00	2.14
En porcentaje				
Corteza	100	83.75	9.60	6.65
Médula	100	77.13	10.25	12.62
Mezcla	100	60.75	12.50	26.75

**Tabla 3.27 Cantidades obtenidas en el proceso de tamizaje con la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura (en kilogramos y en porcentaje)**

Bio-agregado	Peso inicial	Material menor a 4 mm	Material mayor a 4 mm
En kilogramos			
Corteza	18.08	11.17	6.91
Médula	6.18	4.51	1.67
Mezcla	4.86	4.45	0.41
En porcentaje			
Corteza	83.75	51.74	48.25
Médula	77.13	56.28	20.84
Mezcla	60.75	55.62	44.38

En la tabla 3.28 se resumen las cantidades de los materiales útiles y los no útiles. A diferencia de los procesos de obtención descritos en los incisos 3.2.2 y 3.2.3, los bio-agregados habían sido separados previamente, para poder tener una mayor cantidad de material disponible.

**Tabla 3.28 Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de maíz**

<i>Material útil (entre 1 y 4 milímetros)</i>		
Bio-agregado	Kilogramos	Porcentaje
Corteza	11.17	51.74
Médula	4.51	56.28
Mezcla	4.45	55.62

Por otro lado, es importante recalcar las grandes diferencias que se obtienen cuando los bio-agregados son separados secos contra la obtención de los bio-agregados obtenidos con humedad. En la tabla 3.29 se muestra una comparación de las cantidades obtenidas.

**Tabla 3.29 Cantidades obtenidas de los bio-agregados del tallo de maíz**

<i>Material útil (entre 1 y 4 milímetros)</i>		
Bio-agregado	Kilogramos	Porcentaje
<b>Bio-agregados del tallo de maíz obtenidos en Francia</b>		
Corteza	13.10	54.40
Médula	0.70	2.90
Mezcla	2.50	10.20
<b>Bio-agregados del tallo de maíz obtenidos en México</b>		
Corteza	11.17	51.74
Médula	4.51	56.28
Mezcla	4.45	55.62

Es en este punto donde cobra una mayor importancia la metodología aplicada para la obtención de los bio-agregados. Uno de los más importantes puntos a destacar es que en los bio-agregados obtenidos en México se obtienen valores cercanos a la mitad del peso total. De los resultados descritos en la tabla anterior se deduce que las limitaciones encontradas durante la obtención de los bio-agregados fueron:

La alimentación del molino, al igual que en Francia, es necesario hacer una reducción previa del tallo.

La velocidad de giro.

El sistema de recolección.

En la figura 3.12 se muestra el resultado de los materiales obtenidos de estos bio-agregados del tallo de la planta de maíz en México.

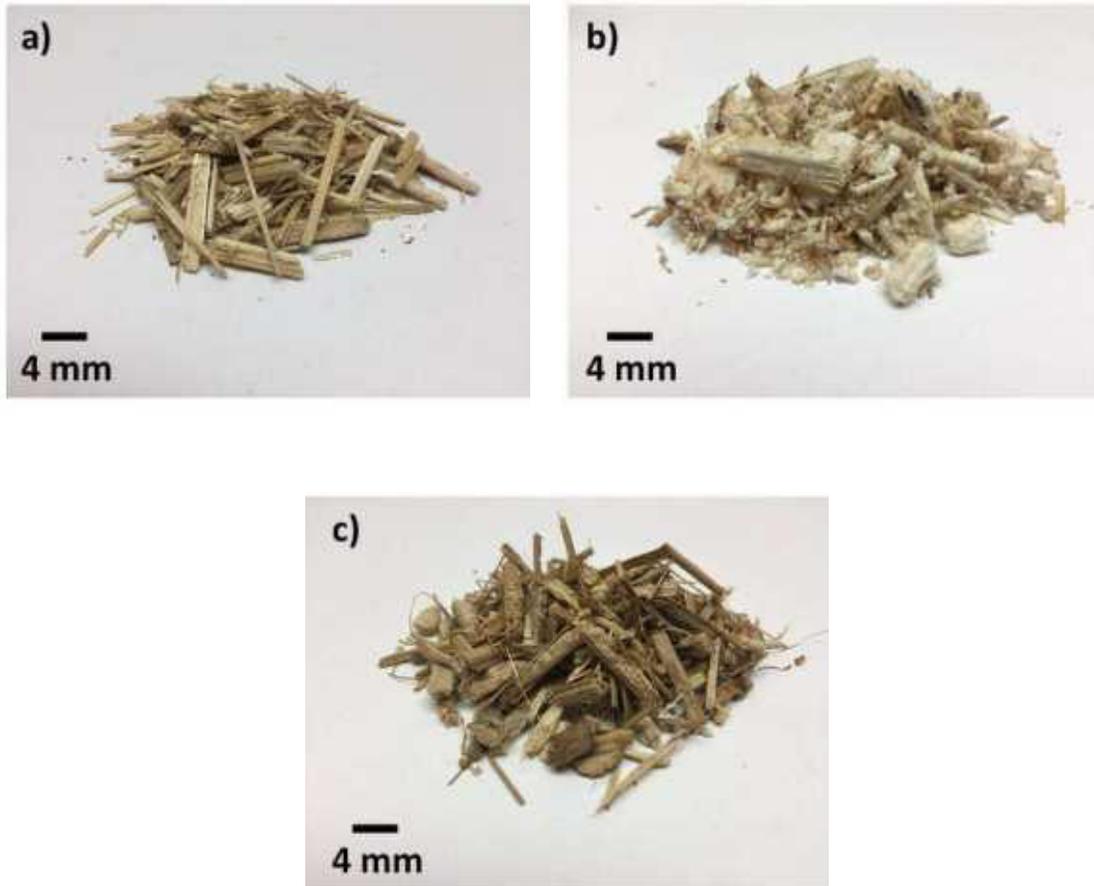


Figura 3.12. a) Corteza de maíz (CB-mx), b) Médula de maíz (CP-mx) y c) Mezcla de corteza y médula de maíz (CM-mx).

### 3.4 Caracterización de los bio-agregados obtenidos

#### 3.4.1. Videomicroscopía

##### 3.4.1.1 Cáñamo

Las observaciones realizadas en el cáñamo (ver figura 3.13), permite ver que la viruta o madera (ver figura 3.13a), tiene una anchura aproximada de entre 2 y 5 milímetros, la cual se ve rodeada de fibras; posteriormente, al analizar dichas fibras se puede distinguir que tienen un grosor entre 20 y 300  $\mu\text{m}$  (ver figura 3.13b).



a)



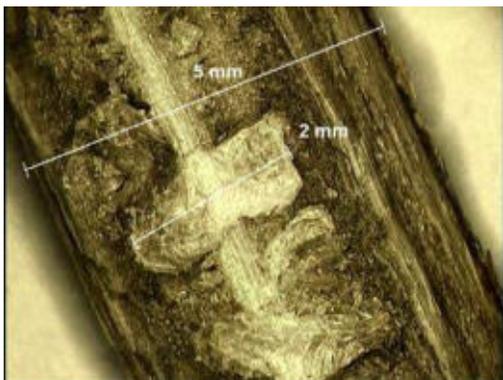
b)

Figura 3.13. a) Magnificación a 50x de una partícula de cáñamo, b) Magnificación a 175x de una partícula de cáñamo

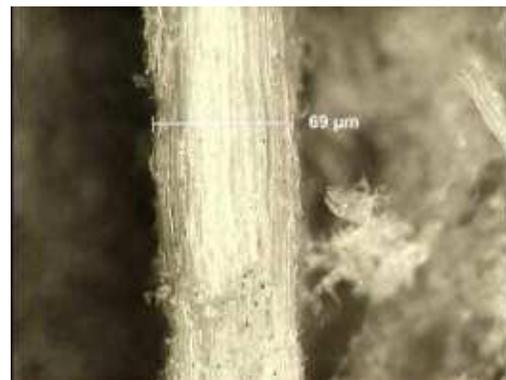
En la tesis doctoral realizada por Magniont [86], se analizó diversas fibras, entre ellas fibras de cáñamo, dichas fibras, tienen una dimensión similar (entre 30 y 310  $\mu\text{m}$ ), así mismo, determinó que estas fibras probablemente sean algunos fragmentos de una fibra principal a la que describe como fibra elemental. Al igual que en la tesis mencionada anteriormente, se observa que las fibras tienen un color más oscuro, esto probablemente sean restos del parénquima cortical, es decir, a la sección que mantiene unida a la fibra y el tallo.

#### 3.4.1.2 Corteza y médula de girasol

En la figura 3.14, se muestran las imágenes obtenidas de la corteza de girasol. En los fragmentos de corteza se observa la presencia de médula adherida a la madera (ver figura 3.14a) la madera tiene un grosor aproximado de 2 milímetros en su sección más pequeña y entre 5 y 6 milímetros en su sección media.



a)



b)

**Figura 3.14. a) Magnificación a 50x de una partícula de corteza de girasol, b) Magnificación a 175x de una fibra de médula**

Al observar la porción de médula en la madera (ver figura 3.14b), se observan fibras que tienen una forma cilíndrica y en su mayoría, estas fibras llegan a medir entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ . La presencia de las fibras de médula antes mencionadas, puede ser un factor que cause un efecto negativo, pues la absorción de agua puede incrementar, así mismo, la densidad aparente puede aumentar, debido a que se suma el peso de la médula al peso de la madera de la corteza.

En la figura 3.15 se muestran las partículas de médula, se puede observar que presentan unas líneas oscuras en la superficie, las cuales son parte del parénquima cortical, cuya función es mantener unida la corteza de la médula (ver figura 3.15a).

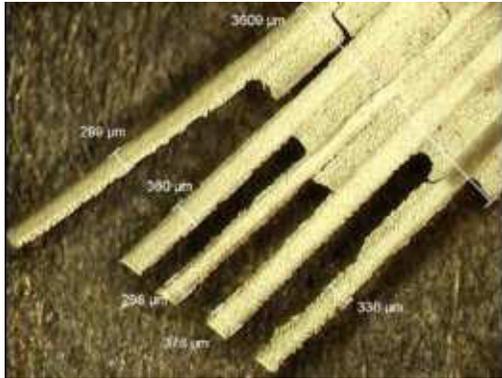


**Figura 3.15. a) Magnificación a 50x de una partícula de médula de girasol, b) Magnificación a 175x de una fibra de médula de girasol**

Se observa que la mancha de parénquima cortical es superficial y tiene una anchura de 69  $\mu\text{m}$  aproximadamente y esta incrementa hasta las 500  $\mu\text{m}$ . La médula tiene una forma cilíndrica semi definida y en algunas secciones, se aprecia las mismas fibras que se mencionan en la imagen 3.14b.

### **3.4.1.3 Corteza y médula de maíz**

En la figura 3.16 se muestran las imágenes obtenidas de la corteza de maíz, a 50x es posible observar una serie de fibras tubulares que mantienen unida a la corteza, los cuales tienen un grosor de entre 250 a 380  $\mu\text{m}$  (ver figura 3.16a), estas fibras están unidas por una capa muy delgada, flexible y resistente. Esta capa tiene una fuerte adherencia con la médula; sin embargo, a pesar de esta adherencia, se observan muy pocos residuos de médula entre estas fibras.



a)



b)

**Figura 3.16. a) Magnificación a 50x de una partícula de corteza de maíz, b) Magnificación a 175x de una partícula de corteza de maíz**

En la figura 3.16b, se muestra un fragmento de corteza, donde es posible apreciar las fibras tubulares que componen a la corteza, estas fibras tienen un grosor entre 300 y 400  $\mu\text{m}$ . De manera general, el grosor de la partícula en su sección más pequeña es de 2.5 milímetros y en su sección con mayor grosor es de 3.5 milímetros.

En la figura 3.17 se muestran las imágenes obtenidas de la médula de maíz, a 50x, se tienen unas líneas compuestas por fibra las cuales van de 250 a 360  $\mu\text{m}$ , a 175x se puede observar unas líneas oscuras que son parte de la estructura interna de la médula, estas fibras tienen una anchura promedio de 69  $\mu\text{m}$ . Estas fibras sirven para conducir las sustancias y nutrientes de la raíz al tallo.



a)



b)

**Figura 3.17. Magnificación a 50x de una partícula de la médula de maíz, b) Magnificación a 175x de una partícula de la médula de maíz**

En las imágenes anteriores, se aprecia una serie de fibras cilíndricas que rodean y mantienen unida a la médula, como se mencionó anteriormente, estas fibras tienen un diámetro muy pequeño, este bio-agregado tiene una coloración amarillenta, a diferencia del color de la médula de girasol que es completamente blanca.

#### 3.4.1.4 Síntesis

La videomicroscopía permite hacer un análisis visual de la morfología, y algunos componentes a nivel macroestructural de los bio-agregados utilizados en esta investigación. Las principales características que se resaltan son:

En el cáñamo: Este bio-agregado se encuentra rodeado de una serie de fibras, que a pesar de haber sido tamizado a través de la malla de 4 mm<sup>2</sup> de abertura, no fueron retiradas en su totalidad. Así mismo, estas fibras pueden tener una repercusión en el aumento de la densidad aparente, así como de la absorción de agua; no obstante, puede también tener un efecto positivo en la conductividad térmica pues el calor puede ser disipado a través de las fibras.

En la corteza de girasol: Las partículas analizadas, presentan fragmentos de médula los cuales son resultado de la separación que se realiza por medios mecánicos, esta parte tiene una medida que si bien, no es significativa, tendrá un resultado importante en el desempeño de las partículas de este bio-agregado cuando es sometido a la prueba de absorción de agua; por otro lado, esta porción de médula, puede disminuir la densidad aparente de la corteza, así como a reducir la conductividad térmica del bio-agregado antes mencionado.

En la médula de girasol: Se observan líneas de color oscuro, las cuales pertenecen al parénquima cortical, lo que hace suponer que, en algunos segmentos de la corteza, la adherencia es fuerte; así mismo, la apariencia de la composición de la médula es similar a una fibra compactada, lo que puede resultar en una alta absorción de agua, en una baja densidad aparente y en la conductividad térmica.

En la corteza de maíz: Se observó que es bio-agregado compuesto por una membrana, unida a una serie de fibras de forma circular, al igual que en la corteza de girasol, en algunas partículas analizadas se presentaba fracciones de médula, lo que hace suponer que este material puede tener una densidad aparente similar a la del cáñamo; pero, por otro lado, la absorción de agua puede ser mayor.

En la médula de maíz: Se puede observar que es similar a la médula de girasol, sin embargo, en la médula de maíz, es visible una serie de fibras tubulares que mantienen unida a la médula. De igual manera, este bio-agregado puede tener una mayor absorción de agua, así como una densidad aparente y conductividad térmica menor que las cortezas y el cáñamo.

De manera general, las observaciones en los bio-agregados correspondientes al cáñamo, a la corteza de girasol y maíz revelan que son materiales heterogéneos, debido a que presentan porciones de médula y en algunos casos de fibras. Esta heterogeneidad puede dar como resultado el mejoramiento de

algunas propiedades como la conductividad térmica y en otros puntos, tener un efecto negativo como el aumento en la absorción de agua.

### 3.4.2 Microscopía electrónica de barrido

#### 3.4.2.1 Agregados empleados en Francia

##### 3.4.2.1.1 Cáñamo

En la figura 3.18 se presentan 2 fragmentos de cáñamo, la figura 3.18a muestra un corte longitudinal, donde se puede observar una serie de vasos los cuales tienen una medida de entre 50 y 100  $\mu\text{m}$  de largo, por otro lado, estos vasos cuentan con perforaciones, las cuales permiten el movimiento de la humedad, así como la circulación de las sustancias con nutrientes de una celda a otra a lo largo de todo el tallo, también, sirven como una conexión a celdas más pequeñas. En la figura 3.18b, se muestra un corte transversal, en la cual se observa una estructura extremadamente porosa, esta estructura está formada por una membrana gruesa que interconecta a los poros, los alveolos tienen una medida entre 10 y 50  $\mu\text{m}$ . En la parte inferior de la imagen se puede distinguir una capa verrugosa la cual forma parte del floema, y es una capa que cubre a los vasos y está precedida por la epidermis cortical.

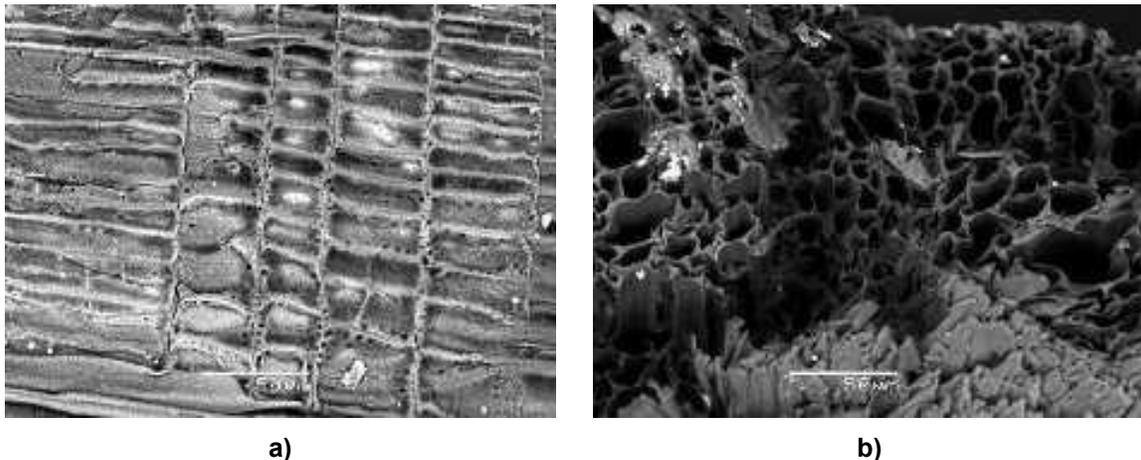
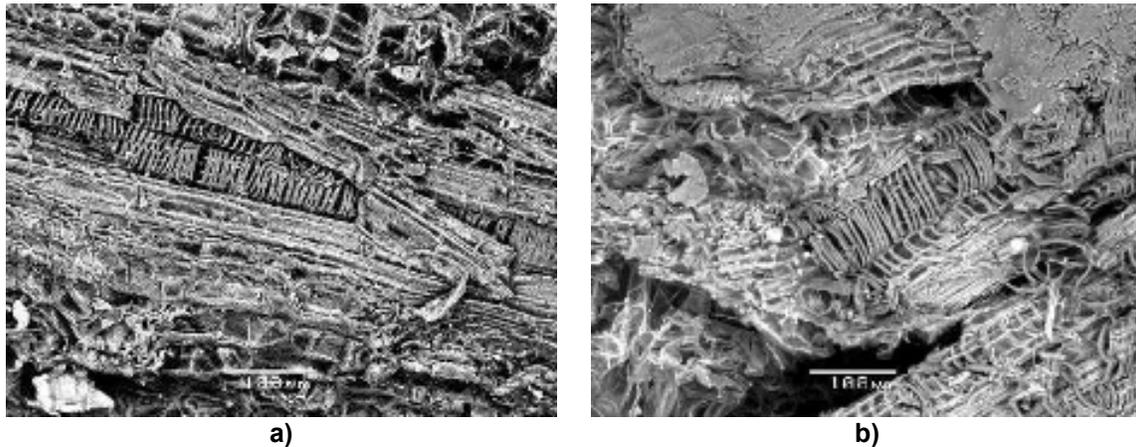


Figura 3.18. Micrografías de una partícula de cáñamo: a) Corte longitudinal y, b) corte transversal (x50, 15kV)

##### 3.4.2.1.2 Bio-agregados del tallo de girasol

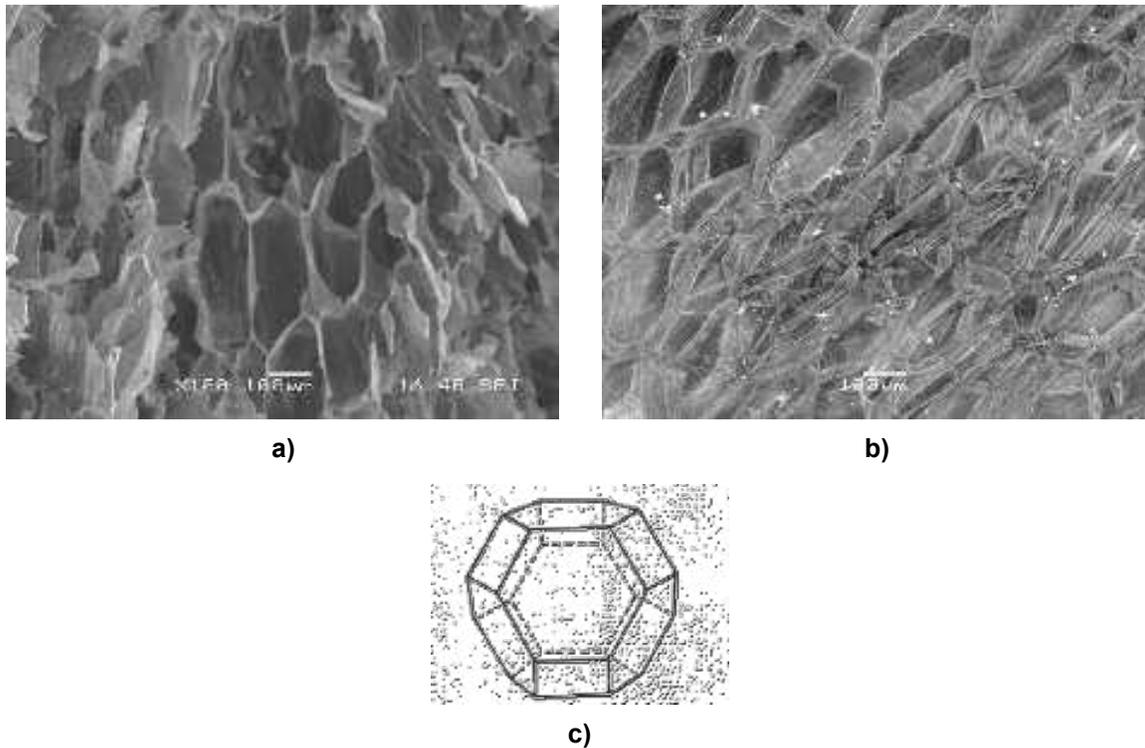
En la figura 3.19, se muestran 2 partículas de corteza de girasol; en la figura 3.19a) se observa el corte longitudinal, al igual que en el cáñamo, presenta una serie de vasos por donde corren los nutrientes, así mismo es posible observar algunos alveolos correspondientes a algunos fragmentos de médula que quedaron durante el proceso de preparación de la muestra. A diferencia de las observaciones realizadas por Mati-Baouche [195], los vasos observados no tienen un orden o una

forma de panal, sino que es posible identificar algunas estructuras en forma de láminas que posiblemente contribuyan a la distribución de los nutrientes del suelo a toda la planta. En la figura 3. 19b), se presenta el corte en sección, donde se puede ver que la corteza está formada por una serie de fibras más pequeñas, mismas que se encuentran cubiertas por una membrana delgada.



**Figura 3.19. Micrografías de una partícula de corteza de girasol a) Corte longitudinal y, b) corte transversal (x100, 15kV).**

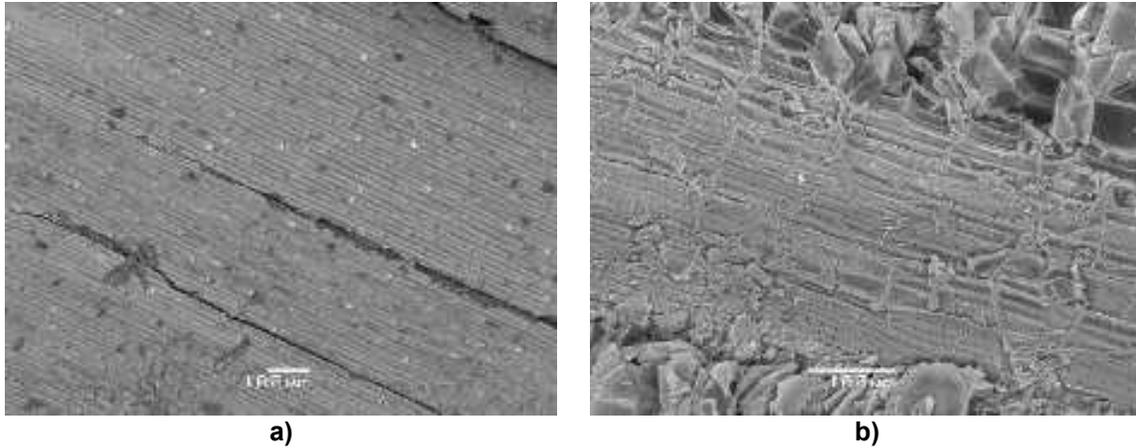
En la figura 3.20 se muestran 2 partículas de médula de girasol, la figura 3.20a), se observa el corte longitudinal, en el cual se aprecia los alveolos, cuyo diámetro promedio ronda entre los 200 y 400  $\mu\text{m}$ , estos alveolos están formados por una membrana más delgada a diferencia de la observada en la corteza de girasol, la cual permite la circulación de los nutrientes [138]. En la figura 3.20b) se muestra el corte en sección, la microestructura observada es altamente porosa y cuenta con paredes muy finas. La médula recibe el nombre de parénquima fundamental, también debido a la sinergia con la turgencia de las células presentes en la médula, generan rigidez al cuerpo vegetal. En la imagen mencionada anteriormente, es posible observar espacios intercelulares más pequeños, mismos que se forman entre los alveolos de mayor dimensión. La microestructura de la médula del tallo del girasol tiene una forma poliédrica, también conocidos como isodiamétricas. Es decir, es un poliedro casi perfecto formado por 14 caras, de las cuales son 8 hexagonales y 6 cuadradas al cual se denomina ortotetraedraedro (ver figura 3.20c), el cuerpo geométrico antes mencionado, ayuda a que la planta sea más compacta y por consiguiente, ocupe menos espacio, sin embargo, es muy inusual que las paredes celulares de la médula presenten esta forma [196].



**Figura 3.20. Micrografías de una partícula de médula de girasol a) Corte longitudinal, b) corte transversal (x100, 15kV), c) ortotetradecaedro**

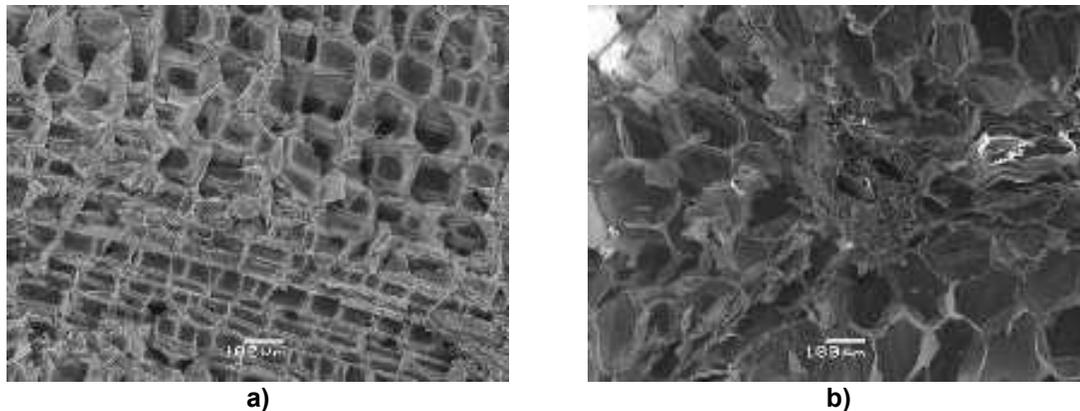
### 3.4.2.1.3 Bio-agregados del tallo de maíz

En la figura 3.21 se muestran 2 partículas de la corteza de maíz; en la figura 3.21a) se observa el corte longitudinal, en este caso se aprecia que no existe rugosidad en la superficie de la corteza, lo que significa que solo cuenta con la epidermis; también, no presenta los vasos observados en el cáñamo y la corteza de girasol, lo que es característico de las plantas monocotiledóneas. En la figura 3.22b), se muestra el corte en sección de la corteza de maíz, se puede observar la epidermis y el parénquima cortical; sin embargo, en esta partícula se puede observar la presencia de médula en la parte superior derecha, lo que es un indicio de la fuerte adherencia que se presenta entre ambos bio-agregados.



**Figura 3.21. Micrografías de una partícula de corteza de maíz a) Corte longitudinal y b) corte transversal (x100, 15kV)**

En la figura 3.22, se muestran 2 fragmentos de la médula de maíz, en la figura 3.22a), se puede observar el corte longitudinal, es posible apreciar la red de alveolos que componen a este bio-agregado, los cuales tienen la función de transportar las sustancias y nutrientes desde las raíces hacia el tallo, las paredes celulares son muy delgadas y tienen una morfología definida. En la figura 3.22b), se muestra el corte transversal, los alveolos tienen una forma similar a la observada en la médula de girasol, y en promedio, el diámetro promedio de los alveolos es de entre 50-500  $\mu\text{m}$ . Es posible ver que del centro de la médula se ubica una columna primaria, donde las paredes celulares crecen alrededor de dicha columna, formando el parénquima fundamental como un conjunto, brindando rigidez al tallo y al cuerpo vegetal.



**Figura 3.22. Micrografías de una partícula de médula de maíz a) Corte longitudinal y b) corte transversal (x100, 15kV).**

### 3.4.2.2 Agregados empleados en México

#### 3.4.2.2.1 Corteza de maíz y médula de maíz

En la figura 3.23a) se muestra una partícula con un corte longitudinal de la corteza de maíz, es posible observar que no existe rugosidad en su superficie; lo que también se observó en la corteza de maíz analizada en Francia, prácticamente es la epidermis de la planta. En la figura 3.30b) se muestra el corte en sección de la médula de maíz, los alveolos tienen una forma cilíndrica al igual que en la médula de maíz estudiada en Francia, sin embargo, el diámetro promedio de los alveolos es de entre 20 y 500  $\mu\text{m}$ , la cual es un poco mayor al obtenido en la médula francesa, esto puede deberse a que ha sido cosechada en diferentes tipos de suelo, lo que ha sido mencionado en el estudio realizado por Delhomme [197] .

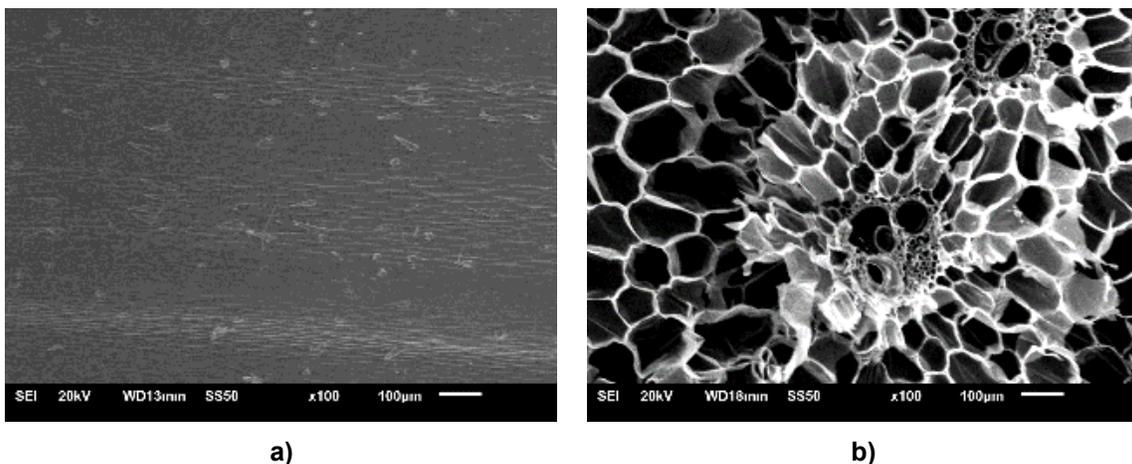


Figura 3.30. a) Micrografía de un fragmento de corteza de maíz (x100), b) Micrografía de un fragmento de médula de maíz (x100)

#### 3.4.2.3 Síntesis

De manera general, las muestras observadas de cáñamo, corteza de girasol, médula de girasol y de maíz, tienen una microestructura extremadamente porosa; que pueden dar como resultado, efectos positivos y negativos tanto en el diseño de la mezcla, como en las propiedades fisicomecánicas de los concretos vegetales.

Los efectos positivos de los bio-agregados porosos son:

- Baja densidad aparente
- Baja conductividad térmica
- Buena resistividad térmica
- Buen desempeño higrotérmico

Los efectos negativos de los bio-agregados porosos son:

## Alta absorción de agua

Por otro lado, la corteza de maíz analizada en Francia y en México no es porosa, pueden observarse algunas porciones de médula, dichos fragmentos son el resultado de la transformación y obtención de los bio-agregados, por lo que este residuo puede tener un efecto negativo en la absorción de agua, pero un impacto positivo en la densidad aparente y la conductividad térmica. La porosidad intraparticular es la causante de todos los efectos mencionados anteriormente. Sin embargo, para poder analizarlos de manera eficiente, son necesarios algunos otros métodos de caracterización, como la porosimetría de intrusión de mercurio, la cual ayudará a comprender de manera cuantitativa el volumen de los vacíos en los bio-agregados. A manera de referencia, en la investigación desarrollada por Jiang et al., [198], se hace un estudio detallado de la microestructura de diferentes bio-agregados utilizados en la fabricación de concretos vegetales; en dicha investigación, el cáñamo presenta una frecuencia de 20.8 vasos/mm<sup>2</sup>.

### 3.4.3 Densidad aparente

#### 3.4.3.1 Agregados empleados en Francia

##### 3.4.3.1.1 Cáñamo

La densidad aparente promedio obtenida en este bio-agregado, cuando se encuentra a granel y seco, es de  $112 \pm 1.30$  kg/m<sup>3</sup>, esta característica está profundamente ligada a la microestructura del bio-agregado, donde la porosidad efectiva tiene un efecto positivo en esta propiedad física, de igual manera existe una relación directa entre el tamaño de las partículas y la densidad aparente, pues los vacíos pueden aumentar dependiendo del tamaño de la porosidad intergranular.

##### 3.4.3.1.2 Bio-agregados del tallo de girasol

En la tabla 3.30 se muestran los valores obtenidos en los bio-agregados del tallo de girasol, los cuales son comparados con los datos obtenidos en el cáñamo.

**Tabla 3.30 Densidad aparente de los diferentes bio-agregados utilizados**

Referencia	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Cáñamo (H)	$112.50 \pm 1.30$
Corteza de girasol (SB)	$124.80 \pm 5.70$
Médula de girasol (SP)	$11.80 \pm 0.90$
Mezcla de corteza y médula de girasol (SM)	$66.60 \pm 2.80$

El valor de la densidad aparente promedio obtenida en la corteza de girasol (SB), es mayor en comparación al obtenido al cáñamo (H), esto se debe a que algunos fragmentos de SB tienen una longitud y una sección transversal mayor con respecto a H, se esperaba que la médula que se encontraba adherida en el bio-agregado

ayudase a reducir la densidad aparente, pero probablemente la reducción del peso fue insignificante. La microestructura extremadamente porosa de la médula de girasol (SP), da como resultado una baja densidad aparente, a esto, también se le suman los espacios interparticulares formados en el interior de los bio-agregados almacenados a granel. La mezcla de médula y corteza de girasol (SM), presenta un valor intermedio de densidad aparente promedio entre SB y SP, al analizar el resultado de obtención de los bio-agregados de SM, se aprecia que el contenido de médula es mayor con respecto a la presencia de corteza, esto se debe a que los espacios interparticulares entre la médula, son cubiertos por fragmentos de corteza, cabe recordar, que este bio-agregado tiene un tamaño de entre 1 y 4 mm de longitud.

### 3.4.3.1.3 Bio-agregados del tallo de maíz

En la tabla 3.31 se muestran los resultados obtenidos en los bio-agregados del tallo de maíz, los cuales son comparados con los datos obtenidos en el cáñamo.

**Tabla 3.31 Densidad aparente de los diferentes bio-agregados utilizados (en kg/m<sup>3</sup>)**

Referencia	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Cáñamo (H)	112.5 ± 1.3
Corteza de maíz (CB)	98.9 ± 2.2
Médula de maíz (CP)	26.8 ± 0.7
Mezcla de corteza y médula de maíz (CM)	43 ± 0.05

En la corteza de maíz (CB), el valor de la densidad aparente promedio es menor que SB y H, esto se debe a la microestructura de CB la cual es plana y no presenta porosidad, se esperaba que este tipo de estructura presentara un aumento significativo en la densidad aparente al disminuir la porosidad interparticular. Sin embargo, en algunas partículas se presentan fragmentos de médula, lo que pudo contribuir de manera positiva en la disminución del peso. Los valores de la densidad promedio de la médula de maíz (CP), reflejan que, a pesar de tener una microestructura extremadamente porosa, similar a SP, la densidad aparente promedio obtenida se ve influenciada por el espesor de la pared celular que divide a los alveolos de la médula, lo que incrementa significativamente el peso de CP. En la mezcla de corteza y médula (CM), se observa que la densidad aparente promedio obtenida es menor con respecto a SM, en CM, se presenta un comportamiento intermedio entre CB y CP, y, al igual que en el caso de SM, se observa la presencia de una mayor cantidad de médula, con respecto a la corteza, lo que favorece la disminución del peso en este bio-agregado.

### 3.4.3.2 Agregados empleados en México

#### 3.4.3.2.1 Bio-agregados de maíz

En la tabla 3.32 se muestran los resultados obtenidos de los bio-agregados del tallo de maíz, los cuales son comparados con los datos obtenidos del cáñamo.

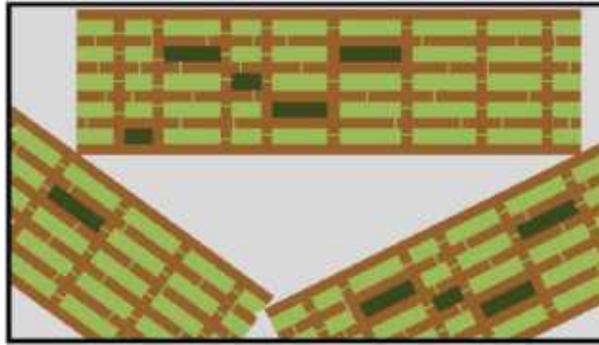
**Tabla 3.32 Densidad aparente de los diferentes bio-agregados utilizados (en kg/m<sup>3</sup>)**

Referencia	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Cáñamo (H)	112.5 ± 1.3
Corteza de maíz (CB-mx)	134.20 ± 15.11
Médula de maíz (CP-mx)	63.20 ± 3.47
Mezcla de corteza y médula de maíz (CM-mx)	81.50 ± 7.31

La densidad aparente promedio obtenida en la corteza de maíz (CB-mx), es mayor a la registrada en H, también es superior a que se presenta en SB y CB. En este caso es importante mencionar que debido al proceso de obtención de CB-mx, el cual tuvo un mayor control, refiere a que cuando no hay presencia de médula en la corteza, la densidad aparente suelta y seca aumenta de manera drástica, a pesar de que la forma de las partículas es idéntica a CB, por lo que los vacíos interparticulares, son más cerrados, ocasionando con ello el aumento de la densidad aparente promedio. La médula de maíz (CP-mx) también presenta una densidad aparente promedio más alta con respecto a CP, se esperaba que tuviese una similitud entre estos dos bio-agregados, sin embargo, esto es resultado del proceso de transformación al que fueron sometidos, pues al reducir el tamaño de las partículas de CP-mx, la densidad aparente aumentó considerablemente. Por último, la mezcla de corteza y médula de maíz (CM-mx), también registró un valor mayor con respecto a CM, al igual que la densidad aparente de los bio-agregados de maíz franceses, se percibe un comportamiento intermedio entre los calores de CB-mx y CP-mx, al igual que en CM, en CM-mx se aprecia un mayor contenido de médula con respecto a la corteza, lo que hace suponer que la médula ayuda a reducir el peso y por consecuente la densidad aparente en este tipo de bio-agregado.

#### **3.4.3.4 Síntesis**

El tipo de microestructura que compone a un bio-agregado es de suma importancia, pues la densidad aparente es una de las propiedades físicas que se ven afectadas de manera directa. Como es sabido, una microestructura extremadamente porosa, da como resultado una densidad aparente baja, caso contrario, si la microestructura presenta una red de poros muy cerrada, o nula, puede traducirse en una densidad aparente alta. El estudio realizado por Ratsimbazafy [14], sugiere que la elongación de las partículas también tiene un papel importante para determinar la densidad aparente; de igual forma, vincula a la porosidad interparticular, como un agente que ayuda a disminuir la densidad aparente, por lo que mientras más alargada sea la partícula, mayor será la porosidad interparticular y con ello, la densidad aparente será menor, el efecto causado por la porosidad inter e intraparticular, se presentan en la figura 3.31.



a)

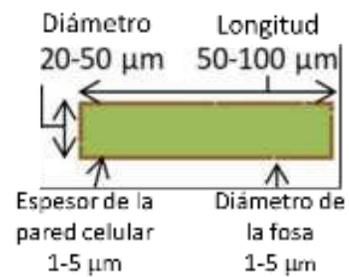
Espacio entre partículas



En milímetros

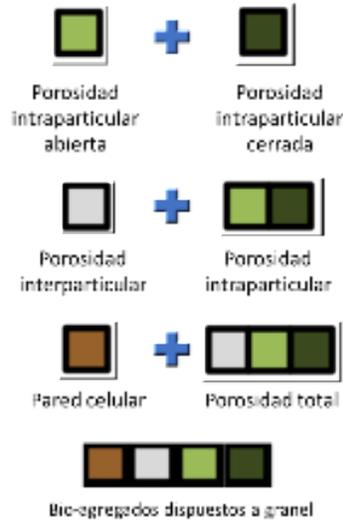
b)

Escala de una celda



c)

Fraciones de volumen que componen a un bio-agregado a granel



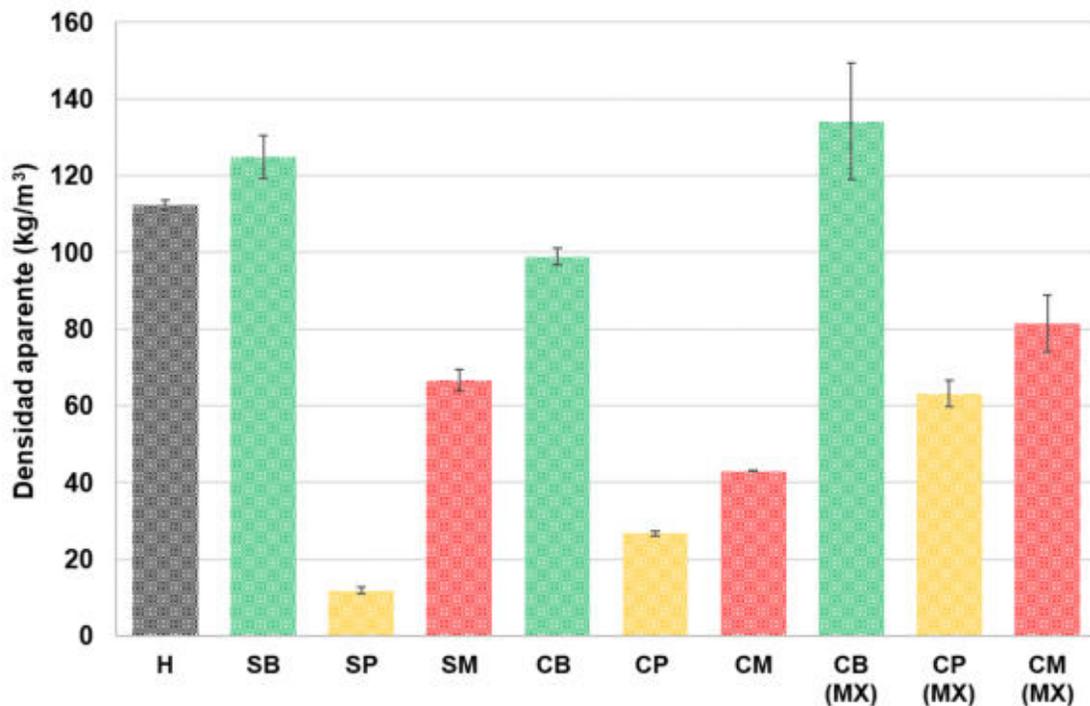
d)

Figura 3.31 Estructura de las partículas a granel

a) Partículas dispuestas a granel, b) microestructura de una celda, c) espacios interparticulares, d) componentes del bio-agregado a granel. Adaptado de Delannoy et al. [3]

En la figura 3.31a) y 3.31b), se muestran las partículas sueltas a granel y los vacíos interparticulares respectivamente, al determinar los valores de densidad aparente y otras propiedades físicas, como la conductividad térmica, se miden también el volumen o la cantidad de aire que ocupan los vacíos. Por otro lado, la porosidad intraparticular (ver figura 3.31c), actúa en favor de la reducción de la densidad aparente suelta a granel. Por último, en la figura 3.31d, se presenta la sumatoria de las porosidades inter e intraparticulares, las paredes celulares, dando como resultado la disposición de los bio-agregados a granel.

La figura 3.32, muestra una comparación de las densidades aparentes obtenidas en este trabajo de investigación.



**Figura 3.32 densidades aparentes promedio obtenidos en los bio-agregados Cafamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM)**

Los resultados obtenidos en el análisis de esta propiedad presentan concordancia a las microestructuras observadas en el apartado 3.4.2. Las partículas con mayor porosidad (SP y CP), fueron aquellas que presentaron las densidades aparentes más bajas de todo el estudio; seguidas de las partículas que presentan médula y corteza (SM y CM), en las que se observó una densidad aparente con valores intermedios entre las médulas, las cortezas y el cafamo; y finalmente, obtener las densidades aparentes más altas (SB, H y CB).

La tabla 3.33 presenta una comparativa con los resultados de la bibliografía consultada.

**Tabla 3.33 Análisis bibliográfico de la densidad aparente de los bio-agregados utilizados en esta investigación**

Bio-agregado	$\rho_{\text{aparente}}$ promedio (kg/m <sup>3</sup> )	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Referencia
H	117.70	21.50	18.30	[1–4,6,131,138– 141,181,199–233]
	112.50	1.30	5.60	Este estudio
SB	148.60	62.80	42.20	[5,7,56,138,234–237]
	124.80	5.60	4.50	Este estudio
SP	20.60	6.40	31.27	[7,56,138,141,203,233,237]
	11.80	0.90	8.00	Este estudio
SM	109.40	8.80	8.00	[56,211]
	66.61	2.80	4.10	Este estudio
CB	168.20	4.50	--	[5]
CB (Francia)	98.90	2.20	2.20	Este estudio
CB-mx	134.20	15.10	11.30	
CP	18.00	--	--	[203]
CP (Francia)	26.80	0.60	0.10	Este estudio
CP-mx	63.10	3.50	5.50	
CM (Francia)	43.00	0.10	1.20	Este estudio
CM-mx	81.50	7.30	9.00	

Por otro lado, la tabla anterior corrobora que la elongación de las partículas tiene efectos positivos y negativos en los diferentes bio-agregados; por ejemplo, CB-mx, CP-mx y CM-mx, presentan las mayores densidades aparentes, debido a que el tamaño de las partículas se encuentra mejor regulados, es decir, tienen una menor dimensión con respecto a los agregados utilizados en Francia, por lo que la porosidad interparticular es menor y la densidad obtenida es mayor. También los valores de la densidad aparente de H, SB, SP, SM, y SB, se encuentran dentro de lo establecido en las referencias, por otro lado, CB-mx, CP-mx y CM-mx, presentan valores más elevados que las referencias y los bio-agregados obtenidos del tallo de maíz en Francia.

### 3.4.4 Conductividad térmica

#### 3.4.4.1 Cábano

El valor de la conductividad térmica obtenida en este bio-agregado fue de  $0.060 \pm 0.001$  W/m.k, al igual que en la densidad aparente de este bio-agregado. Nuevamente, es notoria que la porosidad inter e intraparticular tienen un papel importante en el desarrollo de esta propiedad.

#### 3.4.4.2 Bio-agregados del tallo de girasol

En la tabla 3.34, se muestran los valores de conductividad térmica derivados de los diferentes bio-agregados obtenidos del tallo del girasol, los cuales son comparados con la conductividad térmica del cáño.

**Tabla 3.34 Conductividad térmica de los diferentes bio-agregados utilizados (en W/(m.K))**

Referencia	Conductividad térmica
Cábano (H)	$0.060 \pm 0.001$
Corteza de girasol (SB)	$0.060 \pm 0.003$
Médula de girasol (SP)	$0.036 \pm 0.004$
Mezcla de corteza y médula de girasol (SM)	$0.052 \pm 0.003$

En este caso, es importante resaltar la similitud entre los valores de H y SB, sin embargo, la densidad aparente de SB es mayor con respecto a H, de igual manera, algunas fracciones de médula adheridas en SB, contribuyen en la disminución de la densidad y por consiguiente tienen un efecto favorable en la conductividad térmica de este bio-agregado. La microestructura porosa observada en SP, ayuda a limitar la transferencia del flujo de calor a través de los poros; también lo vuelve un material con una densidad aparente menor y un material aislante, siendo esta, la conductividad térmica más baja obtenida en este estudio. Por otro lado, en SM, se observa un comportamiento intermedio, debido a que se mezclan las características mencionadas entre SB y SP.

