

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



“DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ A BASE DE CEMENTO PORTLAND CON AGREGADO VEGETAL LIGNOCELULÓSICO DE AGAVE”

Por

Felipe Esteban Rosas Díaz

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS con orientación en materiales de construcción

Agosto, 2021

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



“DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ A BASE DE CEMENTO PORTLAND CON AGREGADO VEGETAL LIGNOCELULÓSICO DE AGAVE”

Por  
Felipe Esteban Rosas Díaz

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS con orientación  
en materiales de construcción

Director de tesis  
Dr. César Antonio Juárez Alvarado

Codirector de tesis  
Dr. David Gilberto García Hernández

Agosto, 2021

## Resumen

### **Desarrollo de un material compuesto de matriz a base de Cemento Portland con agregado vegetal lignocelulósico de Agave**

El propósito de la investigación fue desarrollar un biomaterial compuesto por una matriz a base de Cemento Portland reemplazando los agregados pétreos por agregados vegetales lignocelulósicos de Agave Salmiana residuales de la producción de destilados como el Tequila o el Mezcal.

Para el desarrollo de este proyecto se contactó una productora de destilados quienes aportaron la materia prima residual de su cadena productiva. Se realizaron pruebas de caracterización física, química y mecánica al material cementante CPO40R y al agregado vegetal, evaluando cuatro tratamientos sobre la fibra que permiten una mayor hidrofobicidad y por lo tanto una mejor compatibilidad al ser incorporada en una matriz de pasta de cemento. Los tratamientos se evaluaron mediante especímenes de mortero con 30% de contenido volumétrico de Agave con tamaño de partícula menor a 4.7mm determinando su conductividad térmica, densidad y resistencia mecánica a 7 y 28 días. Posteriormente se determinaron las proporciones para la producción del mortero vegetal obteniendo la menor conductividad térmica del material propuesto pero con una resistencia mecánica que permita su utilización como material de construcción. Se realizaron pruebas físicas y mecánicas sobre el compuesto en sus distintas configuraciones, trabajando con una matriz Taguchi con variables de entrada y salida controladas.

Como resultado, la incorporación del agregado vegetal de Agave Salmiana sometido a un tratamiento de hornificación permitió obtener valores de conductividad térmica de 0.48W/mK con una resistencia mecánica de 8.1MPa, muy superior a los 0.2MPa obtenidos con la fibra expuesta a los otros tratamientos, debido a la extracción de hidrosolubles que interfieren con la reacción de hidratación del Cemento Portland. A su vez, el tratamiento sobre la fibra permite disminuir en un 15.2% la capacidad de absorción de agua, logrando un mejor desempeño en el tiempo.

Firma del Asesor:

---

Dr. César Antonio Juárez Alvarado



## Dedicatoria

A Dios, mi familia y amigos.

*El caballo se alista para el día de la batalla;*

*Mas Jehová es el que da la victoria*

***Proverbios 21:31***

## Agradecimientos

Mediante este espacio quisiera agradecer sinceramente a todo el grupo académico, profesional, técnico y humano que me ha ayudado en el proceso de desarrollo de esta tesis. Agradezco también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado mediante la beca otorgada con CVU 995549 y a México por haberme recibido y mostrado su mayor riqueza: su gente.

El poder estar en esta instancia, corresponde a un logro que no solo me pertenece a mi. No habría podido estar aquí si no fuera por un grupo de personas muy importantes en mi vida y que son la mejor familia que alguien haya tenido. Comenzando con mi madre Angélica, mi hermano Andrés, mi sobrino Gaspar, mis abuelos Sergio y Maria y mi tío Jose Luis, así como un grupo de amigos que a lo largo de mi vida se han convertido en mi otra familia. Quiero que sepan lo feliz que me hacen con que sean parte de mi vida porque a lo largo de ésta, he sido alentado, apoyado, inspitado y tolerado por todos ellos. Lamento si aveces no he sido el hijo, hermano, tío, nieto, sobrino o amigo que se merecen, pero deben saber que a mi manera los amo a todos.

*Cada uno de nosotros es una preciosidad, en una perspectiva cósmica.*

*Si alguien discrepa de tus opiniones, déjalos vivir.*

*En un millón de galaxias no hallarías otro igual.*

***Carl Sagan***



## Tabla de contenidos

CAPÍTULO 1- INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
Introducción .....	9
Planteamiento del problema .....	10
Demanda de recursos naturales en la construcción .....	10
Demanda energética de climatización.....	14
Generación de residuos de agave.....	15
Justificación de la investigación .....	20
CAPÍTULO 2 - GENERALIDADES .....	22
Introducción .....	23
cemento Portland.....	24
Consumo a nivel mundial de cemento Portland .....	24
Producción de cemento Portland .....	26
Composición química del cemento Portland.....	27
Pasta de cemento.....	32
Hidratación del cemento Portland.....	32
Fibras naturales .....	35
Agroindustria y bioresiduos .....	35
Fibras naturales vegetales.....	36
Propiedades de las fibras vegetales.....	37
Clasificación de fibras vegetales .....	38
Composición de fibras vegetales .....	39
Ensayos y caracterización aplicables.....	47
Composición química .....	47
Método experimental Taguchi.....	47
Conductividad térmica [ $\lambda$ ] .....	48
Transmitancia térmica [ $U$ ].....	50