#### 3.4.4.3 Bio-agregados del tallo de maíz

En la tabla 3.35, se muestran los valores de conductividad térmica derivados de los diferentes bio-agregados obtenidos del tallo del maíz, los cuales son comparados con la conductividad térmica del cáño.

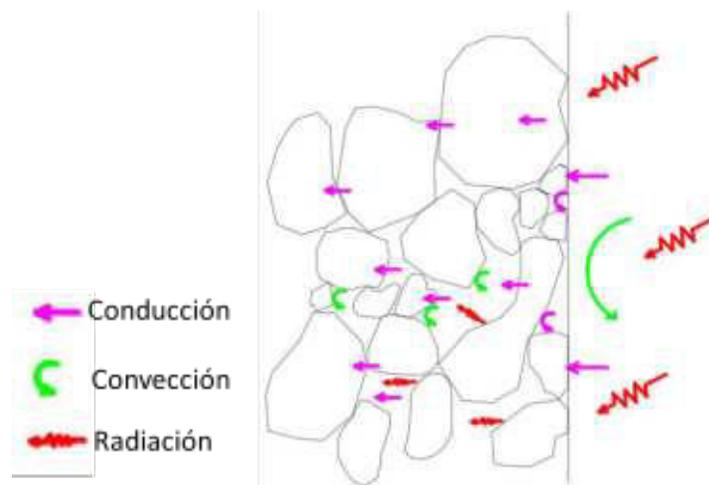
**Tabla 3.35 Conductividad térmica de los diferentes bio-agregados utilizados (en W/(m.K))**

	Referencia	Conductividad térmica
Cáñamo (H)		$0.060 \pm 0.001$
Corteza de maíz (CB)		$0.055 \pm 0.003$
Médula de maíz (CP)		$0.040 \pm 0.004$
Mezcla de corteza y médula de maíz (CM)		$0.044 \pm 0.002$

La conductividad térmica obtenida en CB refleja un comportamiento similar observado en SB, la presencia de fragmentos de médula tiende a disminuir la densidad aparente y por consiguiente el valor de la conductividad térmica. El valor de la conductividad térmica obtenida en CP es alto en comparación a SP, la limitación de la transferencia del calor entre los alveolos se ve mermada debido a su diámetro, es decir, a la porosidad intraparticular, también existe una influencia dada por el espesor de la pared celular; también otro factor es la morfología de las partículas y los vacíos interparticulares; lo anterior justifica el hecho de tener una medida de conductividad térmica mayor en comparación a SP. En CM se obtuvo un valor de conductividad térmica intermedio entre CB y CP.

#### 3.4.4.4 Síntesis

La conductividad térmica es la propiedad física que mide la capacidad intrínseca de conducción del calor, o bien la capacidad de transferir la energía cinética de una molécula a otra adyacente, o a sustancias con las que esté en contacto. El valor de la conductividad térmica más baja se liga a los bio-agregados que tienen una densidad aparente menor. La caracterización de la densidad aparente y la conductividad térmica, ayuda a clasificar a los bio-agregados como materiales aislantes de relleno suelto [14,23]. En la figura 3.33, se presenta de forma gráfica la manera en que se transmite la conductividad térmica en los bio-agregados.



**Figura 3.33 formas de transmisión de calor entre los bio-agregados [238]**

Como se puede observar en la imagen anterior, el calor se transmite en 3 formas (conducción: es la transmitancia del calor desde la fuente de origen y para a través de la porosidad del bio-agregado; convección: en esta forma, el calor es reflejado por las partes del bio-agregado donde no hay porosidad, y la radiación: en la cual el calor circula de manera libre entre la porosidad interparticular en el bio-agregado. La conductividad térmica es sensible a la geometría de los poros y su distribución en la materia a analizar [238].

En la figura 3.34, se presentan los resultados de las mediciones realizadas con el método de explicado en el apartado 2.4.7. Por otro lado, se ilustran los valores de diferentes materiales convencionales para el acondicionamiento térmico de espacios. Se observa que el poliuretano tiene una densidad de  $30.0 \text{ kg/m}^3$  y una conductividad térmica de  $0.030 \text{ W/(m.K)}$ ; sin embargo, el proceso de fabricación requiere de diversos elementos como catalizadores, polioles e isocianatos, los cuales al combinarse para fabricar  $1 \text{ m}^2$  y un espesor de  $7.5 \text{ cm}$  se liberan  $14 \text{ kg}$  de  $\text{CO}_2$ . De igual manera en los casos de la fibra de vidrio y la lana de vidrio el costo de producción es mayor en comparación a la obtención de los bio-agregados. De manera general, los materiales convencionales empleados en sistemas de envolventes térmicos tienen buena regulación térmica, pero los procesos y los materiales empleados en su fabricación conllevan varios factores que son dañinos al medio ambiente.

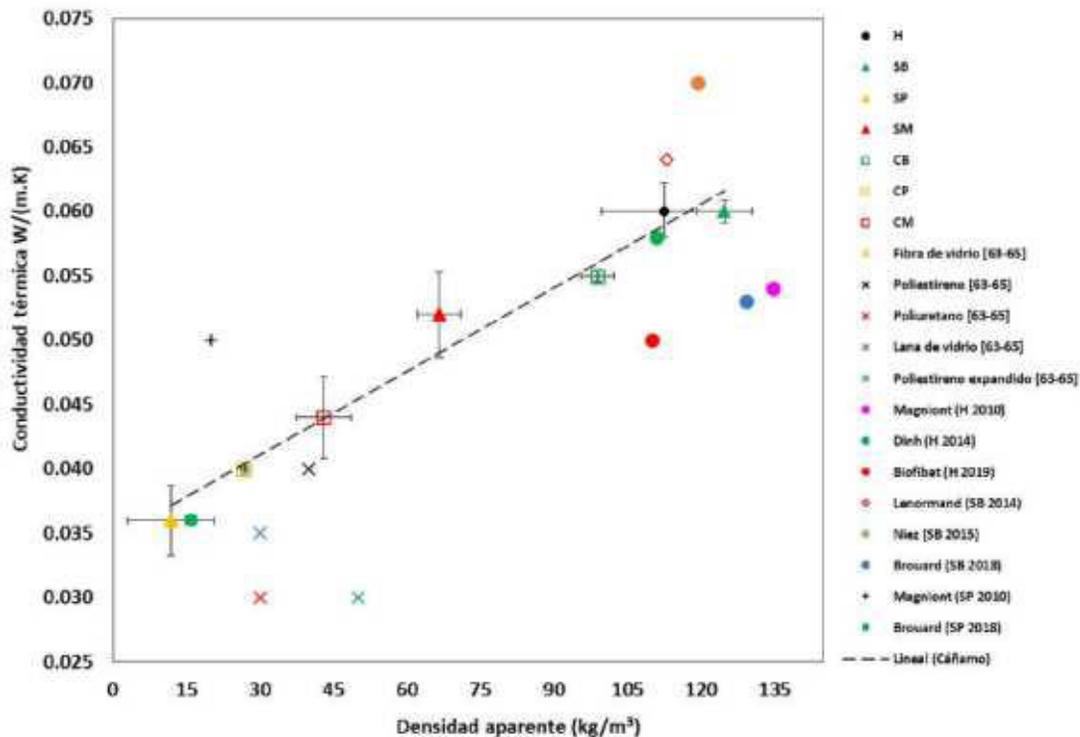


Figura 3.34. Conductividad térmica de los bio-agregados: Cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM)

En la tabla 3.36 se muestra una comparativa con la bibliográfica versus los resultados obtenidos en este estudio.

**Tabla 3.36 Análisis bibliográfico de la conductividad térmica ( $\lambda$ ) de los bio-agregados obtenidos en Francia para esta investigación**

Bio-agregado	$\lambda$ W/m.k	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Referencia
H	0.055	0.007	12.09	[1,2,138,141,181,205,207,208,229]
	0.060	0.001	3.70	Este estudio
SB	0.060	0.009	15.21	[138,234,242]
	0.060	0.001	1.50	Este estudio
SP	0.046	0.009	18.95	[7,56,141]
	0.036	0.003	7.50	Este estudio
SM	0.063	0.001	2.24	[56]
	0.052	0.003	6.40	Este estudio
CB	0.055	0.000	0.80	Este estudio
CP	0.040	0.000	1.10	Este estudio
CM	0.044	0.003	7.30	Este estudio

La conductividad térmica que se registra en H, SB y CB, es similar entre ellas; esto se debe al parecido entre la microestructura de las partículas, también algo en común presenta SB y CB es la presencia de médula en algunos fragmentos; aunado a esto se debe tomar en cuenta la porosidad intergranular durante los ensayos. La presencia de médula contribuye a disminuir la densidad aparente y la conductividad térmica. La similitud en la conductividad térmica de H, SB y CB es un punto a favor en el uso de estos bio-agregado, ya que es evidente una disminución en la conductividad térmica, debido a la porosidad intragranular y la porosidad interparticular entre los bio-agregados. Y, por último, el comportamiento que se presenta en la SM y CM es intermedio con respecto a las cortezas y las médulas, aquí se aprecia la sinergia entre las características intergranulares.

### 3.4.5 Absorción de agua

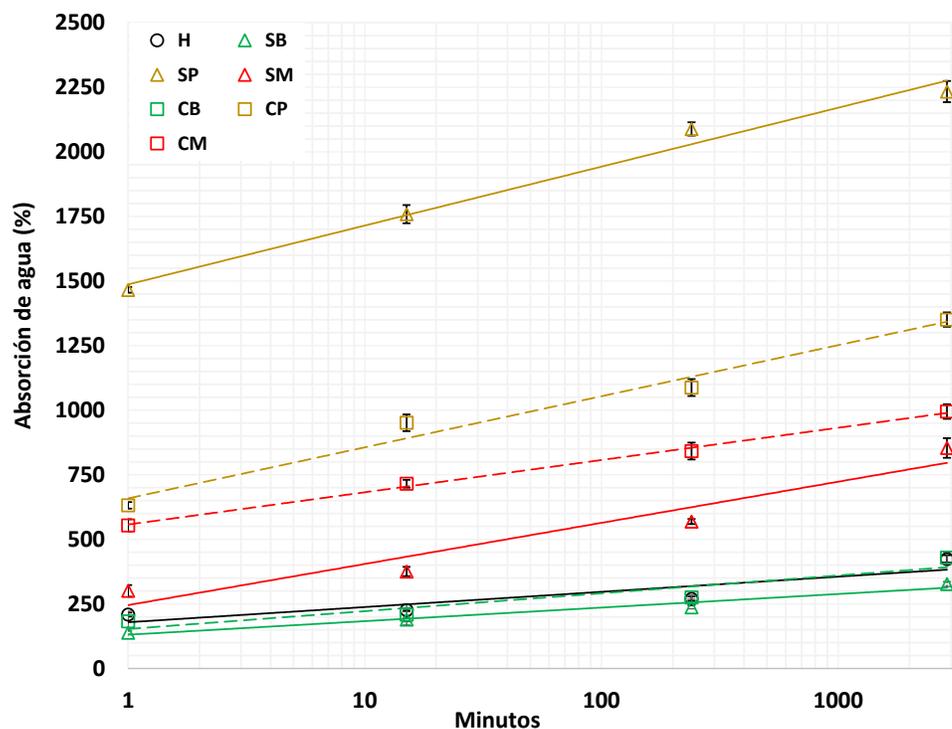
#### 3.4.5.1 Agregados empleados en Francia

En la tabla 3.37, se muestran los parámetros que componen la ecuación de la curva de regresión lineal, se observa la absorción de agua durante el primer minuto.

**Tabla 3.37** Parámetros de absorción de los bio-agregados: cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula de girasol (SM), corteza de maíz (CB), médula de maíz (CP) y mezcla de corteza y médula de maíz (CM)

Bio-agregados	IRA	Desviación estándar	$K_1$	$R^2$
H	178.90	7.90	25.50	0.80
SB	130.50	3.10	22.80	0.96
SP	1486.80	0.80	99.00	0.98
SM	245.30	22.60	69.20	0.93
CB	152.70	38.50	30.00	0.80
CP	656.50	12.80	85.90	0.97
CM	557.10	24.00	54.30	0.99

Los resultados de esta propiedad se muestran en la figura 3.35. Un punto importante a recalcar es que se aprecia la ley lineal en función del logaritmo del tiempo, según lo establecido por la ley establecida por Nozahic, la cual ha sido explicada anteriormente.



**Figura 3.35** Absorción de agua de los bio-agregados Cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM)

### 3.4.5.1.1 Cáñamo

El cáñamo (H) tiene una absorción promedio de 209% al primer minuto de inmersión y una absorción promedio de 424% a los 2880 minutos (48 horas) de inmersión.

#### **3.4.5.1.2 Bio-agregados del tallo de girasol**

En el primer minuto de inmersión SB presenta una absorción de 138%, es decir una disminución relativa del 66.4% del con respecto a H; así mismo, a los 2880 minutos de inmersión se obtuvo una absorción del 326%, lo cual se traduce en una disminución relativa del 77.1% con respecto a H. Durante el primer minuto de inmersión SP tuvo una absorción promedio de 1466%, este bio-agregado tuvo un aumento relativo del 1060% con respecto a H; posteriormente, a los 2880 minutos de inmersión, SP presenta una absorción promedio de 2234%, en esta última medición se tuvo un aumento relativo del 684% con respecto a H. Si comparamos estas tasas de absorción con las obtenidas en H, resulta muy evidente el efecto de la porosidad de la médula, tan solo en comparar las dimensiones de las porosidades del H y SP, podemos observar que este último bio-agregado tiene una gran capacidad de absorción de agua. Por otro lado, SM tiene una absorción promedio de 300%, lo cual muestra un incremento relativo del 20.5% con respecto a H; y posteriormente a los 2880 minutos se obtuvo una absorción promedio de 854%, la cual tiene un incremento relativo del 38.2% con respecto a la absorción obtenida en H; en este caso es posible ver el comportamiento intermedio que se presenta en la mezcla con respecto a los otros dos bio-agregados mencionados en los párrafos anteriores.

#### **3.4.5.1.3 Bio-agregados del tallo de maíz**

En el primer minuto de inmersión, CB registra una absorción promedio de 129%, esta contrasta en un 60.9% con respecto al valor obtenido en H, posteriormente, a los 2880 minutos de inmersión se obtuvo un valor de absorción promedio de 429%, el cual tiene un aumento de 50.3% con respecto al valor obtenido en H; cabe hacer mención que algunos fragmentos obtenidos para este ensaye presentaban algunas fracciones de médula. Por otro lado, en CP, el valor promedio obtenido al primer minuto de inmersión fue de 631% lo cual significa que este bio-agregado tiene un aumento relativo del 345% con respecto a H; a los 2880 minutos de inmersión, se registró una absorción promedio de 1351%, aumentando relativamente un 315% la absorción de agua con respecto a H. En CM, se obtuvo una absorción de 554% al primer minuto de inmersión, lo cual tiene un incremento relativo del 87.7% con respecto a H; a los 2880 minutos de inmersión, se obtuvo un valor de 995%, lo cual tiene un aumento relativo del 73.3% con respecto a H.

#### **3.4.5.2 Agregados empleados en México**

En la tabla 3.38, se muestran los parámetros que componen la ecuación de la curva de regresión lineal, se observa la absorción de agua durante el primer minuto. También, los resultados se grafican en la figura 3.36, en la cual se aplica la ley lineal en función del logaritmo del tiempo, según lo establecido por la ley establecida por Nozahic.

Tabla 3.38 Parámetros de absorción de los bio-agregados: Cáñamo (H), Corteza de maíz (CB), Médula de maíz (CP) y Mezcla de corteza y médula de maíz (CM)

Bio-agregados	IRA	Desviación estándar	K <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>
H	178.90	7.90	25.50	0.80
CB-mx	108.90	3.00	17.40	0.98
CP-mx	325.10	7.20	26.40	0.95
CM-mx	660.60	16.70	40.30	0.95

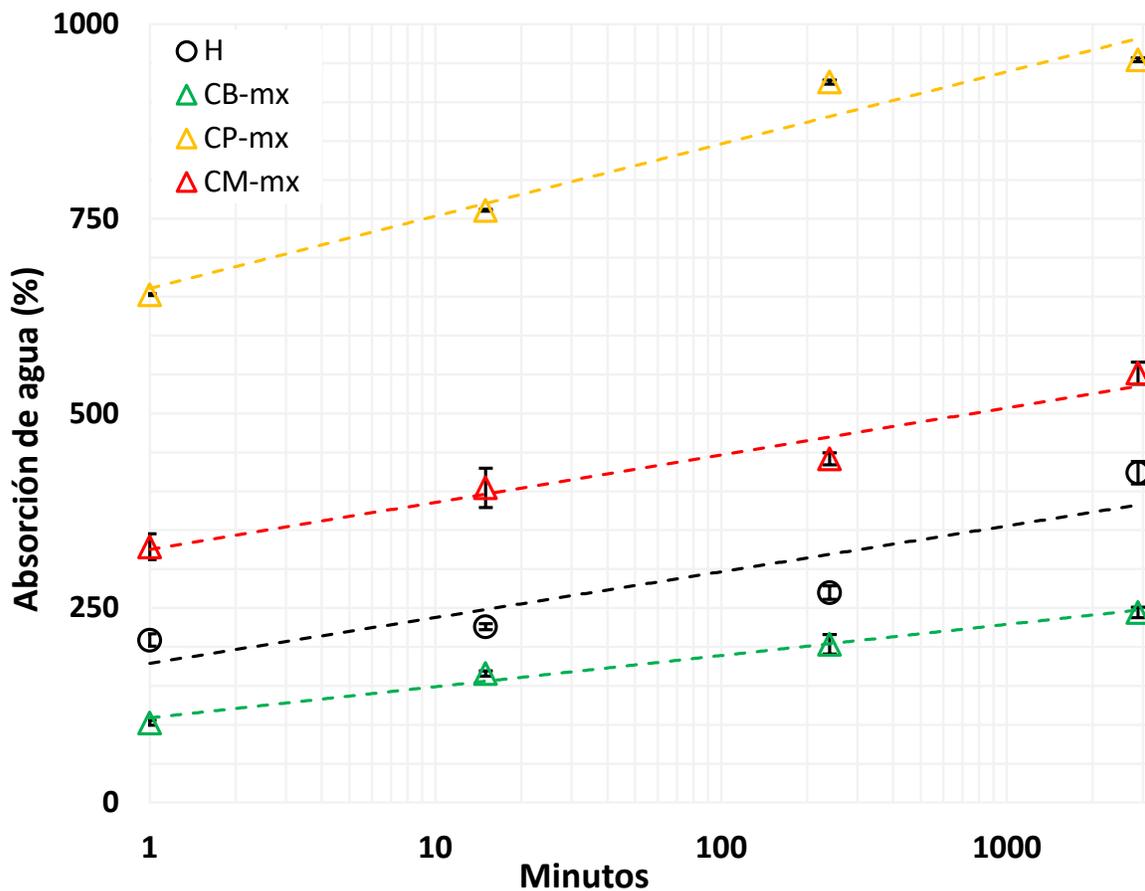


Figura 3.32. Absorción de agua de los bio-agregados Cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP), mezcla de corteza y médula girasol (SM)

En el primer minuto de inmersión CB registra una absorción promedio de 102.50%, esta absorción es menor en un 49.10% con respecto al mismo valor obtenido en H; a los 2880 minutos de inmersión este mismo bio-agregado tiene un valor de absorción promedio de 244.40%, el cual tiene un aumento de 57.70% con respecto al valor obtenido en H. A diferencia del bio-agregado utilizado en Francia, los fragmentos de CB-mx no tienen partículas de médula adheridas; sin embargo, el

aumento en la absorción se debe al tamaño más reducido de partículas en comparación a los bio-agregados utilizados en Francia.

En CP-mx, el valor promedio obtenido al primer minuto de inmersión fue de 652.70% lo cual significa que este bio-agregado tiene un aumento relativo del 312.60% con respecto al cáñamo; y, a los 2880 minutos de inmersión, la médula de maíz tuvo una absorción promedio de 954.30%, aumentando relativamente un 225.20% la absorción de agua con respecto al cáñamo. La mezcla de la corteza y la médula de maíz presentan una absorción de 328.30% al primer minuto de inmersión, lo cual tiene un incremento relativo del 157.40% con respecto de al cáñamo; a los 2880 minutos de inmersión, se obtuvo un valor de 551.70%, lo cual tiene un aumento relativo del 130.20% con respecto al cáñamo.

### 3.4.5.1.4 Síntesis

En la tabla 3.39 se presentan algunos valores representativos encontrados en la revisión bibliográfica, estos valores han sido obtenidos a través del método establecido por el RILEM 236 Bio-based building materials [15].

**Tabla 3.39 Valores de absorción de agua encontrados en la bibliografía**

Bio-agregado	IRA (%)	K1 (%.log(min) <sup>-1</sup> )	Referencia
H	122 - 218	19.5 - 50.0	[1-5]
	178.90	25.50	Este estudio
SB	141 - 148	17.8 - 18.5	[5,6]
	130.50	22.80	Este estudio
SP	223	--	[165,166]
	1486.80	99.00	Este estudio
SM	--	--	--
	245.30	69.20	Este estudio
CB	98.00	19.8	[5]
CB (Francia)	152.70	30.00	Este estudio
CB-mx	108.90	17.40	
CP	450 - 550	11.69 - 19.49	[10]
CP (Francia)	665.50	85.90	Este estudio
CP-mx	325.10	26.40	
CM	--	--	--
CM (Francia)	557.10	54.30	Este estudio
CM-mx	660.60	40.30	

En la bibliografía estudiada se han reportado datos similares como lo es el caso de Nozahic [4] donde obtuvo una absorción promedio de 220% al primer minuto de inmersión, y una absorción promedio de 370% a los 2880 minutos; otro caso es el de Page [47] en la cual la absorción promedio fue de 190% al primer minuto de inmersión, y a los 2880 minutos de inmersión la absorción promedio fue de 460%. Por otro lado, Dinh obtuvo una absorción promedio de 141% al primer minuto de inmersión, y de 300% a los 2880 minutos de inmersión respectivamente. En el caso del cáñamo, la corteza de girasol y de maíz, los resultados de esta prueba muestran

una rápida cinética de absorción al primer minuto. Los valores de absorción de agua para estos bio-agregados son muy similares. Como puede observarse, los resultados obtenidos en esta prueba muestran que el cáñamo tiene una alta absorción de agua durante el primer minuto (209%), de igual manera, la corteza de girasol (139%) y de maíz (183%), debido a la porosidad que presenta en su microestructura, esto también se asemeja a algunos resultados obtenidos en diversos estudios realizados anteriormente [34,45,94,182,243–246].

Las médulas de girasol y de maíz tienen una absorción mayor que el cáñamo y las cortezas de girasol y de maíz esto se debe a que las microestructuras de ambos tipos de médula están compuestas por una extensa red de poros, la cual pueden retener una gran cantidad de agua. Es de notar que la tasa de absorción a un minuto para la médula de girasol es del 1466%, en comparación a la médula de maíz la cual es de 632%. En el estudio realizado por Brouard [8,9], se observan tasas de absorción similares en el caso de la médula de girasol; así mismo caso de la médula de maíz, Rhouma [245] en su estudio reporta una tasa de absorción de agua similar.

Por otro lado, durante la fabricación de la mezcla se debe de tener un especial cuidado pues la alta absorción de agua de ambas médulas tiene un impacto negativo afectando principalmente la relación agua/cementante, pues la pasta derivada de esta relación migra hacia el interior de los poros como se referencia en [51,247]. También la absorción es un factor que incide directamente en el tiempo de secado de las probetas, pudiendo prolongar este proceso entre 2 o 3½ meses. Las mezclas de corteza y médula de girasol y maíz muestran un comportamiento de absorción intermedio, esto debido a que en la mezcla existe una mayor presencia de médula. La mezcla de maíz sigue teniendo una absorción relativamente alta (554%), en comparación de la mezcla de girasol (301%) Como se ha observado este comportamiento se repite en la densidad aparente y la conductividad térmica.

De manera general, los resultados obtenidos pueden diferir de la bibliografía consultada, esto generalmente se debe a los diferentes tipos de bio-agregado, el tamaño de las partículas, el contenido de fibra y polvo, así como también de la forma en cómo se realiza el ensayo, el tamaño de la muestra y la eliminación del agua superficial. Dinh [88], sugiere que el pretratamiento de los bio-agregados a través de una lechada elaborada con una relación agua/cementante de 1, y dejando reposar los bio-agregados durante dos días a temperatura ambiente, puede ayudar a mitigar la alta absorción de agua de los mismos.

#### **3.4.6. Distribución del tamaño de partícula**

##### **3.4.6.1 Agregados empleados en Francia**

La figura 3.33, muestra la distribución del tamaño de partícula de los bio-agregados obtenidos del tallo de girasol

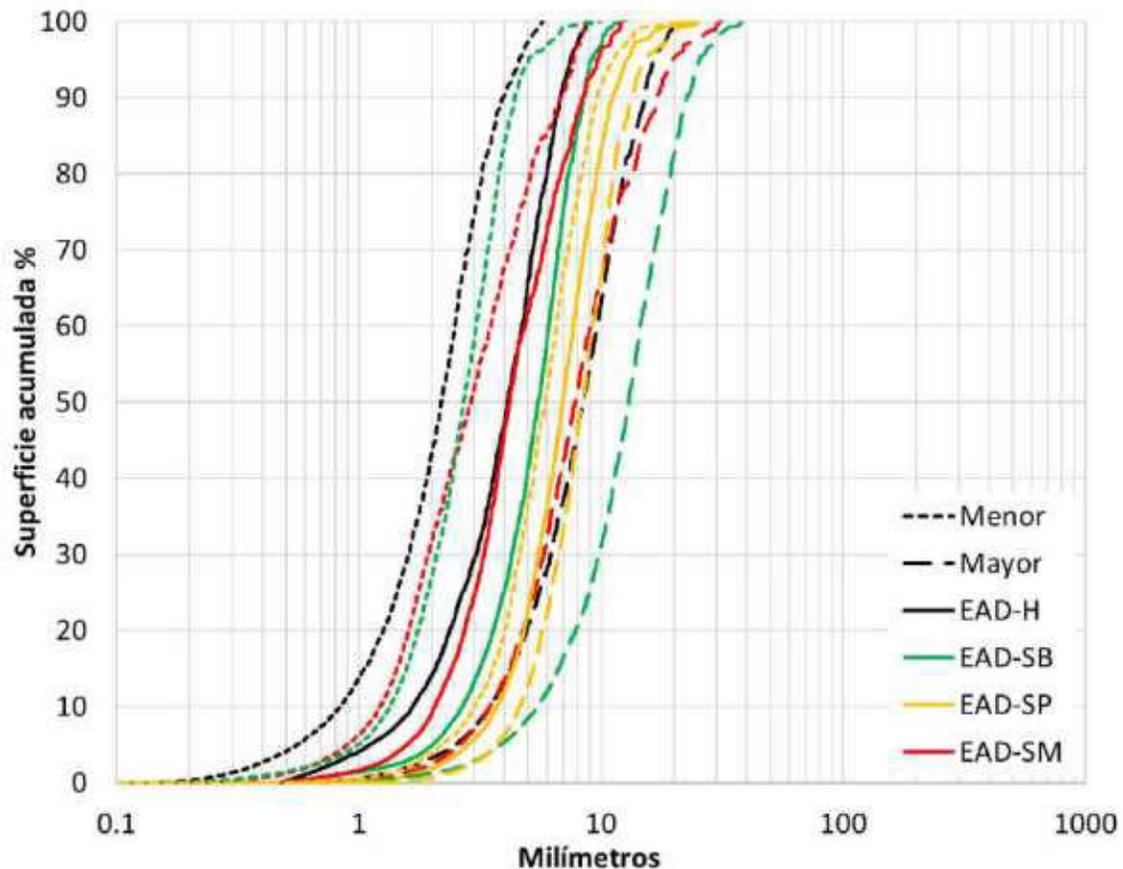


Figura 3.33 Distribución del tamaño de partícula: cáñamo (ED-H), corteza de girasol (ED-SB), médula de girasol (ED-SP), mezcla de corteza y médula de girasol (ED-SM)

#### 3.4.6.1.1 Cáñamo

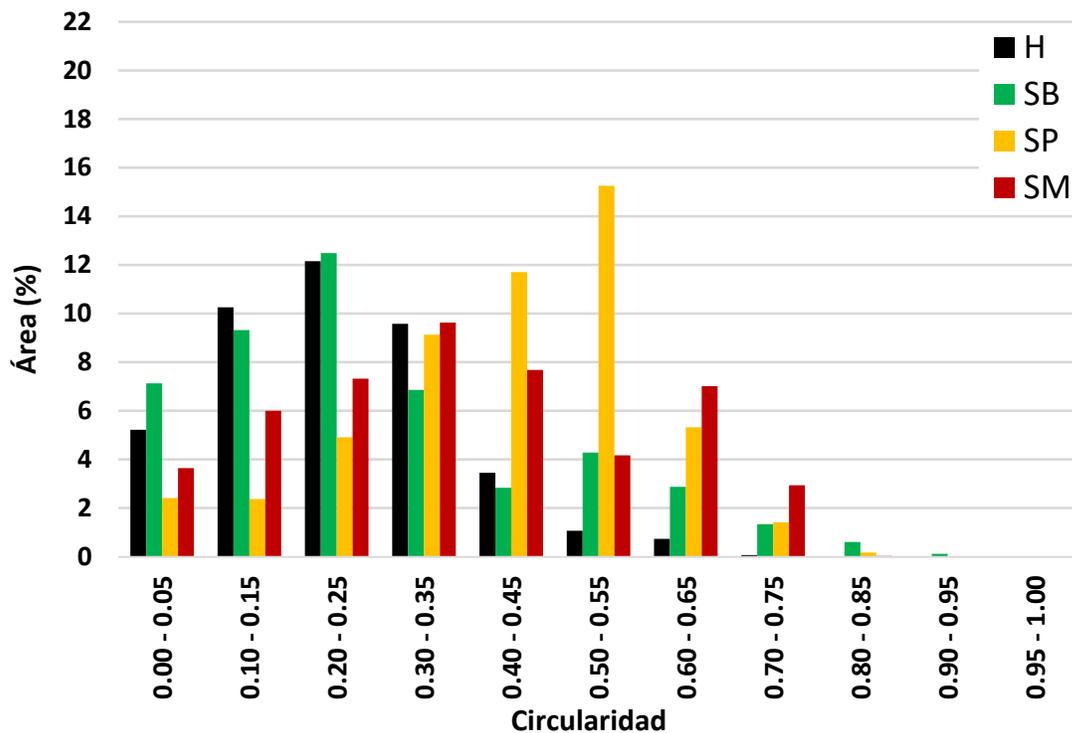
En el eje menor (ancho de la partícula) del cáñamo, se obtuvieron un rango de partículas de entre 0.2 a 13 milímetros, en el diámetro equivalente (área de la partícula) un rango de 0.4 a 15 milímetros, y en el eje mayor (longitud de la partícula) un rango de 0.4 a 20.3 milímetros. Los valores anteriores muestran una similitud a los obtenidos por Dinh, Nozahic y Nguyen [159,243,246], esta dispersión de los diferentes tamaños puede modificarse realizando nuevamente el tamizaje, y verificar cuidadosamente que las partículas no atraviesen el tamiz de manera vertical.

#### 3.4.6.1.2 Bio-agregados del tallo de girasol

SB tiene un rango de 0.13 a 10 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.4 a 13 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.4 a 80 milímetros; como sucede con el cáñamo, esta dispersión del tamaño de las partículas puede solucionarse realizando nuevamente el tamizaje, y verificar cuidadosamente que las partículas no atraviesen el matiz de manera vertical. En SP

se obtuvo un rango de 0.1 a 20 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.5 a 22 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.5 a 60 milímetros; en este caso, se tienen diferentes tamaños debido a que se juntaron las partículas que se retuvieron y pasaron el tamiz de 4 mm<sup>2</sup>. En SM, se obtuvo un rango de 0.12 a 14 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.5 a 20 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.7 a 100 milímetros.

En la figura 3.34, se muestra el intervalo de circularidad de las partículas antes mencionadas, en este caso, mientras la partícula tenga un intervalo cercano a uno, este tiende a una morfología circular, mientras que, si la partícula tiene un intervalo cercano a cero, la morfología de dicha partícula tiende a ser alargada.



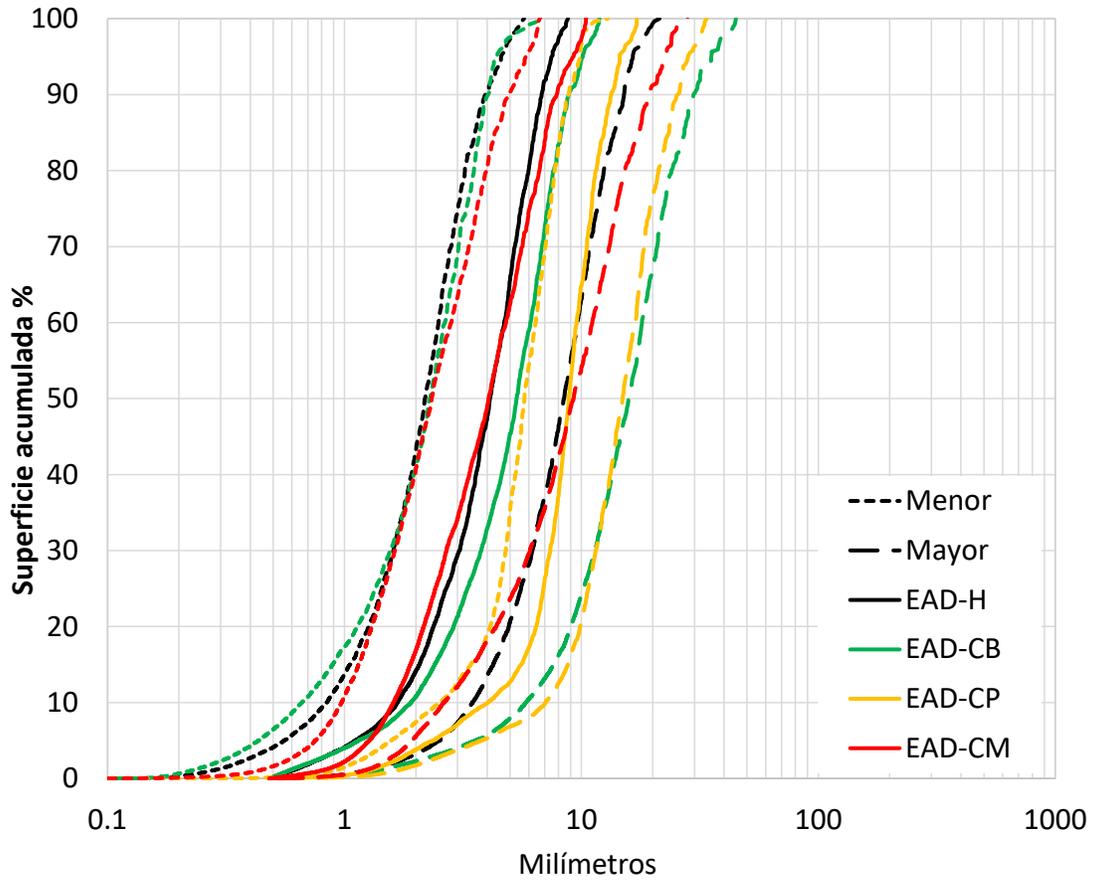


**Figura 3.34. Intervalo de circularidad y morfología de las partículas: cáñamo (H), corteza de girasol (SB), médula de girasol (SP) y mezcla de corteza y médula de girasol (SM)**

La mayor concentración del intervalo de circularidad de las partículas del cáñamo está entre 0 y 0.45, lo cual se traduce en una morfología alargada y plana, esto se puede confirmar en la imagen con el inciso H. Por otro lado, en SB, el intervalo de circularidad es similar al obtenido en H, pues la mayor concentración del intervalo de circularidad se presenta entre 0 y 0.65, esto se debe a que algunos fragmentos de este bio-agregado presentan una morfología circular. En SP, el intervalo de circularidad se muestra una marcada tendencia a 1, pues en su mayoría, las partículas tienen una morfología circular o elíptica, la mayor concentración del intervalo de circularidad se registra entre 0.25 y 0.65. En el caso de SM, se observa que la mayor concentración del intervalo de circularidad se registra entre 0.05 y 0.45, pero vuelve a incrementar en intervalo 0.65, esto debido a la presencia de la médula en este bio-agregado, sin embargo, la morfología predominante es la alargada, la cual corresponde a la corteza de girasol. El comportamiento del intervalo de circularidad en este bio-agregado puede definirse como intermedio.

#### **3.4.6.1.3 Bio-agregados del tallo de maíz**

En la figura 3.35 se muestran las distribuciones de tamaño de partícula de los bio-agregados obtenidos del tallo de maíz. En CB, se obtuvo un rango de 0.1 a 0.8 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.5 a 15 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.6 a 48 milímetros. En este caso la morfología de las partículas (generalmente rectangular) impedía su paso por el tamiz de 4 mm<sup>2</sup> de abertura, por lo que se realizaron diferentes procesos de molienda, así mismo estos procesos de molienda originaban una mayor cantidad de partículas finas y por consecuente la pérdida de material útil. En CP, se obtuvo un rango de 0.15 a 18 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.5 a 12 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.5 a 100 milímetros; en este caso, se tienen diferentes tamaños debido a que se juntaron las partículas que se retuvieron y pasaron el tamiz de 4 mm<sup>2</sup>. En CM, se obtuvo un rango de 0.1 a 11 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.5 a 17 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.5 a 100 milímetros.



**Figura 3.35 Distribución del tamaño de partícula: cáñamo (ED-H), corteza de maíz (ED-CB), médula de maíz (ED-CP), mezcla de corteza y médula de maíz ED-CM)**

En la figura 3.36 se muestra el intervalo de circularidad obtenido en los bio-agregados el tallo de maíz.

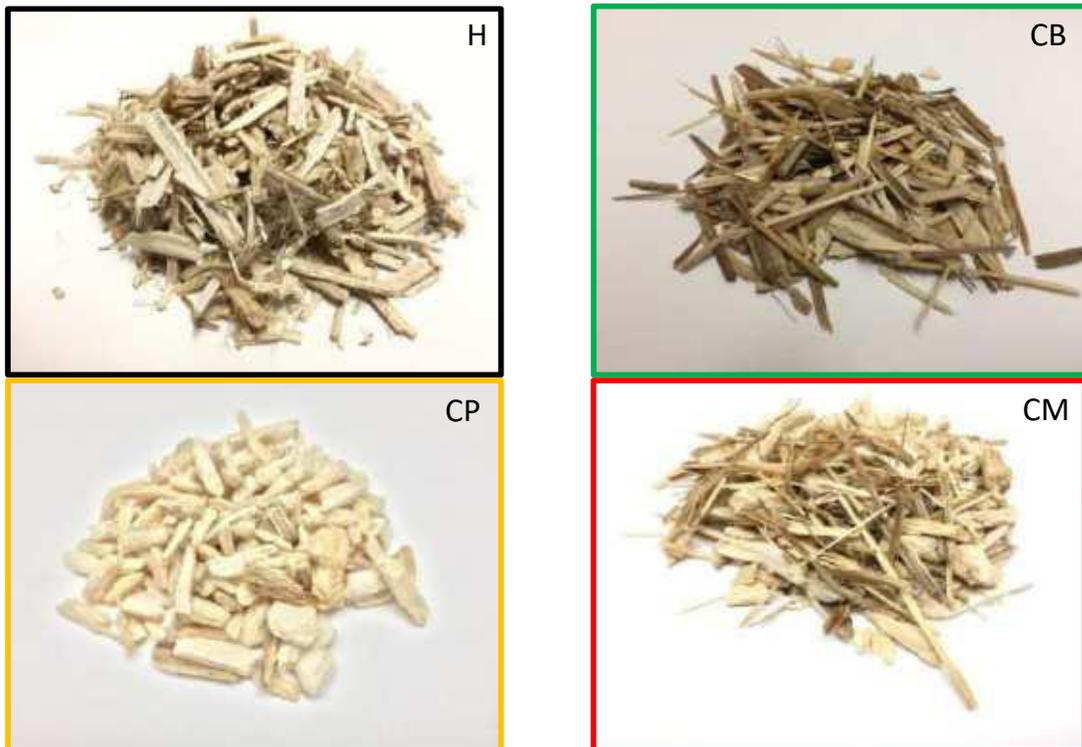
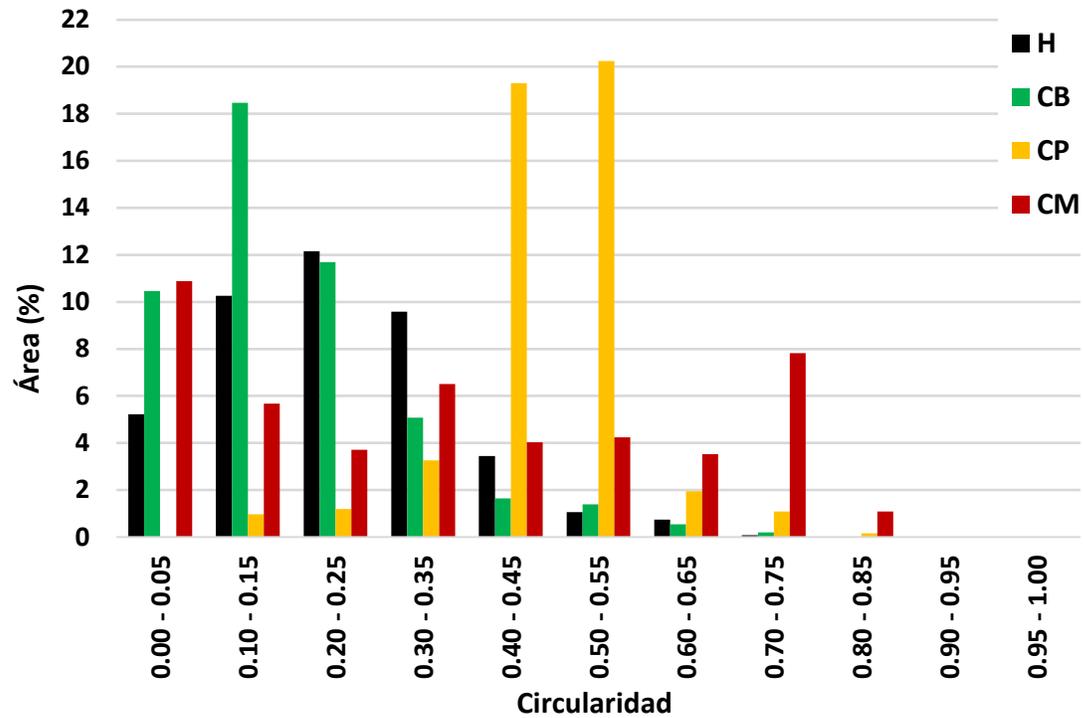


Figura 3.36. Intervalo de circularidad de las partículas: cañamo (H), corteza de maíz (CB), médula de maíz (CP) y mezcla de corteza y médula de maíz (CM)

En CB, el intervalo de circularidad se presenta entre 0 y 0.45, esto se debe a que algunos fragmentos de este bio-agregado presentan una morfología alargada, con

una geometría bien definida la que asemeja a un rectángulo. En CP, la mayor concentración del intervalo de circularidad se presenta en 0.40 hasta 0.55, pues en su mayoría, las partículas tienen una morfología elíptica, y en algunos casos alargada. En CM, se observa que la mayor concentración del intervalo de circularidad se registra entre 0.05 y 0.30, pero vuelve a incrementar en intervalo 0.45 hasta 0.70, esta disparidad muestra que la mezcla de ambos bio-agregados pueden dar lugar a una disparidad compleja entre los intervalos de las partículas, pues se tiene la morfología rectangular de la corteza y la forma elíptica de las partículas de la médula

### 3.4.6.2 Bio-agregados empleados en México

#### 3.4.6.2.1 Bio-agregados del tallo de maíz

En la figura 3.37 se muestran las distribuciones de tamaño de partícula de los bio-agregados obtenidos del tallo de maíz.

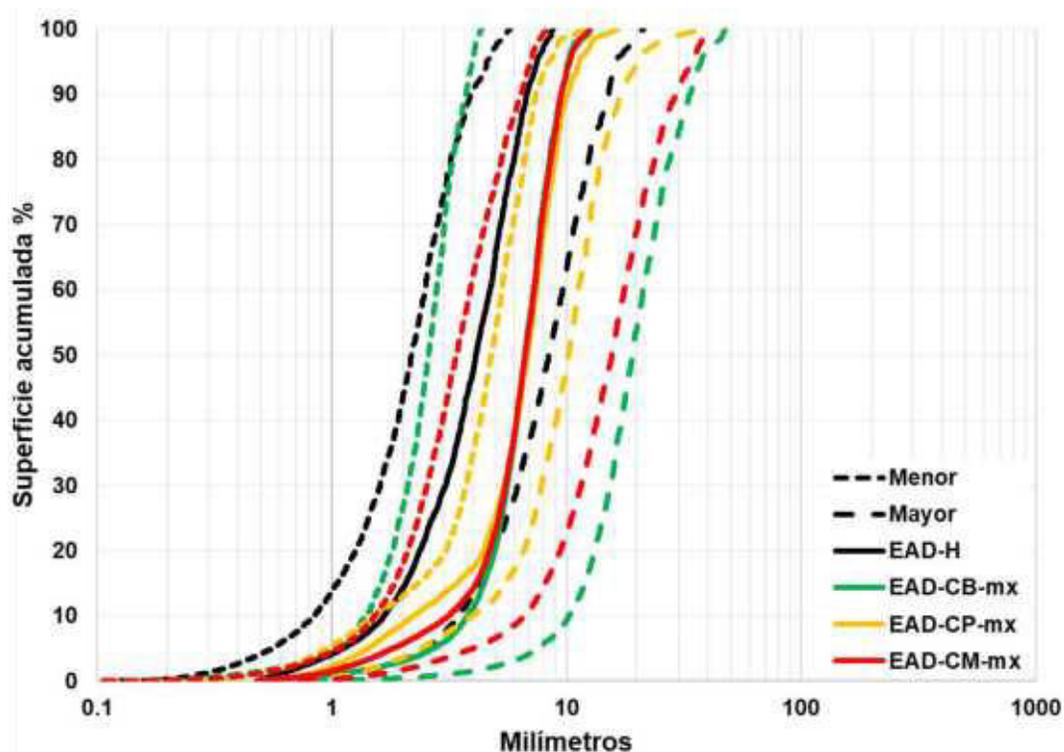
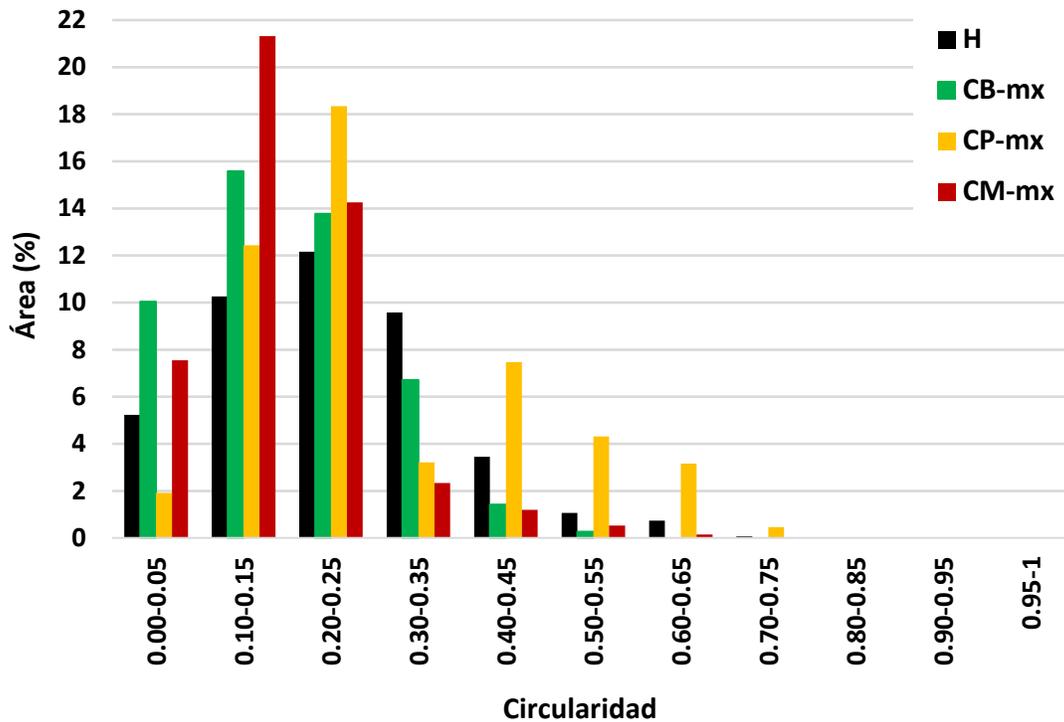


Figura 3.33. Distribución del tamaño de partícula, corteza de maíz (ED-CB-mx) de maíz (ED-CP), mezcla de corteza y médula de maíz ED-CM).