Difracción de rayos X [DRX].....	51
Fluorescencia de Rayos X [FRX].....	51
Análisis de espectroscopia infrarroja [FTIR] .....	52
Termo gravimetría [TGA] .....	54
Ensayo de compresión .....	54
Concreto Vegetal.....	57
Generalidades.....	57
Comportamiento mecánico de concretos vegetales.....	59
Comportamiento higrotérmico de concretos vegetales .....	63
Durabilidad de concretos vegetales.....	66
Tratamiento superficial (recubrimiento) .....	68
Tratamiento químico.....	68
Tratamiento de hornificación .....	69
CAPÍTULO 4 – HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....	70
Hipótesis .....	71
Objetivo general .....	71
Objetivos específicos.....	71
CAPÍTULO 5 - METODOLOGÍA .....	72
Introducción .....	73
Etapa 1 – Obtención de materias primas.....	74
Etapa 2 – Caracterización de cementante y fibras naturales.....	75
Caracterización de cementante – Estado original.....	75
Distribución del tamaño de partícula del polvo de cemento.....	75
Densidad de polvo de cemento .....	75
Difracción de rayos X (DRX) sobre el polvo de cemento .....	75
Fluorescencia de rayos X (FRX) sobre el polvo de cemento.....	76
Espectroscopia infrarroja (FTIR) sobre el polvo de cemento.....	76
Análisis termo gravimétrico (TGA) sobre el polvo de cemento .....	76

Caracterización de cementante – Estado endurecido .....	76
Dosificación de pastas de cemento .....	76
Fabricación de especímenes de pasta de cemento .....	77
Trabajabilidad en estado fresco de la pasta de cemento.....	78
Curado de las muestras de pasta de cemento .....	79
Detención de proceso de hidratación de la pasta de cemento .....	79
Peso volumétrico de la pasta de cemento endurecida .....	79
Conductividad térmica de la pasta de cemento endurecida .....	79
Resistencia a la compresión de la pasta de cemento endurecida .....	80
DRX sobre la pasta de cemento endurecida.....	81
FTIR sobre la pasta de cemento endurecida .....	82
TGA sobre la pasta de cemento endurecida.....	82
Caracterización del agregado vegetal lignocelulósico de agave .....	82
Caracterización morfológica de la penca de Agave salmiana .....	82
Contenido inicial de agua de la penca de Agave salmiana.....	83
Preparación de la muestra de Agave salmiana.....	83
Densidad Aparente de la penca de Agave salmiana.....	84
Conductividad térmica de la fibra de Agave salmiana .....	84
Absorción de agua de la penca de Agave salmiana.....	85
Observación morfológica de la fibra de Agave salmiana .....	86
Difracción de rayos X (DRX) de la penca de Agave salmiana.....	86
Fluorescencia de rayos X (FRX) de la penca de Agave salmiana .....	87
Espectroscopia infrarroja (FTIR) de la penca de Agave salmiana.....	87
Análisis termo gravimétrico (TGA) de la penca de Agave salmiana.....	87
Caracterización química de la penca de Agave salmiana .....	88
Etapas 3 - Tratamiento y evaluación de la fibra .....	94
Preparación de muestras .....	95
Tratamientos sobre el agregado lignocelulósico de Agave salmiana.....	95

Agregado vegetal sin tratamiento [S/T].....	95
Tratamiento de congelamiento de la fibra [T/C] .....	96
Tratamiento físico de hornificación [T/H].....	97
Tratamiento químico de NaOH [T/NaOH] .....	97
Tratamiento de recubrimiento a base de parafina sólida [T/P] .....	98
Caracterización del agregado vegetal post tratamientos.....	99
Tamaño de partícula del agregado vegetal después del tratamiento .....	99
Absorción de agua del agregado vegetal después del tratamiento.....	99
Densidad Aparente del agregado vegetal después del tratamiento .....	100
Conductividad térmica del agregado vegetal después del tratamiento .....	100
Observación morfológica del agregado vegetal después del tratamiento .....	100
Evaluación de los tratamientos en la fabricación de mortero vegetal .....	100
Fabricación de especímenes de mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra.....	100
Curado de las muestras de mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra .....	101
Detención del proceso de hidratación del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra .....	102
Peso volumétrico del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra .....	102
Conductividad térmica del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra.....	102
Resistencia a la compresión del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra.....	102
Difracción de rayos X (DRX) de la pasta de cemento del mortero vegetal .....	102
Espectroscopia infrarroja (FTIR) de la pasta de cemento del mortero vegetal .....	103
Análisis termo gravimétrico (TGA) de la pasta de cemento del mortero vegetal .....	103
Observación morfológica sobre la pasta de cemento del mortero vegetal .....	103
Etapa 4 - Metodología experimental Taguchi.....	103
Metodología experimental Taguchi .....	103
Etapa 5 - Estudio energético .....	104
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	107
Etapa 2 – Caracterización de cementantes y fibras naturales .....	108

Caracterización de cementantes – Estado original .....	108
Distribución del tamaño de partícula del polvo de cemento .....	108
Densidad del polvo de cemento .....	108
Difracción de rayos X (DRX) sobre el polvo de cemento .....	109
Fluorescencia de rayos X (FRX) sobre el polvo de cemento .....	110
Espectroscopia infrarroja (FTIR) sobre el polvo de cemento .....	110
Análisis termo gravimétrico (TGA) del polvo de cemento .....	111
Caracterización de cementantes – Estado endurecido .....	112
Trabajabilidad en estado fresco de la pasta de cemento .....	112
Peso volumétrico de la pasta de cemento endurecida .....	113
Conductividad térmica de la pasta de cemento endurecida .....	114
Resistencia a la compresión de la pasta de cemento endurecida .....	115
DRX de la pasta de cemento endurecida .....	117
FTIR de la pasta de cemento endurecida .....	118
TGA de la pasta de cemento .....	121
Caracterización del agregado vegetal lignocelulósico de agave .....	121
Caracterización morfológica de la penca de Agave salmiana .....	122
Contenido inicial de agua de la penca de Agave salmiana .....	123
Preparación de la muestra de Agave salmiana .....	124
Absorción de agua de la fibra de Agave salmiana .....	125
Densidad Aparente de la penca de Agave salmiana .....	126
Conductividad térmica de la fibra de Agave salmiana .....	126
Observación morfológica de la penca de Agave salmiana .....	127
Difracción de rayos X (DRX) de la penca de Agave salmiana .....	129
Fluorescencia de rayos X (FRX) de la penca de Agave salmiana .....	130
Espectroscopía infrarroja (FTIR) de la penca de Agave salmiana .....	130
Análisis termo gravimétrico (TGA) de la penca de Agave salmiana .....	131
Caracterización química de la penca de Agave salmiana .....	133

Etapa 3 - Tratamiento y evaluación de la fibra .....	134
Caracterización del agregado vegetal post tratamientos.....	134
Tamaño de partícula del agregado vegetal después del tratamiento .....	134
Absorción de agua del agregado vegetal después de los tratamientos .....	135
Densidad Aparente del agregado vegetal después del tratamiento .....	137
Conductividad térmica del agregado vegetal después del tratamiento.....	138
Observación morfológica del agregado vegetal después del tratamiento.....	140
Evaluación de los tratamientos en la fabricación de mortero vegetal .....	143
Peso volumétrico del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra .....	143
Conductividad térmica del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra.....	145
Resistencia a la compresión del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra.....	147
Espectrofotometría del agregado vegetal después de los tratamientos.....	148
Análisis sobre el tratamiento de hornificación .....	150
FTIR sobre la fibra tratada mediante hornificación.....	150
Análisis sobre la pasta de cemento del mortero vegetal .....	151
Difracción de rayos X (DRX) de la pasta de cemento del mortero vegetal .....	151
Espectroscopía infrarroja (FTIR) de la pasta de cemento del mortero vegetal .....	153
Análisis termo gravimétrico (TGA) de la pasta de cemento del mortero vegetal .....	154
Observación morfológica sobre la pasta de cemento del mortero vegetal .....	155
Etapa 4 - Metodología experimental Taguchi.....	157
Metodología experimental Taguchi.....	157
Etapa 5 – Estudios complementarios: Análisis energético potencial.....	160
CAPÍTULO 7 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	165
Conclusiones generales .....	166
Recomendaciones para investigaciones futuras .....	169
CAPÍTULO 8 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	170

## **CAPÍTULO 1- INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## Introducción

Hoy en día, temáticas medioambientales como el cambio climático a raíz del calentamiento global han dado lugar a nuevas investigaciones para el desarrollo de materiales amigables con el medio ambiente, que presenten una combinación de propiedades asociadas a un menor impacto ambiental y menores costos de producción [1][2]. En los últimos años ha existido un sector importante de investigadores empeñados en realizar estudios con el objetivo de desarrollar el uso de fibras vegetales en materiales compuestos [3], previniendo la tala de recursos forestales, produciendo buenos rendimientos económicos para el cultivo y otorgando propiedades mejoradas de los materiales compuestos desarrollados [4][5]. El propósito de la investigación es desarrollar un biomaterial compuesto por una matriz a base de cemento Portland reemplazando los agregados pétreos por agregados vegetales lignocelulósicos de agave. De acuerdo con la experiencia científica, la utilización de elementos lignocelulósicos permite mejorar las propiedades higrotérmicas del material, mejorando el comportamiento energético térmico de las viviendas y a su vez disminuyendo el impacto ambiental asociado al proyecto de edificación. Para el desarrollo de este proyecto se emplearon fibras obtenidas de la penca del Agave salmiana utilizada en la fabricación de destilados y cuyas partes distintas a la piña corresponden a materia prima residual de la cadena productiva. Se realizaron pruebas de caracterización fisicoquímica antes y después de ser sometidas a tratamientos que modifiquen su propiedad hidrofílica para evaluar el tratamiento que obtuvo mejores resultados de interés. Posteriormente se determinaron las proporciones y métodos para el mezclado de la matriz cementante con bioagregado obteniendo las mejores propiedades higrotérmicas del material propuesto. Se realizaron pruebas físicas y mecánicas para cuantificar las propiedades del material en sus distintas configuraciones, y ver la influencia de las variables con una matriz Taguchi. Para finalizar, se realizó un estudio térmico evaluando materialidades convencionales de viviendas con el material propuesto a modo de cuantificar potenciales ahorros energéticos en climatización. Como resultado de esta investigación, se obtuvo un material de construcción competente para su utilización en cuanto a su resistencia mecánica, con una baja conductividad térmica que permitirá ahorros energéticos de climatización, pero con un impacto ambiental menor al de materiales convencionales.

## **Planteamiento del problema**

El planteamiento del problema de esta investigación está enfocado en tres lineamientos, los cuales abarcan la alta demanda de recursos naturales y energéticos por parte del sector de la construcción, la demanda energética de climatización en las viviendas en México y, por otro lado, la generación de residuos agrícolas derivados de la industria del tequila y mezcal en México por la cosecha de Agave. Cada uno de estos temas será abordado en detalle a continuación.

### **Demanda de recursos naturales en la construcción**

El aumento de la población mundial propicia la construcción de infraestructuras más grandes y costosas que son diseñadas para una duración mínima específica. Se espera que la población mundial aumente en casi 2 mil millones de personas entre los años 2000 y 2030, y casi todos estos habitantes vivirán en ciudades de África, Asia y América Latina [6]. Desde la segunda mitad del siglo XX se ha producido un crecimiento económico global generando importantes avances sociales en las principales economías mundiales, sin embargo, asociado a este fenómeno, están los indicadores ambientales negativos que resaltan en paralelo [7]. La necesidad de una vivienda económica y sustentable es un problema global inherente y aún existen numerosos desafíos para producir productos de construcción respetuosos con el medio ambiente que sean estructuralmente seguros y duraderos [8].

Existen estudios que demuestran una estrecha vinculación entre los indicadores económicos y los medioambientales que pueden ser cuantificados mediante categorías de impacto como la huella de carbono y la energía contenida entre otras [6][9]. Si relacionamos el crecimiento económico de México con los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero se puede observar la estrecha relación que existe entre estas dos curvas y que se muestra en la figura 1. Este fenómeno no se percibe de la misma manera en países de la Unión Europea en donde se advierte un claro desacoplamiento de las curvas debido a las medidas de sustentabilidad que han aplicado como lineamientos y que se muestra en la figura 1 (izquierda) [10][11].