CB-mx obtuvo un rango de 0.1 a 10 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.5 a 10.9 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.4 a 100 milímetros. En este caso la morfología de las partículas (que en su mayoría es rectangular) impedía su paso por el tamiz de 4 mm<sup>2</sup> de abertura, por lo que se realizaron diferentes procesos de molienda, así mismo estos procesos de molienda

originaban una mayor cantidad de partículas finas y por consecuente la pérdida de material útil. En CP-mx se obtuvo un rango de 0.1 a 10 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.4 a 11 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.5 a 100 milímetros; en este caso, se tienen diferentes tamaños debido a que se juntaron las partículas que se retuvieron y pasaron el tamiz de 4 mm<sup>2</sup>. En CM-mx, se obtuvo un rango de 0.1 a 9 milímetros en el eje menor, en el diámetro equivalente un rango de 0.5 a 10.3 milímetros, y en el eje mayor, un rango de 0.5 a 100 milímetros.

En la figura 3.34 se muestra el intervalo de circularidad de los bio-agregados obtenidos del tallo de maíz.





**Figura 3.34. Intervalo de circularidad de las partículas: cáñamo (H), corteza de maíz (CB-mx), médula de maíz (CP-mx) y mezcla de corteza y médula de maíz (CM-mx)**

En CB-mx, el intervalo de circularidad la mayor concentración del intervalo de circularidad se presenta entre 0 y 0.55, esta geometría es la misma que se observa en CB obtenida en Francia. En CP-mx, la mayor concentración del intervalo de circularidad se presenta en 0.10, hasta 0.45, en su mayoría, las partículas tienen una morfología elíptica. En el caso de CM-mx, se observa que la mayor concentración del intervalo de circularidad se registra entre 0 y 0.25; esta morfología se ve influenciada ampliamente por la corteza, ya que este es el bio-agregado predominante en la mezcla; por consiguiente, no presenta una circularidad intermedia como en el caso de este mismo bio-agregado obtenido en Francia.

### 3.4.6.3 Síntesis

El RILEM TC 236-Biobased Building Materials, recomienda 2 métodos principales para determinar el tamaño de las partículas en los bio-agregados, el primero es el tamizaje mecánico y el segundo es el análisis de imagen a través de software [15,45]; este último método es recomendable para los bio-agregados que son alargados. En este método, en primer lugar, las partículas se tamizan a 500  $\mu\text{m}$  para eliminar el polvo. Luego se homogeneizan antes de escanearlas sobre un fondo negro para obtener un mejor contraste para el análisis de imágenes mediante el uso del software. Sin embargo, este método solo se realiza con un pequeño número de partículas. Por lo tanto, la precisión de los resultados puede verse limitada por la representatividad de la muestra. Además, las dimensiones obtenidas solo están relacionadas con la proyección 2D de las partículas [14].

La distribución del tamaño de partícula es una propiedad física que depende de los procesos de molienda y tamizaje de los bio-agregados, también, juega un papel importante en el desempeño sus propiedades físicas, tal es el caso de la absorción de agua, donde CB obtuvo la mayor tasa de absorción a un minuto de inmersión; la morfología y el área superficial de dichas partículas es mayor en comparación a SB y H. Sin embargo, en SP se presenta un caso diferente, pues sus propiedades físicas como su tasa de absorción de agua es mayor, su densidad aparente es menor y la conductividad térmica es menor, con respecto a CP, lo anterior se atribuye a su microestructura, pues los alveolos de SP tienen un mayor diámetro, a

pesar de que la morfología de CP tiene un mayor tamaño. En la tabla 3.40, se muestra una comparativa entre las diferentes longitudes de partícula encontradas en la bibliografía contra los bio-agregados utilizados en esta investigación.

**Tabla 3.40 longitudes promedio de los diferentes bio-agregados**

Bio-agregado	Longitud promedio de partícula (mm)	Ancho promedio de partícula (mm)	Referencia
H	0.70 - 30.00	0.25 – 0.50	[1,2,14,181,182,201,202,205–208,211,213,247,248]
	0.50 – 23.30	0.12 – 12.29	Este estudio
SB	5.70 – 9.00	1.80 – 8.30	[5,6,211,249]
	0.57 – 39.56	0.51 – 19.17	Este estudio
SP	9.00	6.00	[141]
	0.50 – 25.17	0.12 – 15.28	Este estudio
SM	--	--	--
	0.52 – 30.94	0.10 – 8.97	Este estudio
CB	9.00 – 14.00	1.80 – 8.30	[5,6,250]
CB (Francia)	0.51 – 44.93	0.10 – 6.43	Este estudio
CB-mx	0.54 – 46.10	0.06 – 4.24	
CP	--	--	--
CP (Francia)	0.50 – 33.81	0.13 – 12.92	Este estudio
CP-mx	0.49 – 37.18	0.1 – 11.90	
CM	--	--	--
CM (Francia)	0.51 – 27.35	0.1 – 6.66	Este estudio
CM-mx	0.49 – 43.35	0.06 – 8.24	

Las características antes mencionadas, hacen que las propiedades físicas de los bio-agregados sean casi idénticas a las de algunos materiales de construcción convencionales, al grado de que puede alcanzar valores similares al poliuretano expandido. En el caso de CM, los valores obtenidos de densidad aparente y conductividad térmica fueron menores en comparación a SM, esto se debe a que existe una heterogeneidad entre las partículas de la mezcla de corteza y médula de maíz. Sin embargo, cabe señalar que, en la tasa de absorción de agua, este último bio-agregado fue mayor, esto debido a la forma y el área superficial de la corteza presente en esta mezcla.

Por otro lado, las diferencias observadas en los bio-agregados obtenidos en México, presentan una diferencia significativa con respecto a su similares franceses, pues

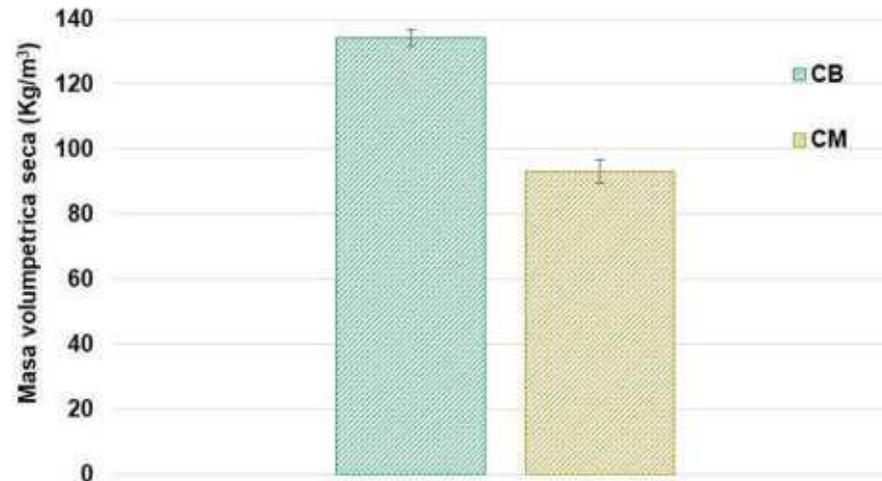
el factor que afecta directamente a esta propiedad es la molienda de los materiales, debido a que han sido triturados con un molino diferente al utilizado en Francia. Se puede observar que la circularidad de las partículas tiene una mejor distribución en el contexto mexicano. Al realizar la comparación de CB y CB-mx, CM y CM-mx, sin embargo, en la comparativa realizada en CP y CP-mx, este último presenta una morfología diferente y dispereja. Lo anterior puede solucionarse empleando técnicas de trituración y tamizaje mejor controlados.

#### **3.5.4 Masas volumétricas compactadas**

El procedimiento de prueba inició colocando una masa de corteza de maíz con un peso de 0.65 kilogramos, posteriormente, esta misma masa de bio-agregados fue sometida a una inmersión en agua durante 30 segundos. También en la fabricación de las probetas con los bio-agregados de la mezcla de maíz, se emplearon 0.45 kilogramos de bio-agregados, los cuales fueron sumergidos durante 30 segundos. En la tabla 3.41, se muestran las cantidades que se emplean en la elaboración de los especímenes. Cabe hacer mención que en este punto la experimentación se detuvo debido a la pandemia, quedando pendiente la elaboración de las masas compactadas de la médula de maíz. En la figura 3.35 se muestra una gráfica con la masa seca compactada de los bio-agregados analizados

**Tabla 3.41 Masas compactadas de los bio-agregados**

Material	Masa del material (kg)	Masa húmeda del material (kg)	Absorción de agua (%)	Masa de carga (Kg)	Fuerza de compresión (MPa)	Masa húmeda compactada (kg)	Masa seca compactada (kg)	Promedio Masa seca compactada (kg)
CB-1						0.44	0.13	
CB-2	0.65	1.25	92.50			0.39	0.13	0.13 ± 2.50
CB-3				3.30	0.004	0.41	0.13	
CM-1						0.59	0.98	
CM-2	0.45	5.95	1222.80			0.53	0.91	0.93 ± 3.60
CM-3						0.50	0.89	



**Figura 3.35 Masas secas compactadas**

La principal limitante que se observó en este procedimiento fue lograr la estabilidad volumétrica del material en la mezcla de la corteza y la médula de maíz; en la corteza de maíz no se presentaron otros problemas, sin embargo; al momento de realizar la compresión de los materiales se observó la expulsión de agua en ambos materiales; puede deberse que, al momento de realizar la compresión, los poros, en especial de la médula del maíz, drenaron un porcentaje del agua que absorbieron. Los fragmentos de las partículas que constituyen a la masa compactada seca de la corteza de maíz se desprenden con mayor facilidad en comparación a las partículas de la mezcla de corteza y médula de maíz.; en la gráfica se puede observar el impacto que tiene el efecto de la compactación en el material debido al drenaje el agua; y en segundo la diferencia relativa del peso del material del 69.20% de la mezcla de corteza y médula de maíz con respecto a la corteza

### **3.5 Conclusiones**

#### **Contexte français**

Ce chapitre présente les résultats de transformation, d'obtention et de caractérisation appliqués aux bio-agrégats utilisés dans cette recherche, ainsi qu'une comparaison avec certains résultats obtenus dans la littérature. Dans la première partie, une description est donnée des deux procédés développés pour obtenir les bio-agrégats. Dans le processus décrit au point 3.2.4, on observe une plus grande efficacité dans l'obtention de bio-agrégats de tournesol, ce qui est attribué à la facilité de séparation ; c'est le contraire dans le point 3.2.5, qui montre l'obtention de bio-agrégats de maïs, dans lequel la séparation de l'écorce et de la moelle a été développée avec plusieurs processus de broyage et de tamisage mécanique, ce qui entraîne une plus grande consommation d'énergie et de temps. Il est donc nécessaire d'adapter ce procédé par un pré-nettoyage ou une séparation manuelle de l'écorce et de la moelle avant le broyage, afin d'éviter une consommation d'énergie plus élevée.

Dans la deuxième partie, les différents résultats de caractérisation appliqués aux bio-agrégats sont présentés, où l'on peut apprécier l'importance de la microstructure, ainsi que l'effet (positif ou négatif) qu'elle a sur les différentes propriétés physiques évaluées. En général, en réalisant une microscopie électronique à balayage, il est possible d'avoir une notion préalable des propriétés physiques des bio-agrégats, puisque leur microstructure définit de manière générale le comportement et la performance des propriétés physicomécaniques des bio-agrégats. SB présente une densité apparente intermédiaire, par rapport à H et CB ; cependant, l'absorption d'eau de SB est plus faible par rapport à H et CB, mais la conductivité thermique présente une valeur très proche de celle obtenue dans H, en raison de sa similitude microstructurale.

Un autre exemple clair est le SP, car sa microstructure lui permet d'avoir une densité apparente et une conductivité thermique très faibles par rapport au CP, cependant, cela devient un grand désavantage lors de l'analyse de l'absorption d'eau, car le SP présente un taux d'absorption 8 fois plus élevé que le CP. Ce

facteur aura un effet négatif lors de l'élaboration des bétons à base de plantes, car l'un des objectifs du travail est de fabriquer des mélanges ayant des caractéristiques et des valeurs similaires à celles utilisées pour la fabrication de bétons à base de plantes avec du chanvre. En revanche, dans le SM, la teneur prédominante en écorce contribue à réguler le comportement du taux d'absorption, le plaçant dans une valeur intermédiaire entre SB et SP sans mélange. Le même comportement se répète en CM, où les valeurs sont intermédiaires dans la caractérisation des propriétés physiques des bio-agrégats.

Un autre point important est la distribution de la taille des particules car, comme mentionné ci-dessus, ce facteur a une grande influence sur les propriétés physiques décrites ci-dessus ; d'autre part, la disparité de taille peut être régulée avec des processus de broyage et de tamisage plus contrôlés.

### **Contexte mexicain**

Les points importants à noter sont la remarquable similitude des caractéristiques microstructurelles entre les 2 enveloppes de maïs. Il y a également une différence remarquable entre les diamètres des cellules du grain de maïs, dans les deux cas on observe une structure amorphe, mais la croissance de la tige de la plante se fait de l'intérieur vers l'extérieur, aussi bien dans les grains de maïs français que mexicains.

La densité apparente augmente considérablement dans les 3 bio-agrégats obtenus au Mexique par rapport aux mêmes bio-agrégats provenant de France, car le processus de concassage et de tamisage a été mieux contrôlé et la régulation de la taille réduit les vides interparticulaires. Cela a également un effet sur l'absorption d'eau, car la plus grande quantité de particules fines augmente la surface et donc la quantité d'eau que les bio-agrégats peuvent retenir.

L'augmentation de la teneur en particules fines est visible dans les courbes obtenues à partir de l'analyse de la distribution granulométrique, où dans les 3 bio-agrégats, la courbe de la plus petite enveloppe est plus longue que dans les bio-agrégats obtenus en France. De même, l'intervalle de circularité des bio-agrégats obtenus au Mexique présente une grande similitude avec les bio-agrégats obtenus en France. Les particules CB-mx présentent une forme similaire à un rectangle, tandis que les particules CP-mx présentent une disparité de morphologie, puisqu'il existe des particules allongées et des particules rondes. Enfin, dans le cas de CM-mx, la circularité de la taille des particules tend à s'allonger, en raison de la présence d'une majorité d'écorce dans le mélange. L'un des principaux problèmes observés dans les masses volumétriques sèches était l'expulsion de l'eau, qui faisait perdre à l'échantillon sa stabilité volumétrique.

### **Contexto francés**

En este capítulo se presentan los resultados de transformación, obtención y la caracterización aplicada a los bio-agregados empleados en esta investigación, así mismo, se hace una comparación con algunos resultados obtenidos en la bibliografía. En la primera parte se hace una descripción de los 2 procesos desarrollados para la obtención de los bio-agregados. En el proceso descrito en

el apartado **3.2.4**, se observa una mayor eficiencia en la obtención de los bio-agregados de girasol; esto se atribuye a la facilidad de separación; caso contrario en el apartado **3.2.5**, se muestra la obtención de los bio-agregados de maíz, en el cual, la separación de la corteza y la médula se desarrolló con varios procesos de molienda y tamizaje mecánico lo que se traduce en un mayor consumo de energía y de tiempo. Por lo anterior es necesario adecuar este proceso con una limpieza previa o una separación manual de la corteza y la médula antes de ser sometido a su trituración, a fin de evitar un consumo de energía mayor.

En la segunda parte, se exponen los diferentes resultados de caracterización aplicadas a los bio-agregados, donde se aprecia la importancia que tiene la microestructura, así como el efecto (positivo o negativo) que tiene en las diferentes propiedades físicas evaluadas. De manera general, al realizar la microscopía electrónica de barrido, se logra tener una noción previa de las propiedades físicas de bio-agregados, pues su microestructura se define de manera general el comportamiento y el rendimiento de las propiedades fisicomecánicas de los bio-agregados. En SB presenta una densidad aparente intermedia, comparada con H y CB; sin embargo, la absorción de agua de SB es menor con respecto a H y a CB, pero la conductividad térmica presenta un valor muy cercano a la obtenida en H, debido a su similitud microestructural.

Otro ejemplo claro es SP, pues su microestructura le permite tener una densidad aparente y una conductividad térmica muy baja en comparación de a CP, sin embargo, esto se convierte en una gran desventaja al analizar la absorción de agua pues SP, exhibe una tasa de absorción 8 veces mayor con respecto a CP. Este factor tendrá un efecto negativo durante la elaboración de los concretos vegetales, pues uno de los objetivos del trabajo es fabricar mezclas con características y valores similares con las que se elaboran los concretos vegetales con cáñamo. Por otro lado, en SM, el contenido predominante de corteza ayuda a regular el comportamiento en la tasa de absorción, colocándolo en un valor intermedio entre SB y SP sin mezclar. El mismo comportamiento se repite en CM, donde los valores son intermedios en la caracterización de las propiedades físicas de los bio-agregados.

Otro punto importante es la distribución del tamaño de partícula ya que como se mencionó anteriormente, este factor tiene una gran influencia en las propiedades físicas descritas anteriormente; por otra parte, la disparidad de los tamaños puede regularse con procesos de trituración y tamizaje más controlados.

### **Contexto mexicano**

Los puntos importantes por destacar es la notable similitud de las características microestructurales entre las 2 cortezas de maíz. También una notable diferencia entre los diámetros de los alveolos de las médulas de maíz, en ambos casos se observan una estructura amorfa, pero el crecimiento del tallo de la planta es de adentro hacia afuera, tanto en la médula de maíz de Francia y México.

La densidad aparente incrementa considerablemente en los 3 bio-agregados obtenidos en México con respecto a los mismos bio-agregados de Francia, lo

anterior es debido a que el proceso de trituración y tamizaje fue más controlado y la regulación de tamaños reducen los vacíos interparticulares. Lo anterior también tiene un efecto en la absorción de agua, pues al tener una mayor cantidad de partículas finas, el área superficial aumenta y con ello la cantidad de agua que los bio-agregados pueden retener.

El aumento en el contenido de partículas finas puede observarse en las curvas obtenidas el análisis de la distribución del tamaño de partículas, donde en los 3 bio-agregados, la curva de la envolvente menor es más prolongada que en los bio-agregados obtenidos en Francia. De igual manera, el intervalo de circularidad de los bio-agregados obtenidos en México muestran una gran similitud a los bio-agregados obtenidos en Francia. Las partículas de CB-mx presentan una forma similar a un rectángulo, mientras que las partículas de CP-mx presentan una disparidad en la morfología, pues existen partículas alargadas y partículas redondas. Por último, en el caso de CM-mx, la circularidad del tamaño de las partículas tiende a ser alargada, esto debido a la presencia mayoritaria de la corteza en la mezcla. Uno de los principales problemas observados en las masas volumétricas secas, fue la expulsión de agua, lo que hacía perder estabilidad volumétrica a la muestra.

# Capítulo 4

## *Formulación, elaboración y caracterización de los concretos vegetales*

## **Capítulo 4. Formulación, elaboración y caracterización de los concretos vegetales**

### **Introduction**

Ce chapitre analyse la méthode utilisée pour le dosage des mélanges de béton à base de plantes, ainsi que le suivi du processus de prise de ces mélanges. Ensuite, les résultats obtenus à partir des tests physicomécaniques appliqués aux bétons à base de plantes sont étudiés, et l'effet des extraits hydrosolubles présents dans les bio-agrégats sur l'interaction avec les agents cimentaires pouzzolaniques est examiné. Il faut noter que sur ce dernier point, certains mélanges ont été sélectionnés qui ont un comportement intéressant du point de vue mécanique.

### **Introducción**

En este capítulo se analiza el método empleado para la dosificación de las mezclas de concreto vegetal, así como el seguimiento al proceso de fraguado de dichas mezclas. Posteriormente, se estudian los resultados obtenidos de las pruebas fisicomecánicas aplicadas a los concretos vegetales y principalmente se examina el efecto que causan los extractos hidrosolubles presentes en los bio-agregados en la interacción con los cementantes puzolánicos. Cabe señalar que en este último punto, se seleccionaron algunas mezclas que tienen comportamientos interesantes desde el punto de vista mecánico.

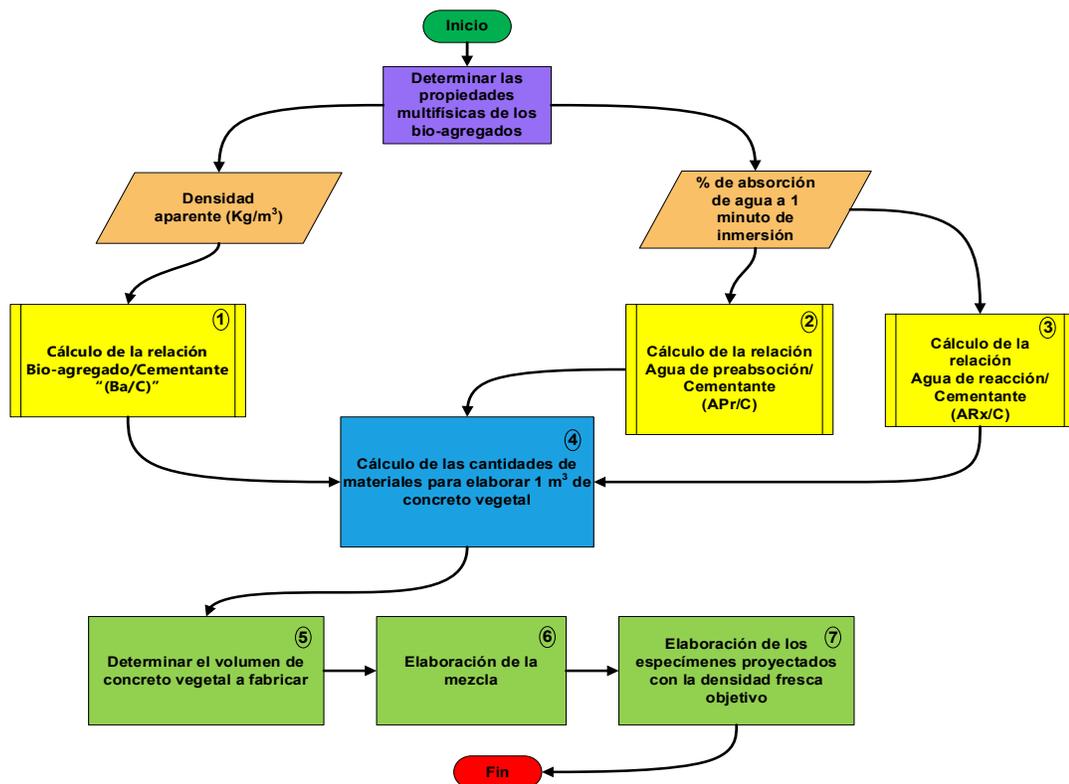
### **4.1 Diseño y fabricación de los compuestos de concreto vegetal**

En el diseño de concretos vegetales hay dos parámetros principales que se toman en cuenta, el primero es la densidad aparente de los agregados, pues este indica la cantidad de bio-agregado a utilizar, el segundo es la absorción de agua el cual regula la cantidad de agua presente en la mezcla. Dinh [159] realizó un estudio para encontrar las cantidades optimas de los cementantes, los bio-agregados, los activantes puzolánicos, los aditivos y el agua; esto con la finalidad de estandarizar dichas cantidades y asegurar la calidad de las mezclas.

Las cantidades antes mencionadas se muestran en la tabla 4.1, en dicho diseño de mezcla se tiene una relación bio-agregado/cementante de 0.43, esta relación puede adaptarse dependiendo las propiedades físicas de los bio-agregados así como una relación agua/cementante puzolánico de 0.98, la cual asegura una buena trabajabilidad en la mezcla, además se hace la adición del 3% de sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ) con respecto al peso total de los cementantes cuya función es de activar al metacaolín y acelerar los procesos de fraguado, y del 1.6% de aditivo superfluidificante con respecto al peso de los cementantes, el cual permite que la mezcla sea trabajable. El procedimiento del diseño y la elaboración de mezcla se ejemplifica en la figura 4.1.

**Tabla 4.1. Cantidad de materiales para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal (kg) [159]**

Metacaolín	262.00
Cal hidráulica	112.30
<i>Total de cementantes</i>	<i>374.30</i>
Bio-agregado (cáñamo)	161.90
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11.20
Superplastificante	6.00
Agua de absorción de los bio-agregados	112.30
Agua de mezcla	252.70
<i>Total de agua</i>	<i>365.00</i>



**Figura 4.1. Secuencia para el diseño de mezclas de concreto vegetal**

Partiendo de la premisa de que el cáñamo es el bio-agregado de referencia, en la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos al primer minuto de absorción de los diferentes bio-agregados, así como su correlación con respecto al cáñamo; y en la tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos en la densidad aparente de los diferentes bio-agregados, así como su correlación con respecto al cáñamo. Esta correlación ayuda a entender cómo las diferencias entre las características físicas de los bio-agregados, pueden aumentar o disminuir las cantidades de bio-agregados o de agua en la mezcla, también esto puede tener repercusiones en las propiedades físicas y mecánicas de los concretos vegetales.

**Tabla 4.2. Absorción de agua a 1 minuto de los bio-agregados**

<i>Bio-agregado</i>	<i>Absorción de agua a 1 min (%)</i>	<i>Correlación con respecto al cáñamo</i>
Cáñamo	211	1.00
Corteza de girasol	141	0.67
Médula de girasol	1530	7.25
Mezcla de girasol	323	1.35
Corteza de maíz	212	1.01
Médula de maíz	619	2.93
Mezcla de maíz	1260	5.97

**Tabla 4.3. Densidad aparente de los bio-agregados**

<i>Bio-agregado</i>	<i>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Correlación con respecto al cáñamo</i>
Cáñamo	112.5	1
Corteza de girasol	124.8	1.11
Médula de girasol	11.8	0.1
Mezcla de girasol	66.6	0.59
Corteza de maíz	98.9	0.88
Médula de maíz	26.8	0.24
Mezcla de maíz	43	0.38

***A manera de ejemplo, se realiza el diseño de mezcla de concreto vegetal con la corteza de girasol, donde se tiene la siguiente metodología.***

La relación *bio-agregados/cementante* (BA/C) se obtiene multiplicando el valor de la relación BA/C del cáñamo (0.43) por el valor de la correlación de la densidad aparente de la corteza de girasol (1.11).

$$BA/C = (0.43)(1.11) = \underline{\underline{0.48}}$$

La relación *agua de preabsorción/cementante* (APr/C), se obtiene multiplicando el valor de la relación del agua de preabsorción del cáñamo (0.30) por el valor de la correlación de la densidad aparente de girasol con respecto al cáñamo (1.11) por el valor de la correlación de la absorción de la corteza de girasol con respecto al cáñamo (0.67).

$$APr/C = (0.30)(1.11)(0.67) = \underline{\underline{0.22}}$$

Después de elaborar una mezcla de prueba, se observó que se formaban algunos grumos que contenían cementante no hidratado, por lo cual se

decidió elaborar una mezcla con una relación agua/cemento que permitiese mantener el mismo volumen y una misma densidad fresca en todas las mezclas.

$$AR_x/C = \underline{0.76}$$

Una vez obtenidos los valores correspondientes a las relaciones de bio-agregado, agua de preabsorción y agua de reacción con respecto al cementante, se procede a calcular las cantidades de materiales correspondientes para elaborar 1 metro cúbico de concreto vegetal, los cálculos parten de la mezcla optimizada realizada por Dinh [88], las adecuaciones para conocer el contenido de bio-agregados, la cantidad de agua de preabsorción y el agua de reacción se realizan multiplicando el peso total de los cementantes empleados por los valores obtenidos por cada una de las relaciones antes mencionadas; esto se muestra en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4. Cantidad de materiales para fabricar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal de corteza de girasol**

Mezcla optimizada por Dinh [159] para el uso del cáñamo.		Adecuación al diseño para el uso de la corteza de girasol.	Cantidad de materiales para elaborar 1 m <sup>3</sup> de concreto vegetal de corteza de girasol
Materiales	kg/m <sup>3</sup>		kg/m <sup>3</sup>
Metacaolín	262	--	262
Cal hidráulica	112.3	--	112.3
Total de cementantes	374.3	--	374.3
Bio-agregado	161.9	(374.30) (0.48)	179.7
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11.2	--	11.2
Superplastificante	6	--	6
Agua de preabsorción	112.3	(374.30) (0.22)	82.3
Agua de mezcla	252.7	--	252.7

Ya establecidas las cantidades de los materiales a utilizar para fabricar 1 metro cúbico vegetal, se procede a calcular el volumen de los especímenes, esto se realiza para determinar el volumen de concreto a fabricar, esto se ejemplifica en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5. Volumen proyectado de los especímenes en metros cúbicos**

Tipo de espécimen	Diámetro	Altura	Volumen	# de piezas	Total	20% extra por compactación
Cilindro	0.11	0.22	0.0021	4	0.0087	0.0100
	0.11	0.06	0.0006	6	0.0035	0.0041
	0.16	0.075	0.0015	4	0.0060	0.0072
Volumen total de la mezcla						0.0214

Para obtener las cantidades necesarias para fabricar el volumen calculado de concreto vegetal, se multiplica la cantidad total de materiales para fabricar 1 metro cúbico por el volumen calculado para fabricar los especímenes, lo cual se muestra en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6. Cantidad de materiales para elaborar 0.0214 m<sup>3</sup> de concreto vegetal de corteza de girasol (kg)**

Material	Cantidad para fabricar 1 m <sup>3</sup>	Volumen proyectado de los especímenes (m <sup>3</sup> )	Cantidad total de mezcla (kg)
Metacaolín	262		5.6
Cal hidráulica	112.3		2.4
Bio-agregado (corteza de girasol)	179.6		3.8
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11.2	0.0214	0.2
Superplastificante	6		0.1
Agua de preabsorción	83.6		1.8
Agua de mezcla	252.7		5.4

En las mezclas elaboradas con la cal comercial, se sigue el mismo procedimiento, pero en este caso, no es necesario la adición de activadores, ni aditivos superplastificantes, pues en este caso, la cal tiene los aditivos necesarios para lograr las condiciones de fraguado, las cuales se muestran en la tabla 4.7. En la tabla 4.8, se muestran la nomenclatura de mezclas elaboradas en este estudio.

**Tabla 4.7. Cantidad de materiales para elaborar 0.02 m<sup>3</sup> de concreto vegetal de corteza de girasol con cal comercial (kg)**

Material	Para 1 m <sup>3</sup>	Volumen total m <sup>3</sup>	Cantidad total de mezcla (kg)
Cal comercial	374.3		8
Bio-agregado (corteza de girasol)	179.6	0.02	3.8
Agua de preabsorción	83.6		1.8
Agua de mezcla	252.7		5.4

**Tabla 4.8. Nomenclatura de las mezclas fabricadas en este estudio**

Abreviatura	Nombre	
HP	Hemp Pozzolanic	Cáñamo con cementante puzolánico
SBP	Sunflower Bark pozzolanic	Corteza de girasol con cementante puzolánico
SPP	Sunflower Pith pozzolanic	Médula de girasol con cementante puzolánico
SMP	Sunflower Mix pozzolanic	Mezcla de corteza y médula de girasol con cementante puzolánico
CBP	Corn Bark Pozzolanic	Corteza de maíz con cementante puzolánico
CPP	Corn Pith Pozzolanic	Médula de maíz con cementante puzolánico
CMP	Corn Mix Pozzolanic	Mezcla de corteza y médula de maíz con cementante puzolánico
HL	Hemp Lime	Cáñamo con cal comercial
SBL	Sunflower Bark Lime	Corteza de girasol con cal comercial

En la tabla 4.9, se muestra un resumen de las cantidades de los materiales empleadas para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal con diferentes bio-agregados.

**Tabla 4.9 Cantidades de materiales para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal**

Mezcla	Cementante	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Bio-agregado	Agua de preabsorción	Agua de reacción	Aditivo Superplastificante
HP			161.9	364.9	112.3	
SBP			179.6	336.3	83.6	
SPP			17	338.1	85.5	
SMP		11.2	95.8	338.1	101.8	252.6
CBP	374.3		142.3	351.9	99.3	
CPP			38.6	331.2	78.5	
CMP			61.9	509.1	256.4	
HL		--	161.9	524	112.3	
SBL		--	179.6	495.3	83.6	411.7

## 4.2 Elaboración de las mezclas

En la figura 4.2 se muestra el proceso de fabricación de las mezclas de concreto vegetal, el cual se llevó a cabo siguiendo la metodología empleada por Abdellahi Ahmed Maaloum [251], la cual consta de los siguientes pasos:

- Verter los bio-agregados en la mezcladora y homogenizar durante 2 minutos.
- Añadir el agua de absorción durante 1 minuto.
- Mezclar durante 1 minuto.
- Agregar los cementantes puzolánicos y el sulfato de potasio durante 1 minuto.
- Mezclar durante 2 minutos.
- Diluir el aditivo superplastificante en el agua de reacción y agregar en a la mezcladora durante 1 minuto.

- Mezclar durante 4 minutos.
- Si existe la formación de grumos, estos se deben separar manualmente.

Fabricación de especímenes y densidad fresca objetivo.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



i)



j)

**Figura 4.2. Proceso de fabricación de las mezclas de concreto vegetal y de las probetas: a) pesaje de los materiales, b) mezcla de cal, metacaolín y el sulfato de potasio, c) homogenización de los bio-agregados y adición del agua de preabsorción, d) homogenización de los cementantes y el bio-agregado, e) adición del agua de reacción y el aditivo superplastificante, f) resultado de la mezcla, g) preparación de las probetas, h) curado de las probetas, i) probetas de medida 16 x 7.5 cm y, j) probetas de 22 x 11 cm**

La fabricación de los especímenes se realizó con el protocolo desarrollado por Cesar Niyigena [178] en su tesis doctoral, el cual establece los pasos para elaborar los especímenes de 22 x 11 cm:

- Rellenar el molde en 5 capas.
- En cada capa se vibrocompacta, se varilla en 5 ocasiones y se raspa la superficie.
- Se enrasa la superficie y se coloca la tapa.
- Y, por último, se almacenan en el laboratorio durante 72 horas.

Cilindros de 11 x 6 cm:

- Se rellena en 2 capas siguiendo el procedimiento antes descrito.

Cilindros de 16 x 7.5 cm:

- Se rellena en 2 capas siguiendo el procedimiento antes descrito.

En la mezcla elaborada con la corteza de girasol, la densidad seca objetivo de las probetas es  $669.6 \text{ kg/m}^3$  por lo cual se estableció que la masa fresca de las probetas fuese la siguiente:

- Para las probetas de 11 x 22 cm la masa fresca es de 1.400 kilogramos.
- Para las probetas de 11 x 6 cm la masa fresca es de 0.380 kilogramos.
- Para las probetas de 16 x 7.5 cm la masa fresca es de 1.040 kilogramos.

#### 4.3 Selección, formulación y elaboración de pastas elaboradas en México

La selección de las formulaciones de las pastas con cemento, ceniza volante y cal hidráulica se llevó a cabo a través de una revisión bibliográfica de 16 artículos científicos referentes a este tema, de los cuales se seleccionaron 2 artículos que presentan sustituciones entre el 25 y 60% de ceniza volante con respecto al peso del cemento; dicho análisis se muestra en la tabla 4.10.

**Tabla 4.10 Formulaciones seleccionadas para la elaboración de pastas con ceniza volante y cal hidráulica.**

Referencia	% Cemento	% Ceniza volante	% Cal hidráulica	Relación W/B
Mezcla 1 [252]		25	55	
Mezcla 2 [171]	20	40	40	0.45
Mezcla 3 [252]		50	30	
Mezcla 4 [252]		60	20	

La elaboración de las mezclas se realizó con la norma ASTM C-305 “procedimiento para el mezclado mecánico de pastas y morteros de cemento”; la mezcla se realizó con una mezcladora de la marca Hobart de 25 watts (figura 4.3a), de 3 velocidades; el método establece lo siguiente:

- Colocar la paleta seca y el tazón en la mezcladora
- Verter el agua de mezcla en el tazón
- Agregar los cementantes, esperar 30 segundos y cubrir con un paño húmedo
- Mezclar a velocidad lenta durante 30 segundos
- Detener el proceso de mezclado por 15 segundos y quitar la mezcla de las paredes del tazón.
- Mezclar a velocidad media durante 60 segundos.

En total se elaboraron 3 cubos de 5 x 5 x 5 cm de medida por cada mezcla, y estas se ensayaron a los 28 y 71 días; dicho ensayo se llevó a cabo con una prensa de la marca instron, modelo 600Dx series M47-14276-EN (ver figura 4.3b).



a)



b)

**Figura 4.3. a) mezcladora de la marca Hobart, b) prensa instron, modelo 600Dx series M47-14276-EN**

## 4.4 Caracterización de los compuestos de concreto vegetal

### 4.4.1 Densidad aparente

Como se mencionó en el apartado 3.4.3 la conductividad se encuentra ligada a la densidad, pues el valor que presenta una menor conductividad térmica se encuentra relacionado a la densidad más baja, y esta a su vez, depende principalmente de la porosidad del material que se analice. En las mezclas elaboradas en esta investigación, se realizó un control de la densidad fresca ( $\rho_f$ ), a temperatura ambiente (23 °C y 50% RH) ( $\rho_{60 \text{ días}}$ ), secas en el horno a 60 °C ( $\rho_{90 \text{ días}}$ ).

Para los especímenes de 22 x 11 cm, las tapas fueron retiradas de los moldes a los 2 días después de la elaboración y, a los 60 días después de la fabricación los moldes fueron retirados por completo, posteriormente se ensayaron a los 90 días después de la elaboración, lo anterior se recalca porque desde el momento en que se fabrica la mezcla, hasta el ensayo a compresión se ha monitoreado las diferencias de las densidades en estado fresco y en estado endurecido. En el caso de los especímenes de medida 16 x 7.5 cm, sus tapas fueron removidas a los 2 días de elaboración, estos especímenes fueron desmoldados a los 60 días, posteriormente, las mediciones de conductividad térmica al ambiente y en estado seco al horno se realizaron a los 90 días después de su elaboración, la pérdida de masa en porcentaje se calculó con la ecuación 9:

$$\Delta m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

$\Delta m$  = Variación relativa de la masa de la muestra en porcentaje.

$m_i$  = Masa fresca del concreto vegetal.

$m_f$  = Masa del concreto vegetal al momento de la medición.

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran los resultados del seguimiento a las diferentes densidades logradas por los especímenes de 22 x 11 cm y de 16 x 7.5 cm respectivamente. En la tabla IV.10 se muestran las densidades obtenidas y las pérdidas de masa en las diferentes probetas realizadas en este estudio.

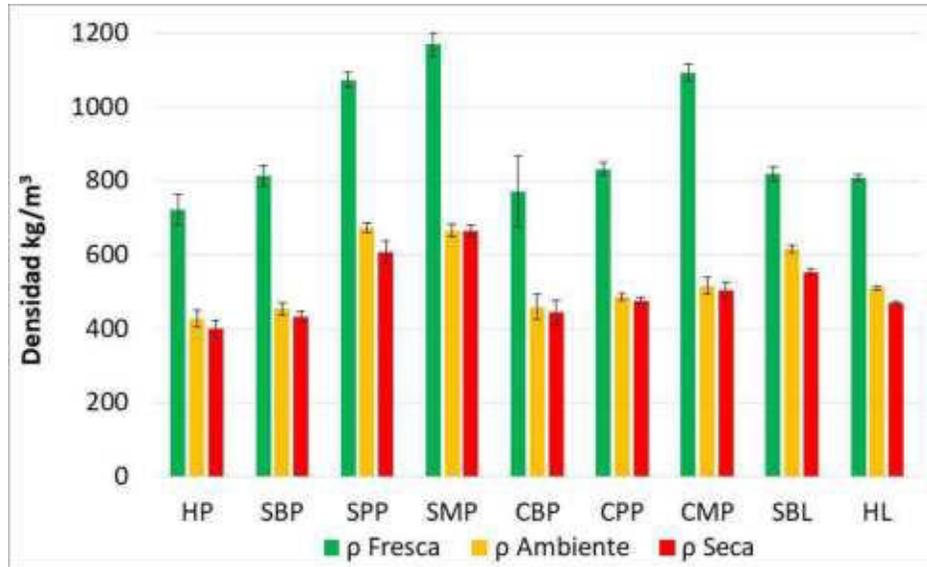


Figura 4.3. Densidades de los concretos vegetales de 22 x 11 cm

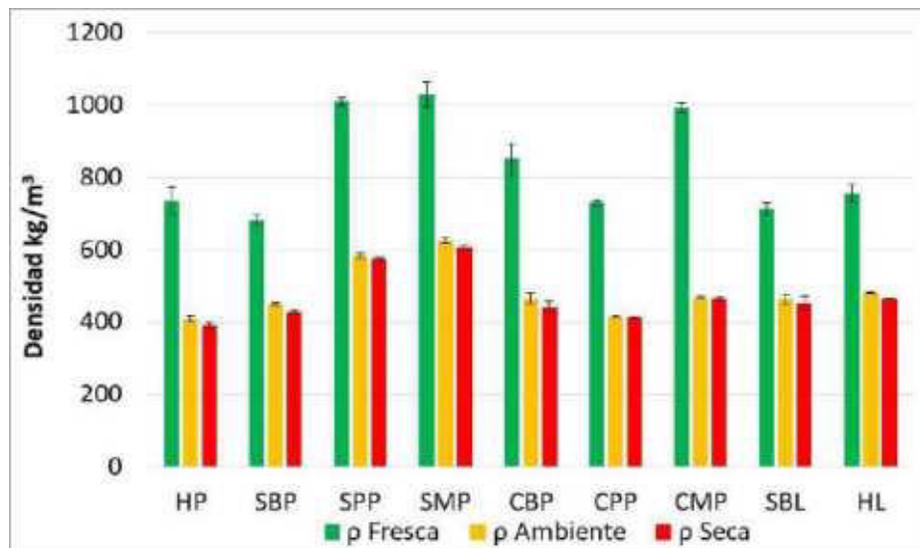


Figura 4.4 Densidades de los concretos vegetales de 16 x 7.5 cm

En las gráficas anteriores, se puede observar que las densidades frescas son muy elevadas debido al contenido de agua de las mezclas; además de que los bio-agregados contienen en sus poros el agua de preabsorción y el agua de reacción. Posteriormente, con el paso del tiempo, el agua de preabsorción y el agua de reacción se evaporan y otra parte reacciona con el cementante, y como resultado la densidad en la probeta disminuye notablemente. Por otro lado, la densidad seca al horno es el producto de eliminar en su totalidad el agua adsorbida en las probetas en equilibrio con el ambiente; por ello al realizar algunos ensayos posteriores al secado al horno, es necesario colocar las probetas en un desecador con gel de sílice para estabilizar de 60 °C a la

temperatura del laboratorio, sin alterar su contenido de humedad relativa, lo anterior se resume en la tabla 4.11.

**Tabla 4.11. Densidades de los concretos vegetales obtenidas en esta investigación kg/m<sup>3</sup>**

Mezcla	$\rho$ Teórica	$\rho$ Fresca promedio	$\rho$ 60 días promedio	$\rho$ 90 días promedio
HP	1277.2	729.3 $\pm$ 9	418.6 $\pm$ 12.3	396.0 $\pm$ 5.9
SBP	1237.6	749.6 $\pm$ 92.6	452.9 $\pm$ 2	430.6 $\pm$ 3.5
SPP	1078.7	1041.9 $\pm$ 45.6	628.7 $\pm$ 63.9	591.1 $\pm$ 23.5
SMP	1173.8	1100.4 $\pm$ 98.7	646.1 $\pm$ 28.6	607.1
CBP	1231.6	811.5 $\pm$ 56	462.4 $\pm$ 4.4	443.7 $\pm$ 0.4
CPP	1086.4	781.7 $\pm$ 72.1	452.4 $\pm$ 49.2	445.1 $\pm$ 44.2
CMP	1465.5	1044.2 $\pm$ 71.1	492.4 $\pm$ 34	484.3 $\pm$ 27.4
HL	1584.2	770.1 $\pm$ 55.4	477.0 $\pm$ 47.4	445.7 $\pm$ 32
SBL	1544.5	767.2 $\pm$ 76.3	540.9 $\pm$ 107.1	453.0 $\pm$ 71.7

De manera general, las mezclas que tienen una mayor densidad en estado fresco son SMP, CMP, SPP y CPP, pues en este caso son las mezclas que están elaboradas con la mezcla de los bio-agregados de girasol y de maíz, respectivamente. La mayor de pérdida de masa a los 60 días se registra en la mezcla CMP (52.9% de pérdida de masa promedio en probetas de 16 x 7.5 cm), caso contrario a la mezcla HL donde se registra la menor pérdida de masa (24.9% de pérdida de masa promedio en probetas de 22 x 11 cm). A los 90 días, la mayor pérdida de masa se concentra en la mezcla CMP la cual registra una pérdida de masa promedio de 54.0% en las probetas de 22 x 11 cm, lo anterior se registra en las probetas de 16 x 7.5 cm de la misma mezcla, la cual tuvo una pérdida de masa promedio de 53.2%.

Por otro lado, se puede observar una diferencia importante entre las densidades teóricas y las densidades frescas reales de las mezclas de concreto vegetal. A pesar del método utilizado para el diseño de las mezclas, algunos agregados como SP y CP, presentan una alta compresibilidad, esto debido a la porosidad de su microestructura. También, gracias a la compactación aplicada durante la fabricación de los especímenes, se obtuvo una mayor cantidad en masa de la mezcla y con ello una variación en la cantidad de los agregados colocados dentro de los moldes. Es posible distinguir estas diferencias en las mezclas HP, SBP, CBP, HL y SBL, estas mezclas no contienen médula y por consecuente la tasa de compactación es menor con respecto a las mezclas SPP, CPP, SMP, y CMP, ya que en las primeras 2 mezclas los bio-agregados son netamente médula y en el resto, solo se tiene un porcentaje de médula, lo anterior hace que las mezclas con médula logren estar cerca de la densidad teórica.

En la tabla 4.12 se pueden apreciar las dosificaciones de los materiales, estas cantidades se calcularon con las densidades frescas reales.

**Tabla 4.12 Dosis de los materiales para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto vegetal**

Mezcla	Dosis de materiales								
	Metacaolín	Cal apagada	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Cementante total	Bio-agregados	Agua de absorción	Agua de reacción	Aditivo superplastificante	Agua + aditivo superplastificante
HP	206.23	88.39	8.84	303.46	127.42	88.39	198.87	4.71	291.97
SBP	208.73	100.87	10.09	346.32	161.32	75.09	226.96	5.38	307.43
SPP	253.68	164.61	16.46	565.17	24.89	125.27	370.38	8.78	504.43
SMP	253.68	176.00	17.60	604.28	26.61	159.55	396.01	9.39	539.33
CBP	213.81	136.17	13.62	467.51	172.59	120.40	306.38	7.26	434.04
CPP	248.80	122.81	12.28	421.65	42.18	85.86	276.33	6.55	368.73
CMP	196.78	90.06	9.01	309.20	49.63	205.64	202.63	4.80	413.07
HL	--	--	--	289.89	125.38	86.97	318.88	--	405.85
SBL	--	--	--	288.67	138.50	64.47	317.53	--	382.00

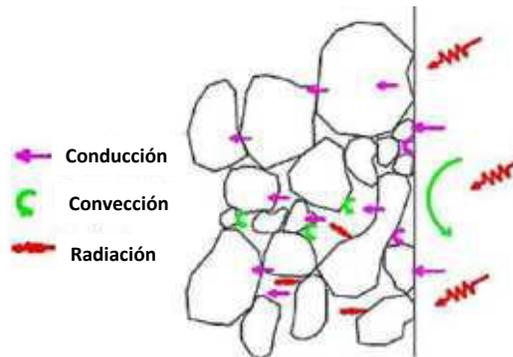
Las dosis mostradas en la tabla anterior se obtuvieron a través de las densidades frescas del material, es posible observar las diferencias de las cantidades de los materiales empleados, que a pesar de estar sometidas a un diseño de mezcla, presentan variaciones que en algunos casos son importantes, tal es el caso de la mezcla SMP, la cual tiene la cantidad de cementante más elevada, debido a la alta absorción de la médula, y a la gran tasa de compactación de la médula. Por otro lado, la concentración más baja de cementante se observa en la mezcla HP, la cual tiene una absorción baja, así como una tasa de compactación baja.

Los resultados presentados en la tabla son similares a los obtenidos por Dinh [1] en su tesis doctoral, los bio-agregados las mezclas elaboradas con el cementante comercial tienden a absorber el agua rápidamente. Por otro lado, el consumo de agua en el cementante puzolánico para que se lleve a cabo las reacciones de hidratación es menor en el caso de las mezclas HL y SBL; caso contrario al resto de las mezclas que fueron elaboradas con el cementante puzolánico (HP, SBP, SPP, SMP, CBP, CPP y CMP), las cuales necesitaron una mayor cantidad de agua para llevar a cabo las reacciones de hidratación.