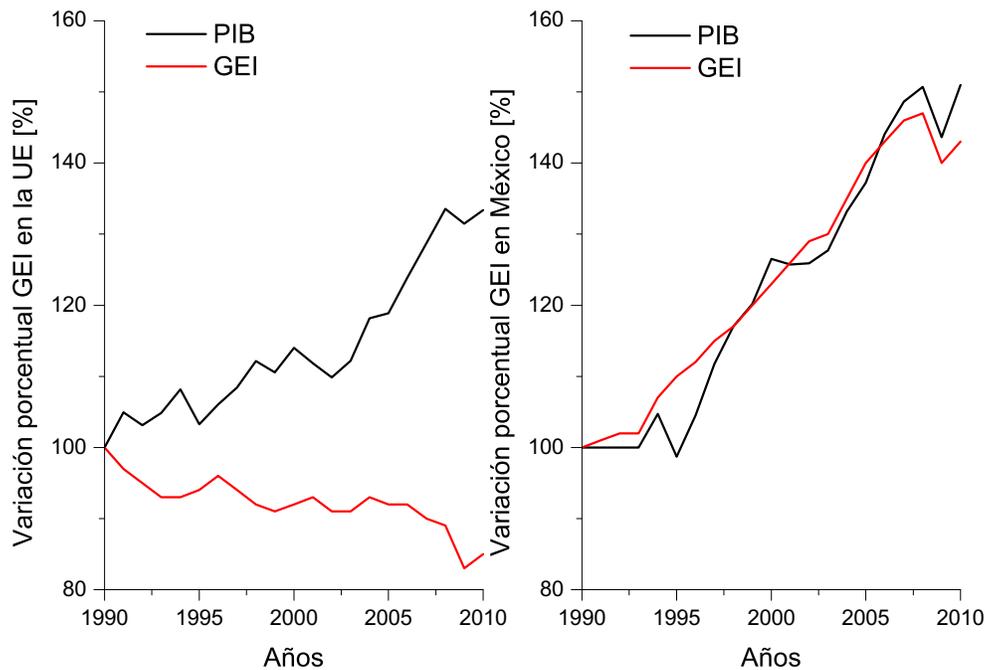


Figura 1 - Evolución del PIB y las emisiones de GEI para la UE (izquierda) y México (derecha)

Las emisiones totales de gases de efecto invernadero a nivel mundial, por sector económico en 2010 que incluye las emisiones directas fueron: 25% para la producción de electricidad y calor en edificios, 6.4% para la construcción de edificios, 14% para el transporte, 21% para la industria, 9.6% para otras energías y 24% para la agricultura, la silvicultura y otros usos del suelo. Por consiguiente, el sector de la construcción se enfrenta a importantes retos en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de energía mediante el uso de materiales alternativos [5].

Se estima que, a nivel mundial, el sector edificación es responsable de entre un 30 a un 40% del uso de la energía consumida directamente durante la construcción, el uso y la demolición del edificio, e indirectamente a través de la producción de materiales utilizados en el edificio (energía contenida) [6], así como también de entre un 40% a un 50% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.

Alrededor del 20-25% de toda la energía mundial se gasta en la producción de materiales de construcción como el cemento o el acero. Además, existe una correlación con altas emisiones de gases de efecto invernadero ( $CO_{2eq}$ ) y con el consumo de materias primas equivalentes a 1000 millones de toneladas de agua, 1500 millones de toneladas de cemento, 10000 millones de toneladas de arena y

pedras en todo el mundo cada año [12]. Estas emisiones de CO<sub>2eq</sub> alcanzaron los 8.6 billones de toneladas en el 2004, cifra que podría alcanzar los 15.6 billones de toneladas para el 2030, en caso de continuar construyendo de la manera actual [7][6][13][14]. Además, es importante mencionar que la construcción de edificios consume el 40% de la piedra, arena y grava, el 25% de la madera virgen, y el 16% del agua utilizada cada año en todo el mundo. Asimismo, es responsable de la generación del 30% de los residuos sólidos mundiales, asociados a la extracción de materias primas, la fabricación de componentes, la construcción, la restauración y la demolición [7][15].

El creciente problema de la reducción de recursos y la contaminación global ha desafiado a muchos investigadores a buscar nuevos materiales en función de los recursos renovables. En este contexto el concepto de "construcción sustentable" ha sido utilizado para caracterizar la construcción que incluye criterios ambientales en el concepto del proyecto, en la forma de construir, mantener y, cuando llegue el momento, demoler las obras [14]. Para este aspecto, el desarrollo de compuestos con materias primas vegetales se basa en la estrategia de prevenir la demolición de los recursos agroforestales, así como en producir buenos rendimientos económicos para su cultivo [4][16]. La racionalización de nuestro consumo de energía y la promoción del uso de materiales de bajo impacto ambiental son medidas que deben adoptarse para frenar la degradación de nuestro medio ambiente, así como el agotamiento prematuro de los recursos energéticos disponibles [13]. La combinación de fibras naturales con matrices de recursos no renovables y renovables para producir materiales compuestos competitivos está ganando cada vez más atención. La mayoría de los productos y materiales químicos procedían de recursos renovables hasta principios del siglo XX, sin embargo, el éxito y el enorme crecimiento de la industria petroquímica ralentizó el crecimiento de los productos biotecnológicos [17].

Las fases de construcción se pueden separar según el proceso que implique durante su ciclo de vida como se observa en la figura 2.

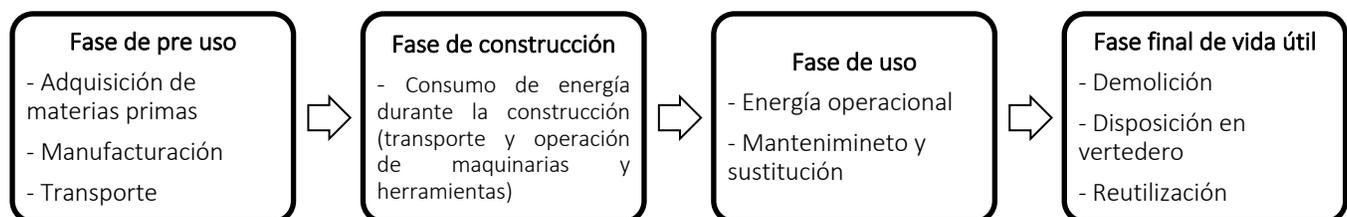


Figura 2 - Uso de los límites del sistema desde la cuna hasta la tumba en la investigación de ACV en un edificio [6].

La mayoría de los investigadores han encontrado que la fase de uso del ciclo de vida de los edificios contribuye al mayor impacto ambiental debido a su extensa duración y porque está relacionada con la utilización de combustibles fósiles para generación eléctrica y calefacción [6]. Se ha documentado que esta fase consume la mayor cantidad de energía en comparación con otras fases del ciclo de vida del edificio como se observa en la figura 3 llegando a valores que superan el 80% [18], sin embargo, a medida que el consumo energético anual disminuye, la energía incorporada en los materiales comienza a ser mas relevante en el análisis de ciclo de vida del edificio. En climas más fríos, la calefacción de espacios se considera el mayor consumidor de energía, sin embargo, los edificios en las regiones tropicales pueden tener diferentes patrones de uso de energía [6].

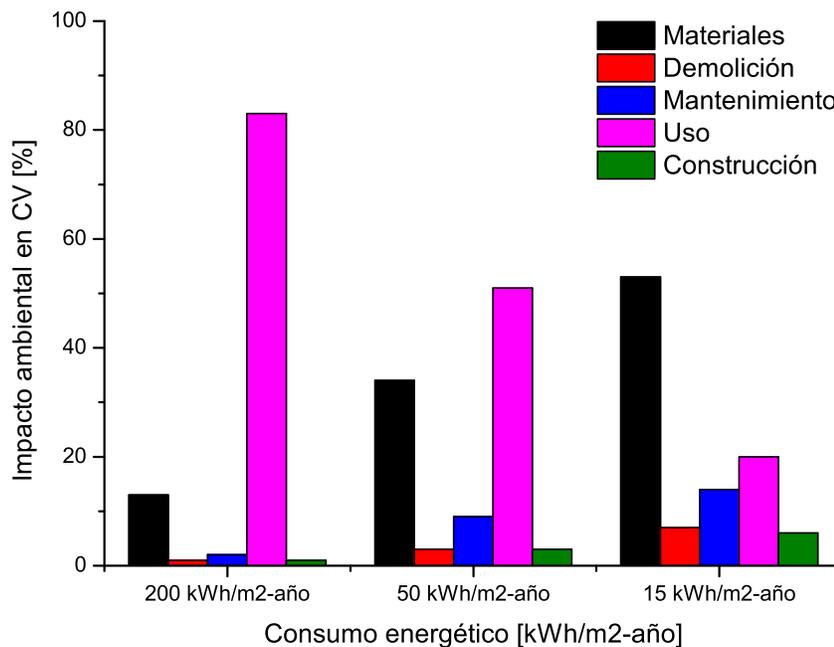


Figura 3 - Impacto ambiental entre diferentes fases de un proyecto dependiendo de su desempeño energético [5]

Las tecnologías que se seleccionen en la actualidad en las edificaciones tendrán consecuencias inmediatas con respecto al consumo de energía y sus patrones de emisión [19]. Considerar y aplicar prácticas de sustentabilidad en la construcción puede generar una reducción del 35% en las emisiones de CO<sub>2</sub>, un ahorro en el consumo de agua y energía del 30% al 50% respectivamente y la reducción de los costos por disposición de residuos sólidos en hasta un 90% [7][18].

En resumen, el sector de la construcción lucha contra cuatro impactos principales en el medio ambiente: sus emisiones de gases de efecto invernadero; su consumo de energía; su consumo de

recursos naturales y su producción de residuos. Como alternativa, los materiales a base de plantas tienen un valioso beneficio para la salud, el medio ambiente, un hábitat confortable (manejo de la humedad, térmico y acústico) y materiales sostenibles [5].

### **Demanda energética de climatización**

A medida que aumenta la demanda de confort térmico interior, los sistemas de energía que proporcionan calefacción, ventilación y aire acondicionado aumentan su consumo energético en edificios. La mejora del aislamiento térmico de los edificios es una de las formas más efectivas de obtener ahorros de energía reduciendo las pérdidas por medio de la envolvente térmica. Sin embargo, variados materiales de construcción no tienen buenas propiedades de aislamiento térmico, por lo tanto, se utilizan materiales de aislamiento térmico adicional, como tableros sólidos de Poliéstireno Expandido y Poliuretano en la envolvente térmica [20].

Actualmente, en México, el impacto económico en la climatización de viviendas para el confort es muy notorio y va en incremento. El sector residencial muestra el mayor efecto de la climatización con un consumo de electricidad que se eleva casi 50% de enero a agosto. El consumo total de electricidad del país en agosto es casi 5TWh (aproximadamente 30%) superior que el promedio de diciembre a marzo. En la figura 4, se aísla la carga de enfriamiento de cada sector al compararla con la carga base en invierno, para lo cual es claro que el sector residencial, así como el comercial y la mediana industria cuentan con la mayor demanda energética para fines de enfriamiento en México. El consumo de energía para climatización anual derivada de este modo fue de 22.6TWh en 2015, u 8.9% la electricidad generada en el año. El costo de la electricidad para climatización para los hogares y negocios mexicanos fue de alrededor de 31 mil millones de pesos en 2015 con base en las tarifas actuales. Específicamente, los usuarios de energía residenciales pagaron más de 10 mil millones de pesos por climatización, aproximadamente 1.1 pesos por kWh [21][22].