#### 4.4.2 Conductividad térmica

Una de las principales propiedades físicas de los concretos vegetales es la conductividad térmica, de esta característica depende el sistema de aislamiento térmico, el cual puede estar elaborado de un sistema de mampostería, losas y suelos, la función del concreto vegetal es actuar como una interfaz, la cual regula el confort térmico en el interior de una habitación, esto como respuesta a las condiciones climáticas en el exterior [2]. La transferencia de calor a través de medios porosos depende principalmente de los componentes que forman el material que constituyen a la envolvente térmica, dicha transferencia de calor es una combinación de mecanismos de transferencia, conductores, convectoros y radiativos; este fenómeno se representa en la *figura 4.5* [253].

La conducción del calor se realiza a través de la excitación de los átomos, mientras en la convección se realiza mediante el movimiento de las moléculas debido al diferencial de la temperatura; y, por último, la radiación se realiza por la transferencia de calor a través de la energía electromagnética. Los materiales de construcción pueden modificarse para regular sus propiedades térmicas, su densidad, empaquetamiento, geometría, porosidad, propiedades minerales, etc. En la tabla 4.11 se muestran las conductividades térmicas de los diferentes concretos vegetales elaborados en esta investigación.



**Figura 4.5. Mecanismos de transferencia de calor a través de medios porosos [253]**

En la figura 4.6, se muestran los resultados de las conductividades térmicas de las muestras analizadas. En el caso de las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico; los resultados muestran que la conductividad térmica más baja se encuentra en la mezcla HP tiene una conductividad térmica similar de  $0.098 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  y una densidad aparente de  $396 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Seguida de la mezcla CPP con una conductividad térmica de  $0.105 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  y una densidad de  $412 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; seguida de la mezcla CMP, con una conductividad térmica de  $0.113 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  y una densidad aparente de  $469 \text{ kg}/\text{m}^3$ . La mezcla SBP tiene una conductividad térmica de  $0.115 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  y una densidad de  $438 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Como se muestra en la figura anterior, la conducción del calor se realiza a través de la excitación de los átomos, mientras en la convección se realiza mediante el

movimiento de las moléculas debido al diferencial de la temperatura; y, por último, la radiación se realiza por la transferencia de calor a través de la energía electromagnética. Los materiales de construcción pueden modificarse para obtener las propiedades térmicas, de densidad, de empaquetamiento, geometría, porosidad, propiedades minerales, etc.

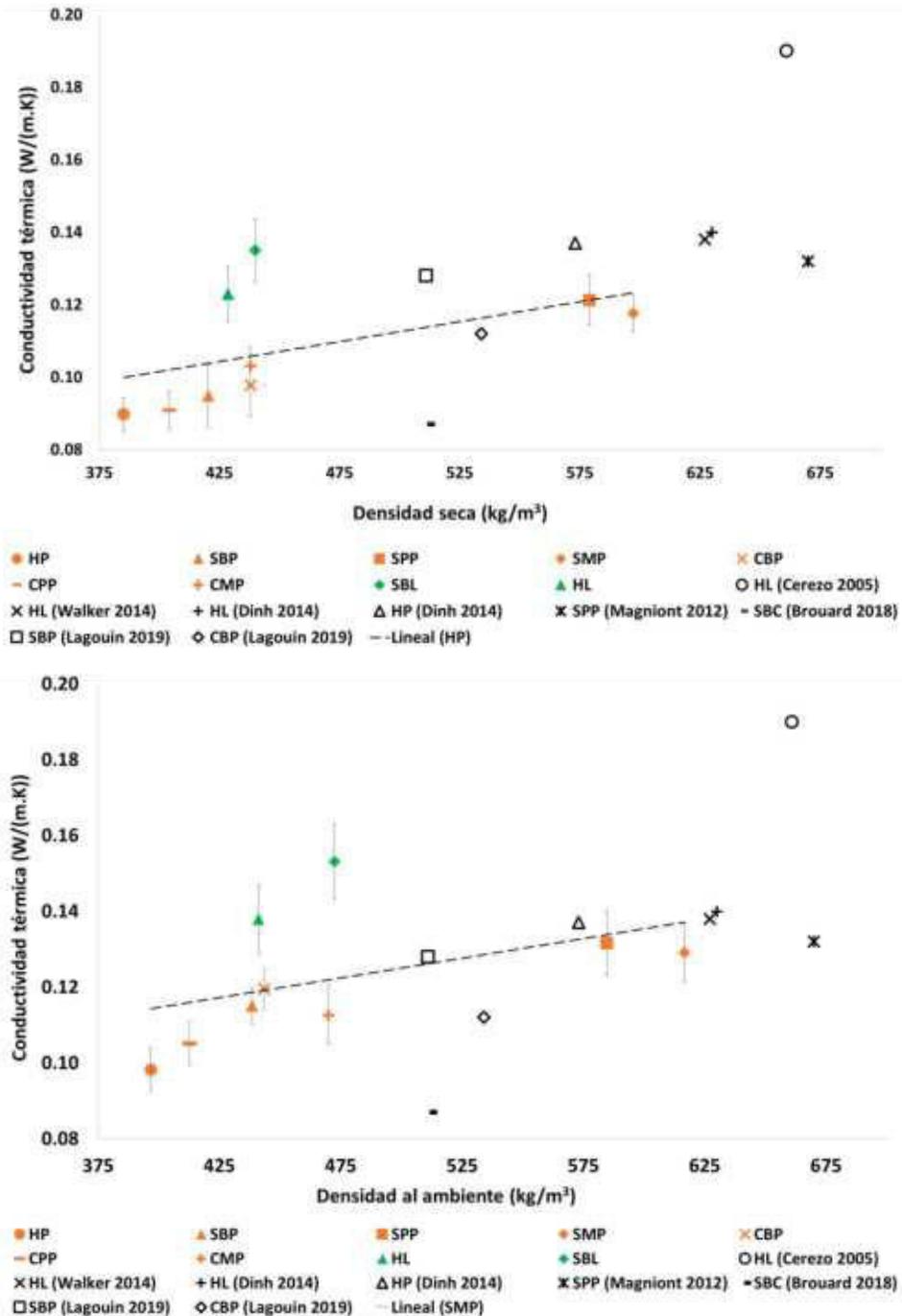


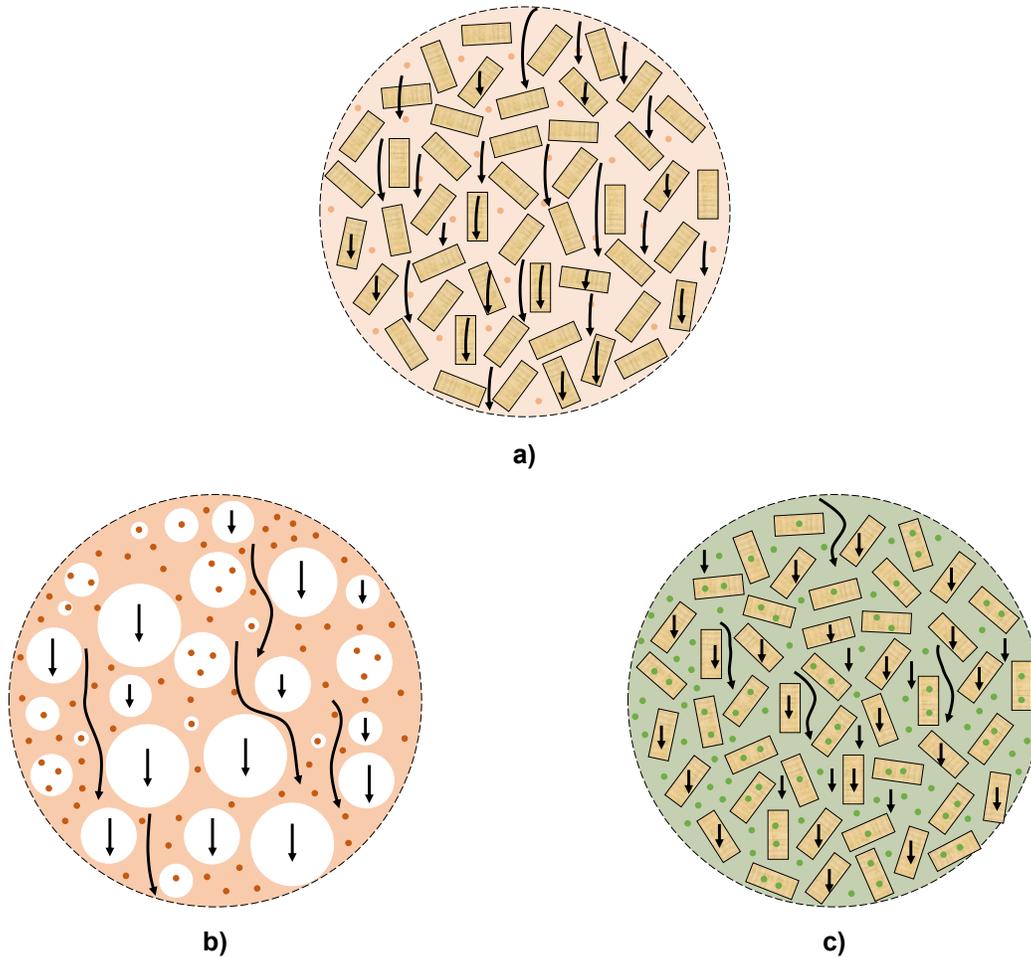
Figura 4.6. Densidad aparente y conductividad térmica a) estado seco y b) temperatura y humedad relativa ambientes.

De las figuras anteriores, se puede observar una variación importante de los resultados obtenidos con respecto a la literatura, dicha variación tiene su origen en la proporción de los bio-agregados y cementantes utilizada en la fabricación de los concretos vegetales. Además, es importante añadir el efecto que causa la metodología de la fabricación de las probetas, ya que la compactación tiene una gran influencia en la densidad de las mezclas. En la tabla 4.13 se muestran las conductividades térmicas de los diferentes concretos vegetales elaborados en esta investigación. La conductividad térmica se encuentra relacionada con la densidad aparente, también depende del tipo de cementante utilizado en la fabricación de la mezcla, pues existe una diferencia en las mediciones realizadas en estado seco y en equilibrio con la humedad relativa ambiente, esto debido que en el primer caso no hay presencia de humedad en los macro y mesoporos del concreto vegetal y de los bio-agregados concordando con lo establecido por Lagouin [254].

**Tabla 4.13. Conductividad térmica de los concretos vegetales (Cáñamo (H), Corteza de girasol (SB), Médula de girasol (SP), Mezcla de corteza y médula de girasol (SM), Corteza de maíz (CB), Médula de maíz (CP) y Mezcla de corteza y médula de maíz (CM)) con una matriz puzolánica (P) o un ligante comercial (L)**

Mezcla	Seco al horno	$\lambda$ promedio	Temperatura ambiente	$\lambda$ promedio	Contenido de agua (%)
HP	385.3 ± 2.9	0.090 ± 0.005	396.8 ± 5.1	0.098 ± 0.006	3.0
SBP	420.5 ± 0.3	0.095 ± 0.006	438.4 ± 4.6	0.115 ± 0.005	4.3
SPP	579.1 ± 9.8	0.098 ± 0.009	584.7 ± 1.2	0.120 ± 0.005	1.0
SMP	597.3 ± 0.4	0.121 ± 0.007	616.6 ± 8.2	0.132 ± 0.008	3.2
CBP	438 ± 19.8	0.091 ± 0.005	443.4 ± 17.7	0.105 ± 0.006	1.2
CPP	404.4 ± 3	0.118 ± 0.005	412.7 ± 3.2	0.129 ± 0.008	2.1
CMP	461.6 ± 4.7	0.103 ± 0.004	469.9 ± 5.3	0.113 ± 0.006	1.8
HL	428.6 ± 2.2	0.123 ± 0.008	441.1 ± 6.3	0.138 ± 0.009	2.9
SBL	440 ± 55.7	0.135 ± 0.009	472.5 ± 21	0.153 ± 0.010	7.4

La figura 4.7 muestra como es la transmisión del flujo de calor en los concretos vegetales. concordando con lo establecido en una investigación realizada por Lagouin [254]. Por otro lado, la reducción de la conductividad térmica también está relacionada con la forma y el tamaño del bio-agregado; también, depende de la influencia del empaquetamiento de la pasta del cementante. Mientras menos denso sea el empaquetamiento granular, menor será la conductividad térmica debido a la mayoría de los vacíos atrapados entre la matriz cementante y en los bio-agregados.



**Figura 4.7 Transmisión del flujo de calor en las mezclas de concreto vegetal**

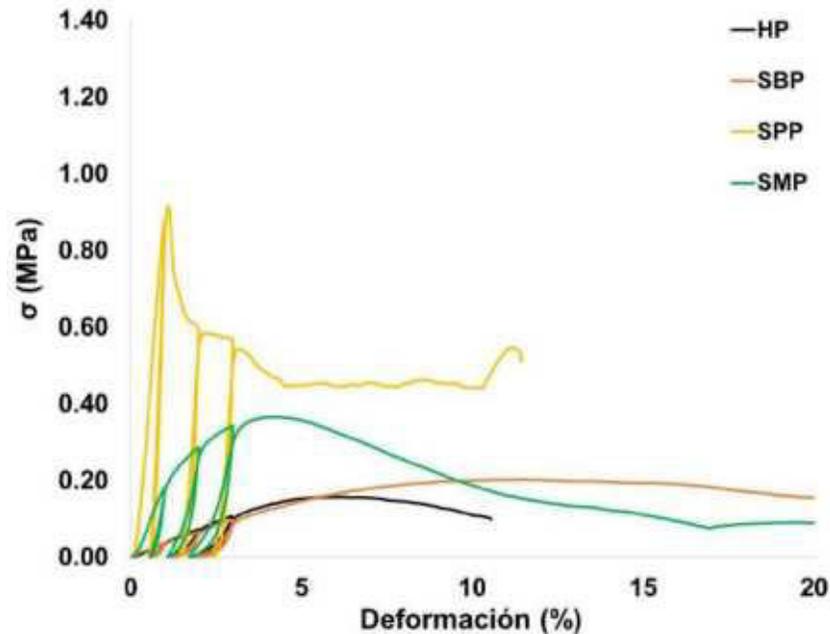
La figura 4.7a corresponde a las mezclas HP, SBP, SMP, CBP y CMP, en estos cinco casos la porosidad intraparticular de los bio-agregados, así como la porosidad interparticular del concreto vegetal favorece una densidad menor, y por consiguiente se obtienen mediciones de conductividad térmica menor. Por otro lado, en figura 4.7b se tiene la mezcla SPP, la cual cuenta con bio-agregados que tienen una microestructura altamente porosa; durante el proceso de fabricación de las probetas, es necesario aplicar una compactación para eliminar el aire atrapado en la mezcla; sin embargo dicha microestructura, se comprime y la densidad de la mezcla en estado fresco tiende a aumentar y con ello incrementa también la dosificación del cementante, el cual tiene una conductividad térmica más alta que los bio-agregados en estado fresco. En la figura 4.7c, se muestran las mezclas HL y SBL, la diferencia obtenida en la conductividad térmica de estos bio-compuestos y los elaborados con el cementante puzolánico, radica en la capacidad calorífica de los cementantes empleados; por ejemplo, en la figura 4.6 se puede apreciar que SBP y SBL, tienen casi la misma densidad, pero al tener una matriz cementante diferente, la

capacidad calorífica presenta un aumento en la conductividad térmica de los concretos vegetales.

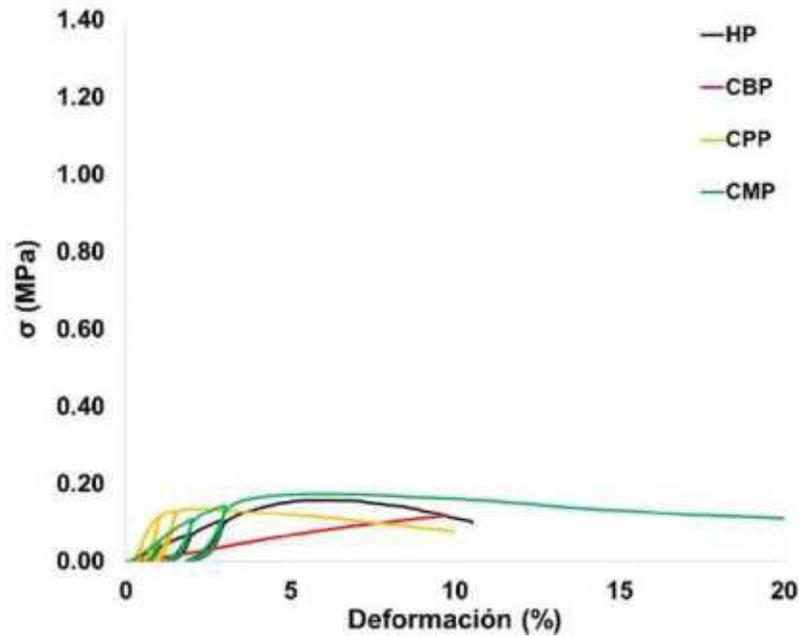
Las causas de error en las mediciones de la conductividad térmica en los concretos vegetales están asociadas principalmente a la complejidad de su microestructura, la heterogeneidad, la densidad del material, la proporción y el tipo de cementante utilizado, así como el contenido de agua y aire. Por otro lado, los aparatos que miden las propiedades térmicas de los materiales generan un flujo de calor que causa la migración de la humedad, afectando a la medición obtenida. De manera general, existe una relación entre el contenido de humedad y la variación de las propiedades térmicas, lo cual se expone en un estudio realizado por Palumbo [255]. Durante la fabricación de los especímenes, se aplica una fuerza de compactación la cual induce a una orientación, según la sección transversal en el plano perpendicular a la dirección de la compactación, lo anterior concuerda con lo descrito por Nguyen [130], donde observó un efecto entre la orientación de las partículas y su anisotropía en la conductividad térmica del concreto vegetal elaborado con cáñamo. Así mismo, el nivel de compactación ayuda a reducir el volumen de porosidad en el espécimen y también se produce el aumento de su densidad. Por otro lado, cuando la relación cementante/bio-agregado es mayor, la porosidad se reduce y como resultado la conductividad térmica aumenta.

#### 4.4.3 Ensaye a compresión

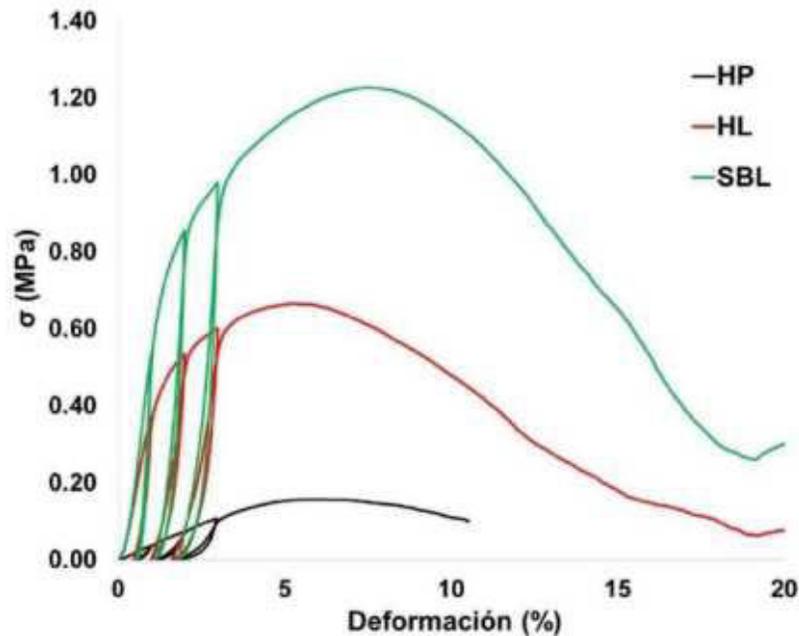
En la figura 4.9 se muestran las curvas esfuerzo-deformación, de las diferentes mezclas elaboradas en esta investigación.



a)



b)



c)

**Figura 4.9. Ensayos de resistencia a compresión de los concretos vegetales, a) Mezclas elaboradas con los bio-agregados obtenidos del tallo del girasol, b) mezclas elaboradas con el tallo de maíz, y c) mezclas elaboradas con el cementante comercial con el cáñamo y la corteza de girasol**

En la figura 4.9a, las mezclas HP y SBP presentan un comportamiento dúctil, posteriormente se presenta la fractura de la probeta. En la mezcla SBP la deformación alcanzó más allá del 20%, y después se llegó a la ruptura de la

probeta. De igual manera en la mezcla SMP presenta un comportamiento dúctil, sin embargo, el aplastamiento prolonga la deformación de la probeta hasta superar la deformación del 20% y luego se fragmentan. Por otro lado, en el caso de la mezcla SPP, presenta un comportamiento frágil, en su mayoría las probetas llegaron a sobrepasar más del 1.2% de la deformación y después las probetas tienden a fracturarse.

En la figura 4.9b, la mezcla CBP las probetas se comprimen conforme se aplica la carga, lo cual refleja un comportamiento dúctil, sin embargo, en 3 de las 4 probetas no se presentó la ruptura, pero se hizo evidente la pulverización de la matriz puzolánica. En la mezcla CPP se presenta un comportamiento dúctil, de igual manera la deformación y la ruptura de las probetas tiene un nivel bajo de deformación, también fue notoria la pulverización de la matriz puzolánica; en el caso de la mezcla CMP, se presenta un comportamiento dúctil, el cual supera el 20% de la deformación y como se esperaba la matriz puzolánica se pulverizó, y posteriormente, se llegó a la ruptura de la probeta. Cabe hacer mención que en los ensayos de los cilindros correspondientes a las mezclas CBP y CPP, la compresión se detuvo, ya que se apreciaba que los especímenes solo se deformaban conforme la carga se aplicaba, pero dichos aumentos en la carga eran muy pequeños.

En la figura 4.9c, la mezcla HL y SBL se muestra un comportamiento frágil, donde en la mezcla HL la ruptura en la mayoría de las probetas se presenta antes de llegar al 5% de la deformación y al igual que las probetas de la mezcla SBL, también se observó un comportamiento dúctil, pero la deformación llegó a ser cercana al 10%, para posteriormente fracturar a las probetas. En la *figura 4.10*, se muestran los tipos de fallas obtenidas después de realizar el ensaye a compresión de los concretos vegetales.



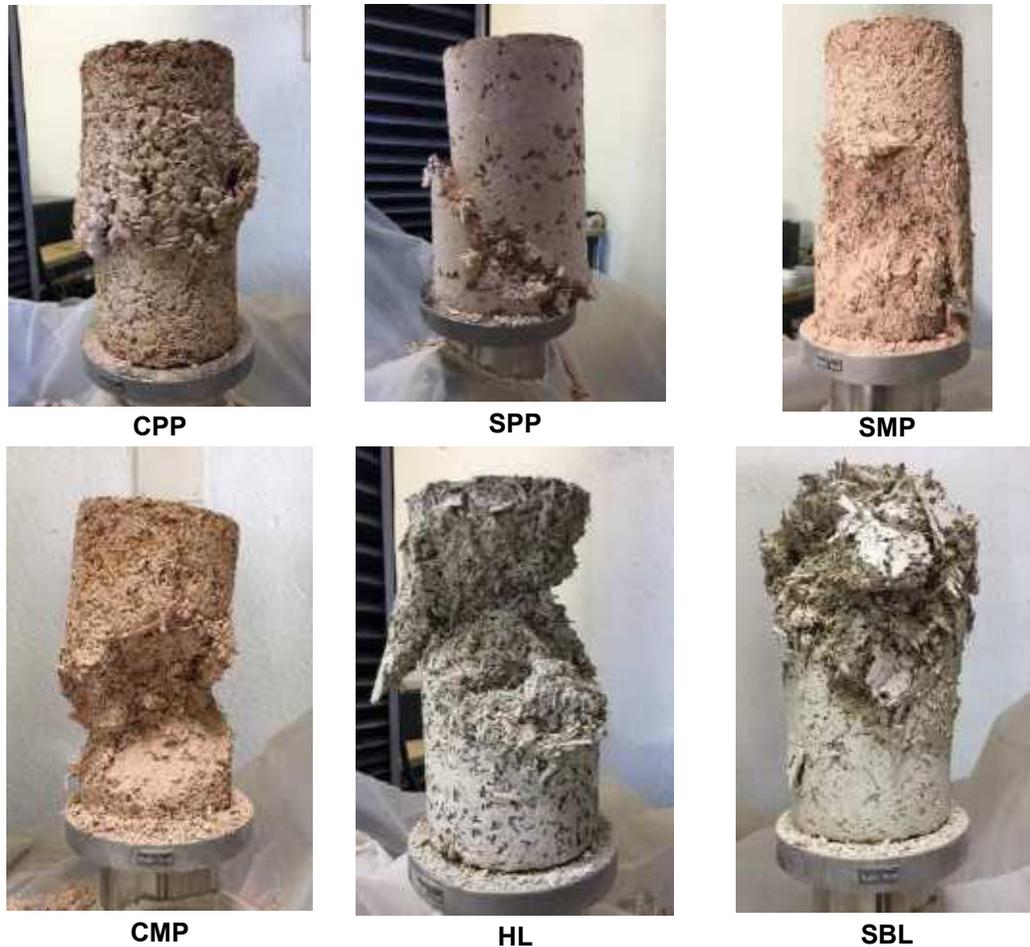
HP



SBP



CBP



**Figura 4.10. Tipos de fallas obtenidas después de realizar el ensaye a compresión de los concretos vegetales de: cáñamo puzolánico (HP), corteza de girasol puzolánico (SBP), médula de girasol puzolánico (SPP), mezcla de corteza y médula de girasol puzolánico (SMP), corteza de maíz puzolánico (CBP), médula de maíz puzolánico (CPP), mezcla de corteza y médula de maíz puzolánico (CMP), cáñamo puzolánico (HP), cáñamo con cementante comercial (HL), corteza de girasol con cementante comercial (SBL)**

Durante el ensaye a compresión de las mezclas HP, SBP, SMP, CBP, CPP, CMP, HL y SBL se logró identificar las 3 fases reportadas en el estudio previo llevado a cabo por Lagouin [36]:

- En la primera fase, se observó un comportamiento cuasi-elástico, ocasionado por la dureza de la pasta.
- En la segunda fase se desarrolla un comportamiento elastoplástico, el cual se ve reflejado en el agrietamiento del ligante y aplastamiento de los bioagregados y de los grumos formados por la compacidad de las partículas.

- En la tercera fase, al no existir estabilidad en la matriz puzolánica, el bio-agregado resiste el esfuerzo a compresión y a tensión y las probetas se fracturan en su totalidad. En este caso la deformación aumenta y la tensión disminuye debido a que las partículas de bio-agregado son menos rígidas que la matriz puzolánica [254].

La mezcla SPP se desarrollan 2 fases, la primera el comportamiento elástico, pues en este caso la rigidez de la pasta soporta el esfuerzo a compresión, pues el bio-agregado se encuentra sumergido en su totalidad en la matriz ligante. En la segunda fase se observa una región plástica, y posteriormente una zona de fluencia, donde trabajan en conjunto la pasta y el bio-agregado; sin embargo, la densidad de la pasta tiene un fuerte impacto en esta zona. Y por último se observa que las probetas se fracturan en su totalidad, llegando a una deformación del 10%. En la tabla 4.14, se muestran los esfuerzos de deformación a 1, 1.5, 5 y 7.5%; algunos autores refieren que al alcanzar la tensión máxima antes de los valores mencionados, se registra la resistencia a compresión máxima [31,181,182].

Tabla 4.14. Valores de esfuerzo y deformación máximos promedio

	HP	SBP	SPP	SMP	CBP	CPP	CMP	HL	SBL
$\sigma$ max	0.3 ± 0.10	0.2 ± 0.03	0.9 ± 0.01	0.4 ± 0.02	0.1 ± 0.03	0.1 ± 0.01	0.2 ± 0.02	0.7 ± 0.07	1.1 ± 0.12
$\epsilon$ ( $\sigma$ max)	8.4 ± 2.02	11.3 ± 0.69	1.4 ± 0.28	4.4 ± 0.32	9.8 ± 0.07	2.2 ± 0.07	5.7 ± 0.62	5.0 ± 0.65	8.5 ± 1.07
$\sigma$ ( $\epsilon=1\%$ )	0.02 ± 0.02	0.03 ± 0.03	0.7 ± 0.15	0.2 ± 0.02	0.01	0.1 ± 0.01	0.05	0.4 ± 0.12	0.5 ± 0.03
$\sigma$ ( $\epsilon=1,5\%$ )	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.8 ± 0.10	0.2 ± 0.02	0.02	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.01	0.5 ± 0.08	0.7 ± 0.04
$\sigma$ ( $\epsilon=5\%$ )	0.2 ± 0.04	0.2 ± 0.01	0.4 ± 0.12	0.4 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.2 ± 0.02	0.7 ± 0.07	1.0 ± 0.10
$\sigma$ ( $\epsilon=7,5\%$ )	0.2 ± 0.07	0.2 ± 0.02	0.4 ± 0.14	0.3 ± 0.03	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.2 ± 0.02	0.6 ± 0.09	1.1 ± 0.12

El comportamiento mecánico de los bio-compuestos se rige principalmente por el tipo de ligante utilizado durante su elaboración, de igual manera, los intersticios influyen en gran medida en este comportamiento. La mezcla HP obtuvo una resistencia a compresión de 0.30 MPa y un módulo de Young de 23.1 MPa; durante el ensaye de estas probetas se observó un desprendimiento excesivo de partículas de cáñamo, lo que hace evidente la falta de adherencia entre la matriz puzolánica y el bio-agregado.

En la mezcla SBP, se obtuvo una resistencia a compresión de 0.20 MPa, así como un módulo de Young de 23.4 MPa, también es notorio el desprendimiento de las partículas de bio-agregado debido a una débil adherencia. Por otro lado, la mezcla SPP registró una resistencia a compresión de 0.9 MPa y un módulo de Young de 160.5 MPa, los valores obtenidos se deben a que el esfuerzo mecánico se ejerció en mayor parte en la matriz puzolánica, por ello no hubo

desprendimiento de bio-agregado. La mezcla SMP obtuvo una resistencia a compresión de 0.40 MPa, siendo está la más baja en el estudio, así como un módulo de Young de 71.8 MPa, este comportamiento es el resultado de la mezcla de los bio-agregados.

Por otro lado, la mezcla CBP obtuvo una resistencia a compresión de 0.1 MPa, así como un módulo de Young de 6.3 MPa, durante el ensayo la pasta se pulveriza, las partículas del bio-agregado se desprendían con facilidad y tenían una alta deformación. En la mezcla CPP refiere una resistencia a compresión de 0.1 MPa y un módulo de Young de 10.2 MPa, en esta mezcla no se observó desprendimiento de los bio-agregados ni de pasta. En la mezcla CMP se obtuvo una resistencia a compresión de 0.2 MPa, así como un módulo de Young de 9.8 MPa, de igual manera no hubo desprendimiento de bio-agregado.

En la mezcla HL se obtuvo una resistencia a compresión de 0.7 MPa y un módulo de Young de 127.8 MPa. En el caso de la mezcla SBL se obtuvo una resistencia a compresión de 1.1 MPa y un módulo de Young de 204.4 MPa, siendo estos los valores más altos obtenidos en el estudio. En ambos casos no se observó el desprendimiento de bio-agregados, lo cual se debe a una excelente adherencia entre la matriz y los bio-agregados. Sin embargo, durante el proceso de fabricación de los especímenes se debe prestar atención en la compactación ejercida en cada capa, pues como lo menciona Nguyen [131,210], una compactación adecuada ayuda a aumentar la resistencia a compresión, así como su deformación, la densidad y su conductividad térmica, esto debido a la disminución de los vacíos dentro del espécimen. Otro factor que influye en la resistencia compresión y la ductilidad de las probetas es la desorientación de las partículas de los bio-agregados utilizados en la mezcla.

En la figura 4.11 se muestran los valores promedio donde se compara el esfuerzo máximo con respecto a la deformación promedio obtenida al 1%.

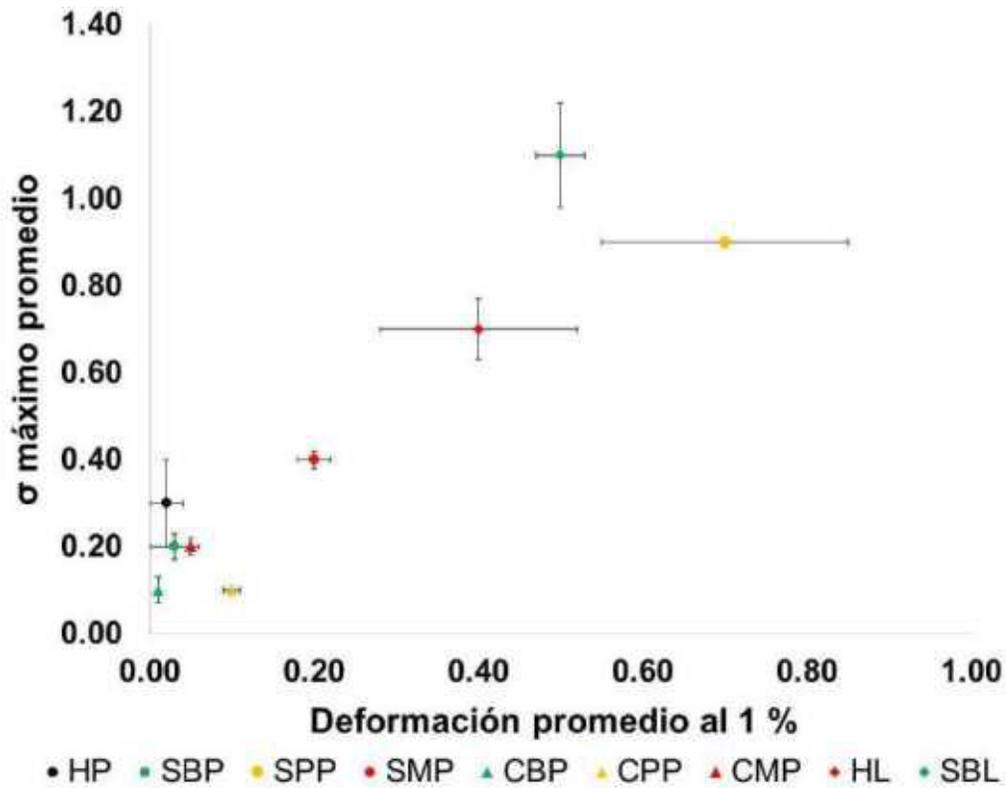
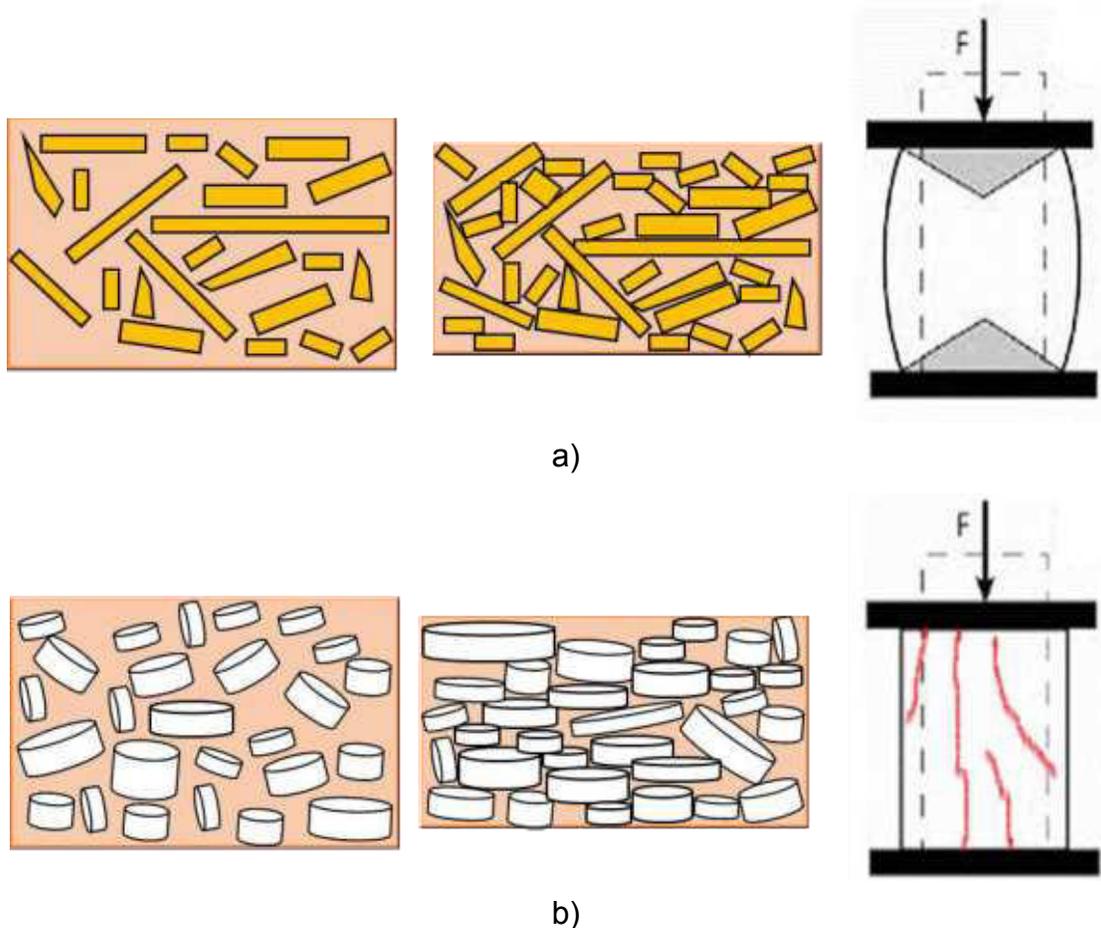


Figura 4.11 Esfuerzo máximo con respecto a la deformación promedio obtenida al 1%

Durante el ensaye a compresión se observaron diversos niveles de deformación, especialmente en el caso de la mezcla CBP (*ver figura 4.11*), si se comparan con los esfuerzos obtenidos en las mezclas SPP y SMP, los valores de resistencia a compresión de CBP no son relevantes, pues en su mayoría no rebasa el 0.15 de esfuerzo a compresión, ya que las partículas de la corteza de maíz demuestran que

puede comprimirse sin romperse, creando un alto de nivel de deformación, lo anterior se asocia con lo expuesto por Niyigena en el estudio de las propiedades mecánicas del concreto vegetal [258]. Debido a la anisotropía de la mezcla, el sentido de orientación de las partículas de la corteza de maíz tiene una amplia influencia en los resultados, es importante recalcar que se esperaba que esta mezcla presentase una gran dispersión en la compresión a los 1, 1.5, 5 y 7.5% de la resistencia a compresión.



**Figura 4.11 Modelo de la deformación de las mezclas: a) CBP comportamiento dúctil y b) SPP comportamiento frágil**

Del modelo mostrado anteriormente, se pueden observar las siguientes particularidades:

- El desprendimiento de la matriz cementante durante el ensayo de resistencia a compresión, lo cual significa que el esfuerzo comprime las partículas de agregado, pulverizando la pasta, la cual no tiene ninguna adherencia con el bio-agregado.

- Las partículas de la corteza de maíz tienen una deformación importante, a pesar de no tener una estructura porosa, la cual absorba el esfuerzo a compresión; sin embargo, la forma elongada y plana permite soportar este tipo de esfuerzos.
- El valor de esfuerzo máximo de esta mezcla no tiene correlación con la deformación, ya que es demasiado alta, es decir el material puede comprimirse y deformarse hasta un “indeterminado” porcentaje. Lo que lo hace incompatible en una aplicación ya sea en muro, techo o piso.

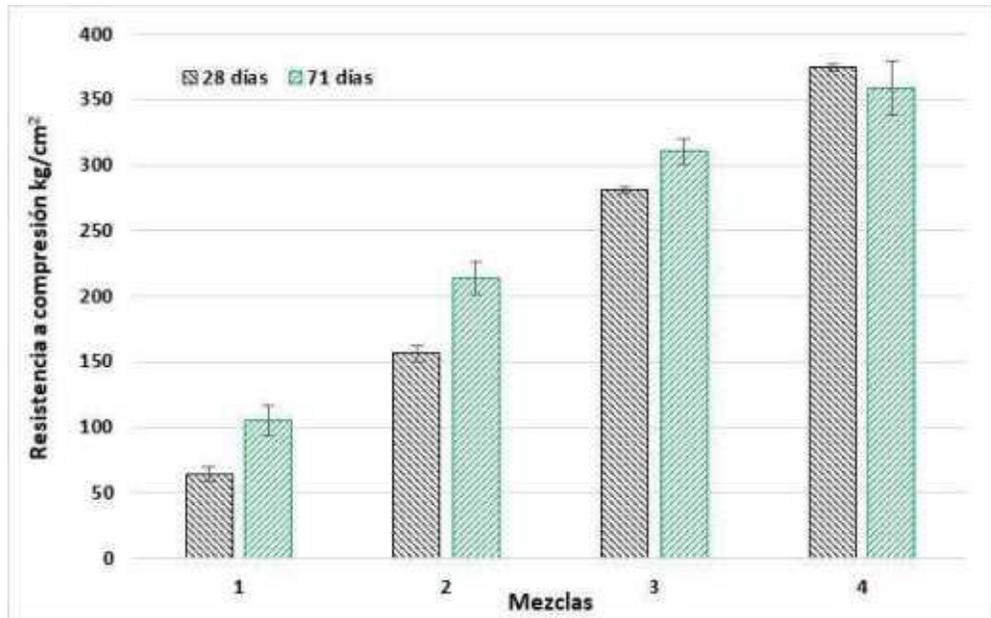
#### 4.4.4 Caracterización mecánica de las pastas elaboradas en México

Uno de los objetivos de este trabajo es desarrollar una mezcla de concreto vegetal con corteza, médula y la mezcla corteza y médula de maíz, para lo cual se llevó a cabo un análisis de la bibliografía y así identificar formulación y una proporción ideal para realizar una pasta elaborada con cemento CPO, cal hidráulica y ceniza volante, la cual, tenga un buen desempeño mecánico, identificándose 4 mezclas, mismas que se muestran en la tabla 4.15 del apartado 4.3. La caracterización mecánica de estas pastas se realiza a través del ensayo de resistencia a compresión de cubos de 5 x 5 x 5 cm.

**Tabla 4.15 Formulaciones seleccionadas para la elaboración de pastas con ceniza volante y cal hidráulica.**

Referencia	% Cemento	% Ceniza volante	% Cal hidráulica	Relación W/B
Mezcla 1 [252]		25	55	
Mezcla 2 [171]	20	40	40	0.45
Mezcla 3 [252]		50	30	
Mezcla 4 [252]		60	20	

En la figura 4.12 se muestran los resultados a compresión de las diferentes pastas analizadas; es de resaltar que las mezclas en las cuales las adiciones de cal son altas (mezcla 1), la resistencia a compresión es menor, incluso a los 71 días se alcanzan los 105 kg/cm<sup>2</sup>; por otro lado, a partir de la mezcla 2, comienza a ver el impacto que tiene la cantidad de la adición de la ceniza volante en la mezcla de concreto.



**Figura 4.12. Resistencia a compresión de cubos de mortero**

Es notable la reducción de la resistencia que se presenta en la mezcla 4, esta reducción de la resistencia puede deberse a la actividad puzolánica que se produce con respecto al paso del tiempo; lo que significa que la reacción aún se lleva a cabo, lo que puede afectar en la resistencia a compresión deseada; así mismo, otro de los factores que pueden inferir es el tipo de cemento, las diferencias en el contenido de los compuestos químicos de la cal hidráulica y la ceniza volante. Por lo que la mezcla que puede dar mejores resultados, sin pérdida de resistencia a compresión con el paso del tiempo es la mezcla 3.

#### **4.5 Estudio de las interacciones químicas de los extractos hidrosolubles de los bio-agregados y los cementantes**

En diversos estudios se ha demostrado que las propiedades físicas y principalmente las propiedades mecánicas de los concretos vegetales se ven modificadas desde edades tempranas, esto se ve reflejado en la cinética del fraguado y, en estado endurecido, pueden influir desde la resistencia a compresión, hasta en la durabilidad del material [259–269]. Hoy en día, el estudio de las interacciones químicas entre los bio-agregados y los cementantes empleados para elaborar las mezclas de concreto vegetal sigue teniendo un amplio campo de oportunidad, pues aún no se logra comprender de manera precisas como se llevan a cabo; sin embargo, existen algunos avances que permiten determinar confirmar algunas hipótesis sobre dichas interacciones, en varios estudios se han identificado 2 tipos de agentes que tienen una amplia influencia en el deterioro de los concretos vegetales, la primera son los compuestos hidrosolubles presentes en los bio-agregados y la segunda son los productos del ataque alcalino ocasionados por la matriz cementante o puzolánica sobre los bio-agregados [187,263,269–273]. En este apartado se analiza el efecto

inducido por las interacciones químicas que existen entre las partículas de los bio-agregados y los cementantes de las mezclas de concreto vegetal.

#### **4.5.1 Calorimetría isotérmica**

La metodología de la elaboración de esta prueba se describe en el inciso 2.6.4.2. Este ensaye, muestra un modelo que permite conocer como es el desarrollo del proceso de hidratación de las pastas, así mismo, la calorimetría isotérmica permite explorar el impacto de los extractos hidrosolubles presentes en las plantas durante las reacciones y mecanismos de hidratación de las pastas elaboradas con los diferentes cementantes puzolánicos [274]. En estudios realizados previamente [159,187,236,269,274], se ha destacado la importancia que tiene el realizar la calorimetría isotérmica a las pastas de los concretos vegetales, pues esto ayuda a comprender cuál es el efecto que llegan a tener los compuestos hidrosolubles en los concretos vegetales; como se ha demostrado, la corteza del tallo de la planta de maíz, no permite que la pasta formada por el agua y el cementante desarrolle completamente el endurecimiento. De lo observado en las figuras 4.12 a y b, el concreto vegetal fabricado con el tallo de maíz, así como otro tipo de bio-agregado que afecte de manera importante las reacciones químicas y el fraguado en las mezclas, pueden ser empleados con algún material que tenga un endurecimiento por secado, es decir, pueden ser empleados con algunas arcillas.

Cuando un cementante entra en contacto con el agua se produce un proceso exotérmico a través de una serie de reacciones químicas. En una primera etapa y dependiendo el tipo de cementante, después de 10 minutos aproximadamente inicia la hidratación, donde se lleva a cabo la disolución inicial de algunas partículas que tienen un tamaño por debajo de  $3 \mu\text{m}$ . Posteriormente, en una segunda etapa, inicia un periodo de inducción, donde los productos de hidratación formados se precipitan en la superficie de cada grano de cemento, actuando como una barrera protectora y no permite que las partículas se diluyan, y deteniendo de manera parcial las reacciones en varias horas. En una tercera etapa, las partículas de cemento hidratado comienzan a reaccionar más rápidamente con el agua y da lugar a la formación de nuevos productos de hidratación y con ello inicial el fraguado. En la cuarta etapa, la hidratación comienza a detenerse y la disolución es lenta y controlada y, por último, en la quinta etapa, la reacción de hidratación es más lenta, o en algunos casos ya no se realiza. Durante el tiempo en que se llevan a cabo las 5 etapas antes mencionadas, las reacciones de hidratación dan como resultado la liberación de calor, sin embargo, en las etapas 2, 3 y 4, se registran altos valores de liberación de calor en un lapso de 24 horas. El calor de hidratación puede definirse como la cantidad de calor que se desprende en julios por gramo de cemento al completarse la hidratación a una temperatura determinada, Sin embargo, como se mencionó en el párrafo anterior, esta reacción no es instantánea, pero la reacción se lleva a cabo más rápido en las etapas iniciales y continúa de manera indefinida a un ritmo decreciente [80,82–84,191,275–277].

En la figura 4.13a) se muestra la gráfica del calor acumulado de las mezclas elaboradas con las mezclas puzolánicas. Por otro lado, en la figura 4.13b) se

muestran las diferentes mezclas elaboradas con la mezcla de cementante puzolánica.

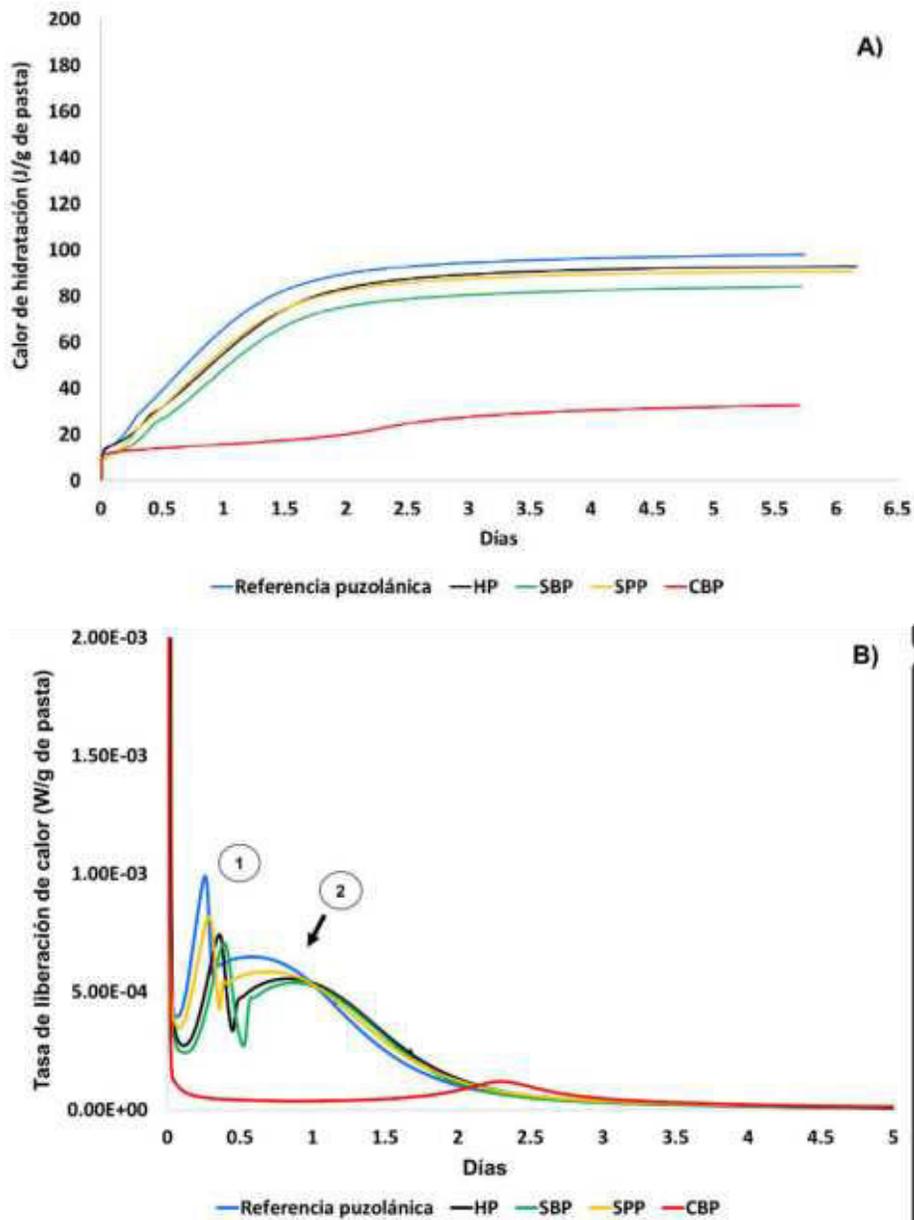


Figura 4.13. a) Gráfica del calor acumulado de las mezclas puzolánicas, b) Gráfica de la calorimetría isotérmica de las mezclas puzolánicas

De la imagen 4.13a), el calor acumulado por la pasta de referencia puzolánica es cercano a los 100 J/g, la mezcla SPP, muestra un valor cercano a los 90 J/g; por otro lado, las mezclas HP y SBP, tienen un calor acumulado similar el cual es cercano a los 75 J/g. Cabe señalar que la cinética de generación de calor en las mezclas anteriormente mencionadas es similar, pues en estos casos el calor de

hidratación se estabiliza a partir de las 28 horas. En contraparte, en la mezcla CBP el calor acumulado es cercano a los 25 J/g, también, la estabilización del calor se observa después de las 112 horas (4.6 días). Por otro lado, de la figura 4.13b) se muestran dos fases en esta gráfica: en la primera fase (marcado con 1), se observan una reacción exotérmica entre el sulfato de potasio y los iones de calcio, los cuales forman etringita; en la segunda fase (marcado con 2) es atribuida a la reacción puzolánica [188,268,274,278]. En esta misma gráfica, el mayor impacto negativo se destaca en la mezcla elaborada con la corteza de maíz (CBP), donde es notoria la reducción del flujo de calor, así como un retraso importante en el proceso de fraguado de la mezcla, esto tiene lugar durante un tiempo cercano a los 2 días aproximadamente.

De la imagen 4.13b) se puede observar que la mezcla de referencia desarrolla su proceso de liberación de calor y fraguado de manera normal, Dinh [159] plantea que el uso del  $K_2SO_4$  ayuda en la aceleración de la hidratación inicial de manera considerable, así como la mejora en la resistencia a compresión, esto debido a la formación de etringita a edades tempranas. Por otro lado, la mezcla de referencia comienza el proceso de fraguado 5 horas después de la mezcla inicial, es decir cuando el agua entra en contacto con las partículas de cementante; la mezcla elaborada con los compuestos hidrosolubles de la médula de girasol (SPP) presenta un retraso en el fraguado aproximadamente entre 7 horas después de la hidratación inicial.

Siguiendo el orden la mezcla elaborada con el cáñamo (HP), comienza a desarrollar el fraguado cerca de las 8 horas posteriores a la hidratación inicial, y poco a poco podemos observar que el retraso en el fraguado se ve inducido por el tipo de compuestos presentes en los bio-agregados; la mezcla elaborada con los compuestos hidrosolubles de la corteza de girasol (SBP), tiene un retardo en el fraguado de aproximadamente 9 horas después de que el agua entra en contacto con el cementante; sin embargo, la mezcla elaborada con los compuestos hidrosolubles de la corteza de maíz (CBP), presenta un retardo en el fraguado de aproximadamente 56 horas (2 días aproximadamente) después de que el cementante entra en contacto con el agua; lo cual concuerda con un estudio realizado por Bourdot *et al.* [236] donde también existía una reducción importante del calor relacionado con la reacción, lo cual implica que existe una inhibición parcial del fraguado de dicha mezcla. También, se observan dos fases, en la primera (marcada con 1) corresponde a las reacciones exotérmicas entre el sulfato y los iones de calcio que forman la etringita. La segunda fase (marcada con 2), se debe a la reacción puzolánica.

En la figura 4.14a) se muestra la gráfica del calor acumulado de las mezclas elaboradas con el cementante comercial. Por otro lado, en la figura 4.14b) se muestran las diferentes mezclas elaboradas con el cementante comercial

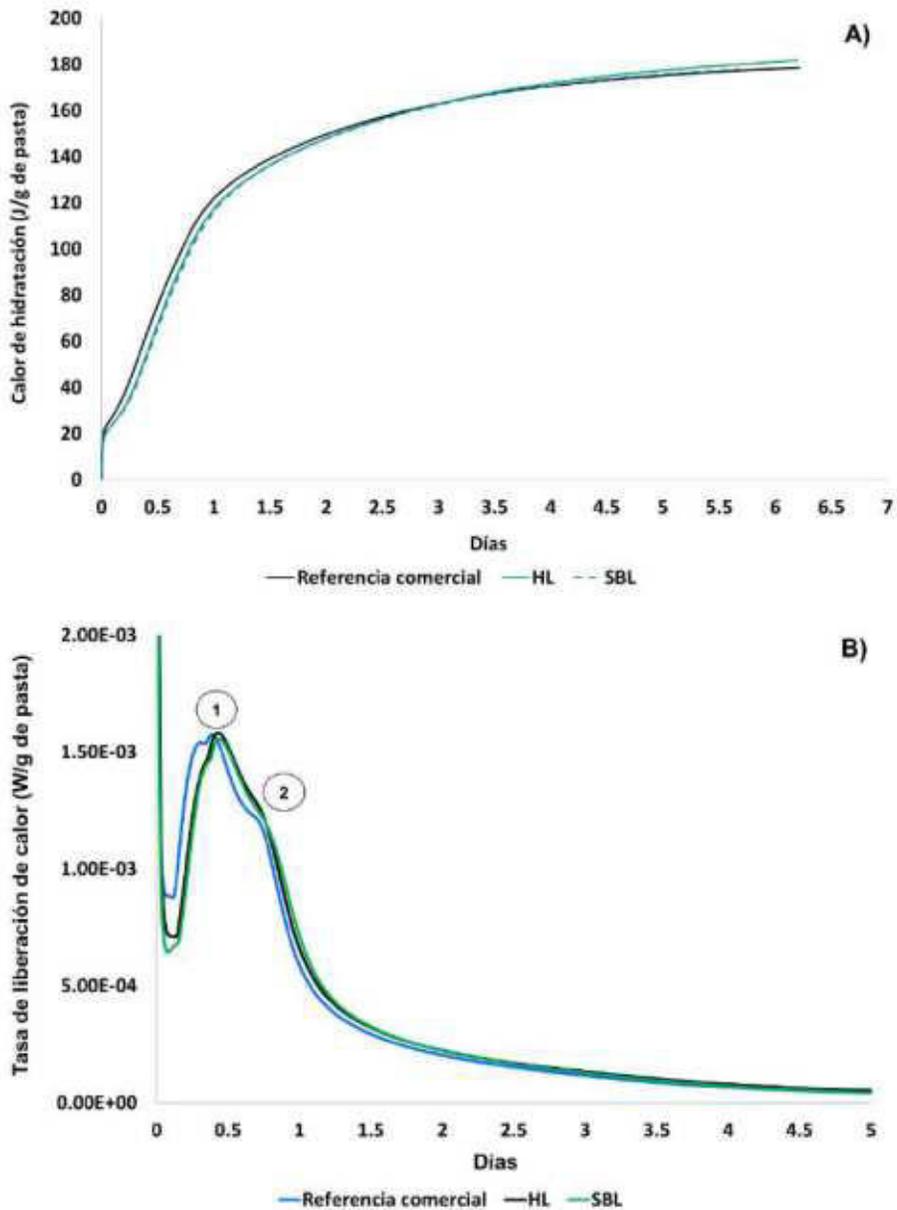


Figura 4.14. a) Gráfica del calor acumulado de las mezclas elaboradas con el cementante comercial, b) Gráfica de la calorimetría isotérmica de las mezclas elaboradas con el cementante comercial

De la figura 4.14a) se observa que el calor acumulado por la mezcla de referencia elaborada con el cementante comercial va aumentando con respecto al tiempo, esto puede ser inducido por la presencia de cemento, pues a diferencia de la pasta de referencia elaborada con el cementante puzolánico, no se mantiene constante, sino que incrementa con el paso del tiempo; por otro lado, la mezcla elaborada con los compuestos hidrosolubles de la corteza de girasol (SBL) presenta una tasa de liberación de calor que va más allá de los 180 J/g y al igual que en el caso de la mezcla de referencia elaborada con el cementante comercial, incrementa con el paso del tiempo, al igual esto puede atribuirse a la presencia de cemento en el

cementante. La mezcla elaborada con los compuestos hidrosolubles del cáñamo (HL) presenta una cantidad de calor acumulado de la hidratación es ligeramente menor a la mezcla de referencia elaborada con el cementante comercial, pues en este caso se observa que es cercana a los 180 J/g y de igual manera incrementa con el paso del tiempo. De manera general, a diferencia de las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico, el calor acumulado no se mantiene constante.

De la figura 4.14b), la reacción principal es la hidratación inicial del cemento (marcada con el número 1). Las reacciones marcadas con el número 2, son reacciones secundarias de hidratación. La mezcla realizada con el cáñamo (HL), da lugar reacción exotérmica aproximadamente a las 10 horas después de que el cementante entra en contacto con el agua, En la mezcla elaborada con la corteza de girasol (SBL), la reacción exotérmica tiene lugar aproximadamente a las 11 horas después de haber iniciado el proceso de mezcla del cementante con el agua; por lo que se piensa que la mezcla elaborada con los extractos hidrosolubles tiene un efecto muy ligero en el retaso de las reacciones de hidratación y el fraguado con respecto a la mezcla de referencia.

De la *figura 4.13b)*, se puede deducir que el efecto del deterioro en las mezclas puzolánicas se clasifica de la siguiente manera: **Referencia puzolánica < CBP < SBP < HP < SPP**. De la *figura 4.14b)*, se puede concluir que el deterioro de se clasifica de la siguiente manera: **Referencia comercial < SBL < HL** e manera general, los bio-agregados obtenidos del tallo de girasol no tienen un impacto significativo durante el proceso de hidratación del cementante, caso contrario se ve en la mezcla elaborada con la corteza de maíz (CBP), donde el retraso de las reacciones es importante, hipotéticamente puede asociarse al nulo rendimiento mecánico de esta última mezcla.

#### **4.5.2 Análisis mineralógico**

Para identificar y comprender la influencia que tienen los hidrosolubles presentes en los bio-agregados en el proceso de fraguado y la resistencia a compresión, es necesario realizar algunos análisis como lo son la termogravimetría y la difracción de rayos X, en ambos casos se han llevado a cabo a los 2 y 60 días, utilizando la metodología que se explica en los apartados 2.5.4.2, 2.5.4.3 y 2.5.4.4.

##### **4.5.2.1 Análisis termogravimétrico (TGA)**

En la figura 4.15, se muestran los resultados del análisis termogravimétrico realizado en las pastas de referencia y con los compuestos hidrosolubles de los bio-agregados.

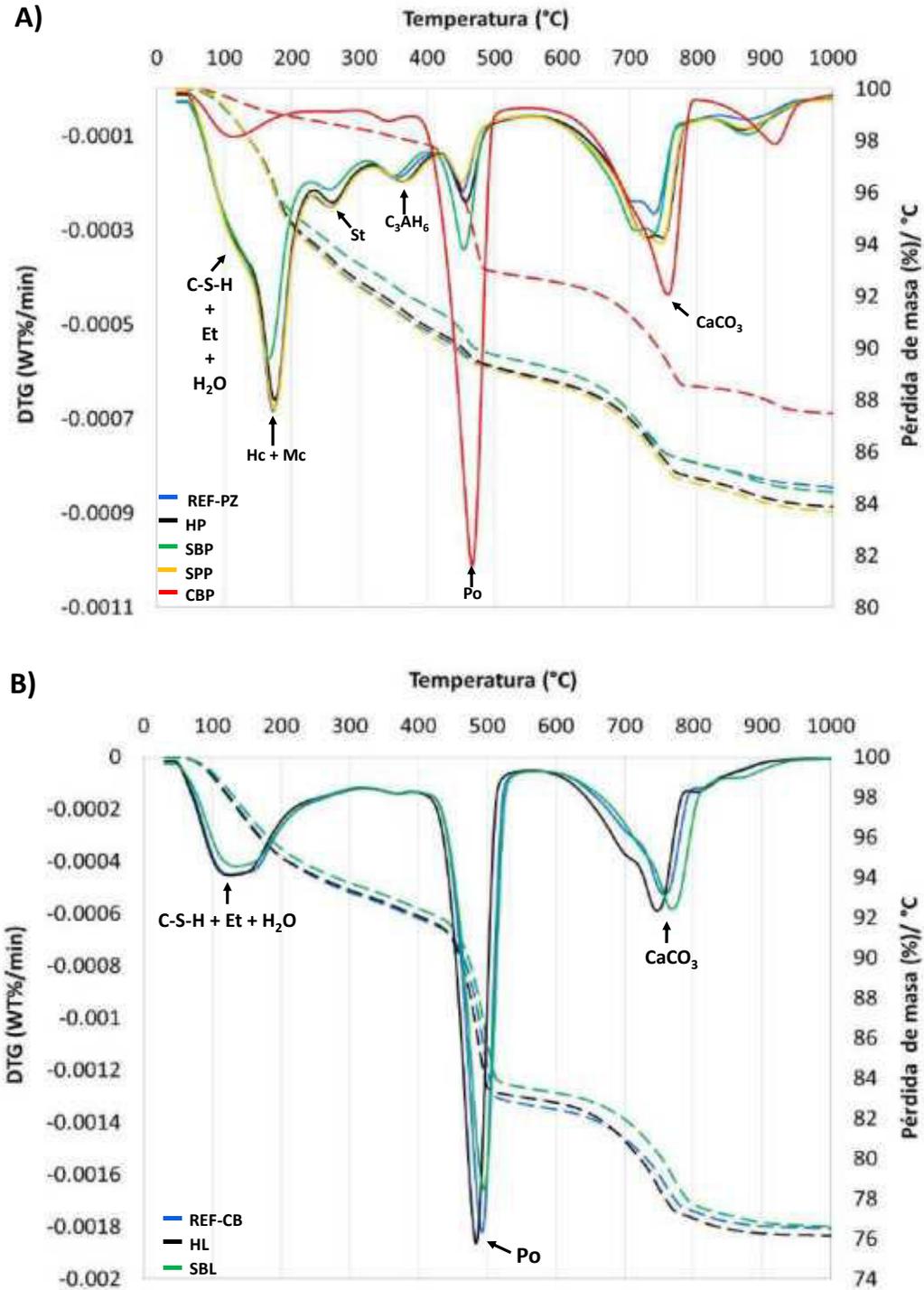


Figura 4.15. Análisis termogravimétrico a 2 días de hidratación de: A) mezclas elaboradas con cementantes pozzolánicos, mezcla de referencia (REF-PZ), cáñamo (HP), corteza de girasol (SBP), médula de girasol (SPP) y corteza de maíz (CBP). b) mezclas elaboradas con cementante comercial REF-CB, cáñamo (HL) y corteza de girasol (SBL).

En la figura 4.15a) se presentan los resultados de las mezclas elaboradas con los cementantes puzolánicos a los 2 días:

Entre los 100 y 200 °C:

Se muestra la deshidratación de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H), etringita (Et) y la pérdida del agua libre (H<sub>2</sub>O), así mismo se presenta la descomposición de los hemicarboaluminatos cálcicos (Hc) y monocarboaluminatos cálcicos (Mc); estos compuestos minerales tienen una mayor presencia en las mezclas de referencia, HP, SBP y SPP. Sin embargo, en CBP, estos compuestos minerales no tienen una presencia debido a la interacción de los extractos hidrosolubles de la corteza de maíz con el cementante puzolánico.

Entre los 200 y 300 °C:

Se presenta la reducción de la etringita (St) excepto en la mezcla CBP. Los extractos hidrosolubles tienen un efecto importante en el desarrollo de la reacción puzolánica, reduciendo los productos de reacción.

Entre los 300 y 400 °C:

Se registra el consumo o pérdida de masa del aluminato tricálcico hexahidratado (C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>).

Entre los 400 y 500 °C:

Se muestra la descomposición de la portlandita (Po); en este caso este mineral tiene una mayor presencia en la mezcla CBP que en el resto de las mezclas. La portlandita residual observada es resultado del retraso en el desarrollo de la reacción puzolánica.

Entre los 600 y 800 °C:

Se muestra la descarbonatación o la pérdida de masa del carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) en las mezclas HP, SBP y SPP, pero es más remarcable en la mezcla CBP. La presencia de carbonatos podría estar relacionada con la liberación de dióxido de carbono inducida por la degradación alcalina de las partículas de cáñamo y girasol [6].

En la *figura 4.15b*) se muestran los resultados de las mezclas elaboradas con el cementante comercial a los 2 días se presentó:

Entre los 100 y 200 °C:

Se muestra la deshidratación de silicatos de calcio hidratados (C-S-H), etringita (Et) y la pérdida agua libre (H<sub>2</sub>O), así mismo se presentan hemicarboaluminatos cálcicos (Hc) y monocarboaluminatos cálcicos (Mc); estos compuestos minerales se presentan en todas las mezclas, esto es debido a la reacción de los compuestos puzolánicos.

Entre los 400 y 500 °C:

Se muestra la descomposición de la portlandita (Po); en este caso este mineral es notorio en todas las mezclas debido a que es el resultado de la hidratación de los compuestos hidráulicos.

Entre los 600 y 800 °C:

Se muestra nuevamente la pérdida de masa del carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). La presencia de carbonatos podría estar relacionada con la liberación de dióxido de carbono inducida por la degradación alcalina de las partículas de cáñamo y girasol [6].

Entre los 900 y 1000 °C:

Se presenta un consumo de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), sin embargo, este pico se resalta dependiendo el tipo de método que se utilice para detener la hidratación.

La presencia de los extractos hidrosolubles de los diferentes bio-agregados, se hace evidente el retraso en el desarrollo de las reacciones puzolánicas al reducir la cantidad de productos de reacción. En la tabla 4.16, se muestran las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico.

**Tabla 4.16 Porcentajes en peso de los minerales presentes en las mezclas elaboradas en este estudio a 2 días de fabricación.**

Minerales	Mezclas analizadas				
	Referencia puzolánica	HP	SBP	SPP	CBP
Portlandita	7.90	8.40	9.80	7.70	21.6
Calcita	8.00	9.40	9.10	9.60	9.6

El contenido de portlandita presente en la referencia puzolánica, es menor con respecto a la mezcla HP y SBP, por lo que los extractos hidrosolubles, sin embargo, en la mezcla SPP, el contenido de portlandita es menor. Por otro lado, en la mezcla CBP se tiene un porcentaje elevado de portlandita, lo que indica que hay un retraso

en el consumo de este mineral. La formación de carbonatos de calcio es mayor en la mezcla CBP en comparación a la mezcla de referencia, además dentro de los resultados se observó la presencia de hydrogarnet, el cual es resultado de la reacción del metacaolín con el hidróxido de calcio. De manera general el efecto deletéreo de las pastas elaboradas con los extractos bio-agregados, pero específicamente de la pasta CBP, pueden ser los responsables directos de las limitaciones en las propiedades mecánicas. Algunos estudios, sugieren que la presencia mayoritaria de carbonatos podría estar relacionada con la liberación de dióxido de carbono inducida por la degradación alcalina de los bio-agregados de maíz, y a su vez, esto causaría el efecto de la carbonatación de la portlandita.

En la tabla 4.17 se muestran las mezclas elaboradas con el cementante comercial.

**Tabla 4.17 Porcentajes en peso de los minerales presentes en las mezclas elaboradas en este estudio a 2 días de fabricación.**

Minerales	Mezclas analizadas		
	REF-CB	HL	SBL
Portlandita	38.60	37.70	37.30
Calcita	13.00	14.60	14.10

La formación de los productos de la hidratación del cementante comercial son visibles (C-S-H y C-A-S-H). Por otro lado, el efecto deletéreo de los extractos hidrosolubles de los bio-agregados del cáñamo y de la corteza de girasol se hace presente, ya que en el efecto más pronunciado se observa en la mezcla SBL, pero entre los 600 y 800 °C, el consumo de  $\text{CaCO}_3$  se es mayor en la mezcla HL [268]. Por otro lado, la variación en la cantidad de la calcita presente en las mezclas depende del tipo de bio-agregado que se utilice, pues se puede ver que tiene una ligera variación HL con respecto a SBL, lo cual corresponde a la liberación de dióxido de carbono inducida por la degradación alcalina del cáñamo y de la corteza de girasol.

En la figura 4.16a) se presentan los resultados de las mezclas elaboradas con los cementantes puzolánicos a los 60 días también, en la tabla 4.16b) se muestran las cantidades de las fases hidratadas presentes en las mezclas:

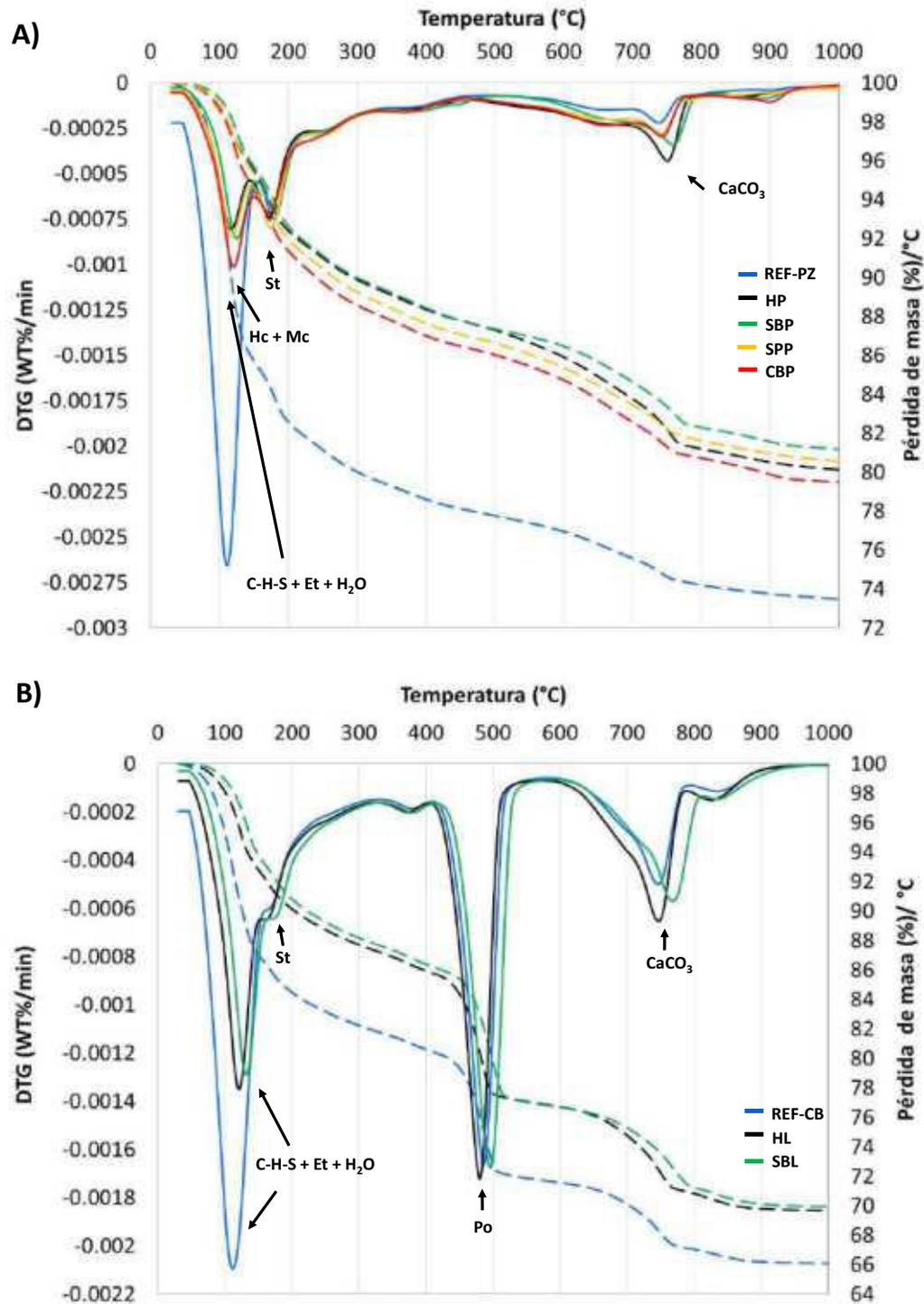


Figura 4.16. Análisis termogravimétrico a 60 días de hidratación de: A) mezclas elaboradas con cementantes pozolánicos, mezcla de referencia (REF-PZ), cáñamo (HP), corteza de girasol (SBP), médula de girasol (SPP) y corteza de maíz (CBP). B) mezclas elaboradas con cementante comercial REF-CB, cáñamo con cementante comercial (HL) y corteza de girasol con cementante comercial (SBL).

En la figura 4.15a) se presentan los resultados de las mezclas elaboradas con los cementantes puzolánicos a los 60 días:

Entre los 100 y 200 °C:

Se muestra la deshidratación de silicatos de calcio hidratados (C-S-H), etringita (Et) y el consumo del agua libre (H<sub>2</sub>O), el agua libre se registra en mayor medida en la mezcla de referencia puzolánica, probablemente esto se asocia a un problema con el secado de la mezcla, así mismo se presenta a descomposición de los hemicarboaluminatos cálcicos (Hc) y monocarboaluminatos cálcicos (Mc);); lo anterior se registra en todas las mezclas puzolánicas, sin embargo, el pico que resalta en mayor medida corresponde a la mezcla CBP, lo cual puede ser resultado de la inhibición de estas reacciones.

Entre los 600 y 800 °C:

Los iones de carbonato reaccionan con los iones de calcio, lo cual da como resultado la precipitación del carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) en todas las mezclas. La cantidad de calcita presente depende del tipo de bio-agregado utilizado.

En la figura 4.15a) se presentan los resultados de las mezclas elaboradas con el cementante comercial a los 60 días:

Entre los 100 y 200 °C:

Se muestra el consumo de silicatos de calcio hidratados (C-S-H), etringita (Et) y el agua libre (H<sub>2</sub>O), el consumo del agua libre es muy pronunciado en la mezcla de referencia, de igual manera, esto puede atribuirse a un problema de secado de la muestra; estos compuestos minerales se presentan en todas las mezclas.

Entre los 400 y 500 °C:

Se muestra un consumo importante de la portlandita (Po), en este caso este mineral es notorio en todas las mezclas.

Entre los 600 y 800 °C:

Se muestra el consumo carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) en todas las mezclas.

En la tabla 4.17 se muestran las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico.

**Tabla 4.17. Porcentajes en peso de los minerales presentes en las mezclas elaboradas en este estudio a 60 días de fabricación.**

Minerales	Mezclas analizadas				
	REF-PZ	HP	SBP	SPP	CBP
Portlandita	6.0	8.8	7.2	8.1	8.1
Calcita	7.2	12.2	10.7	10.0	10.6

Después de 2 meses, las diferencias entre las mezclas de control y las que contienen los extractos hidrosolubles de los bio-agregados comienzan a atenuarse; sin embargo, aún sigue habiendo una diferencia CBP, SPP, SBP y HP, siendo la primera mezcla la que aún presenta problemas (en menos medida) en cuanto a las reacciones puzolánicas se refiere.

En la tabla 4.18 se muestran las mezclas elaboradas con el cementante comercial.

**Tabla 4.18. Porcentajes en peso de los minerales presentes en las mezclas elaboradas en este estudio a 60 días de fabricación.**

Minerales	Mezclas analizadas		
	REF-CB	HL	SBL
Portlandita	36.6	37.4	39.4
Calcita	11.8	15.3	14.3

En el caso de estas mezclas, la diferencia entre los contenidos de la portlandita es mínima con respecto a lo observado a los 2 días después de haber iniciado la hidratación, lo que quiere decir que las reacciones se desarrollan, pero en el caso del cáñamo, el efecto es menor si se compara con el efecto deletéreo de la corteza de girasol.

#### **4.5.3 Difracción de rayos X (XRD)**

En la figura 4.17, se muestra la difracción de rayos X de las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico y comercial con 2 días de hidratación.

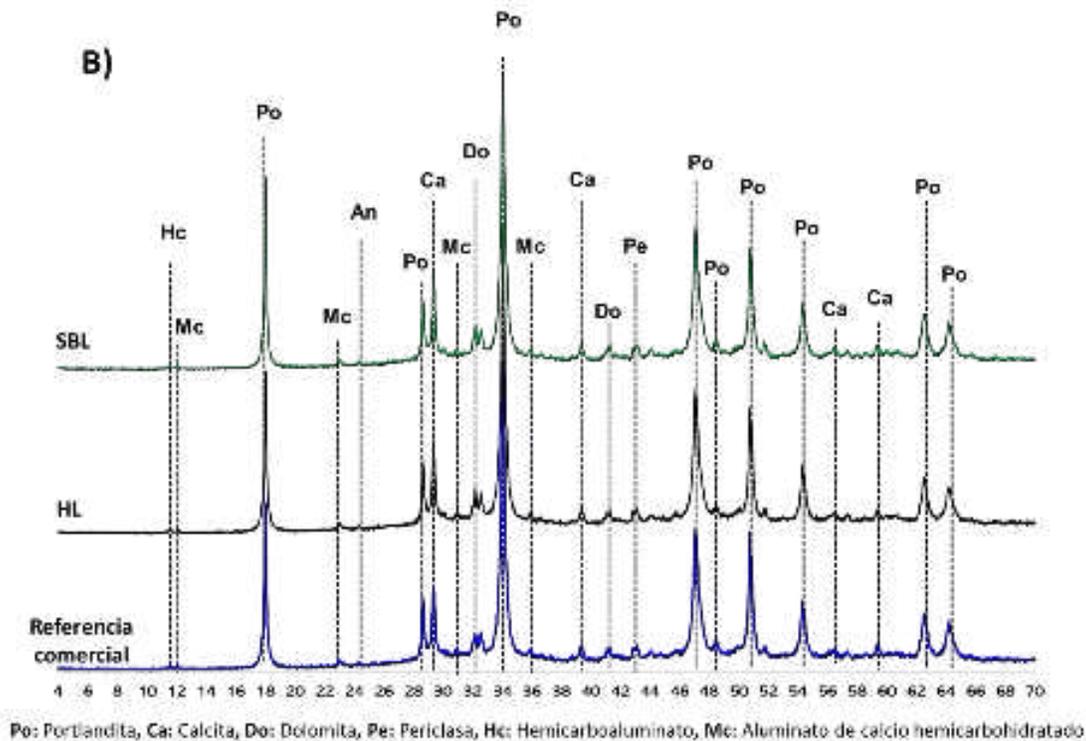
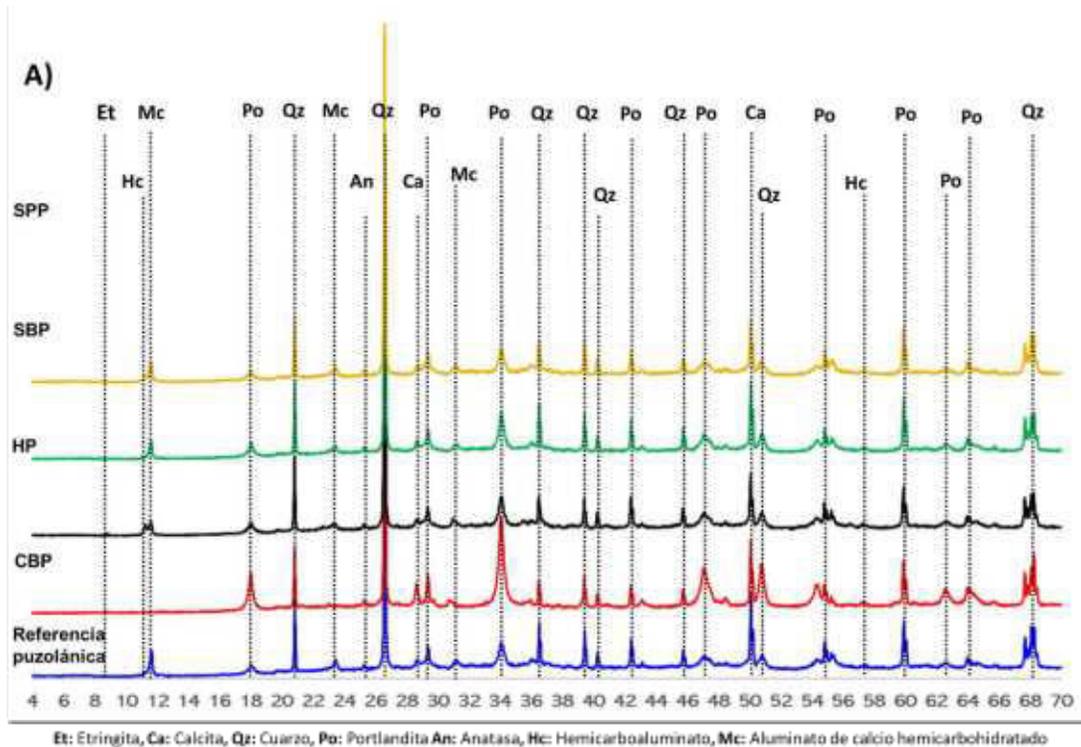


Figura 4.17. Difracción de rayos X a 2 días de hidratación en: A) mezclas elaboradas con cementantes puzolánicos, mezcla de referencia (REF-PZ), cáñamo (HP), corteza de girasol (SBP), médula de girasol (SPP) y corteza de maíz (CBP). B) mezclas elaboradas con cementante comercial REF-CB, cáñamo (HL) y corteza de girasol (SBL).

En la figura 4.17a), se muestra la difracción de rayos X de las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico con 2 días de hidratación, en las cuales se puede ver que las difracciones son similares entre sí; sin embargo, en la mezcla de cáñamo (HP), se observa un pequeño pico de etringita (Et); el cual se ve influenciado por la presencia de sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ), y según algunos estudios, la formación de la etringita durante las edades tempranas (2 días) da como resultado un incremento en la resistencia a compresión con respecto a algunas mezclas donde no se presenta este mineral; tal es el caso de la mezcla fabricada con la corteza de maíz (CBP). También, se pueden observar algunos picos de portlandita (Po), los cuales tienen una intensidad ligeramente menor que los picos de cuarzo (Qz), los cuales provienen del metacaolín. Los hemicarboaluminatos (Hc) y los aluminatos de calcio hemicarbonato hidratado (Mc) se identifican las fases de AFm con aniones de hidróxido, sulfato, carbonato, aluminosilicato o cloruro. Estos resultados muestran que solo en la mezcla elaborada con la corteza de maíz (CBP) no se desarrolla el aluminato de calcio hemicarbo hidratado (Mc), esto debido a que los extractos de dicho bio-agregado pueden inhibir las reacciones puzolánicas [6,137,236,269,279].

Las difracciones son similares entre sí; sin embargo, en la mezcla de cáñamo (HP), se observa un pequeño pico de etringita (Et); el cual se ve influenciado por la presencia de sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ), y según algunos estudios, la formación de la etringita durante las edades tempranas (2 días) da como resultado un incremento en la resistencia a compresión con respecto a algunas mezclas donde no se presenta este mineral; tal es el caso de la mezcla fabricada con la corteza de maíz (CBP). También, se pueden observar algunos picos de portlandita (Po), y picos de cuarzo (Qz), los cuales provienen del metacaolín.

Los hemicarboaluminatos (Hc) y los aluminatos de calcio hemicarbonato hidratado (Mc) se identifican las fases de AFm con aniones de hidróxido, sulfato, carbonato, aluminosilicato o cloruro. Estos resultados muestran que solo en la mezcla elaborada con la corteza de maíz (CBP), no se desarrolla el aluminato de calcio hemicarbo hidratado (Mc), esto debido a que los extractos de dicho bio-agregado pueden inhibir las reacciones puzolánicas, así mismo, otro punto importante a resaltar es que en la mezcla de referencia existe menos portlandita y un mayor contenido de productos de la reacción puzolánica Mc y Hc; lo cual indica que la mezcla se encuentra optimizada. [6,137,236,269,279].

En la figura 4.17b) se presenta la difracción de rayos X a 2 días de hidratación de las mezclas elaboradas con el cementante comercial, en la cual se observa una similitud entre los diferentes tipos de bio-agregados utilizados en las mezclas los picos predominantes son de la Portlandita (Po), Calcita (Ca), Dolomita (Do), Periclase (Pe); las diferencias entre las intensidades de los picos se deben al proceso utilizado para detener la hidratación de la mezcla.

En la figura 4.18, se muestra la difracción de rayos X de las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico y comercial con 60 días de hidratación.

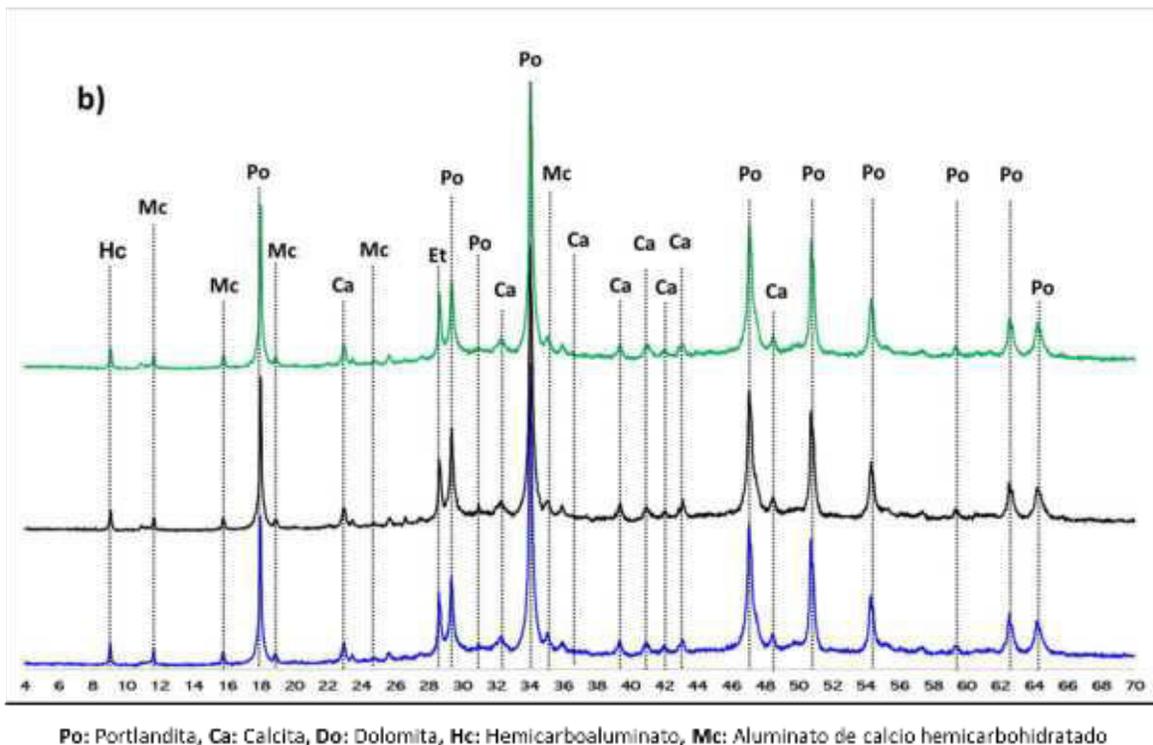
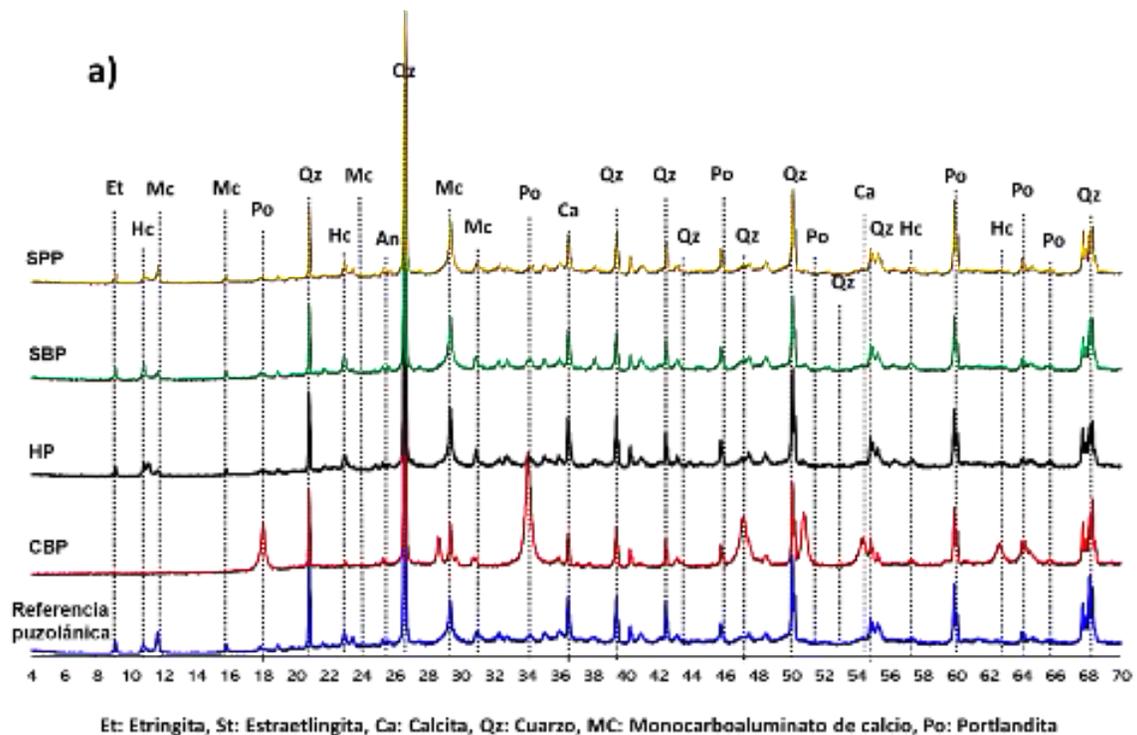


Figura 4.18. Difracción de rayos X a 60 días de hidratación en: A) mezclas elaboradas con cementantes puzolánicos, mezcla de referencia (REF-PZ), cáñamo (HP), corteza de girasol (SBP), médula de girasol (SPP) y corteza de maíz (CBP). B) mezclas elaboradas con cemento comercial REF-CB, cáñamo (HL) y corteza de girasol (SBL).

En la figura 4.18a), se muestra la difracción de rayos X de las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico con 60 días de hidratación, en las cuales se puede ver que las difracciones son similares entre sí; sin embargo, en la mezcla de cáñamo (HP), se observa un pequeño pico de etringita (Et). Los hemicarboaluminatos (Hc) y los aluminatos de calcio hemicarbo hidratado (Mc) se identifican las fases de AFm con aniones de hidróxido, sulfato, carbonato, aluminosilicato o cloruro. Estos resultados muestran que solo en la mezcla elaborada con la corteza de maíz (CBP) se ha desarrollado el aluminato de calcio hemicarbo hidratado (Mc); este producto puede ser el responsable del comportamiento mecánico de la mezcla (CBP). La intensidad de este esto debido a la reacción química entre la cal y el metacaolín como lo establece Magniont [137].

En la figura 4.18b) se presenta la difracción de rayos X a 60 días de hidratación de las mezclas elaboradas con el cementante comercial, en la cual se observa una similitud entre los diferentes tipos de bio-agregados utilizados en las mezclas los picos predominantes son de la portlandita (Po), calcita (Ca), dolomita (Do), periclase (Pe); las diferencias entre las intensidades de los picos se deben al proceso utilizado para detener la hidratación de la mezcla. Los compuestos hidrosolubles presentes en los bio-agregados pueden perjudicar las reacciones durante el proceso de hidratación y fraguado de las diferentes mezclas. En general algunas investigaciones se han enfocado en analizar los diferentes tipos de extractos hidrosolubles, sin embargo, este es un campo de oportunidad de investigación, esto se debe a la gran variedad de familias de extractos hidrosolubles presentes en los bio-agregados. Algunos de los concentrados hidrosolubles que presentan un potencial efecto negativo en el proceso de fraguado son las siguientes familias [262,265,280,281]:

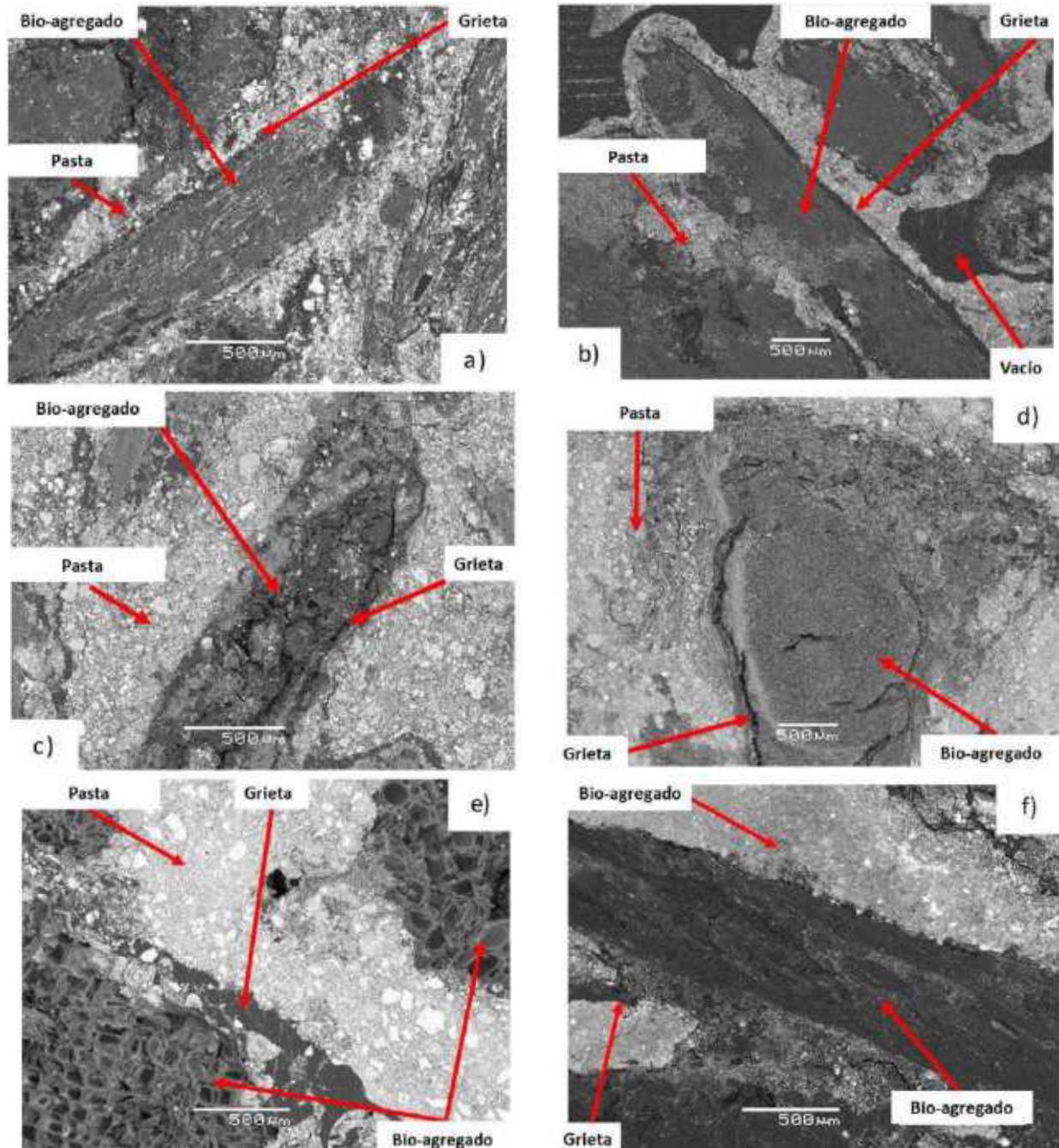
- Monosacáridos: Galactosa, glucosa, manosa, ramnosa, arabinosa y xilosa.
- Polisacáridos: Sacarosa, arabinogalactina, xilano, almidón, hemicelulosa y pectina.
- Fenoles: Tannis.
- Terpenos.
- Ácidos orgánicos: ácidos céticos y ácidos grasos.