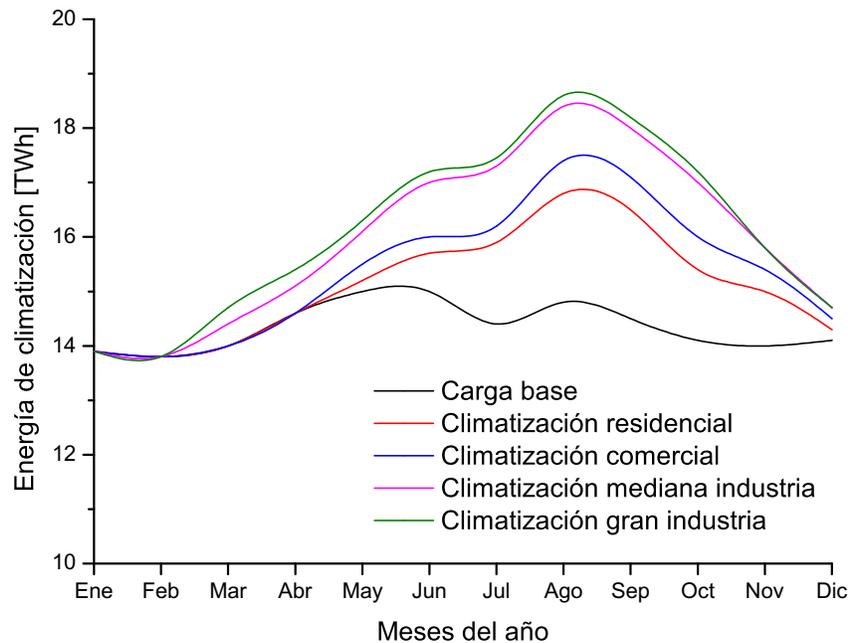


Figura 4 - Cargas de climatización en México por sector [22]

Se han llevado a cabo investigaciones de Análisis de Ciclo de vida en edificios con una proyección de 50 años de vida en las que se identificó que la climatización consume la mayor cantidad de energía durante la fase de uso del edificio (48%), seguida por la iluminación (37%), la ventilación (7%), y los equipos varios (6%). Sin embargo, estos valores son muy variables dependiendo de la localización geográfica en que se sitúe la edificación produciendo patrones de uso de energía diferentes [6].

Los materiales de aislamiento térmico juegan un papel importante en lograr la eficiencia energética de los edificios. Existen muchos tipos de materiales de aislamiento térmico en los edificios, sin embargo, los materiales naturales tienen numerosas ventajas sobre otros materiales y, por lo tanto, son los más prometedores para la construcción. Es por ello que en los últimos años se han realizado numerosas investigaciones experimentales y se ha creado un gran interés en todo el mundo sobre las posibles aplicaciones de las fibras naturales como materiales compuestos reforzados [23].

### Generación de residuos de agave

Alrededor del mundo se han llevado a cabo constantes investigaciones para mejorar el desempeño en la utilización de biomasa en lugar de combustibles fósiles para la conversión de energía. El crecimiento global de biomasa se estima alrededor de 112 y 220 mil millones de toneladas por año, sin embargo, su

producción mundial anual con potencial energético es estimada en cerca de 3 mil millones de toneladas para residuos forestales; 1.1 a 3.1 mil millones de toneladas para residuos agrícolas; y cerca de 1.1 mil millones de toneladas para desechos sólidos municipales [24].

En la agroindustria, las materias primas que son captadas deben ser sometidas a procesos para darle valor agregado que permita generar productos que son atractivos para los consumidores y optimizando al máximo las ganancias económicas posibles de su producción. Las operaciones unitarias que se implementan en la cadena productiva de cualquier materia prima llevan consigo una problemática medioambiental que es la alta producción de residuos asociados. Dependiendo del tipo de materia prima, estos pueden ser tratados con el fin de reducir el impacto ambiental negativo y transformarse en un producto de valor que sirva de materia prima para otros procesos productivos y genere ingresos económicos adicionales [25].

Un análisis del empleo dado a los residuos obtenidos de distintos sectores agroindustriales demuestran que la industria del fique aprovecha el 2% de la biomasa producida, la industria cervecera emplea el 8% de los nutrientes del grano, mientras que en la industria de aceite de palma y de celulosa menos del 9% y 30% respectivamente; en la industria del café solo el 9.5% del peso del fruto fresco es aprovechado para la preparación de la bebida, quedando un 90.5% como residuo, otro ejemplo de agroindustria de gran impacto en cuanto a la producción de residuos lo constituye la producción de papel, donde solo el 30% de la materia prima es aprovechada [25].

El agave corresponde a una planta emblemática de Mesoamérica que de manera natural se da entre el sur de Estados Unidos y el norte de Sudamérica, siendo en México el punto central de su origen y diversidad. Se estima que del total de especies de agave en el mundo el 75% crece en México siendo un 57% de ellas endémicas de esta zona. El Agave es la materia prima que se utiliza para producir los destilados de Tequila y Mezcal principalmente. Esta planta corresponde a un componente estratégico para la economía principalmente de zonas rurales de México debido a que sus derivados poseen un potencial comercial muy viable siendo un motor de desarrollo sobre todo en zonas con condiciones climatológicas adversas. El agave se da de manera preferente en zonas entre 1000 y 2000 m.s.n.m lo cual se ajusta a la geografía de México, concentrando su crecimiento en la zona altiplánica y entre las dos cordilleras que atraviesan longitudinalmente al país: la Sierra Madre Oriental y La Sierra Madre Occidental como puede observarse en la figura 5. Otra característica importante de esta planta es la

resistencia que presenta frente a climas de sequía y heladas lo cual permite su crecimiento en zonas en que por estas razones no se puedan producir otro tipo de cultivos [26].