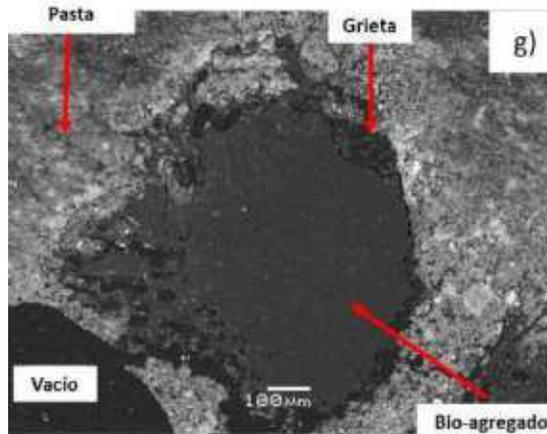
Como es conocido, el proceso de degradación de algunos compuestos hidrosolubles en un medio alcalino como lo son las matrices puzolánicas y algunas matrices cementantes dan como resultado algunas reacciones y la adición de algunas moléculas las cuales dan como resultado un efecto negativo en las reacciones de hidratación del ligante. Estudios realizados en los concretos vegetales elaborados con cáñamo, han podido identificar que el compuesto más sensible a lo mencionado anteriormente es la hemicelulosa, pues dicho extracto, al entrar en un medio alcalino tiende a formar algunos ácidos carboxílicos, los cuales dan como efecto el retardo de la hidratación de algunos minerales en la matriz cementante.

## 4.6 Microscopía electrónica de barrido y análisis EDS

### 4.6.1 Microscopía electrónica de barrido

En la figura 4.19 se muestran las observaciones realizadas en el microscopio electrónico de barrido, todas las mezclas fueron analizadas a los 7 meses después de ser elaboradas, en exploración visual realizada se destaca lo siguiente.





**Figura 4.19. Micrografías de los concretos vegetales seleccionados a) HP, b) SBP, c) CBP, d) SPP, e) CPP, f) HL y g) SBL**

De las micrografías anteriores, en las mezclas HP, SBP, CBP, HP y SBL se presentan grietas causadas por la contracción de los bio-agregados embebidos en la matriz cementante, esto debido a la evaporación del agua absorbida por los bio-agregados de las mezclas arriba mencionadas al inicio de la fabricación de las mezclas, a este efecto se le conoce como contracción por secado. Por otro lado, en las mezclas SPP, y CPP no se presenta la grieta característica de la contracción por secado.

En la mezcla HP, se puede ver que el cáñamo tiene una adherencia regular, esto se pudo corroborar durante los ensayos a compresión, donde las partículas del cáñamo se desprendían junto a la matriz puzolánica. En la mezcla SBP las partículas de la corteza de girasol presentaban una adherencia similar a la observada en la mezcla HP, se igual manera esto se pudo comprobar durante los ensayos de resistencia a compresión, así como en las micrografías obtenidas.

En la mezcla CBP, la corteza del tallo de maíz presentaba una adherencia pobre (esta mezcla presentaba una interacción química entre los compuestos hidrosolubles más marcada que en el resto de las mezclas de este estudio), esto se reflejó en la resistencia a compresión, donde la pasta se pulverizó en su totalidad y solo la corteza del tallo del maíz fue el material que aportó en la deformación. En la mezcla SPP, se evidenció un alto contenido de agua, en la micrografía se puede apreciar la grieta de contracción por secado en el contorno de la médula del tallo de girasol; a diferencia de los casos anteriores, esta grieta se observa de mayor profundidad, debido a que el bio-agregado contenía un volumen de agua importante en su interior y al secarse produjo una grieta de dimensiones mayores a las observadas en las mezclas anteriores.

Cabe hacer mención que, de todas las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico, tuvieron los mejores resultados de resistencia a compresión. En micrografía de la mezcla CPP se puede observar que no existen grietas en la interfaz de la médula del tallo del maíz y la matriz cementante, la grieta que se presenta en la micrografía se debe al proceso de fabricación de la muestra seleccionada para la observación en el microscopio electrónico de barrido, esta mezcla no presentó contracción por secado, lo que hace suponer que la mezcla tuvo

una cantidad de agua idónea. A diferencia de las mezclas puzolánicas, la mezcla HL (elaborada con el cementante comercial), la grieta en la interfaz cementante no es tan evidente, durante el ensayo a compresión las partes que se desprendían de la mezcla mostraban una fuerte adherencia entre la matriz cementante y el cáñamo, al igual que en la mezcla CPP, el vacío que muestra está relacionado con la preparación de la muestra.

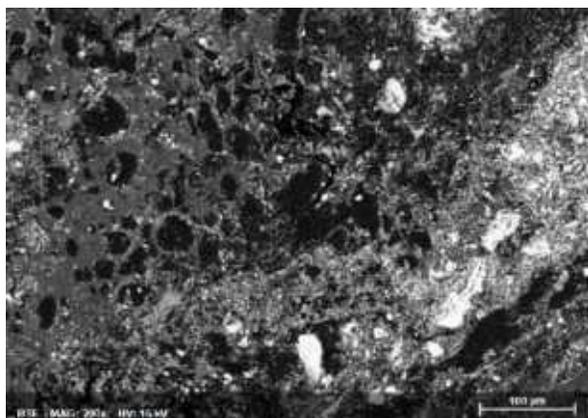
Por último, en la mezcla SBP se puede ver que la presencia de la grieta de contracción por secado, lo que supone que la corteza del tallo de girasol; sin embargo, esto puede deberse a la naturaleza misma del cementante, que, en comparación al cementante puzolánico, tiene una liberación más alta de calor, lo que puede crear una contracción química la mezcla SBP. Un punto importante para recalcar es que la tendencia indica que en aquellas mezclas obtuvieron mejores desempeños en el ensayo a compresión fue en aquellas mezclas donde se observa un mayor contenido de agua; por otro lado, aquellas donde el contenido era menor, los resultados de la resistencia a compresión son menores.

#### 4.6.2 Análisis de Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS)

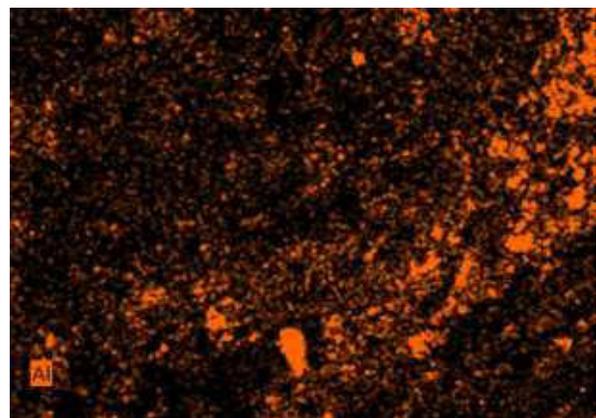
Para el desarrollo de esta técnica de caracterización mineralógica, se toma como base las imágenes obtenidas por la observación a través del microscopio electrónico; posteriormente, se toman 5 puntos de referencia donde se realizará la espectroscopía de rayos X.

##### 4.6.2.1 Mezcla HP

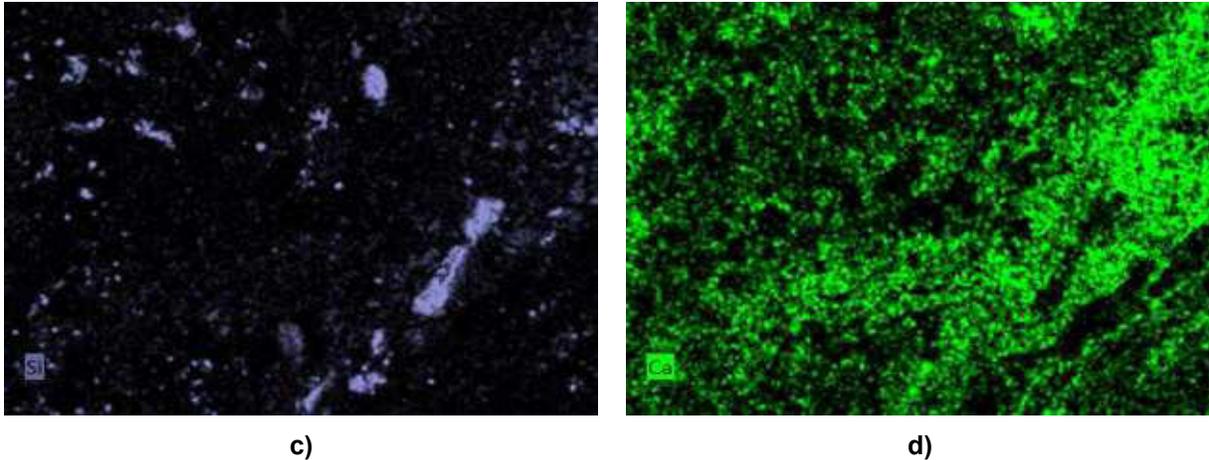
En la figura 4.20 se muestra la espectroscopía realizada, así mismo en la tabla 4.17 se presentan los datos correspondientes a la mezcla HP. En este caso se seleccionaron 2 puntos al interior de la matriz puzolánica y 3 puntos en el interior del bio-agregado.



a)



b)



**Figura 4.20. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla HP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio**

En la imagen 4.21 se puede observar que el elemento predominante es el calcio, pues este es el elemento más soluble (ver imagen 4.19d), en la cual se observa que este elemento tiene una mayor presencia, tanto en la pasta como en el cáñamo; en el mismo orden, el silicio también tiene una presencia significativa (ver figura 4.16c) y por último se tiene una menor presencia de aluminio (ver figura 4.19b). En tabla 4.19 se describe el contenido en porcentaje en masa de los elementos presentes en la muestra. De lo descrito anteriormente, la difusión de los iones de calcio y carbonato se propicia hacia el cáñamo. En aquellas partes donde ni el calcio, ni el aluminio y ni el silicio tienen presencia (partes oscuras), son el resultado de la preparación de la muestra ya que son oquedades cubiertas por la resina. La zona de transición entre el cáñamo y la matriz puzolánica se observa cargada de los 3 elementos descritos arriba, lo que puede ser derivado de la contracción durante el fraguado de la mezcla, o bien, como lo detalla Magniont [137] puede ser atribuido también a la preparación de la muestra.

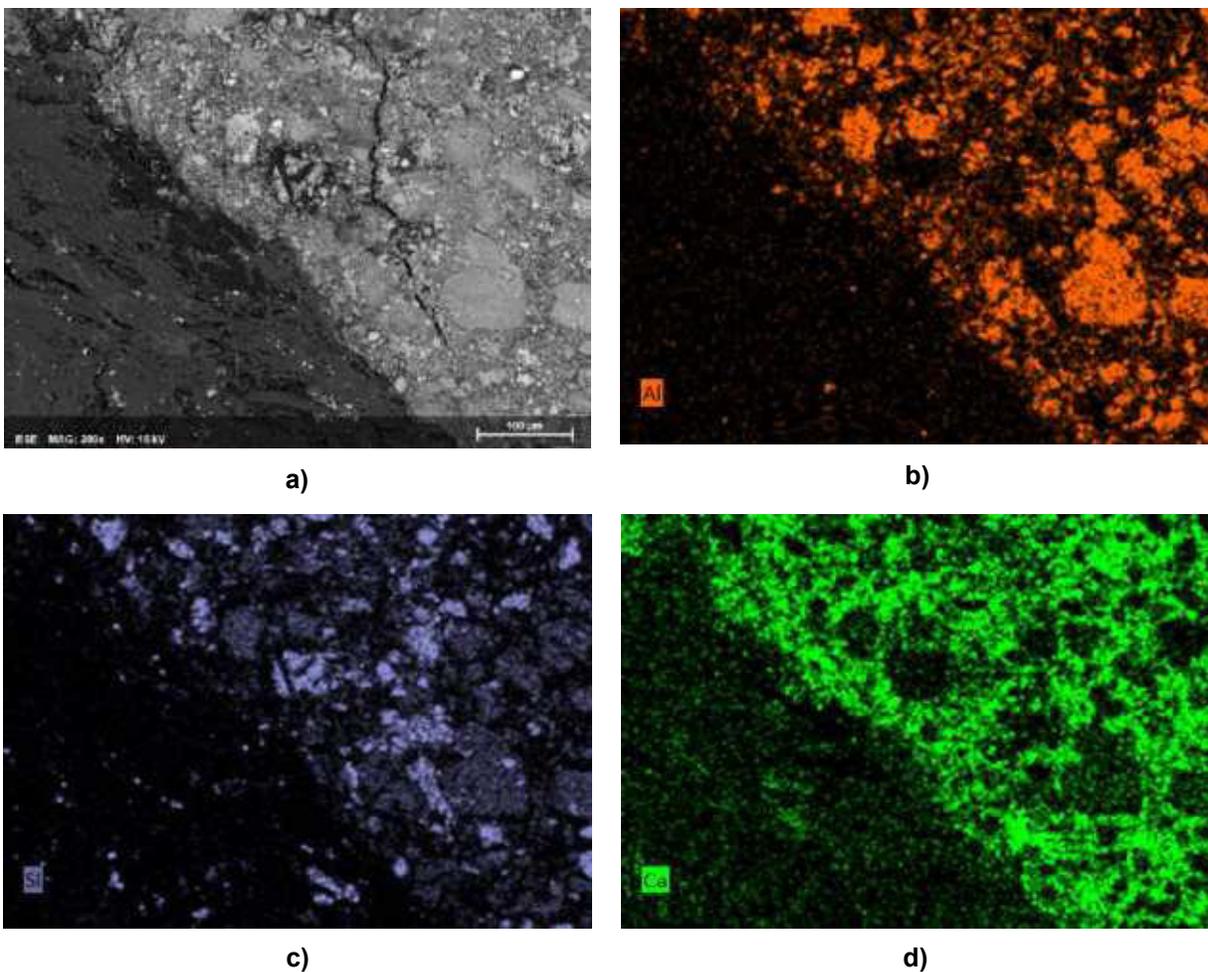
**Tabla 4.19. Contenido de masa de compuestos en la mezcla HP en porcentaje**

Puntos	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
Puntos seleccionados en la pasta						
1	24.71	9.69	5.99	--	2.25	2.35
2	25.74	21.01	16.02	--	1.18	1.60
<i>Promedio</i>	<i>25.22</i>	<i>15.35</i>	<i>11.00</i>	--	<i>1.71</i>	<i>1.97</i>
Puntos seleccionados en el bio-agregado						
3	22.67	8.34	2.08	--	4.82	1.74
4	14.84	12.70	4.70	--	2.55	1.45
5	14.04	9.78	1.34	--	5.24	1.53
<i>Promedio</i>	<i>17.18</i>	<i>8.77</i>	<i>2.70</i>	--	<i>4.20</i>	<i>1.57</i>

El análisis químico se resume en la tabla anterior, donde se puede corroborar que el calcio (Ca) es el elemento predominante, se tiene un contenido del 42.4%, seguido del silicio (Si) con un contenido del 24.1%, le sigue el aluminio (Al) con un contenido del 13.7%, el hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) con un 5.9%, el azufre ( $\text{SO}_3$ ) con un 5.9% y de manera minoritaria, se tiene al sodio, cloro, entre otros con un porcentaje menor al 10%.

#### 4.6.2.2 Mezcla SBP

En la figura 4.21, se muestra la espectroscopía realizada, así mismo en la tabla 4.18, se presentan los datos correspondientes a la mezcla SBP. En este caso se seleccionaron 2 puntos al interior de la matriz puzolánica y 3 puntos en el interior del bio-agregado.



**Figura 4.21. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla SBP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio**

En la figura anterior se puede observar que el calcio sigue siendo el elemento con mayor presencia, pero en este caso no logra penetrar en su totalidad hacia la

corteza de girasol, lo que hace suponer que la difusión de los iones de calcio en el bio-agregado mencionado anteriormente, es lenta, o bien se realiza de manera parcial (ver figura 4.20d). Por otro lado, el silicio (ver figura 4.20c) también tiene una presencia importante, la cual se encuentra presente una parte minoritaria en la matriz puzolánica, pero en la corteza de girasol se hace mayoritariamente presente. El aluminio aparece de manera minoritaria en la corteza de girasol y con mayor presencia se denota en la matriz cementante. En tabla 4.202 se describe el contenido en porcentaje en masa de los elementos presentes en la muestra.

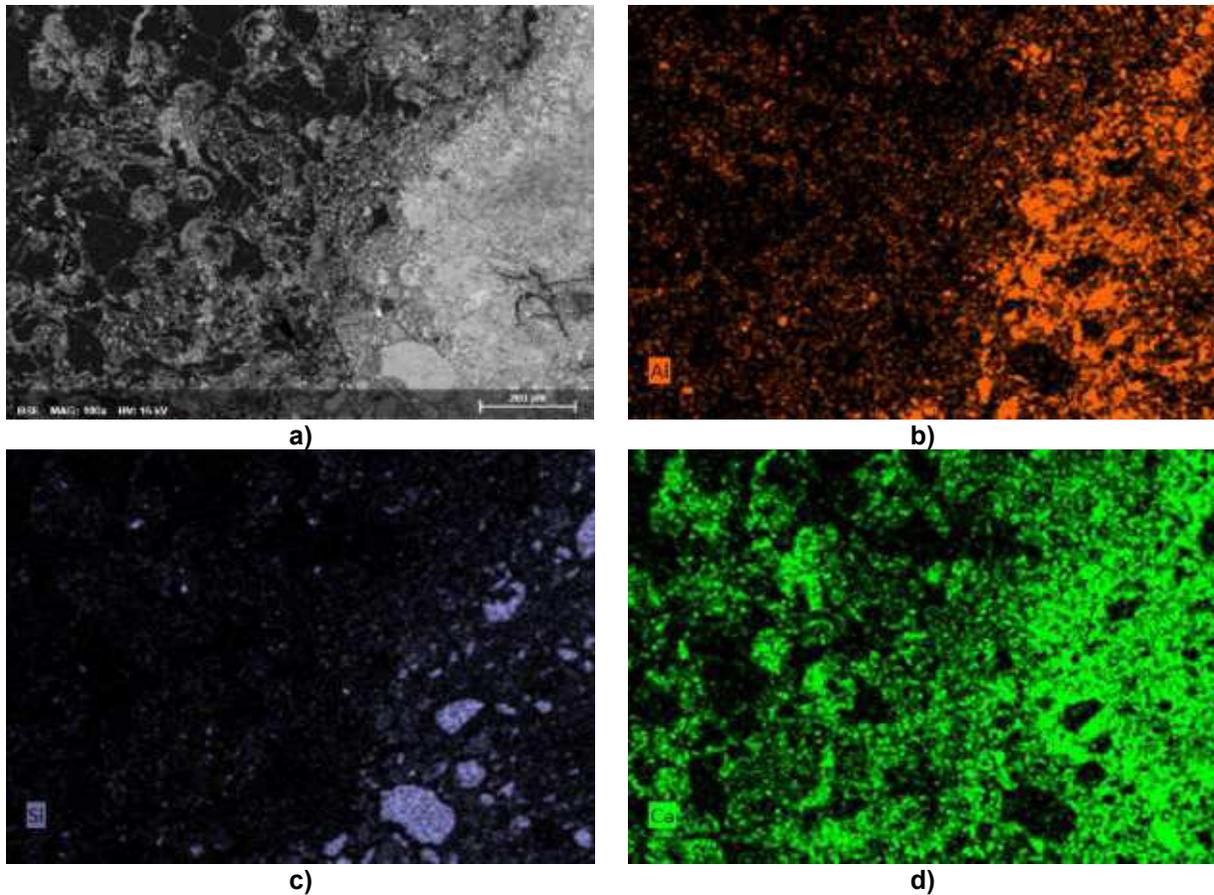
**Tabla 4.20. Contenido de masa de compuestos en la mezcla SBP en porcentaje**

Puntos	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
Puntos seleccionados en la pasta						
1	10.31	16.69	14.15	0.09	1.00	2.11
2	25.07	11.37	9.17	0.34	0.40	2.53
3	24.70	12.87	10.03	0.14	0.93	1.84
<i>Promedio</i>	<i>20.03</i>	<i>13.64</i>	<i>11.12</i>	<i>0.19</i>	<i>0.78</i>	<i>2.16</i>
Puntos seleccionados en el bio-agregado						
4	33.68	0.32	0.74	1.16	0.21	0.54
5	39.69	1.23	0.73	2.04	0.12	0.73
6	11.64	0.49	0.42	0.68	0.08	0.46
<i>Promedio</i>	<i>28.34</i>	<i>0.68</i>	<i>0.63</i>	<i>1.29</i>	<i>0.14</i>	<i>0.58</i>

Del análisis químico se muestra que el calcio (Ca) es el elemento predominante, se tiene un contenido del 48.3%, seguido del silicio (Si) con un contenido del 14.3%, le sigue el aluminio (Al) con un contenido del 11.7%, el hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 0.9%, el azufre (SO<sub>3</sub>) con un 2.7% y de manera minoritaria, se tiene al sodio, cloro, entre otros con un porcentaje menor al 12%.

#### 4.6.2.3 Mezcla SPP

En la 4.22 se muestra la espectroscopía realizada, así mismo en la tabla 4.19, se presentan los datos correspondientes a la mezcla SPP. En este caso se seleccionaron 2 puntos al interior de la matriz puzolánica y 3 puntos en el interior del bio-agregado.



**Figura 4.22. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla SPP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio**

El calcio es el elemento con una presencia mayoritaria, en este caso logra penetrar en su totalidad hacia la médula de girasol, la solubilidad del calcio se asocia con la difusión rápida de los iones de calcio (ver figura 4.21d). Por otro lado, el silicio (ver figura 4.21c) también tiene una presencia importante, la cual se encuentra presente una parte minoritaria en la matriz puzolánica, pero en la corteza de girasol se hace mayoritariamente presente. El aluminio aparece de manera minoritaria en la corteza de girasol y con mayor presencia se denota en la matriz cementante.

El calcio se hace presente tanto en la médula de girasol como en la matriz puzolánica, también el aluminio y el silicio se muestra en menor medida en la médula de girasol que en la matriz puzolánica. En este caso, la médula de girasol tiene una alta absorción, sin embargo, en el bio-agregado no se puede apreciar en una mayor medida como se aprecia en la figura 4.21a) y 4.21b); en la figura 4.21b) el bio-agregado el silicio no se propaga en mayor medida. En tabla 4.21 se describe el contenido en porcentaje en masa de los elementos presentes en la muestra.

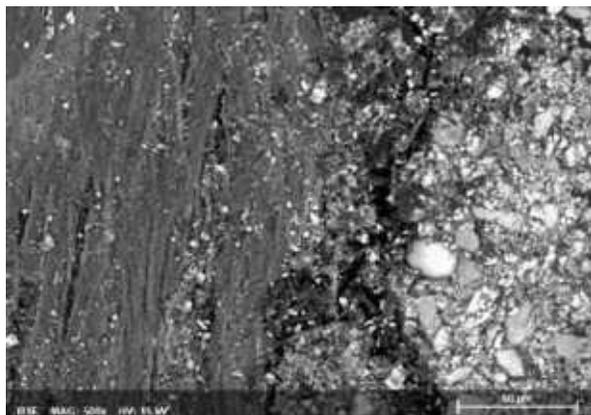
**Tabla 4.21. Contenido de masa de compuestos en la mezcla SPP en porcentaje**

Puntos	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
Puntos seleccionados en la pasta						
1	3.49	39.58	32.80	--	32.80	0.49
2	21.21	23.88	11.30	--	11.30	0.57
Promedio	12.35	31.73	22.05	--	22.05	0.53
Puntos seleccionados en el bio-agregado						
3	34.34	9.73	3.05	--	4.61	6.41
4	36.06	12.29	3.87	--	0.73	0.85
5	0.55	0.16	0.06	--	0.03	0.25
Promedio	23.65	7.39	2.33	--	1.79	2.50

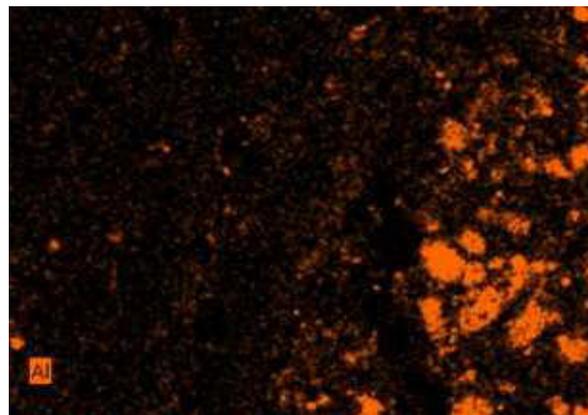
Del análisis químico se muestra que el calcio (Ca) es el elemento predominante, se tiene un contenido del 30%, seguido del silicio (Si) con un contenido del 39%, le sigue el aluminio (Al) con un contenido del 25%, el hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 3%, el azufre (SO<sub>3</sub>) con un 3% y de manera minoritaria, se tiene al sodio, titanio, cloro, entre otros con un porcentaje menor al 1%.

#### 4.6.2.4 Mezcla CBP

En la figura 4.23, se muestra la espectroscopía realizada, así mismo en la tabla 4.20, se presentan los datos correspondientes a la mezcla CBP. En este caso se seleccionaron 2 puntos al interior de la matriz puzolánica y 3 puntos en el interior del bio-agregado.



a)



b)

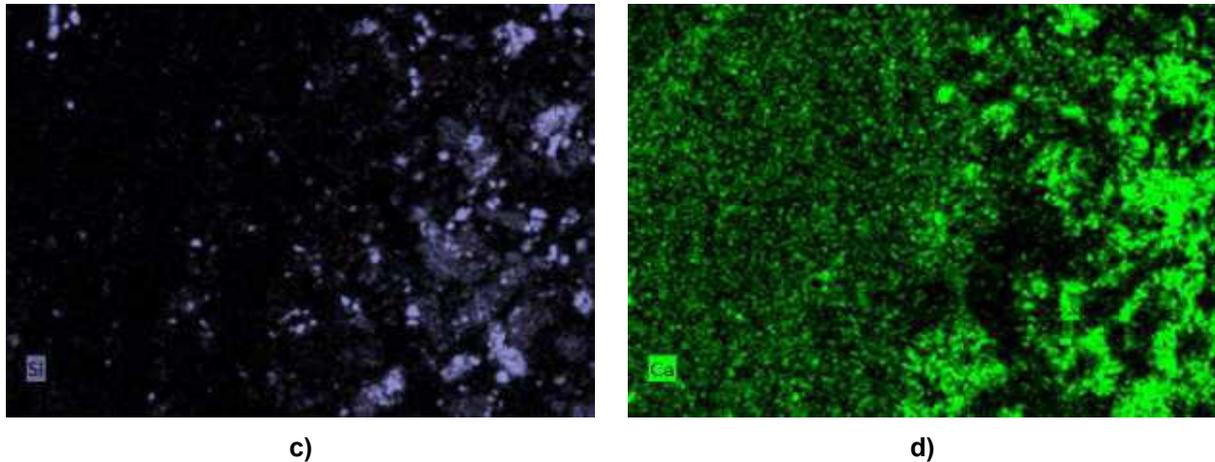


Figura 4.23. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla CBP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio

La solubilidad del calcio se asocia con la difusión rápida de los iones de calcio en la corteza de maíz (ver figura 4.22d). Por otro lado, el silicio (ver figura 4.22c) también tiene una presencia importante, la cual se encuentra presente una parte minoritaria en la matriz puzolánica, pero en la corteza de girasol se hace mayoritariamente presente. El aluminio aparece de manera minoritaria en la corteza de maíz y con mayor presencia se denota en la matriz cementante. El calcio se hace presente tanto en el bio-agregado como en la matriz puzolánica, también el aluminio y el silicio se muestra en menor medida en el bio-agregado que en la matriz puzolánica. En tabla 4.22 se describe el contenido en porcentaje en masa de los elementos presentes en la muestra.

Tabla 4.22. Contenido de masa de compuestos en la mezcla CBP en porcentaje

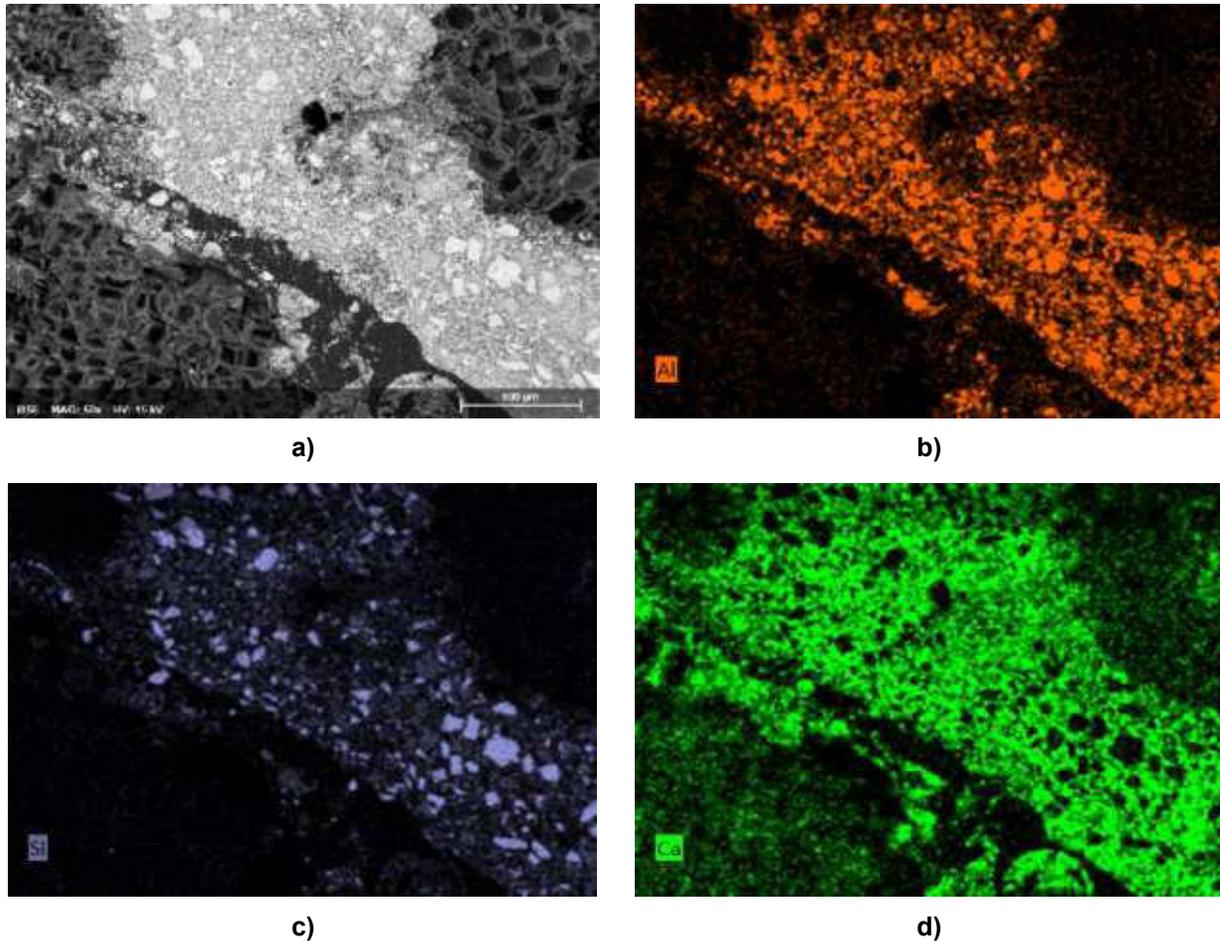
Puntos	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
Puntos seleccionados en la pasta						
1	31.71	1.57	0.98	0.07	0.24	--
2	34.91	0.57	0.55	0.14	0.27	--
<i>Promedio</i>	<i>33.31</i>	<i>0.91</i>	<i>0.76</i>	<i>0.10</i>	<i>0.25</i>	--
Puntos seleccionados en el bio-agregado						
3	18.94	10.34	1.48	0.10	0.77	--
4	3.84	40.77	33.07	0.12	1.44	--
5	5.02	36.57	28.63	0.15	3.17	--
<i>Promedio</i>	<i>9.26</i>	<i>29.22</i>	<i>21.06</i>	<i>0.12</i>	<i>1.79</i>	--

Del análisis químico se muestra que el calcio (Ca) es el elemento predominante, se tiene un contenido del 42.5%, seguido del silicio (Si) con un contenido del 30.2%, le sigue el aluminio (Al) con un contenido del 21.8%, el hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 2%, y

por otro lado se tiene al sodio, azufre, cloro, entre otros con un porcentaje menor al 4%.

#### 4.6.2.5 Mezcla CPP

En la figura 4.24, se muestra la espectroscopía realizada, así mismo en la tabla 4.21, se presentan los datos correspondientes a la mezcla CPP. En este caso se seleccionaron 2 puntos al interior de la matriz puzolánica y 3 puntos en el interior del bio-agregado.



**Figura 4.24 Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla CPP, b) aluminio, c) silicio, d) calcio**

El calcio es el elemento con una presencia mayoritaria, en este caso logra penetrar en su totalidad hacia la médula de girasol, la solubilidad del calcio se asocia con la difusión rápida de los iones de calcio (ver figura 4.23d). Por otro lado, el silicio (ver figura 4.23c) también tiene una presencia importante, la cual se encuentra presente una parte minoritaria en la matriz puzolánica, pero en la corteza de girasol se hace mayoritariamente presente. El calcio se hace presente tanto en la médula de maíz como en la matriz puzolánica, también el aluminio y el silicio se muestra en menor

medida en la médula de girasol que en la matriz puzolánica. En este caso, la médula de maíz tiene una alta absorción, sin embargo, en el bio-agregado no se puede apreciar en una mayor medida como se aprecia en la figura 4.23a) y 4.23b); en la figura 4.23b) el bio-agregado el silicio no se propaga en mayor medida. En tabla 4.23 se describe el contenido en porcentaje en masa de los elementos presentes en la muestra.

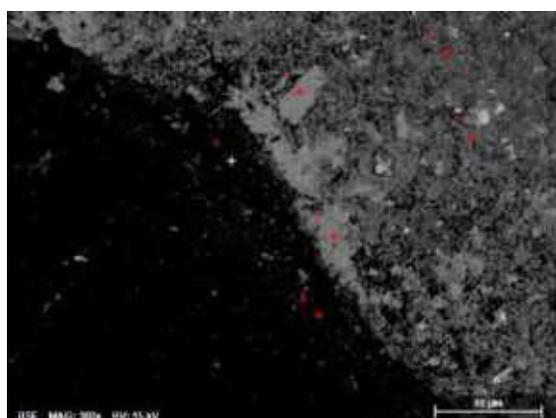
**Tabla 4.23. Contenido de masa de compuestos en la mezcla CPP en porcentaje**

Puntos	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
Puntos seleccionados en la pasta						
1	56.2	8.64	11.03	--	3.7	--
2	40.5	15.16	4.57	--	1.61	--
Promedio	48.35	11.9	7.8	--	2.655	--
Puntos seleccionados en el bio-agregado						
3	34.08	5.35	2.62	--	1.58	--
4	20.35	2.56	1.28	--	1.16	--
5	14.58	1.67	0.19	--	0.12	--
Promedio	23.0	3.19	1.36	--	0.95	--

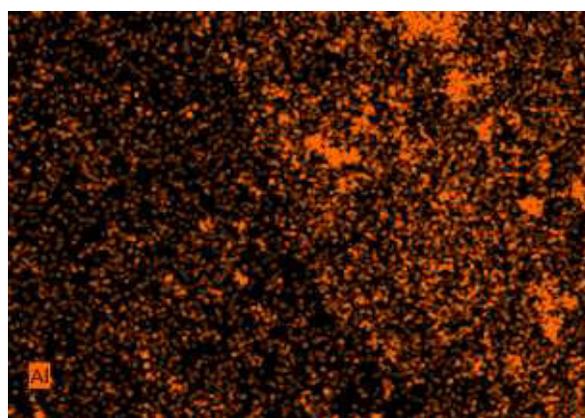
Del análisis químico se muestra que el calcio (Ca) es el elemento predominante, se tiene un contenido del 48.3%, seguido del silicio (Si) con un contenido del 15.1%, le sigue el aluminio (Al) con un contenido del 9.2%, el hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 3.6%, y de manera minoritaria, se tiene al sodio, cloro, entre otros con un porcentaje mayor al 20%.

#### 4.6.2.6 Mezcla HL

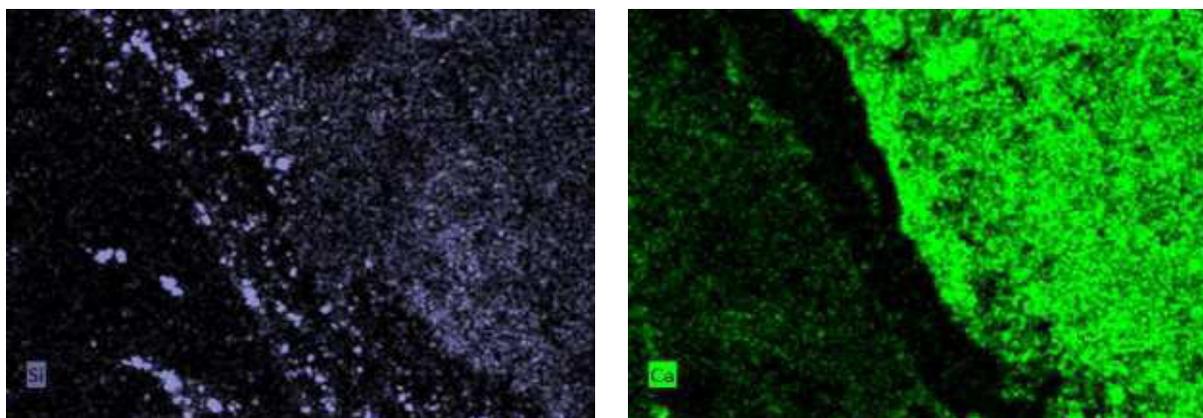
En la figura 4.25, se muestra la espectroscopía realizada, así mismo en la tabla 4.22, se presentan los datos correspondientes a la mezcla HL. En este caso se seleccionaron 2 puntos al interior de la matriz puzolánica y 3 puntos en el interior del bio-agregado.



a)



b)



c)

d)

**Figura 4.25 Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla HL, b) aluminio, c) silicio, d) calcio**

En esta mezcla, el elemento predominante es el calcio, ya que el cementante utilizado es una cal comercial con una mezcla de cemento hidráulico, también se aprecia que ocurre el mismo efecto de disolución en el cáñamo que en la mezcla HP (ver figura 4.24d), por otro lado, el silicio presente en la muestra se observa con igual correspondencia dentro de la matriz cementante y en el cáñamo (ver figura 4.24c), por otro lado, el aluminio corresponde a una parte minoritaria en la mezcla (ver figura 4.24b). En tabla 4.24 se describe el contenido en porcentaje en masa de los elementos presentes en la muestra.

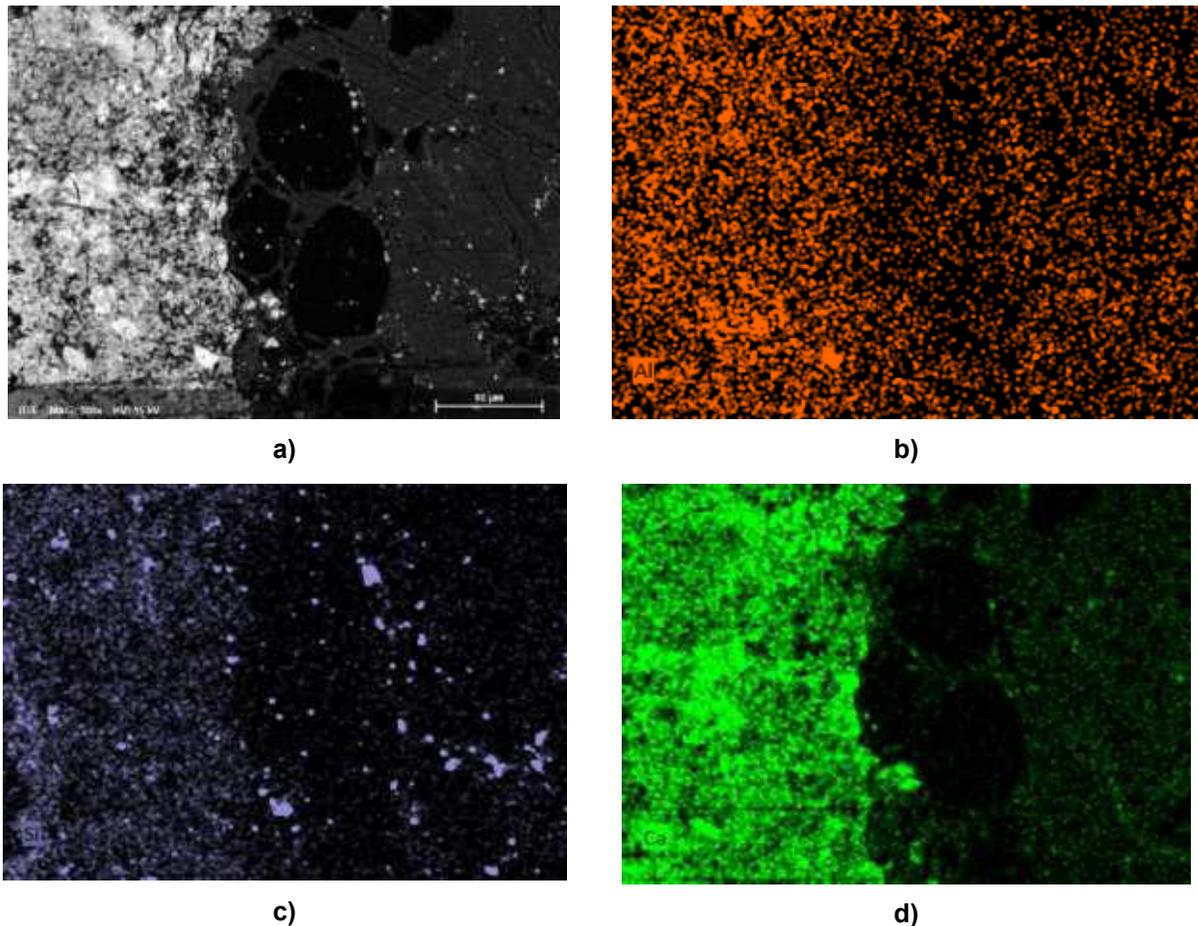
**Tabla 4 24. Contenido de masa de compuestos en la mezcla HL en porcentaje**

Puntos	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
Puntos seleccionados en la pasta						
1	61.62	8.64	11.03	2.67	3.70	12.70
2	73.72	15.16	4.57	1.42	1.61	3.52
Promedio	67.67	11.90	7.80	2.05	2.66	8.11
Puntos seleccionados en el bio-agregado						
3	73.57	15.84	2.62	1.20	1.58	5.19
4	79.85	13.80	1.28	1.29	1.16	2.63
5	95.11	4.30	0.19	0.09	0.12	0.19
Promedio	82.84	11.31	1.36	0.86	0.95	2.67

Del análisis químico se muestra que el calcio (Ca) es el elemento predominante, se tiene un contenido del 75%, seguido del silicio (Si) con un contenido del 11.6%, le sigue el aluminio (Al) con un contenido del 4.6%, el hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 1.8%, y de manera minoritaria, se tiene al sodio, cloro, magnesio, entre otros con un porcentaje menor al 7%.

#### 4.6.2.7 Mezcla SBL

En la figura 4.26, se muestra la espectroscopía realizada, así mismo en la tabla 4.23., se presentan los datos correspondientes a la mezcla SBL. En este caso se seleccionaron 2 puntos al interior de la matriz puzolánica y 3 puntos en el interior del bio-agregado.



**Figura 4.26. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS): a) imagen de espectroscopía en la mezcla SBL, b) aluminio, c) silicio, d) calcio**

El calcio es el elemento principal en esta mezcla, también se aprecia que ocurre el mismo efecto de disolución en el cáñamo que en la mezcla SBL (ver figura 4.25d), por otro lado, el silicio presente en la muestra se observa con igual correspondencia dentro de la matriz cementante y en la corteza de girasol (ver figura 4.25c), por otro lado, el aluminio corresponde a una parte minoritaria en la mezcla (ver figura 4.25b). En tabla 4.25 se describe el contenido en porcentaje en masa de los elementos presentes en la muestra.

**Tabla 4.25. Contenido de masa de compuestos en la mezcla SBL en porcentaje**

Puntos	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
Puntos seleccionados en la pasta						
1	52.70	20.67	12.77	--	5.37	5.01
2	38.28	31.25	23.83	--	1.75	2.37
Promedio	45.49	25.96	18.30	--	3.56	3.69
Puntos seleccionados en el bio-agregado						
3	52.65	19.37	4.83	--	0.86	4.05
4	39.67	33.95	12.57	--	0.45	3.87
5	40.58	28.27	3.86	--	1.22	4.43
Promedio	44.30	27.19	7.08	--	0.84	4.11

Del análisis químico se muestra que el calcio (Ca) es el elemento predominante, se tiene un contenido del 44.9%, seguido del silicio (Si) con un contenido del 26.6%, le sigue el aluminio (Al) con un contenido del 12.7%, el hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un 2.2%, y de manera minoritaria, se tiene al sodio, cloro, magnesio, entre otros con un porcentaje menor al 7%. De los análisis realizados a las mezclas mostradas anteriormente, se observa que las cantidades de calcio en las mezclas elaboradas con la matriz cementante comercial el calcio se presenta el mayor medida en comparación a la mezcla puzolánica; sin embargo, en las imágenes se observa que algunos elementos como el aluminio tiene una mayor presencia que en comparación del calcio, pero en los análisis químicos se puede verificar que los contenidos son superiores, esto probablemente sea por los colores establecidos en el ensayo. La difusión de los iones de calcio es más rápida en las mezclas HP, SBP, SPP, HL y SBL; no obstante, en la mezcla CBP los extractos hidrosolubles tienen un efecto importante en la difusión de los iones de calcio. Lo anterior también puede tener un fuerte impacto en la adherencia de la matriz puzolánica y en la resistencia a compresión de la mezcla CBP.

## 4.7 Conclusiones

### Contexte français

Les principaux paramètres pour la fabrication des bétons à base de plantes sont la densité apparente et l'absorption d'eau à 1 minute. Les quantités utilisées dans la conception des mélanges de béton végétal ont été obtenues par l'optimisation chimique molaire des 2 principaux agents cimentaires, la procédure étant décrite dans la thèse de doctorat développée par Dinh [136]. Ces quantités permettent le développement des réactions chimiques sans la formation de produits d'hydratation comme dans le cas de l'agent cimentaire commercial, où les produits d'hydratation tels que la portlandite sont encore présents plusieurs jours après. En outre, l'utilisation d'activateurs alcalins tels que le sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ) permet d'accélérer les réactions de prise dans les mélanges pouzzolaniques, tandis que dans le matériau cimentaire commercial, il y a une quantité de matériau cimentaire hydraulique, qui développe des résistances à un âge précoce par rapport au matériau cimentaire pouzzolanique. Comme mentionné ci-dessus, la quantité de bio-agrégats ainsi que la quantité d'eau à utiliser sont liées à la densité apparente et à l'absorption d'eau à 1 minute et par une corrélation entre la densité du bio-agrégat de référence (chanvre) et la densité du bio-agrégat utilisé dans la fabrication des mélanges ; la même corrélation se produit avec l'absorption d'eau à 1 minute d'immersion.

Au cours du processus de conception des mélanges, le mélange SBP a été celui qui nécessitait la plus grande quantité de bio-agrégat, car sa densité apparente est 1,11 fois supérieure à celle du chanvre ; en revanche, le mélange SPP a nécessité une plus petite quantité de bio-agrégat car sa densité est 0,1 fois celle du chanvre ; cependant, dans la corrélation correspondant au taux d'absorption d'eau à 1 minute d'immersion, l'écorce de tournesol (SB) a obtenu une corrélation de 0,67 l'absorption du chanvre, et la moelle de tournesol a obtenu une corrélation de 7,25 fois l'absorption du chanvre ; par conséquent, la quantité d'eau dans le SBP était inférieure à celle du mélange de référence, et dans le mélange SPP la quantité d'eau utilisée était la plus élevée de toute l'étude.

Une fois les bétons à base de plantes produits, les densités ont été contrôlées à l'état frais, à température et humidité ambiantes (60 jours) et à l'état sec au four (90 jours). Les résultats indiquent que le mélange de référence à l'état frais a une densité de  $729,3 \pm 9 \text{ kg/m}^3$ , mais à l'état sec au four, il a une densité de  $396 \pm 5,9 \text{ kg/m}^3$ , ce qui indique une teneur en humidité de 84,16%, ce mélange étant celui qui a présenté une plus faible densité à l'état frais et une plus faible densité à l'état sec au four ; le cas opposé est développé dans le mélange SMP, où une densité à l'état frais de  $1100,4 \pm 98,7 \text{ kg/m}^3$  et une densité à l'état sec au four de  $607,1 \text{ kg/m}^3$  ont été obtenues, ce qui indique une teneur en humidité proche de 81,52%. C'est dans cette partie que se reflète l'influence de la porosité des bio-agrégats dans l'absorption de l'eau et cette quantité absorbée s'évapore lors du séchage, provoquant une diminution du poids et par conséquent de la densité des bétons végétaux.

La porosité a également un effet important sur la conductivité thermique. De plus, l'un des principaux facteurs influençant la conductivité thermique est l'humidité relative présente dans l'environnement. Comme l'ont montré les résultats, les

meilleures conductivités thermiques à l'état sec au four ont été obtenues pour les mélanges HP, CBP et SBP ; en revanche, les meilleures conductivités thermiques dans des conditions d'humidité ambiante ont été obtenues pour les mélanges HP, CBP et CMP. Comme mentionné dans la section 4.3.2, il existe également une corrélation avec le type d'agent cimentaire utilisé, dans ce cas, les conductivités thermiques des bétons à base de plantes réalisés avec l'agent cimentaire commercial augmentent notamment, à l'état sec au four la meilleure conductivité thermique est développée dans le mélange HL, la mesure de la conductivité thermique avec l'humidité relative ambiante augmente, étant le même mélange HL celui avec la meilleure conductivité thermique. De ce qui précède, nous pouvons déduire ce qui suit : A l'état sec au four : **HP<CBP<SBP<SPP<CMP<CPP<SMP<HL<SBL** ; avec une humidité relative ambiante **HP<CBP<CMP<SBP<SPP<CPP<SMP<HL<SBL**. Dans les cas ci-dessus, on constate que les mélanges pouzzolaniques ont une conductivité thermique inférieure à celle des mélanges réalisés avec le matériau cimentaire commercial. A cela s'ajoute l'effet du transfert thermique qui se produit entre la matrice cimentaire et les bio-agrégats dans les deux cas, expliqué dans la figure 4.7. Si nous comparons les valeurs obtenues pour la conductivité mesurée avec l'humidité relative ambiante avec les valeurs présentées dans la norme NMX-C-460-ONNCCE-2009, les bétons à base de plantes produits en France respecteraient les exigences minimales établies dans cette norme ; de même, les valeurs de résistance thermique seraient respectées, mais il convient de mentionner que dans cette dernière valeur, l'épaisseur des matériaux utilisés joue un rôle important, en simulant que les bétons à base de plantes ont une épaisseur de 15 cm, les valeurs de résistance thermique établies dans la norme susmentionnée sont respectées.

D'autre part, la résistance à la compression des bétons à base de plantes fabriqués avec l'agent cimentaire pouzzolanique, le mélange SPP développe la résistance à la compression la plus élevée, cependant, la déformation atteinte à la contrainte maximale était la plus faible de l'étude. D'autre part, la déformation maximale de l'étude est présentée dans le mélange SBP avec une déformation de 11.3%. Du tableau 4.17, en termes de contrainte maximale, on peut déduire ce qui suit : **CBP < CPP < CMP < SBP < HP**. Cependant, si l'on parle en termes de déformation, il en résulte ce qui suit : **SPP < CPP < SMP < CMP < HP < SBP**. C'est dans ce cas que le type de bio-agrégat a une grande influence sur les résultats de la compression. Dans les mélanges élaborés avec le matériau cimentaire commercial, le mélange SBL, la valeur de contrainte maximale est atteinte, de même dans ce même mélange la déformation maximale est atteinte, de la même manière, des résultats présentés dans le tableau 4.17 on peut déduire : **HL < SBL**, aussi bien dans le comportement de la contrainte maximale que dans le pourcentage de déformation par rapport à la contrainte maximale. D'après ce qui précède, les mélanges qui semblent avoir un excès d'eau sont ceux qui ont tendance à présenter les meilleures propriétés mécaniques.

En raison des faibles performances mécaniques du mélange CBP, il a été décidé de réaliser une étude des interactions chimiques entre les extraits hydrosolubles des bio-agrégats et les agents cimentaires, en utilisant dans un premier temps la calorimétrie isotherme développée au point 4.4.1. Les résultats ont montré que dans

les mélanges HP, SBP et SPP, la libération de la chaleur produite par les réactions d'hydratation se développe de façon normale et de manière similaire au mélange réalisé avec de l'eau distillée et l'agent cimentaire pouzzolanique. Cependant, dans le mélange CBP, les réactions d'hydratation sont inhibées par les extraits hydrosolubles présents dans l'écorce de maïs, c'est pourquoi la résistance à la compression n'atteint pas les mêmes valeurs que le reste des mélanges pouzzolaniques, en outre, il n'a pas permis l'adhérence de l'écorce de maïs avec la matrice cimentaire, ce qui a été mis en évidence dans une plus grande mesure pendant l'essai de compression, puisque, comme indiqué dans la section 4.4.1, la matrice pouzzolanique s'est pulvérisée au fur et à mesure que la contrainte était appliquée. De même, le test de calorimétrie a été appliqué aux mélanges réalisés avec le matériau cimentaire commercial, dans lequel il a été observé que le taux de libération de chaleur était similaire à celui du mélange de référence commercial.

En même temps, des analyses minéralogiques (TGA et XRD) ont été effectuées 2 jours et 60 jours après la préparation des mélanges pouzzolaniques et avec l'agent cimentaire commercial. A partir de ces analyses, il a été confirmé qu'aucune réaction liée aux produits d'hydratation ne se développe dans le mélange CBP. Après analyse des données recueillies, le mélange CBP peut être modifié de manière à ce qu'un traitement avec un coulis de l'agent cimentaire pouzzolanique à l'écorce de maïs permette d'éviter le développement de réactions chimiques.

La microscopie électronique à balayage et la spectroscopie à dispersion d'énergie ont également été réalisées. Un dénominateur commun à tous les mélanges est le retrait au séchage des particules de bio-agrégat, cependant, dans les mélanges SPP et CPP, et dans le cas du mélange CBP, le bio-agrégat a été enveloppé dans le mélange pouzzolanique, à nouveau dans la moelle de maïs et de tournesol, la porosité a un impact sur l'absorption d'eau. Dans le test de spectroscopie à dispersion d'énergie, le calcium est l'élément le plus présent dans les mélanges réalisés avec le ciment pouzzolanique et dans le ciment commercial ; dans ce cas, les ions calcium se dissolvent plus rapidement que le reste des éléments présents dans les différents mélanges.

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour l'élaboration de bétons à base de plantes, où les résultats obtenus dans la caractérisation des bio-agrégats sont utilisés. A priori, l'écorce de tournesol semble être la meilleure alternative pour la fabrication de bétons à base de plantes, car elle est largement disponible en France ; d'autre part, ce bio-agrégat présente une absorption d'eau plus faible par rapport au chanvre, ainsi qu'une densité apparente similaire ; cependant, la conductivité thermique de l'écorce de tournesol est légèrement supérieure à celle du chanvre.

### **Contexte mexicain**

En raison de situations indépendantes de la volonté du projet, seuls les mélanges à base de ciment portland ordinaire, de cendres volantes et de chaux commerciale ont été sélectionnés. Le mélange composé de 20 % de ciment portland ordinaire, de 60 % de cendres volantes et de 20 % de chaux a développé la résistance à la compression la plus élevée à 28 jours, mais celle-ci diminue de manière significative

à 71 jours, de sorte que ce mélange peut être utilisé dans la fabrication de bétons à base de plantes au Mexique.

### **Contexto francés**

Los parámetros principales para la fabricación de los concretos vegetales son la densidad aparente y la absorción de agua a 1 minuto. Las cantidades que se utilizaron en el diseño de las mezclas de concreto vegetal fueron obtenidas a través de la optimización química molar de los 2 principales cementantes, el procedimiento se describe en la tesis doctoral desarrollada por Dinh [136]. Dichas cantidades permiten el desarrollo de las reacciones químicas sin la formación de productos de hidratación como en el caso del cementante comercial, donde aún a varios días después se presentan productos de hidratación como principalmente la portlandita. Además, el uso de activadores alcalinos como el sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ) ayuda a acelerar las reacciones de fraguado en las mezclas puzolánicas, mientras en el cementante comercial, se cuenta con una cantidad de cementante hidráulico, el cual desarrolla resistencias a edades tempranas en comparación del cementante puzolánico. Como se mencionó anteriormente, la cantidad de los bio-agregados, así como la cantidad de agua a utilizar está relacionada con la densidad aparente y la absorción de agua a 1 minuto y a través de una correlación entre la densidad del bio-agregado de referencia (cáñamo) y la densidad del bio-agregado empleado en la fabricación de las mezclas; la misma correlación sucede con la absorción de agua a 1 minuto de inmersión.

Durante el proceso del diseño de las mezclas, la mezcla SBP fue la que mayor cantidad de bio-agregados requirió, esto debido a que la densidad aparente es 1.11 veces mayor a del cáñamo; por otro lado, la mezcla SPP requirió una cantidad de bio-agregado menor pues su densidad es de 0.1 veces la densidad del cáñamo; sin embargo, en la correlación correspondiente a la tasa de absorción de agua a 1 minuto de inmersión, la corteza de girasol (SB), obtuvo una correlación de 0.67 la absorción del cáñamo, y la médula de girasol obtuvo una correlación de 7.25 veces la absorción del cáñamo, por consiguiente, la cantidad de agua en la SBP fue menor con respecto a la mezcla de referencia y en la mezcla SPP la cantidad de agua utilizada fue la más grande de todo el estudio.

Una vez elaborados los concretos vegetales se realizó el seguimiento correspondiente a las densidades en estado fresco, a temperatura y humedad ambiental (60 días) y en estado seco al horno (90 días). Los resultados indican que la mezcla de referencia en estado fresco tiene una densidad fresca de  $729.3 \pm 9$  kg/m<sup>3</sup>, pero en estado seco al horno tiene una densidad de  $396 \pm 5.9$  kg/m<sup>3</sup>, lo que indica un contenido de humedad del 84.16%, siendo esta mezcla la que reportó una menor densidad fresca y una menor densidad en estado seco al horno; caso contrario se desarrolla en la mezcla SMP, donde se obtuvo una densidad fresca de  $1100.4 \pm 98.7$  kg/m<sup>3</sup> y una densidad seca al horno de  $607.1$  kg/m<sup>3</sup>, lo que indica un contenido de humedad cercano al 81.52%. Es en esta parte donde se refleja la influencia de la porosidad de los bio-agregados en la absorción de agua y esta cantidad absorbida se evapora en el secado, haciendo una disminución del peso y por consiguientemente la densidad de los concretos vegetales.

La porosidad también tiene un efecto importante en la conductividad térmica, también, uno de los principales factores que tiene injerencia en la conductividad térmica es la humedad relativa presente en el ambiente. Como lo mostraron los resultados, las mejores conductividades térmicas en estado seco al horno se obtuvieron en las mezclas HP, CBP y SBP; por otro lado, las mejores conductividades térmicas en condiciones de humedad ambiental se obtienen en las mezclas HP, CBP y CMP. Como se mencionó en el apartado 4.3.2 existe también una correlación con el tipo de cementante utilizado, en este caso, las conductividades térmicas de los concretos vegetales elaborados con el cementante comercial se elevan notablemente, en estado seco al horno la mejor conductividad térmica se desarrolla en la mezcla HL, la medición de la conductividad térmica con humedad relativa ambiental aumenta, siendo la misma mezcla HL la que tiene la mejor conductividad térmica. De lo anterior podemos deducir lo siguiente: En estado seco al horno: **HP<CBP<SBP<SPP<CMP<CPP<SMP<HL<SBL**; con humedad relativa ambiental **HP<CBP<CMP<SBP<SPP<CPP<SMP<HL<SBL**. En los casos anteriores, se observa que las mezclas puzolánicas tienen una conductividad térmica menor con respecto a las mezclas elaboradas con el cementante comercial. A esto debemos añadirle el efecto de la transferencia de calor que se produce entre la matriz cementante y los bio-agregados en ambos casos, lo cual se explica en la figura 4.7. Si comparamos los valores obtenidos de la conductividad medida con la humedad relativa ambiental con los valores que se presentan en la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009, los concretos vegetales elaborados en Francia, cumplirían con los requisitos mínimos que establece dicha norma; de igual manera, en los valores de resistencia térmica, se cumplirían, pero, cabe mencionar que en este último valor, el espesor de los materiales empleados tiene un papel importante, simulando que los concretos vegetales tienen un espesor de 15 cm, se cumplen con los valores de resistencia térmica establecidos en la norma anteriormente mencionada.

En otro orden de ideas, la resistencia a compresión de los concretos vegetales elaborados con el cementante puzolánico, la mezcla SPP desarrolla la mayor resistencia a compresión, sin embargo, la deformación alcanzada en el esfuerzo máximo fue la más baja del estudio. Por otro lado, la deformación máxima en el estudio se presenta en la mezcla SBP con una deformación 11.3%. De la tabla 4.17 hablando en términos de esfuerzo máximo se deduce lo siguiente: CBP < CPP < CMP < SBP < HP. Sin embargo, hablando en términos de deformación se deduce lo siguiente: SPP < CPP < SMP < CMP < HP < SBP. Es en este caso donde el tipo del bio-agregado tiene una gran influencia en los resultados a compresión. En las mezclas elaboradas con el cementante comercial, la mezcla SBL se alcanza el valor máximo de esfuerzo, así mismo en esta misma mezcla se alcanza la deformación máxima, de igual manera, de los resultados mostrados en la tabla 4.17 se puede deducir: HL < SBL, tanto en el comportamiento del esfuerzo máximo y en el porcentaje de deformación con respecto al esfuerzo máximo. De lo anterior, las mezclas que parecen tener un exceso de agua son las que mejores propiedades mecánicas suelen reportar.

Debido al pobre desempeño mecánico de la mezcla CBP, se optó por realizar un estudio de las interacciones químicas de los extractos hidrosolubles de los bio-agregados y los cementantes, como primer paso la calorimetría isotérmica

desarrollada en el punto 4.4.1. Los resultados arrojaron que en las mezclas HP, SBP y SPP, se la liberación del calor producto de las reacciones de hidratación se desarrolla de manera normal y de manera similar a la mezcla elaborada con agua destilada y el cementante puzolánico. No obstante, en la mezcla CBP, las reacciones de hidratación son inhibidas debido a los extractos hidrosolubles que se presentan en la corteza de maíz, por ello la resistencia a compresión no alcanza los mismos valores que el resto de las mezclas puzolánicas, además, no permitió la adherencia de la corteza de maíz con la matriz cementante, lo anterior se evidenció en mayor medida mientras el ensayo a compresión se realizaba; pues como se ha expresado en el apartado 4.4.1. la matriz puzolánica se pulverizaba conforme el esfuerzo era aplicado. De igual manera, el ensayo de calorimetría se aplicó a las mezclas elaboradas con el cementante comercial, en las cuales se observó que la tasa de liberación de calor fue similar con respecto a la mezcla comercial de referencia.

A la par, se llevaron a cabo análisis mineralógicos (TGA y DRX) a los 2 días y a los 60 días después de la elaboración de las mezclas puzolánicas y con el cementante comercial. A través de dichos análisis, se confirmó que en la mezcla CBP no se desarrolla ninguna reacción vinculada a productos de hidratación. Tras analizar la información recabada, la mezcla CBP puede modificarse de tal manera que un tratamiento con una lechada del cementante puzolánico a la corteza de maíz ayude a prevenir que no se desarrollen las reacciones químicas.

De igual manera se realizó la microscopía electrónica de barrido y la espectroscopía de energía dispersiva. Un común denominador en todas las mezclas es la contracción por secado de las partículas de bio-agregados, sin embargo, en las mezclas SPP y CPP, y en el caso de la mezcla CBP el bio-agregado se ha envuelto en la mezcla puzolánica, nuevamente en las médulas de maíz y girasol, la porosidad tiene un impacto en la absorción de agua. En el ensayo referente a la espectroscopía de energía dispersiva, el calcio es el elemento que tienen mayor presencia en las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico y en el cementante comercial; en este caso los iones de calcio tienen una disolución más rápida que el resto de los elementos presentes en las diversas mezclas.

En este capítulo se presentan la metodología empleada para la elaboración de los concretos vegetales, donde se utilizan los resultados obtenidos en la caracterización de los bio-agregados. De manera preliminar para la fabricación de los concretos vegetales la corteza de girasol apunta a ser la mejor alternativa, pues la disponibilidad es muy amplia en Francia; por otro lado, este bio-agregado tiene una absorción de agua menor en comparación al cáñamo, así como una densidad aparente similar; sin embargo, la conductividad térmica de la corteza de girasol es ligeramente mayor a la del cáñamo.

#### **4.7.2 Contexto mexicano**

Debido a situaciones ajenas al proyecto, solo se realizó la selección de las mezclas elaboradas con cemento portland ordinario, ceniza volante y cal comercial, de los cuales la mezcla con un 20% de cemento portland ordinario, 60% de ceniza volante y 20% de cal desarrolló la resistencia a compresión más alta a los 28 días, pero esta

disminuye significativamente a los 71 días, por lo que esta mezcla puede ser utilizada en la fabricación de los concretos vegetales en México.

## CONCLUSIONES GENERALES

### Conclusiones específicas

Los bio-agregados obtenidos del tallo de la planta de girasol tienen un mejor rendimiento en comparación a los que se obtienen del tallo de la planta de maíz. En el caso de estos últimos, es necesario realizar una separación previa y recién cortados, pues la humedad presente en el tallo favorece la separación y por consiguiente el rendimiento del material obtenido. De igual manera, el proceso de tamizaje tiene un impacto considerable en los bio-agregados, pues en algunos bio-agregados como la corteza de girasol (SB) y de maíz (CB), se encontraron partículas mayores a 4 milímetros, lo anterior se realizó en Francia.

Los bio-agregados obtenidos del tallo de maíz en México, se observa un mayor rendimiento cuando son separados húmedos, pues a diferencia de los obtenidos en Francia, se recupera más del 50% del total del peso inicial. Sin embargo, es necesario nuevamente implementar un proceso minucioso de tamizaje, en especial en la corteza de maíz (CB).

La microestructura de los bio-agregados está ligada con las propiedades físicas de los bio-agregados, como se demostró en el caso de la médula de girasol (SP), la amplia red de poros ayuda a reducir la conductividad térmica y la densidad; sin embargo, en la absorción de agua tiene un impacto negativo, pues esta aumenta más del 1000% con respecto al cáñamo. En este mismo tenor, las cortezas girasol (SB) y de maíz (CB), tienen una gran similitud en sus propiedades físicas con el cáñamo (H), el cual es el bio-agregado de referencia. Y en el caso de las mezclas de corteza y médula de girasol (SM) y maíz (CM) tienen un comportamiento intermedio en las propiedades físicas. También, el tamaño de los bio-agregados empleados en la investigación (1 – 4 mm), reduce el área superficial de las partículas, lo que tiene un fuerte impacto en la absorción de agua, así como en la densidad aparente de todos los bio-agregados utilizados en la investigación.

En el diseño de los concretos vegetales es importante conocer a detalle la densidad aparente y la absorción de agua de los bio-agregados, pues estos dos parámetros son el punto de partida para conocer la cantidad de bio-agregados y la cantidad de agua de preabsorción y de reacción que son necesarias para producir el concreto vegetal; lo anterior se realiza a través de una correlación entre los valores obtenidos del cáñamo con respecto al bio-agregado que se ocupará en la mezcla; no obstante es necesario verificar el contenido de agua, porque durante el proceso de mezclado, la rotación de la olla de la revolvedora, genera partículas grandes de cementante que no se hidrata y es necesario pulverizarlas manualmente.

En México, la selección de la mezcla óptima para la elaboración de los concretos vegetales se basó en términos de resistencia a compresión, de los resultados

obtenidos a través de ensayos de resistencia a compresión en cubos de 5 x 5 x 5 cm; la mezcla #4 desarrolla una mayor resistencia a compresión con respecto a las otras 3, pero a los 71 días tiene una caída en la resistencia a compresión, probablemente se ocasiona por la adición del 60% de ceniza volante.

La extensa red de poros y la humedad relativa presente en el ambiente repercute de manera significativa en las propiedades físicas y en el desarrollo de las propiedades mecánicas de los concretos vegetales, tal como lo demuestran los resultados del trabajo, la menor conductividad térmica se obtiene en los concretos que tienen una baja densidad y 0% de humedad.

Los concretos vegetales tienen un gran potencial térmico y un gran campo de oportunidad en cuanto a la resistividad térmica se refiere, pues en México, la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009, establece valores que sin problemas los concretos vegetales elaborados en esta investigación pueden cumplir, e incluso, con un espesor menor a los 10 cm se encuentran más arriba que las envolventes térmicas convencionales que se utilizan en techos y muros.

La porosidad tiene un efecto negativo en la resistencia a compresión de las mezclas donde esta característica estructural es más evidente, también aumenta la deformación del concreto de manera significativa. El único caso donde la porosidad no es tan remarcada es en la mezcla elaborada con el cementante puzolánico y la médula de girasol (SPP), en esta mezcla se obtuvo la resistencia a compresión más alta de las mezclas elaboradas con el cementante puzolánico. Por otro lado, la resistencia a compresión más baja y la deformación más alta se obtuvo en la mezcla elaborada con la corteza de maíz y el cementante puzolánico (CBP).

Las mezclas elaboradas con el cementante comercial presentan una resistencia a compresión mayor con respecto a las mezclas puzolánicas, esto se debe a que el cementante tiene una parte mayoritaria de cal y a una adición de cemento portland, pero la deformación aumenta y es casi similar a las deformaciones obtenidas en las mezclas puzolánicas; de lo anterior, la mezcla elaborada con corteza de girasol (SBL) tiene el mejor comportamiento de todo el estudio.

A través de un análisis mineralógico, se determinó que los compuestos hidrosolubles presentes en la corteza de maíz de la mezcla CBP no desarrolla los minerales que son productos de las reacciones de hidratación del metacaolín (prácticamente las inhibe), lo que da como resultado una resistencia a compresión menor al resto de las mezclas elaboradas en el estudio, por consiguiente, la matriz puzolánica no se adhiere al bio-agregado, lo anterior se evidenció mientras se realizaba el ensaye a compresión de las probetas de la mezcla, por lo que la deformación registrada en el ensayo era resultado de la compactación de la corteza de maíz.

Los compuestos hidrosolubles como los monosacáridos, polisacáridos, fenoles, terpenos y ácidos orgánicos afectan el desarrollo de minerales que aportan rigidez al sistema de la matriz puzolánica y/o cementante.

En las mezclas con cementante comercial desarrollan productos de hidratación como la portlandita, esto debido a que la mezcla de los cementantes empleados para fabricar el batichavre no se encuentra optimizada.

En la mezcla donde se utilice la corteza de maíz, será necesario emplear un tratamiento previo, ya sea un lavado y secado del bio-agregado, o bien el uso de una lechada o material que revista o prepare de manera química, a fin de que actúe como una barrera ante los compuestos hidrosolubles, así mismo esto puede servir para mejorar la interfaz entre la matriz cementante o puzolánica con el bio-agregado.

#### Conclusiones generales

La obtención de los bio-agregados puede tener un mayor rendimiento empleando la separación en estado húmedo, también aplicando métodos de tamizaje con un mayor control.

Los bio-agregados que dan mejores resultados en las propiedades físicas y mecánicas de los concretos vegetales potencialmente, son aquellos que provienen del tallo de la planta de girasol

Las mejores resistencias a compresión se registran en las mezclas donde el contenido de agua es mayor.

Los concretos vegetales tienen un amplio campo de oportunidad en México, pues las normas presentan valores que pueden ser superados fácilmente.

Este tipo de concretos no son aptos para zonas sísmicas, para ello es necesario utilizar un sistema de marcos que le permitan resistir fuerzas de cortante laterales.

La disponibilidad del tallo de maíz en México es muy amplia, sin embargo, si serán empleados en la fabricación de concretos vegetales es necesario realizar un tratamiento previo para evitar efectos adversos en las propiedades mecánicas, los cuales serán causados por los compuestos hidrosolubles, sin embargo, es importante recordar que dependiendo del lugar donde se obtengan los tallos, la cantidad de compuestos hidrosolubles presentes en el mismo puede variar en concentración.

## **Recomendaciones en trabajos futuros**

Realizar el proceso de obtención de los bio-agregados en estado húmedo (recién cortado el tallo), esto con la finalidad de aumentar el rendimiento en los bio-agregados obtenidos en el tallo de la planta de maíz.

Establecer una metodología de tamizaje que permita obtener bio-agregados con el rango de partículas planteado originalmente en el proyecto.

Analizar a través de pruebas que permitan conocer qué tipo de compuestos hidrosolubles están presentes en los diferentes bio-agregados que se utilicen en la elaboración de concretos vegetales.

Establecer una metodología que permita mantener una relación agua cemento constante.

Llevar a cabo un seguimiento más estricto a la evolución de la densidad con respecto al tiempo.

Realizar una formulación optimizada para las mezclas donde se incluya el uso de ceniza volante, cal y cemento portland ordinario, a fin de evitar la formación de minerales que repercutan en las propiedades de resistencia a compresión de los materiales.

## ANEXO

### Resistencia térmica

La resistencia térmica es la capacidad que tienen los materiales de oponerse a un flujo de temperatura, se obtiene a través de la ecuación 10:

$$R = \frac{e}{\lambda} \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

R = Resistencia térmica.

e= Espesor de la capa del material a estudiar en metros.

$\lambda$  = Conductividad térmica del material en W/(m.K).

Lo anterior aplica en materiales heterogéneos, los cuales no rompen su continuidad por algún material que los una (como lo es el caso de la mampostería, donde la continuidad se ve interrumpida por las capas de mortero). En México, *“todos los productos que se ofrezcan con propiedades de aislante térmico para techos, plafones y muros de las edificaciones, producidos y comercializados con ese fin, deben mostrar el certificado de cumplimiento con la norma oficial mexicana NOM-018-ENER-2011 [282]”*, de esta norma, establece las características y métodos de prueba que deben de cumplir los materiales, productos, componentes y elementos termoaislantes, para techos, plafones y muros en las edificaciones. En cuestión del aislamiento térmico de las edificaciones, el 60% de la pérdida o ganancia del confort térmico se da en el techo, los muros y las fachadas; el 15% de la pérdida y/o ganancia se da a través del suelo, por igual el 10% se da a través de las ventanas y el 15% restante se da a través de la ventilación.

La norma mexicana NMX-C-460-ONNCCE-2009 [241] (*“industria de la construcción – aislamiento térmico – valor “R” para las envolventes de la vivienda por zona térmica para la república mexicana – especificaciones y verificación”*), *“esta norma establece las especificaciones de resistencia térmica total (Valor “R”) que aplican a las envolventes de las viviendas para mejorar las condiciones de habitabilidad y para disminuir la demanda de energía utilizada para acondicionar térmicamente su interior, de acuerdo a la zona térmica del estado donde se ubique. delimita las regiones térmicas que existen en el país, así como los valores de conductividad térmica.”*

La norma mencionada anteriormente, tiene varios puntos a favor:

Ayuda a disminuir el uso de energía en las viviendas por el concepto de climatización, pues establece valores de resistencia térmica total (“R”) para techos, muros y entrepisos ventilados; de acuerdo a la zona térmica en donde se localice la vivienda y la solución térmica.

Busca satisfacer estándares de construcción donde no se consideren equipos de climatización, análisis y demanda energética.

Se plantea el uso de una envolvente para proteger el ambiente.

Como se mencionó anteriormente, la norma establece una zonificación de las regiones térmicas que requieren las necesidades de adaptación climática en el interior de las viviendas, por ello se considera la vinculación con la clasificación climática internacional común con respecto a la clasificación Köppen (ver tabla A.1) así como la correspondencia con las clasificaciones climáticas y ecológicas utilizadas generalmente para el propósito de la República Mexicana, “esta clasificación está diseñada con base al criterio térmico de datos de grados-días año para utilizarse en el diseño y análisis de eficiencia energética en la construcción (en este caso se deben consultar el apéndice E de la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009) [241]”.

**Tabla A.1 Clasificación climática (internacional) de Köppen [241]**

Temperatura	Humedad					
	S	W	f	m	w	s
A Tropical	--	--	Ecuatorial (Af)	Monzónico (Am)	Sabana (Aw)	Sabana (As)
B Árido	Estepario (BS)	Desértico (BW)	--	--	--	--
C Templado	--	--	Subtropical (Cfa) Oceánico (Cfb)	--	Pampeano (Cwa, Cwb)	Mediterráneo (Csa) Oceánico de veranos secos (Csb)
D Continental	--	--	Continental l (Dfa, Dfb)	--	Manchurian o (Dwa, Dwb)	--
E Frío	T Tundra (ET)		F Polar (EF)		H Alta Montaña (H)	

De la tabla anterior, se caracterizan 5 tipos de climas, los cuales se describen a continuación:

**Clima A:** Se caracteriza porque todos los meses tienen una temperatura media superior a los 18 °C y las precipitaciones anuales son superiores a la evaporación. Debajo de estas condiciones se da el bosque tropical. La segunda letra hace referencia al régimen de las precipitaciones.

La segunda letra hace referencia a las precipitaciones:

- f** Precipitaciones constantes (no hay sequía).
- m** Precipitaciones constantes, excepto algún mes seco y precipitaciones exageradas en algunos meses.
- s** Periodo seco en verano.

**w** Periodo seco en invierno.

Clima B: Clima árido y semiárido, Se caracteriza porque las precipitaciones anuales son inferiores a la evaporación. Para el cálculo se multiplica la temperatura media anual por los 12 meses y duplicarla, pues se considera un mes húmedo aquel en el que la precipitación en mm es el doble de la temperatura en °C, de modo que, para un año, hay que multiplicar la temperatura media anual por 24.

La segunda letra explica el grado de aridez

- S** Lluvias medias anuales entre 50 y 100% de la temperatura media anual multiplicada por 24.
- W** Lluvias medias anuales entre 0 y 50% de la temperatura media anual multiplicada por 24.

La tercera letra explica las temperaturas

- h** Es la temperatura media anual por encima de 18 °C.
- k** Es la temperatura media anual por debajo de 18 °C.

Clima C: Se caracteriza porque la temperatura media del mes más frío es menor a 18 °C y la superior a -3 °C y la del mes más cálido es superior a 10 °C. Las precipitaciones exceden a la evaporación. En este tipo de clima se dan los bosques mesotérmicos.

La segunda letra explica el régimen de lluvias

- f** Son las precipitaciones constantes a lo largo del año.
- s** El verano es seco, por lo que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más altas.
- w** El invierno más seco, por lo que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más bajas.

La tercera letra explica el comportamiento de las temperaturas

- a** El verano es caluroso, supera los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias superan los 10 °C al menos cuatro meses al año.

- b** El verano es suave, no supera los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias superan los 10 °C en al menos cuatro meses al año.
- c** El verano es suave, no supera los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias mayores a los 10 °C se dan en menos de cuatro meses al año.

Clima D: Se caracteriza porque la temperatura media del mes más frío es menor a -3 °C y la del mes más cálido es superior a los 10 °C. Las precipitaciones exceden a la evaporación. En este clima se dan los bosques microtéricos.

La segunda letra explica el régimen de lluvias

- f** Son las precipitaciones constantes a lo largo del año, por lo que no hay un periodo seco.
- s** El verano es seco, por lo que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más altas.
- w** El invierno más seco, por lo que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más bajas.

La tercera letra explica el comportamiento de las temperaturas

- a** El verano es caluroso, supera los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias superan los 10 °C al menos cuatro meses al año.
- b** El verano es suave, no supera los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias superan los 10 °C en al menos cuatro meses al año.
- c** El verano es suave, no supera los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias mayores a los 10 °C se dan en menos de cuatro meses al año.
- d** El verano es suave, no supera los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias mayores a los 10 °C se dan en menos de cuatro meses al año. El mes más frío tiene una temperatura media interior a -38 °C.

Clima E: Se caracteriza porque la temperatura del mes más cálido es inferior a 10 °C.

La segunda letra explica el régimen de lluvias

**ET** Son las precipitaciones constantes a lo largo del año, por lo que no hay un periodo seco.

**EF** El verano es seco, por lo que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más altas.

**EH** El invierno más seco, por lo que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más bajas.

De la clasificación anterior, en México se tienen 8 zonificaciones térmicas las cuales se muestran en la tabla A.2, la tabla mencionada anteriormente, establece las necesidades de adaptación climática en el interior de las viviendas. “Esta clasificación de referencia se conformó ponderando las clasificaciones antes mencionadas a fin de tener aplicación práctica en el diseño y análisis de eficiencia energética en la construcción”.

**Tabla A.2 Clasificación por zonas térmicas [241]**

Zona térmica	Clasificación con base en grados - día	Clasificación climática internacional (Clasificación Köppen)
1	$5\ 000 < \text{GDR } 10\ ^\circ\text{C}$	Aw, BWh
2	$3\ 500 < \text{GDR } 10\ ^\circ\text{C} \leq 5\ 000$	Cfa, Bwh
3A y 3B	$2\ 500 < \text{GDR } 10\ ^\circ\text{C} \leq 3\ 500$ y $\text{GDC } 18\ ^\circ\text{C} \leq 3\ 000$	Cfa, BSk / BWh / H
3C	$\text{GDC } 18\ ^\circ\text{C} \leq 2\ 000$	Cs
4A y 4B	$\text{GDC } 10\ ^\circ\text{C} \leq 2\ 500$ Y $\text{GDC } 18\ ^\circ\text{C} \leq 3\ 000$	Cfa / Dfa, BSk/ Bwh/ H
4C	$2\ 000 \leq \text{GDC } 18\ ^\circ\text{C} \leq 3\ 000$	Cfb

GDC = Grados día de calefacción, GDR = Grados día de refrigeración

A continuación, se muestra la figura A.1, se presentan las diferentes zonas climáticas de la república mexicana.

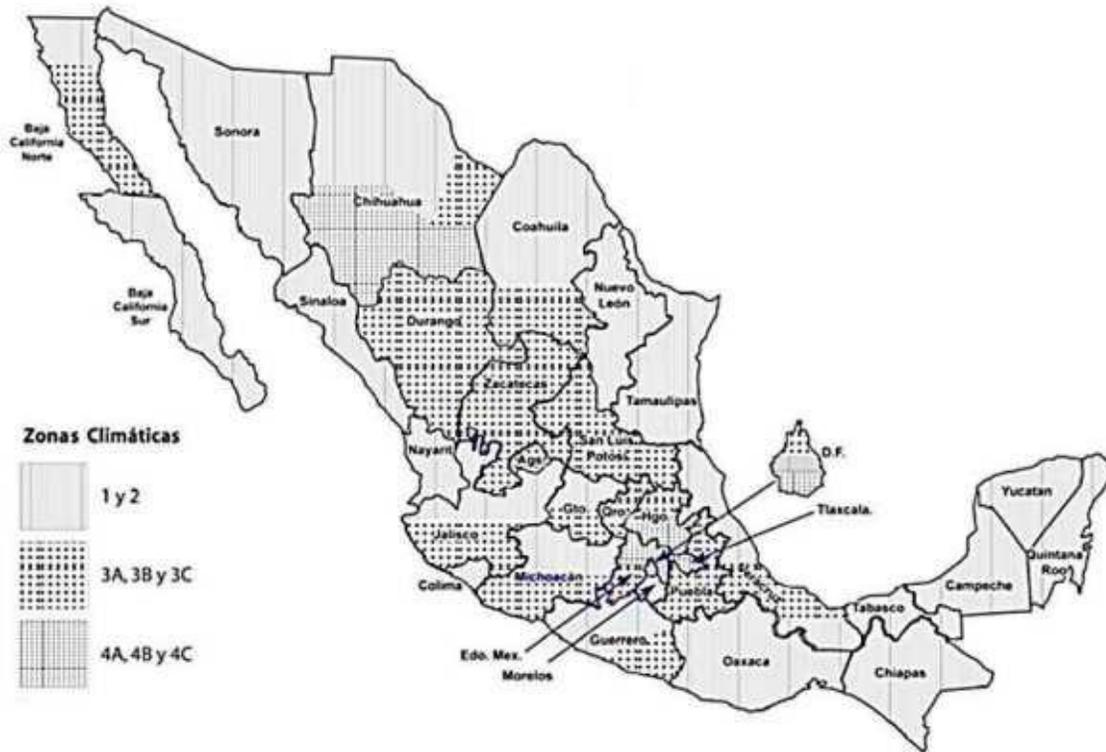


Figura A.1 Zonas climáticas de la República Mexicana [241]

La norma NMX-C-460-ONNCCE-2009 [241] establece que en la mayoría de los estados de la República Mexicana y en sus principales ciudades, *(se consideran ciudades principales a aquellas donde se tienen las capitales de los estados, así como aquellas ciudades donde se tiene una mayor concentración de población; por otro lado, también se consideran aquellas ciudades donde se tienen una actividad económica con el turismo)*. La zona climática que predomina es la zona tipo 2 con un total de 32 ciudades principales en el país, seguida por la zona tipo 1 con 20 ciudades principales; por otro lado, le sigue la zona tipo 3A con un total de 18 ciudades principales; seguida de la zona 3B con 12 ciudades principales, posteriormente le sigue la zona 4A con 9 ciudades principales, 4 ciudades principales en la zona 3C, 2 ciudades principales en la zona 4B y 1 ciudad principal en la zona 4C.

De lo anterior, se puede deducir, que en las zonas 1 se tiene un ambiente árido, donde la mayor parte del tiempo el clima es extremo y se requiere que haya un sistema de aire acondicionado o bien de un calefactor, por otro lado en la zona 2, el ambiente es semiárido y por lo general también se requieren de sistemas de acondicionamiento para el confort en las viviendas o edificaciones; en la zona 3 se tiene un ambiente cálido, donde en la mayoría de las veces no se requiere de un sistema de acondicionamiento; en la zona 4 son zonas de clima templado, donde se requiere de algún sistema de calefacción y en raras ocasiones un sistema de aire acondicionado. De igual manera, la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009, delimita

algunos valores indicativos de algunos materiales de construcción, así como la densidad que deben de cumplir (ver tabla A.3); sin embargo, los valores pueden ser más estrictos cuando el material sea avalado por algún registro de certificación, o bien, si se dispone de ensayos realizados por un laboratorio acreditado por la ley federal de metrología y normalización (LFMN).

**Tabla A.3 Conductividad térmica de materiales dentro de la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009 [241]**

Material	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Conductividad térmica de diseño ( $\lambda$ ) W/m.k
Acero y fierro	7 800	50 000
Aire (sin movimiento)	1.23	0.025
Aluminio	2 700	20 400
Aplanado de mortero de cal al exterior	--	0.872
Aplanado de mortero de cal al interior	--	0.698
Aplanado de yeso	800	0.372
Arcilla expandida	400	0.120
Asfalto impermeabilizante o betún	1 050	0.170
Azulejos o mosaicos	2 300	1 300
Bloque de adobe al exterior	--	0.930
Bloque de adobe al exterior	--	0.582
Bloque de concreto con 2 o 3 huecos	1 700	1.11
Bloque de tepetate o arenisca calcárea al exterior	--	1.047
Bloque de tepetate o arenisca calcárea al interior	--	0.930
Bronce	8 700	65
Cobre	8 900	380
Concreto armado	2 400	2
Concreto ligero al interior	1 250	0.582
Concreto simple al exterior	2 200	1.65
Concreto simple al interior	1 250	0.698
Impermeabilizante	--	0.170
Ladrillo exterior	--	0.827
Madera de cedro (12% de humedad)	505	0.130
Madera de fresno (12% de humedad)	674	0.160
Madera de pino (12% de humedad)	663	0.162
Madera de roble (12% de humedad)	753	0.180
Mortero de cemento arena	2 000	0.170
Piedra arenisca	2 000	1.3
Piedra caliza	2 180	1.4
Piedra de granito, basalto	2 500-2 700	2.8
Piedra de mármol	2 800	3.5
Piedra pizarra	2 000-2 800	2.2
Rellenos de arena seca limpia	1 700-2 200	2
Rellenos de tierra, arena o grava expuesta a la lluvia	2 600	2.3
Rellenos terrados secos en azoteas	--	0.582
Tabique de barro extruido sólido vidriado (exteriores)	2 050	1.282
Tabique de barro extruido bloque hueco vertical (60-67% sólido)	2 050	0.998

Tabique ligero al exterior	1 600	0.814
Tabique rojo recocido común al interior	--	0.698

De la tabla anterior, es posible obtener de algunos materiales el valor de resistividad térmica (R), sin embargo, en algunos de ellos, los espesores varían dependiendo del tipo de material del que se trate. Por otro lado, un estudio realizado por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), muestra un ejemplo de algunos materiales de construcción al que denomina Aislamiento estructurado, en el cual se combinan varios materiales de construcción para formar un arreglo que presenta soluciones de aislamiento térmico que pueden formar parte parcial o total de una envolvente, en la tabla A.4, se muestran algunos materiales que se pueden utilizar en la construcción de muros y techos.

**Tabla A.4 Sistemas de aislamiento estructurado “ONNCCE” [241]**

Muro			
Material	Espesor (m)	W/m.K	R (m <sup>2</sup> .K/W)
Aplanado de mortero de cal al exterior	0.005	0.872	0.005
Bloque de concreto con 2	0.150	1.110	0.135
Aplanado de mortero de cal al interior	0.005	0.698	0.007
Techo			
Impermeabilizante	0.006	0.170	0.035
Concreto simple al exterior	0.040	1.650	0.024
Rellenos de arena seca limpia	0.060	2.000	0.030
Losa de Concreto armado	0.100	2.000	0.050
Aplanado de yeso	0.015	0.372	0.040

De manera general, el ONNCCE, considera que los sistemas de aislamiento estructurado mostrados en la tabla son materiales termoaislantes; sin embargo, al realizar una comparativa con los concretos vegetales elaborados en este trabajo, podemos observar que se alcanzan valores de resistencia térmica más elevados que los obtenidos en los estudios realizados por el ONNCCE, solo empleando un espesor de 0.15 metros de los diferentes concretos vegetales en un muro, como se muestra en la tabla A.5

**Tabla A.5 Valores de resistencia térmica de los concretos vegetales según el estado seco y en equilibrio con la humedad relativa ambiental para la fabricación de un muro**

En estado seco al horno (60 °C)				
Mezcla	Espesor (m)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ (W/m.K)	R (m <sup>2</sup> .K/W)
HP		385.3	0.090	1.67
SBP		420.5	0.095	1.58
SPP		579.1	0.121	1.24
SMP		597.3	0.118	1.28
CBP	0.15	443.4	0.098	1.54
CPP		404.4	0.091	1.65
CMP		438	0.103	1.46
HL		428.6	0.123	1.22
SBL		440	0.135	1.11
En equilibrio con la humedad relativa ambiental (23 °C 50 % H. R.)				
Mezcla	Espesor (m)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ (W/m.K)	R (m <sup>2</sup> .K/W)
HP		396.8	0.098	1.53
SBP		438.4	0.115	1.30
SPP		584.7	0.132	1.14
SMP		616.5	0.129	1.16
CBP	0.15	443.4	0.120	1.26
CPP		412.7	0.105	1.43
CMP		469.9	0.113	1.33
HL		441.1	0.138	1.09
SBL		472.5	0.153	0.98

Es importante conocer que mientras mayor es el valor de la resistividad térmica, el aislamiento es mejor, en las tablas anteriores se evidencia que los concretos vegetales pueden tener un mejor comportamiento térmico en comparación a una envolvente elaborada con materiales de construcción convencionales, de igual manera, si se realiza la comparación con los materiales para construir el techo de una vivienda, resulta evidente que también pueden brindar una solución confiable y sobre todo ecológica. Además, la densidad del material puede ayudar a reducir el peso del sistema estructural, pues en el caso de la construcción del techo, cuando se emplean los materiales convencionales mostrados en la tabla 4.15 el espesor total de la losa es de 0.215 metros, caso contrario al concreto vegetal, donde pueden utilizarse espesores de 0.15 metros, obteniendo mejores resultados en la envolvente térmica y en la disminución de espesores y por consiguiente del peso total de la losa. Por otro lado, es importante mencionar que el consumo de energía para mantener la vivienda en un nivel confortable puede ser menor, pues las envolventes térmicas mencionadas anteriormente tienen un nivel aislante superior que los materiales convencionales.

## Referencias

- [1] A. Laborel-Préneron, C. Magniont, J.-E. Aubert, Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials, *Waste Biomass Valorization*. 9 (2018) 1095–1112. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z>.
- [2] T.M. Dinh, C. Magniont, M. Coutand, G. Escadeillas, Hemp concrete using innovative pozzolanic binder, in: *Eco-friendly Bind. Low CO<sub>2</sub>-emission Low Embed. Energy*, RILEM, Clermont Ferrand, France, 2015: p. 7. [https://www.researchgate.net/publication/279851063\\_Hemp\\_concrete\\_using\\_innovative\\_pozzolanic\\_binder](https://www.researchgate.net/publication/279851063_Hemp_concrete_using_innovative_pozzolanic_binder).
- [3] G. Delannoy, S. Marceau, P. Glé, E. Gourlay, M. Guéguen-Minerbe, D. Diafi, I. Nour, S. Amziane, F. Farcas, Aging of hemp shiv used for concrete, *Mater. Des.* 160 (2018) 752–762. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.016>.
- [4] E. Gourlay, P. Glé, S. Marceau, C. Foy, S. Moscardelli, Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 139 (2017) 513–523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018>.
- [5] M. Lagouin, C. Magniont, P. Sénéchal, P. Moonen, J.-E. Aubert, A. Laborel-Préneron, Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes, *Constr. Build. Mater.* 222 (2019) 852–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004>.
- [6] A. Bourdot, C. Magniont, M. Lagouin, C. Niyigena, P. Evon, S. Amziane, Impact of Bio-Aggregates Properties on the Chemical Interactions with Mineral Binder, Application to Vegetal Concrete, *J. Adv. Concr. Technol.* 17 (2019) 542–558. <https://doi.org/10.3151/jact.17.542>.
- [7] Y. Brouard, *Caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat*, Université de Tours, 2018. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01835828/document>.
- [8] Y. Brouard, *Caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat*, (2016).
- [9] Y. Brouard, N. Belayachi, D. Hoxha, N. Ranganathan, S. Méo, Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation, *Constr. Build. Mater.* 161 (2018) 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>.
- [10] A.B. Rhouma, *Développement et caractérisation de matériaux composites biosourcés de construction à faible impact environnemental à base de tige de maïs*, (n.d.) 43.
- [11] F. Collet, S. Pretot, Thermal conductivity of hemp concretes : Variation with formulation , density and water content, *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>.