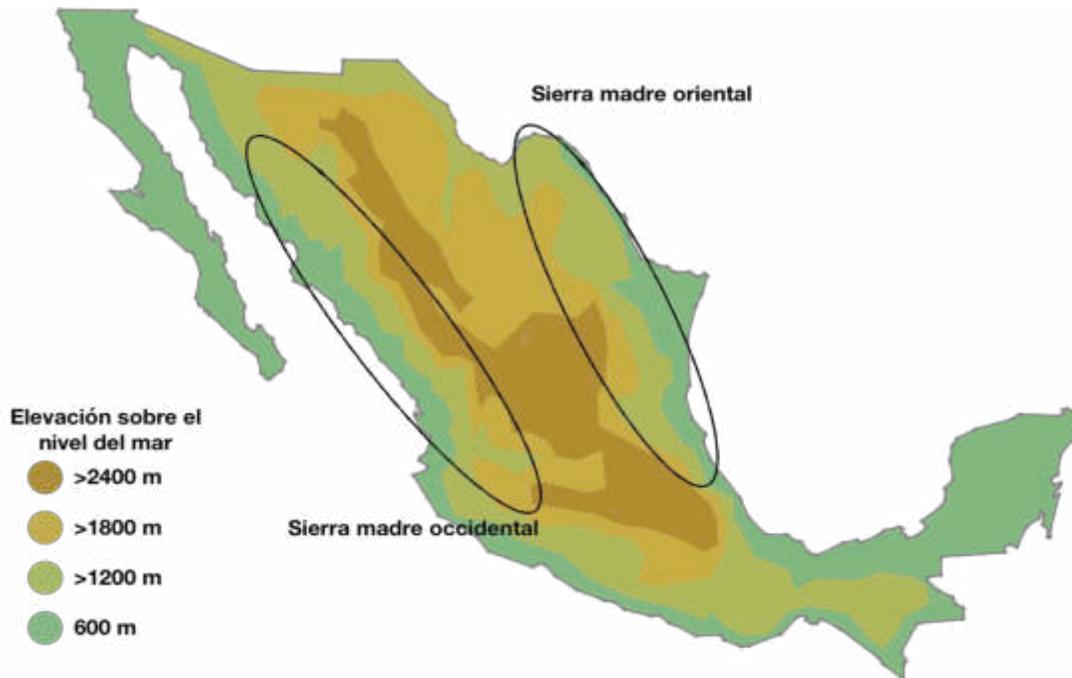


Figura 5 - Zonas que concentran el principal volumen de crecimiento de agave para la producción de destilados

Las tres clases dominantes de Agave que se cultivan son: (1) Agave tequilana Weber variedad Azul; (2) para la producción de mezcal se encuentra el Agave, que incluye especies como agave angustifolia Haw, Agave esperrima, Agave weberi, Agave potatorum y Agave salmiana; y (3) para la producción de Henequén está el Agave fourcroydes. La gráfica de la figura 6, muestra la cantidad de hectáreas cultivadas para las tres especies predominantes en México entre los años 1995 y 2008 en donde se aprecia que en los últimos 5 años del siglo XX, el Henequén ocupaba la mayor cantidad de tierras cultivadas, sin embargo, a partir del año 2003 se produjo un incremento sustancial en las áreas plantadas con A. tequilana [27][28]. Como consecuencia del cultivo de esta planta principalmente por la industria del tequila en México, se genera un gran cantidad de residuos, los cuales no son atendidos ni reutilizados para otras aplicaciones [24].

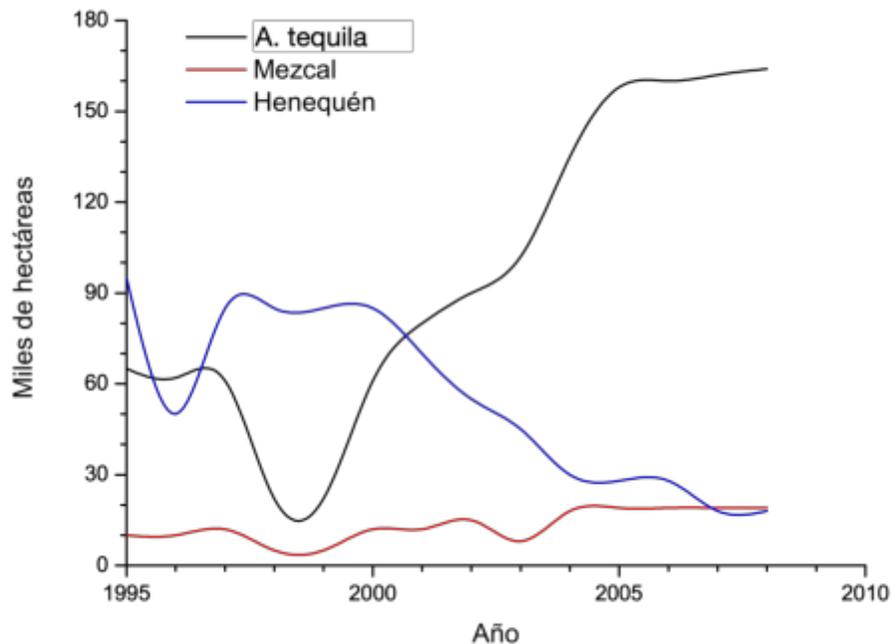


Figura 6 - Superficie plantada de Agave tequilana, materias primas de mezcal y Henequén en miles de hectáreas 1995-2008 [28]

La industria de los destilados de Agave es de suma importancia ya que la creciente demanda de las bebidas alcohólicas genera una producción de millones de litros anuales. El tequila es una de las bebidas mas consumidas en el mundo, mostrando un crecimiento anual atribuido al consumo nacional de esta bebida y a las exportaciones a 170 países. En la gráfica de la figura 7 se puede observar como ha ido en aumento el consumo de estos destilados llegando en el año 2019 a 351.7 millones de litros producidos [29]. Sin embargo, la producción de tequila y mezcal está asociada a la generación de residuos no valorizados como es el caso de la penca (hojas de la planta) en cantidades volumétricas importantes y su disposición se ha vuelto un problema ambiental y económico [26]. Estudios han demostrado que los residuos asociados a la industria de los destilados de Agave pueden ser utilizados como materias primas para la obtención de diversos subproductos [30].