- [12] K. Ip, A. Miller, Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK, *Resour. Conserv. Recycl.* 69 (2012) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>.
- [13] T. Jami, S.R. Karade, L.P. Singh, A review of the properties of hemp concrete for green building applications, *J. Clean. Prod.* 239 (2019) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>.
- [14] H.H. Ratsimbazafy, A. Laborel-Préneron, C. Magniont, P. Evon, A Review of the Multi-Physical Characteristics of Plant Aggregates and Their Effects on the Properties of Plant-Based Concrete, *Recent Prog. Mater.* 03 (2021) 70. <https://doi.org/10.21926/rpm.2102026>.
- [15] S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, M. Sonebi, Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity, *Mater. Struct.* 50 (2017) 1–11. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>.
- [16] United Nations, Brundtland Report - “Our common future” World Commission on Environment and Development, 1987.
- [17] W. Leal, O. Luiz, G. Quelhas, D. Luiz, D.M. Nascimento, L.V. Avila, A literature-based review on potentials and constraints in the implementation of the sustainable development goals Rodrigo Goyannes Gusm a, 198 (2018) 1276–1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.102>.
- [18] K. Urbaniec, H. Mikul, System integration is a necessity for sustainable development, *J. Clean. Prod.* 195 (2018) 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.178>.
- [19] Y.Ö. Mustafa, A. Bak, Sustainability in Construction Sector, 195 (2015) 2253–2262. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.312>.
- [20] E. Sinakou, J.B. Pauw, M. Goossens, P. Van Petegem, Academics in the field of Education for Sustainable Development: Their conceptions of sustainable development, *J. Clean. Prod.* 184 (2018) 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.279>.
- [21] P. Dean, B., Dulac, J., Petrichenko, K., and Graham, Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector, 2016.
- [22] M.R. Ahmad, B. Chen, S. Yousefi Oderji, M. Mohsan, Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement, *Energy Build.* 173 (2018) 719–733. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.007>.
- [23] S. Amziane, F. Collet, eds., Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM, Springer Netherlands, Dordrecht, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1031-0>.
- [24] Informe de estado global para edificios y construcción: 2020 - Foro de liderazgo en carbono, Foro Liderazgo Carbono. (2021).

<https://carbonleadershipforum.org/es/informe-de-estado-global-2020-para-edificios-y-construccion/> (accessed September 14, 2021).

- [25] S. Amziane, M. Sonebi, Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate, *RILEM Tech. Lett.* 1 (2016) 31. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.9>.
- [26] The Climate Transparency Report 2020, *Clim. Transpar.* (2020). <https://www.climate-transparency.org/g20-climate-performance/the-climate-transparency-report-2020> (accessed September 14, 2021).
- [27] S. Amziane, L. Arnaud, eds., *Bio-aggregate-based building materials: applications to hemp concretes*, ISTE ; Wiley, London : Hoboken, NJ, 2013.
- [28] B. Xia, A. Olanipekun, Q. Chen, L. Xie, Y. Liu, Conceptualising the state of the art of corporate social responsibility ( CSR ) in the construction industry and its nexus to sustainable development, *J. Clean. Prod.* 195 (2018) 340–353. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.157>.
- [29] X. Gan, J. Zuo, K. Ye, M. Skitmore, B. Xiong, Why sustainable construction ? Why not? An owner ' s perspective, *Habitat Int.* 47 (2015) 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.01.005>.
- [30] P. Saieg, E.D. Sotelino, D. Nascimento, R.G.G. Caiado, Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review, *J. Clean. Prod.* 174 (2018) 788–806. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.030>.
- [31] M. Alejandro, C. Abarca, A. Alberto, R. Alférez, L.A.E. Sustentable, *La Edificación Sustentable ( Normativa en México )*, México D. F., 2016.
- [32] SENER | Sistema de Información Energética, (n.d.). <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas> (accessed September 14, 2021).
- [33] M. Yadav, M. Agarwal, Biobased building materials for sustainable future: An overview, *Mater. Today Proc.* 43 (2021) 2895–2902. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.165>.
- [34] S. Amziane, L. Arnaud, *Bio-aggregate-based building materials: applications to hemp concretes*, 1st ed., John Wiley & Sons. Inc., London, 2013.
- [35] J.H. Arehart, W.S. Nelson, W.V. Srubar, On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete, *J. Clean. Prod.* 266 (2020) 121846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121846>.
- [36] A. Arrigoni, R. Pelosato, P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini, G. Dotelli, Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 1051–1061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>.
- [37] F. Pittau, F. Krause, G. Lumia, G. Habert, Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls, *Build. Environ.* 129 (2018) 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006>.

- [38] A.S. Nordby, A.D. Shea, Building Materials in the Operational Phase: Impacts of Direct Carbon Exchanges and Hygrothermal Effects, *J. Ind. Ecol.* (2013) n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/jiec.12046>.
- [39] ECO-MATERIALES, *Rev. Latinoam. Metal. Mater.* 23 (2003) 01–01.
- [40] Vulgariser la vulgarisation scientifique, (n.d.). <https://bandana-geekette.fr/vulgariser-la-vulgarisation-scientifique/> (accessed September 15, 2021).
- [41] México busca establecer la economía circular como una estrategia del gobierno federal con la ley general de economía circular | Facultad de Responsabilidad Social, (n.d.). <https://www.anahuac.mx/mexico/EscuelasyFacultades/responsabilidadsocial/noticias/mexico-busca-establecer-la-economia-circular-como-una-estrategia-del-gobierno-federal-con> (accessed September 15, 2021).
- [42] M.R. Vignon, C. Garcia-Jaldon, D. Dupeyre, Steam explosion of woody hemp ch nevotte, (n.d.) 10.
- [43] M. Lagouin, C. Magniont, P. Sénéchal, P. Moonen, J.-E. Aubert, A. Laborel-préneron, Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes, *Constr. Build. Mater.* 222 (2019) 852–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004>.
- [44] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Assessing the impact of calculation methods on the variability of Young's modulus for hemp concrete material, *Constr. Build. Mater.* 198 (2019) 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.174>.
- [45] S. Amziane, F. Collet, S. Report, R.T. Committee, Bio-aggregates Based Building Materials (State of the art report of the RILEM Technical Committee 236-BBM, RILEM, Springer, 2017).
- [46] FAOSTAT, (n.d.). <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (accessed September 15, 2021).
- [47] C. Véronique, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique, (n.d.) 248.
- [48] A. Evrard, Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials, (2008) 142.
- [49] P.B. de Bruijn, K.-H. Jeppsson, K. Sandin, C. Nilsson, Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres, *Biosyst. Eng.* 103 (2009) 474–479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>.
- [50] T.T. Nguyen, Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, (n.d.) 169.
- [51] C. Magniont, G. Escadeillas, M. Coutand, C. Oms-Multon, Use of plant aggregates in building ecomaterials, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 16 (2012) s17–s33. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452>.

- [52] V. Nozahic, Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal., (n.d.) 334.
- [53] T.M. Dinh, C. Magniont, M. Coutand, G. Escadeillas, HEMP CONCRETE USING INNOVATIVE POZZOLANIC BINDER, (2015) 7.
- [54] M. Chabannes, Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction, (n.d.) 226.
- [55] C. Niyigena, Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne., Tesis, l'université Blaise Pascal, 2016.
- [56] B. Niez, Développement d'un matériau bio-sourcé pour la construction : le béton de tournesol, Polytech' Clermont Ferrand, Aubière, France, 2015. <https://docplayer.fr/44873687-Developpement-d-un-materiau-bio-source-pour-la-construction-le-beton-de-tournesol.html>.
- [57] J. Chamoin, Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation, (n.d.) 206.
- [58] R.V. Ratiarisoa, C. Magniont, S. Ginestet, C. Oms, G. Escadeillas, Assessment of distilled lavender stalks as bioaggregate for building materials: Hygrothermal properties, mechanical performance and chemical interactions with mineral pozzolanic binder, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.011>.
- [59] Y. Brouard, caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat, (n.d.) 173.
- [60] Biofibat, BIOFIBAT, (n.d.). [www.biofib-isolation.com](http://www.biofib-isolation.com).
- [61] L. Jimenez, F. Lopez, Characterization of paper sheets from agricultural residues, *Wood Sci. Technol.* 27 (1993). <https://doi.org/10.1007/BF00193870>.
- [62] B. de Groot, Alkaline hemp woody core pulping : impregnation characteristics, kinetic modelling and papermaking qualities, S.n., 1998. <https://edepot.wur.nl/196316>.
- [63] C. Garcia-, Jaldon, D. Dupeyre, M.R. Vignon, Fibres from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment, *Biomass Bioenergy.* 14 (1998) 251–260. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10039-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10039-3).
- [64] A. Belinda, Hemp raw materials: The effect of cultivar, growth conditions and pretreatment on the chemical composition of the fibres, (n.d.) 31.
- [65] D. Sedan, C. Pagnoux, T. Chotard, A. Smith, D. Lejolly, V. Gloaguen, P. Krausz, Effect of calcium rich and alkaline solutions on the chemical behaviour of hemp fibres, *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 9336–9342. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1903-4>.

- [66] S.V. Vassilev, D. Baxter, L.K. Andersen, C.G. Vassileva, An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*. 89 (2010) 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.
- [67] M. Le Troëdec, A. Rachini, C. Peyratout, S. Rossignol, E. Max, O. Kaftan, A. Fery, A. Smith, Influence of chemical treatments on adhesion properties of hemp fibres, *J. Colloid Interface Sci.* 356 (2011) 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.12.066>.
- [68] N. Stevulova, L. Kidalova, J. Junak, J. Cigasova, E. Terpakova, Effect of Hemp Shive Sizes on Mechanical Properties of Lightweight Fibrous Composites, *Procedia Eng.* 42 (2012) 496–500. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.441>.
- [69] G. Balčiūnas, S. Vėjelis, S. Vaitkus, A. Kairytė, Physical Properties and Structure of Composite Made by Using Hemp Hurds and Different Binding Materials, *Procedia Eng.* 57 (2013) 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.023>.
- [70] S. Gandolfi, G. Ottolina, S. Riva, G.P. Fantoni, I. Patel, Complete Chemical Analysis of Carmagnola Hemp Hurds and Structural Features of Its Components, *BioResources*. 8 (2013) 2641–2656. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2641-2656>.
- [71] Y. Diquélou, E. Gourlay, L. Arnaud, B. Kurek, Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix, *Cem. Concr. Compos.* 55 (2015) 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>.
- [72] J. Kamat, EFFECT OF HARVESTING TIME ON THE PWSICAL, CHEMICAL AND PULPING PROPERTIES OF HEMP (CANNABIS SATIVA L.), (n.d.) 151.
- [73] A. Laborel-Préneron, C. Magniont, J.-E. Aubert, Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials, *Waste Biomass Valorization*. 9 (2018) 1095–1112. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z>.
- [74] M. Viel, F. Collet, C. Lanos, Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material, *Ind. Crops Prod.* 120 (2018) 214–237. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>.
- [75] M. Jothilingam, P. Paul, Study on strength and microstructure of hempcrete, in: Chennai, India, 2019: p. 020028. <https://doi.org/10.1063/1.5114608>.
- [76] G. Delannoy, S. Marceau, P. Glé, E. Gourlay, M. Guéguen-Minerbe, D. Diafi, S. Amziane, F. Farcas, Impact of hemp shiv extractives on hydration of Portland cement, *Constr. Build. Mater.* 244 (2020) 118300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118300>.
- [77] L. Wang, H. Lenormand, H. Zmamou, N. Leblanc, Effect of variability of hemp shiv on the setting of lime hemp concrete, *Ind. Crops Prod.* 171 (2021) 113915. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113915>.

- [78] M. Torres-Carrasco, F. Puertas, La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros, *Rev. Ing. Constr.* 32 (2017) 05–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>.
- [79] A.A. Ramezaniapour, *Cement Replacement Materials*, Springer, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>.
- [80] N. De Belie, M. Soutsos, E. Gruyaert, eds., *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4*, Springer International Publishing, Cham, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1>.
- [81] S.H. Kosmatka, *Diseño y control de mezclas de concreto*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2004.
- [82] W. Kurdowski, *Cement and Concrete Chemistry*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>.
- [83] H.F.W. Taylor, *Cement chemistry*, 2nd ed, T. Telford, London, 1997.
- [84] A.M. Brandt, *Cement based composites: materials, mechanical properties, and performance*, 2nd ed, Taylor & Francis, Milton Park, Abingdon, Oxon, 2009.
- [85] F.M. Lea, P.C. Hewlett, M. Liska, *Lea's chemistry of cement and concrete*, Fifth edition, Butterworth-Heinemann, Oxford [England]; Cambridge, MA, 2019.
- [86] C. Magniont, *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*, Université de Toulouse, 2010.
- [87] A.P. | mayo 2, 2016 en 5:49 pm | Responder, *La cal hidráulica, Sobre Cal.* (2013). <https://sobrelacal.wordpress.com/que-es-la-cal/tipos-de-cal/la-cal-hidraulica/> (accessed September 23, 2021).
- [88] D. Manh The, *Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant Contribution to the development of precast hempcrete using innovative pozzolanic binder*, Université Paul Sabatier, 2014.
- [89] *Cement production | Climate Technology Centre & Network | Tue, 11/08/2016*, (n.d.). <https://www.ctc-n.org/technologies/cement-production> (accessed January 20, 2022).
- [90] F. Moodi, A.A. Ramezaniapour, A.Sh. Safavizadeh, Evaluation of the optimal process of thermal activation of kaolins, *Sci. Iran.* 18 (2011) 906–912. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.07.011>.
- [91] E. Llano, "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE CEMENTOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE BASE METACAOLÍN/ESCORIA GRANULADA DE ALTO

HORNO CON ADICIONES DE NANOPARTÍCULAS DE TiO<sub>2</sub>,” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2017.

- [92] A.A. Ramezaniapour, Cement Replacement Materials, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>.
- [93] A.M. Rashad, Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 303–318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>.
- [94] D. Manh The, Développement et Caractérisation d'éco-matériaux pour la Construction, Université de Toulouse, 2014.
- [95] R. San Nicolas, M. Cyr, G. Escadeillas, Characteristics and applications of flash metakaolins, *Appl. Clay Sci.* 83–84 (2013) 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.036>.
- [96] A.A. Ramezaniapour, Cement Replacement Materials, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>.
- [97] T.M. Dinh, C. Magniont, M. Coutand, G. Escadeillas, HEMP CONCRETE USING INNOVATIVE POZZOLANIC BINDER, (2015) 7.
- [98] Batichanvre - Chaux naturelle St Astier - La Maison Eco Naturelle, (n.d.). <https://maison-eco-naturelle.com/le-chaux-chanvre/496-batichanvre-saint-astier.html> (accessed May 31, 2022).
- [99] L. Van Nieuwenhuyze, Technologie de chantier chanvre, Conseil d'administration de C en C, C EN C, Paris, Francia, 2014. [https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/CenC\\_Bonnes\\_Pratiques\\_Tome\\_2.pdf](https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/CenC_Bonnes_Pratiques_Tome_2.pdf).
- [100] T. Hemalatha, A. Ramaswamy, A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete, *J. Clean. Prod.* 147 (2017) 546–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>.
- [101] M. Ahmaruzzaman, A review on the utilization of fly ash, *Prog. Energy Combust. Sci.* 36 (2010) 327–363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>.
- [102] C. Belviso, State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues, *Prog. Energy Combust. Sci.* 65 (2018) 109–135. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.10.004>.
- [103] M. Muñoz, Adams, Caracterización geotécnica de cenizas volantes generadas a partir de la combustión del carbón en central termoeléctrica, in: *Simp. Habilitación Prof.*, n.d. <http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1310/Mauricio%20Mu%C3%B1oz%20Adams.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [104] W. Stanwix, A. Sparrow, *The Hemp Book (Designing and building with hemp-lime)*, 1st ed., Green Books, Cambridge, UK, 2014.

- [105] F. Stella mary, G. Nithambigai, P.M. Rameshwaran, Effect of binders and hemp fibre in concrete, *Mater. Today Proc.* 46 (2021) 3791–3794. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.029>.
- [106] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, C. Lanos, Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes, *Energy Build.* 62 (2013) 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>.
- [107] Q. Pichon, J.-M. Naumovic, Base pour construire en chanvre, Conseil d'administration de C en C, C EN C, Paris, Francia, 2005. [https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/CenC\\_Bonnes\\_Pratiques\\_Tome\\_1.pdf](https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/CenC_Bonnes_Pratiques_Tome_1.pdf).
- [108] C. Magwood, *Essential hempcrete construction: the complete step-by-step guide*, New Society Publishers, Gabriola, BC, 2016.
- [109] R. Rhydwen, *Building with Hemp and Lime*, 2015.
- [110] A. Beraldo, *Compuestos biomasa vegetal y cemento*, in: *Aprovech. Residuos Agro-Ind. Como Fuente Sosten. Mater. Constr.*, Universidad Politecnica de Valencia, 2016.
- [111] A. Kashtanjeva, M. Sonebi, S. Amziane, U.B. Pascal, INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE AND DRYING SHRINKAGE OF HEMP CONCRETE, 33 (2015) 7.
- [112] T.M. Dinh, *Développement et Caractérisation d'éco-matériaux pour la Construction*, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2014.
- [113] P. Monreal, L.B. Mboumba-Mamboundou, R.M. Dheilly, M. Quéneudec, Effects of aggregate coating on the hygral properties of lignocellulosic composites, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.017>.
- [114] L.-B. Mboumba-Mamboundou, P. Montreal, R.-M. Dheilly, M. Queneudec, *Etude du séchage de bétons lignocellulosiques à base de pulpes de betteraves issues de l'industrie sucrière. Impact du traitement des pulpes*, (2018) 9.
- [115] M. Khazma, N. El Hajj, A. Goullieux, R.M. Dheilly, M. Queneudec, Influence of sucrose addition on the performance of a lignocellulosic composite with a cementitious matrix, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 39 (2008) 1901–1908. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.09.014>.
- [116] B. Seng, C. Magniont, S. Lorente, Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties, *J. Build. Eng.* 24 (2019) 100540. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.016>.
- [117] M.M. Bart, M.G. Bastian, M.J. Brau, M.P. Glouannec, M.J. Miriel, M.L. Serres, M. de Conférences, *CARACTERISATION HYDRIQUE ET THERMIQUE DE MATERIAUX DE GENIE CIVIL A FAIBLES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX*, (n.d.) 253.

- [118] F. Collet, M. Bart, L. Serres, J. Miriel, Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1271–1280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.018>.
- [119] V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, K. Saïdi, H. De Baynast, Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>.
- [120] E. Gourlay, P. Glé, S. Marceau, C. Foy, S. Moscardelli, Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 139 (2017) 513–523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018>.
- [121] G. Delannoy, S. Marceau, P. Glé, E. Gourlay, M. Guéguen-Minerbe, D. Diafi, I. Nour, S. Amziane, F. Farcas, Influence of binder on the multiscale properties of hemp concretes, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 23 (2019) 609–625. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1457571>.
- [122] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, C. Lanos, Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes, *Energy Build.* 62 (2013) 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>.
- [123] F. Collet, S. Pretot, Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>.
- [124] C. Rode, R. Peuhkuri, K.K. Hansen, B. Time, K. Svennberg, J. Arvidsson, T. Ojanen, *NORDTEST PROJECT ON MOISTURE BUFFER VALUE OF MATERIALS*, (2005) 6.
- [125] F. Collet, S. Pretot, Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139>.
- [126] A. Evrard, A. De Herde, Hygrothermal Performance of Lime-Hemp Wall Assemblies, *J. Build. Phys.* 34 (2010) 5–25. <https://doi.org/10.1177/1744259109355730>.
- [127] D. Taoukil, A. El bouardi, F. Sick, A. Mimet, H. Ezbakhe, T. Ajzoul, Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.067>.
- [128] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, L. Arnaud, L. Bessette, F. Collet, C. Lanos, G. Escadeillas, M. Lawrence, C. Magniont, S. Marceau, S. Pavia, U. Peter, V. Picandet, M. Sonebi, P. Walker, Variability of the mechanical properties of hemp concrete, *Mater. Today Commun.* 7 (2016) 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>.
- [129] C. Véronique, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique, (n.d.) 248.

- [130] T.T. Nguyen, V. Picandet, P. Carre, T. Lecompte, S. Amziane, C. Baley, Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 14 (2010) 545–560. <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693246>.
- [131] T.T. Nguyen, Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, Université de Bretagne-SUD, 2010. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01017510/document>.
- [132] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete, *Constr. Build. Mater.* 160 (2018) 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026>.
- [133] P.Q. Pichon, J.-M. Naumovic, Béton et mortier de chanvre, Conseil d'administration de C en C, C EN C, Paris, Francia, 2015. [https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/CenC\\_Bonnes\\_Pratiques\\_Tome\\_3.pdf](https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/CenC_Bonnes_Pratiques_Tome_3.pdf).
- [134] P.Q. Pichon, J.-M. Naumovic, BETON ET MORTIER DE CHANVRE, (n.d.) 59.
- [135] F. Collet, S. Prétot, C. Lanos, Hemp-Straw Composites: Thermal And Hygric Performances, *Energy Procedia.* 139 (2017) 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.211>.
- [136] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, L. Goudet, Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 2116–2123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>.
- [137] C. Magniont, Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, phd, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010. <http://thesesups.ups-tlse.fr/980/> (accessed May 27, 2021).
- [138] V. Nozahic, Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal., Blaise Pascal - Clermont II, 2012. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00822142/document>.
- [139] M. Chabannes, Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction, Université de Montpellier, 2015. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01316947/document>.
- [140] J. Chamoin, Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2013.
- [141] C. Magniont, G. Escadeillas, M. Coutand, C. Oms-Multon, Use of plant aggregates in building ecomaterials, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 16 (2012) s17–s33. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452>.

- [142] C. Niyigena, Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne., Université Blaise Pascal-Clermont II, 2016.
- [143] 116R-00 Cement and Concrete Terminology, (n.d.) 73.
- [144] C. Yoann, A. Sofiane, S. Mohammed, Durability test on hemp concrete: Weathering resistance, (n.d.) 9.
- [145] M. Chabannes, V. Nozahic, Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders, *Mater. Struct.* (2015) 1815–1829. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0276-9>.
- [146] R. Walker, S. Pavia, R. Mitchell, Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes, *Constr. Build. Mater.* 61 (2014) 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>.
- [147] T. Decorte, Fibre hemp and marihuana: assessing the differences between distinct varieties, (n.d.) 16.
- [148] D.L. Bye, Robert; Linares, Edelmira; Lentz, MÉXICO: CENTRO DE ORIGEN DE LA DOMESTICACIÓN DEL GIRASOL, *TIP Rev. Espec. En Cienc. Quím.-Biológicas.* 12 (2009) 5–12.
- [149] S.A. Palacio-Román, B. Agudelo-Escobar, Desarrollo del girasol (*Helianthus annuus L.*) con aplicación de codornaza bajo distintas láminas de riego, *Cienc. Agric.* 17 (2020) 3–17.
- [150] M.PHILIPPE evon, nouveau procédé de bioraffinage du tournesol plante entière par fractionnement thermo-mécano-chimique en extrudeur BI-VIS : ETUDE DE L'EXTRACTION AQUEUSE DES LIPIDES ET DE LA MISE EN FORME DU RAFFINAGE EN AGROMATERIEUX PAR THERMOMOULAGE, 2008.
- [151] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, El cultivo de girasol, *Minist. Para Transición Ecológica El Reto Demográfico.* (n.d.). [https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1988\\_20.pdf](https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1988_20.pdf) (accessed September 28, 2022).
- [152] C.A. Bedoya, Teocintle: El ancestro del maíz, *Cualidades Agropecu.* (2010) 32–42.
- [153] Y. Matsuoka, Y. Vigouroux, M.M. Goodman, J.S. G, E. Buckler, J. Doebley, A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping, *PNAS.* 99 (2002) 6080–6084.
- [154] M. Bajo, R. En, H.F. Gallardo, A.C. Rosales, S.S. Espinoza, R.J. Ocampo, P. Alfredo, D. Martínez, RECOMENDACIONES PARA LA PRODUCCIÓN DE GRANO Y FORRAJE DE MAÍZ BAJO RIEGO EN DURANGO, 2017.
- [155] A. Fassio, M.J. Rodríguez, S. Ceretta, Cañamo (*Cannabis sativa L.*, (2013). [https://www.researchgate.net/publication/272148231\\_Canamo\\_Cannabis\\_sativa\\_L](https://www.researchgate.net/publication/272148231_Canamo_Cannabis_sativa_L).
- [156] J.B. Maher, *Cannabis sativa*, (2014).

- [157] A.G. agosto 2019 sinetx@yahoo.com.mx, MONOGRAFÍA ESTATAL GUERRERO Grado 6° Generación 1993, Com. Nac. Libr. Texto Gratuit. CONALITEG. (n.d.). <http://historico.conaliteg.gob.mx/H1993P6HI227.htm> (accessed July 19, 2021).
- [158] C. Magniont, G. Escadeillas, C. Oms-Multon, P. De Caro, The benefits of incorporating glycerol carbonate into an innovative pozzolanic matrix, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 1072–1080. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.009>.
- [159] T.M. Dinh, Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant Contribution.pdf, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2014. <http://thesesups.ups-tlse.fr/2383/#:~:text=Le%20b%C3%A9ton%20de%20chanvre%20utilisant,bonne%20capacit%C3%A9%20d'isolation%20thermique>.
- [160] Hidróxido de Calcio - CALCINOR. Minerales industriales, (n.d.). <https://www.calcinor.com/es/productos/hidroxido-de-calcio-cal-apagada> (accessed July 8, 2022).
- [161] M. Arandigoyen, J.L.P. Bernal, M.A.B. López, J.I. Alvarez, Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity, *Appl. Surf. Sci.* 252 (2005) 1449–1459. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.145>.
- [162] J.V. Gonzáles Aviña, Comportamiento del concreto autocompactable reforzado con fibras sintéticas como material para aplicación estructural, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Octubre ., <http://eprints.uanl.mx/19780/>.
- [163] D. Marchon, R.J. Flatt, Impact of chemical admixtures on cement hydration, in: *Sci. Technol. Concr. Admix.*, Elsevier, 2016: pp. 279–304. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00012-6>.
- [164] G. Domínguez Huerta, Desarrollo de Materiales Cementantes Bio-receptivos en la Colonización de Microalgas, Tesis (Maestría), Universidad Autónoma de Nuevo León, 2020. <http://eprints.uanl.mx/19957/>.
- [165] Ficha técnica de cal hidráulica rebasa, Cal Hidratada Rebasa. (n.d.). [http://www.rebasa.com.mx/docs/cal\\_hidratada.pdf](http://www.rebasa.com.mx/docs/cal_hidratada.pdf) (accessed October 25, 2021).
- [166] V.-C. Mónica Alejandra, R. Erich David, M.-D. Gutiérrez Ruby, Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas, *Ing. Investig. Tecnol.* 16 (2015) 113–122. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72112-8](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72112-8).
- [167] B.K. Halder, V. Tandon, A. Tarquin, Influence of Coal Fly Ash on Mechanical Properties o Mortar Consisting of Total Dissolved Solids, (n.d.) 17.
- [168] P. Lorca, R. Calabuig, J. Benlloch, L. Soriano, J. Payá, Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition, *Mater. Des.* 64 (2014) 535–541. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.022>.

- [169] T. Hemalatha, M. Mapa, N. George, S. Sasmal, Physico-chemical and mechanical characterization of high volume fly ash incorporated and engineered cement system towards developing greener cement, *J. Clean. Prod.* 125 (2016) 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.118>.
- [170] I. Wilińska, B. Pacewska, Influence of selected activating methods on hydration processes of mixtures containing high and very high amount of fly ash: A review, *J. Therm. Anal. Calorim.* 133 (2018) 823–843. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6915-y>.
- [171] V. Sahu, V. Gayathri, The Use of Fly Ash and Lime Sludge as Partial Replacement of Cement in Mortar, 4 (2014) 9.
- [172] S.C.K. Bendapudi, P. Saha, Contribution of Fly ash to the properties of Mortar and Concrete, *Int. J. Earth Sci. Eng.* 04 (2011) 8.
- [173] F. Moghaddam, V. Sirivivatnanon, K. Vessalas, The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes, *Case Stud. Constr. Mater.* 10 (2019) e00218. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00218>.
- [174] D.F. Aponte, M. Barra, E. Vázquez, Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes, *Constr. Build. Mater.* 30 (2012) 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.026>.
- [175] B. Kondraivendhan, B. Bhattacharjee, Flow behavior and strength for fly ash blended cement paste and mortar, *Int. J. Sustain. Built Environ.* 4 (2015) 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2015.09.001>.
- [176] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, 2016. <https://doi.org/10.7693/wl20150205>.
- [177] S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, M. Sonebi, Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity, *Mater. Struct.* 50 (2017) 167. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>.
- [178] C. Niyigena, Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne, Université Blaise Pascal-Clermont II, 2016. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01487057/document>.
- [179] F. Collet, CARACTERISATION HYDRIQUE ET THERMIQUE DE MATERIAUX DE GENIE CIVIL A FAIBLES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2004. <https://www.researchgate.net/publication/326112073>.
- [180] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateaufeuf, L. Arnaud, L. Bessette, F. Collet, C. Lanos, G. Escadeillas, M. Lawrence, C. Magniont, S. Marceau, S. Pavia, U. Peter, V. Picandet, M. Sonebi, P. Walker, Variability of the mechanical properties of hemp concrete, *Mater. Today Commun.* 7 (2016) 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>.

- [181] V. Cerezo, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [182] L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>.
- [183] M. (Ed ) Faraldos, C. (Ed ) Goberna, Técnicas de análisis y caracterización de materiales (2a. ed.), 2nd ed., Consejo superior de investigaciones científicas, Madrid, España, 2011.
- [184] V. Sorrivas de Lozano, A. Morales, M.J. Yañez, principios-practica-microscopia-electronica.pdf, Viviana Sorrivas de Lozano Diseño de tapa y gráficos del capítulo fundamentos: Carlos Alberto Jones., Bahía Blanca, Argentina, 2014. <https://bahiablanca.conicet.gov.ar/biblioteca/principios-practica-microscopia-electronica.pdf>.
- [185] G. Correa, CARACTÉRISATION CHIMIQUE DES FIBRES VEGETALES POUR LA PRODUCTION DE NOUVEAUX COMPOSITES AGROSOURCÉS POUR L'INDUSTRIE DU BÂTIMENT ET DU GENIE CIVIL, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES, 2016.
- [186] E. Philippe, Etude Des Interactions Entre Liant Mineral Et Granulats Vegetaux – Influence De La Nature Du Granulant Vegetal, 2016.
- [187] V. Sabathier, S. Louvel, G. Correa, C. Magniont, P. Evon, L. Labonne, Incidence of the water-soluble compounds contained into lavender and sunflower bioaggregates on the hardening process of mineral binders, 2nd Int. Conf. Bio-Based Build. Mater. 1st Conf. Ecol. Valoris. Granul. Fibrous Mater. ICBBM ECOGRAFI. (2017) 62–68.
- [188] A. Bourdot, C. Magniont, M. Lagouin, G. Lambaré, L. Labonne, P. Evon, Evaluation of the potential of corn and sunflower bark particles as bio-aggregates for lightweight concrete, (2018).
- [189] S. Louvel, Etude Des Interactions Entre Liant Mineral Et Granulats Vegetaux – Influence De La Nature Du Granulant Vegetal, 2016.
- [190] C. Patapy, M. Bégué, Protocole Calorimétrie Isotherme, (2018).
- [191] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, eds., A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, 1st ed., CRC Press, 2018. <https://doi.org/10.1201/b19074>.
- [192] V.S. Ramachandran, ed., Handbook of thermal analysis of construction materials, Noyes Publications/William Andrew Pub, Norwich, N.Y, 2003.
- [193] S. Louvel, ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE LIANT MINERAL ET GRANULATS VEGETAUX – INFLUENCE DE LA NATURE DU LIANT ET DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DU GRANULANT VEGETAL, 2016.
- [194] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, 2016. <https://doi.org/10.7693/wl20150205>.

- [195] N. Mati-Baouche, H. De Baynast, A. Lebert, S. Sun, C.J.S. Lopez-Mingo, P. Leclaire, P. Michaud, Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan, *Ind. Crops Prod.* 58 (2014) 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.022>.
- [196] A.M. Gonzalez, Ma.M. Arbo, Médula de girasol (parénquima fundamental), *Biología*. (n.d.). <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema11/11-1parenquima.htm> (accessed August 9, 2022).
- [197] F. Delhomme, E. Prud'homme, C. Julliot, T. Guillot, S. Amziane, S. Marceau, Effect of hemp on cement hydration: Experimental characterization of the interfacial transition zone, *Results Chem.* 4 (2022) 100440. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100440>.
- [198] Y. Jiang, M.P. Ansell, X. Jia, A. Hussain, M. Lawrence, PHYSICAL CHARACTERISATION OF HEMP SHIV: CELL WALL STRUCTURE AND POROSITY, (2017) 8.
- [199] A. Evrard, Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials, (2008) 142.
- [200] P.B. de Bruijn, K.-H. Jeppsson, K. Sandin, C. Nilsson, Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres, *Biosyst. Eng.* 103 (2009) 474–479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>.
- [201] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, L. Arnaud, L. Bessette, F. Collet, C. Lanos, G. Escadeillas, M. Lawrence, C. Magniont, S. Marceau, S. Pavia, U. Peter, V. Picandet, M. Sonebi, P. Walker, Variability of the mechanical properties of hemp concrete, *Mater. Today Commun.* 7 (2016) 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>.
- [202] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete, *Constr. Build. Mater.* 160 (2018) 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026>.
- [203] M.S. Abbas, F. McGregor, A. Fabbri, M.Y. Ferroukhi, The use of pith in the formulation of lightweight bio-based composites: Impact on mechanical and hygrothermal properties, *Constr. Build. Mater.* 259 (2020) 120573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120573>.
- [204] L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>.
- [205] M. Chabannes, V. Nozahic, S. Amziane, Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders, 48 (2015) 1815–1829. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0276-9>.
- [206] T. Colinart, T. Vincelas, H. Lenormand, A.H.D. Menibus, E. Hamard, T. Lecompte, Hygrothermal properties of light-earth building materials, *J. Build. Eng.* 29 (2020) 101134. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101134>.

- [207] A. Laborel-Préneron, C. Magniont, J.-E. Aubert, Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition, *Energy Build.* 178 (2018) 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>.
- [208] A. Laborel-Préneron, J.-E. Aubert, C. Magniont, P. Maillard, C. Poirier, Effect of Plant Aggregates on Mechanical Properties of Earth Bricks, *J. Mater. Civ. Eng.* 29 (2017) 04017244. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002096](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002096).
- [209] B. Mazhoud, F. Collet, S. Pretot, J. Chamoin, Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters, *Build. Environ.* 96 (2016) 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.013>.
- [210] T.-T. Nguyen, V. Picandet, S. Amziane, C. Baley, Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 13 (2009) 1039–1050. <https://doi.org/10.1080/19648189.2009.9693171>.
- [211] V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, K. Saïdi, H. De Baynast, Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 231–241. <https://doi.org/Man>.
- [212] M. Viel, F. Collet, C. Lanos, Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material, *Ind. Crops Prod.* 120 (2018) 214–237. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>.
- [213] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, T. Langlet, Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete, *Constr. Build. Mater.* 102 (2016) 679–687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>.
- [214] J. Williams, M. Lawrence, P. Walker, The influence of constituents on the properties of the bio-aggregate composite hemp-lime, *Constr. Build. Mater.* 159 (2018) 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.109>.
- [215] J. Williams, M. Lawrence, P. Walker, A method for the assessment of the internal structure of bio-aggregate concretes, *Constr. Build. Mater.* (2016) 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.088>.
- [216] P. Bütschi, C. Deschenaux, B. Miao, N.K. Srivastava, Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction.pdf, in: *Congrès Annu. Société Canadienne Génie Civ., Moncton, Nouveau Brunswick, Canada, 2003*: pp. 1–6. <https://doi.org/Fra>.
- [217] Y. Diquélou, E. Gourlay, L. Arnaud, B. Kurek, Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete, *Constr. Build. Mater.* 112 (2016) 506–517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.138>.
- [218] L. Kidalova, N. Stevulova, E. Terpakova, A. Sicakova, Utilization of alternative materials in lightweight composites, *J. Clean. Prod.* 34 (2012) 116–119. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.031>.

- [219] J. Sheridan, M. Sonebi, S. Taylor, S. Amziane, EFFECT OF VISCOSITY MODIFYING AGENT ON THE MECHANICAL AND TRANSPORT PROPERTIES OF HEMP AND RAPESEED STRAW CONCRETE, (2017) 10.
- [220] N. Stevulova, J. Cigasova, A. Estokova, E. Terpakova, A. Geffert, F. Kacik, E. Singovszka, M. Holub, Properties Characterization of Chemically Modified Hemp Hurds, *Materials*. 7 (2014) 8131–8150. <https://doi.org/10.3390/ma7128131>.
- [221] N. Stevulova, L. Kidalova, J. Cigasova, J. Junak, A. Sicakova, E. Terpakova, Lightweight Composites Containing Hemp Hurds, *Procedia Eng.* 65 (2013) 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.013>.
- [222] P. Strandberg-de Bruijn, P. Johansson, Moisture transport properties of lime–hemp concrete determined over the complete moisture range, *Biosyst. Eng.* 122 (2014) 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.03.001>.
- [223] P. Tronet, T. Lecompte, V. Picandet, C. Baley, Study of lime hemp concrete (LHC) – Mix design, casting process and mechanical behaviour, *Cem. Concr. Compos.* 67 (2016) 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004>.
- [224] P. Tronet, T. Lecompte, V. Picandet, C. Baley, Study of lime hemp composite precasting by compaction of fresh mix — An instrumented die to measure friction and stress state, *Powder Technol.* 258 (2014) 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.03.002>.
- [225] M. Viel, F. Collet, S. Prétot, C. Lanos, Hemp-Straw Composites: Gluing Study and Multi-Physical Characterizations, *Materials*. 12 (2019) 1199. <https://doi.org/10.3390/ma12081199>.
- [226] A. Youssef, T. Lecompte, V. Picandet, N. Challamel, COMPRESSIVE AND SHEARING BEHAVIOR OF LIME AND HEMP CONCRETE, 33 (2015) 7.
- [227] J. Page, M. Sonebi, S. Amziane, Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material, *Constr. Build. Mater.* 139 (2017) 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.037>.
- [228] S. Pantawee, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt, Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate  $[Al_2(SO_4)_3]$  and hydrated lime  $[Ca(OH)_2]$  treatment, *Constr. Build. Mater.* 156 (2017) 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.181>.
- [229] P. Kosiński, P. Brzyski, M. Tunkiewicz, Z. Suchorab, D. Wiśniewski, P. Palczyński, Thermal Properties of Hemp Shives Used as Insulation Material in Construction Industry, *Energies*. 15 (2022) 2461. <https://doi.org/10.3390/en15072461>.
- [230] A. Brás, A. Antunes, A. Laborel-Préneron, R. Ralegaonkar, A. Shaw, M. Riley, P. Faria, Optimisation of bio-based building materials using image analysis method, *Constr. Build. Mater.* 223 (2019) 544–553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.148>.

- [231] S.C. Somé, A. Ben Fraj, A. Pavoine, M. Hajj Chehade, Modeling and experimental characterization of effective transverse thermal properties of hemp insulation concrete, *Constr. Build. Mater.* 189 (2018) 384–396. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.210>.
- [232] U. Dhakal, U. Berardi, M. Gorgolewski, R. Richman, Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings, *J. Clean. Prod.* 142 (2017) 3655–3664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>.
- [233] P.A. Chabriac, E. Gourdon, P. Gle, A. Fabbri, H. Lenormand, Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters, *Constr. Build. Mater.* 112 (2016) 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.162>.
- [234] H. Lenormand, A. Mahieu, N. Leblanc, A. Vivet, Nouvelles agroressources pour panneaux de particules 100% biosourcés, (2014) 11.
- [235] Y. Brouard, N. Belayachi, D. Hoxha, S. Méo, W. Abdallah, Hygrothermal Behavior of Clay - Sunflower (*Helianthus annuus*) and Rape Straw (*Brassica napus*) Plaster Bio-Composites for Building Insulation, *Adv. Eng. Forum.* 21 (2017) 242–248. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.21.242>.
- [236] A. Bourdot, C. Magniont, M. Lagouin, G. Lambaré, L. Labonne, P. Evon, EVALUATION OF THE POTENTIAL OF CORN AND SUNFLOWER BARK PARTICLES AS BIO-AGGREGATES FOR LIGHTWEIGHT CONCRETE, (2018) 6.
- [237] H.H. Ratsimbazafy, Évaluation du potentiel de co-produits agricoles locaux valorisables dans le domaine des matériaux de construction (PALOMAC), (n.d.) 283.
- [238] N.C. Balaji, M. Mani, B.V.V. Reddy, Discerning Heat Transfer in Building Materials, *Energy Procedia.* 54 (2014) 654–668. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.307>.
- [239] D.M. Gálvez, Edificación Sustentable en México: Retos y Oportunidades, (n.d.) 41.
- [240] CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LOS MATERIALES, *Arquit. Efic.* (2014). <https://pedrojhernandez.com/2014/04/09/caracteristicas-termicas-de-los-materiales/> (accessed August 22, 2022).
- [241] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., NMX-C-460-ONNCCE-2009 “INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN –AISLAMIENTO TÉRMICO – VALOR ‘R’ PARA LAS ENVOLVENTES DE VIVIENDA POR ZONA TÉRMICA PARA LA REPÚBLICA MEXICANA - ESPECIFICACIONES Y VERIFICACIÓN,” 2009. <https://www.onncce.org.mx/es/>.
- [242] Y. Brouard, N. Belayachi, D. Hoxha, N. Ranganathan, S. Méo, Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation, *Constr. Build.*

Mater. 161 (2018) 196–207.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>.

- [243] V. Nozahic, Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l' amélioration de l' interface liant / végétal . To cite this version : HAL Id : tel-00809816, (2013).
- [244] B. Niez, Développement d' un matériau bio -sourcé pour la construction : le béton de tournesol, Polytech' Clermont Ferrand, 2015.
- [245] A. Ben Rhouma, Développement et caractérisation de matériaux composites biosourcés de construction à faible impact environnemental à base de tige de maïs, Thèse. (2017) 43.
- [246] T.T. Nguyen, Contribution à l' étude de la formulation et du procédé de fabrication d' éléments de construction en béton de chanvre Tai Thu Nguyen To cite this version : HAL Id : tel-01017510 Contribution à l' étude de la formulation et du procédé de fabrication d , (2014).
- [247] C. Magniont, G. Escadeillas, M. Coutand, C. Oms-Multon, Use of plant aggregates in building ecomaterials, Eur. J. Environ. Civ. Eng. 16 (2012) s17–s33. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452>.
- [248] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Assessing the impact of calculation methods on the variability of Young's modulus for hemp concrete material, Constr. Build. Mater. 198 (2019) 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.174>.
- [249] V. Nozahic, S. Amziane, Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder, Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 43 (2012) 1837–1849. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.07.011>.
- [250] M.R. Ahmad, B. Chen, Influence of type of binder and size of plant aggregate on the hygrothermal properties of bio-concrete, Constr. Build. Mater. 251 (2020) 118981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118981>.
- [251] A. Maaloum, Contribution à l' élaboration et à la caractérisation d' un panneau isolant 100% biosourcé, en utilisant la moelle de tournesol pour des applications de construction., Université de Pau et des Pays de l' adour, Tarbes, France, 2016.
- [252] Z. Zhao, X. Qu, F. Li, J. Wei, Effects of steel slag and silica fume additions on compressive strength and thermal properties of lime-fly ash pastes, Constr. Build. Mater. 183 (2018) 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.220>.
- [253] Z. Pezeshki, A. Soleimani, A. Darabi, S.M. Mazinani, Thermal transport in: Building materials, Constr. Build. Mater. 181 (2018) 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.230>.
- [254] M. Lagouin, C. Magniont, P. Sénéchal, P. Moonen, J.E. Aubert, A. Laborel-préneron, Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal

- and mechanical properties of vegetal concretes, *Constr. Build. Mater.* 222 (2019) 852–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004>.
- [255] M. Palumbo, Contribution to the development of new bio-based thermal insulation materials made from vegetal pith and natural binders: hygrothermal performance, fire reaction and mould growth resistance, *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2015. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/95754?locale-attribute=es>.
- [256] C. Niyigena, Experimental Investigation on Evidence of Low Effect of Hemp Bio-Aggregates on Thermal Property of Hemp Concrete, *Juniper Online J. Mater. Sci.* 1 (2017). <https://doi.org/10.19080/JOJMS.2017.01.555560>.
- [257] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete, *Constr. Build. Mater.* 160 (2018) 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026>.
- [258] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Investigating Hemp Concrete Mechanical Properties Variability Due to Hemp Particles, in: W.C. Ralph, R. Singh, G. Tandon, P.R. Thakre, P. Zavattieri, Y. Zhu (Eds.), *Mech. Compos. Multi-Funct. Mater.* Vol. 7, Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 9–17. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41766-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41766-0_2).
- [259] K. Bilba, M.-A. Arsene, A. Ouensanga, Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 91–96. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00003-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00003-3).
- [260] P.F.P. Ferraz, R.F. Mendes, D.B. Marin, J.L. Paes, D. Cecchin, M. Barbari, Agricultural Residues of Lignocellulosic Materials in Cement Composites, *Appl. Sci.* 10 (2020) 8019. <https://doi.org/10.3390/app10228019>.
- [261] J.M. Owoyemi, O.S. Ogunrinde, I.O. Oyeleye, Physical and mechanical properties of cement bonded strand board produced from *Gmelina arborea* (Roxb.) harvesting residues, *Afr. J. Agric. Res.* 16 (2020) 976–982. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.14809>.
- [262] F.C. Jorge, C. Pereira, J.M.F. Ferreira, Wood-cement composites: a review, *Holz Als Roh- Werkst.* 62 (2004) 370–377. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>.
- [263] A. Govin, A. Peschard, R. Guyonnet, Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>.
- [264] G.A.M. Brasileiro, J.A.R. Vieira, L.S. Barreto, Use of coir pith particles in composites with Portland cement, *J. Environ. Manage.* 131 (2013) 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.046>.
- [265] B. Na, Z. Wang, H. Wang, L. Xiaoning, WOOD-cement compatibility review, *Wood Res.* 59 (2014) 813–825.

- [266] G. Vaickelionis, R. Vaickelioniene, CEMENT HYDRATION IN THE PRESENCE OF WOOD EXTRACTIVES AND POZZOLAN MINERAL ADDITIVES, 115–122 (2006) 9.
- [267] L.K. Aggarwal, S.P. Agrawal, P.C. Thapliyal, S.R. Karade, Cement-bonded composite boards with arhar stalks, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.07.004>.
- [268] V. Sabathier, S. Louvel, G. Correa, C. Magniont, P. Evon, L. Labonne, INCIDENCE OF THE WATER-SOLUBLE COMPOUNDS CONTAINED INTO LAVENDER AND SUNFLOWER BIOAGGREGATES ON THE HARDENING PROCESS OF MINERAL BINDERS, (2017) 8.
- [269] V. Sabathier, C. Magniont, G. Escadeillas, C.A. Juarez, Flax and hemp fibre reinforced pozzolanic matrix: evaluation of impact of time and natural weathering, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 21 (2017) 1403–1417. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1175973>.
- [270] Y. Diquélou, E. Gourlay, L. Arnaud, B. Kurek, Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix, *Cem. Concr. Compos.* 55 (2015) 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>.
- [271] A. Peschard, A. Govin, P. Grosseau, B. Guilhot, R. Guyonnet, Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 2153–2158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.001>.
- [272] R.V. Ratiarisoa, C. Magniont, S. Ginestet, C. Oms, G. Escadeillas, Assessment of distilled lavender stalks as bioaggregate for building materials: Hygrothermal properties, mechanical performance and chemical interactions with mineral pozzolanic binder, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.011>.
- [273] A. Govin, A. Peschard, E. Fredon, R. Guyonnet, New insights into wood and cement interaction, *Holzforschung.* 59 (2005) 330–335. <https://doi.org/10.1515/HF.2005.054>.
- [274] A. Bourdot, C. Magniont, M. Lagouin, C. Niyigena, P. Evon, S. Amziane, Impact of Bio-Aggregates Properties on the Chemical Interactions with Mineral Binder, Application to Vegetal Concrete, *J. Adv. Concr. Technol.* 17 (2019) 542–558. <https://doi.org/10.3151/jact.17.542>.
- [275] V.F. Rahhal, V.L. onavetti, R. Talero, Hidratación temprana de cementos con mediano y alto contenido de adiciones minerales cristalinas, *Rev. Constr.* 4 (2005) 13–24.
- [276] A.A. Ramezaniapour, *Cement Replacement Materials*, 1era ed., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>.

- [277] F.M. Lea, P.C. Hewlett, M. Liska, Lea's chemistry of cement and concrete, Fifth edition, Butterworth-Heinemann, Oxford [England]; Cambridge, MA, 2019.
- [278] G. Correa, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES – FRANCE, (2016) 70.
- [279] V. Sabathier, S. Louvel, G. Correa, C. Magniont, P. Evon, L. Labonne, INCIDENCE OF THE WATER-SOLUBLE COMPOUNDS CONTAINED INTO LAVENDER AND SUNFLOWER BIOAGGREGATES ON THE HARDENING PROCESS OF MINERAL BINDERS, (2017) 8.
- [280] R.V. Ratiarisoa, C. Magniont, S. Ginestet, C. Oms, G. Escadeillas, Assessment of distilled lavender stalks as bioaggregate for building materials: Hygrothermal properties, mechanical performance and chemical interactions with mineral pozzolanic binder, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.011>.
- [281] Y. Diquélou, E. Gourlay, L. Arnaud, B. Kurek, Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix, *Cem. Concr. Compos.* 55 (2015) 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>.
- [282] Secretaría de energía, NOM-018-ENER-2011 Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba. métodos de prueba., 2011. <https://www.gob.mx/sener>.