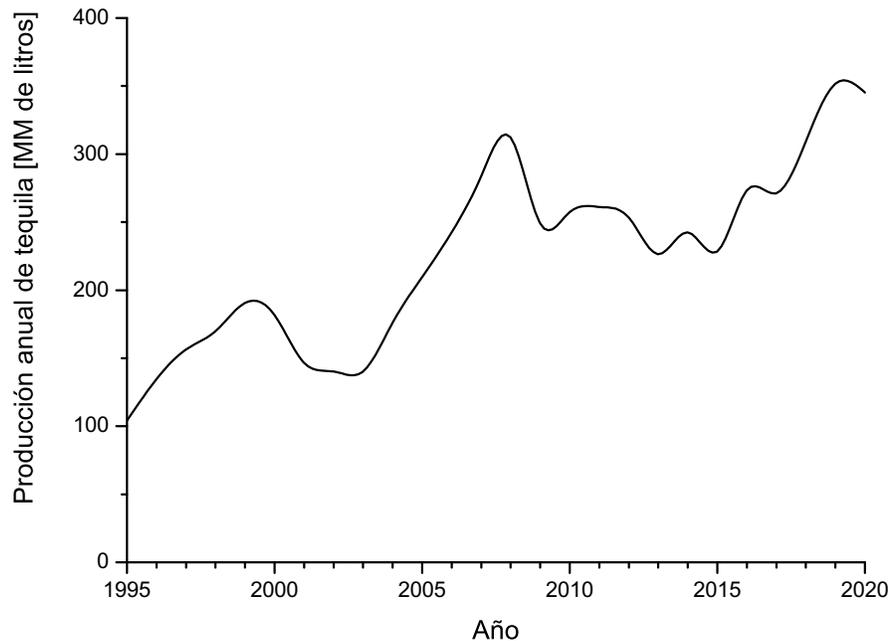


Figura 7 – Producción de tequila en millones de litros por año [29]

Los residuos que se generan con la producción de Agave son principalmente el bagazo, correspondientes a las fibras obtenidas posterior al procesamiento de las piñas, las pencas correspondientes a las hojas de la planta y las vinazas correspondientes al residuo líquido obtenido después de la destilación con un alto contenido de material orgánico en suspensión [31]. Estimaciones muestran que del total de la planta de agave, un 63.85% de la masa corresponde a las pencas y un 36.15% a la piña de donde se extrae el destilado [32]; además, se sabe que para la producción de un litro de tequila se requieren entre 7 y 8 kilogramos de piña de agave que generan aproximadamente 13 kilogramos de pencas como residuo de la cadena productiva [31]. Las estimaciones de la producción potencial de agave quedan descritas en la tabla 1, en donde se muestran los valores en miles de toneladas y cuya estimación se basa en la capacidad instalada actual, los rendimientos de referencia históricos y considerando la frontera agrícola reportada al año 2016 [33].

Tabla 1 - Proyección de la producción de agave para la industria de destilados [33]

Concepto	Estimaciones				Crecimiento anual	
	2016	2018	2024	2030	2003-2016	2016-2030
Producción potencial de agave (miles de toneladas)	1667.82	1732.58	1926.42	2120.27		
Crecimiento acumulado	Año base	3.88%	11.19%	27.13%	10.88%	3,01%

La información descrita en la tabla 1, deja ver los altos índices de producción del Agave para la industria de los destilados, correspondientes al 3.04% de la producción de agroindustriales equivalentes al 1.25% del PIB agrícola nacional con 111 420 hectáreas sembradas al año 2016. Se estima que al año 2016 las exportaciones mexicanas de estas bebidas ascendieron a un total de 1 229 millones de dólares equivalentes a 186.71 millones de litros [33].

Estos antecedentes demuestran la importancia del potencial de producción del agave sobre los indicadores económicos de México, así como la gran cantidad de residuos asociados a su producción los cuales no poseen una valoración y pueden ser incorporados en otros procesos productivos disminuyendo impactos ambientales y otorgando un valor agregado a subproductos.

### Justificación de la investigación

Grupos de investigación alrededor del mundo están enfocados en el uso sustentable de los recursos naturales y el impacto ambiental asociado a su eliminación inadecuada. Por esto es que una de las aplicaciones propuestas para la disposición final de este tipo de residuos es su incorporación en obras de edificación [34]. Se ha demostrado el alto potencial de las fibras vegetales para la reducción de la contracción plástica, la ductilidad, las propiedades higrotérmicas y las resistencias mecánicas, aunque aun se está trabajando para mejorar aspectos de durabilidad de las fibras en el medio alcalino de una matriz mineral [3].

Es así como para lograr que un material sea realmente sostenible, se debe tener en cuenta cada uno de los procesos por los que pasa, desde la extracción de la materia prima, el transporte requerido en cada

etapa, los procesos de transformación de la materia, la forma de uso del material, su disposición luego de acabar su vida útil, su capacidad de ser reciclado o reutilizado, entre otros [7].

El proyecto de investigación mediante el desarrollo del material compuesto a base de cemento Portland con agregados lignocelulósicos residuales de Agave busca dar solución a las problemáticas anteriormente expuestas. La utilización de estas materias primas busca disminuir el impacto ambiental asociado a la producción del material en comparación a materiales convencionales para prestaciones similares. A su vez en la fase operativa de un proyecto de edificación permitirá generar ahorros energéticos de climatización debido a la baja conductividad térmica del compuesto desarrollado.

### **Impacto de la investigación**

El impacto de esta investigación esta enfocado en el impulso y divulgación de los materiales de bajo impacto ambiental para la construcción de edificaciones sustentables con altos estándares de eficiencia energética.

Las problemáticas mundiales relacionadas con el cambio climático y el calentamiento mundial han direccionado las líneas investigativas en el mundo, volcando los intereses científicos y gubernamentales en dar solución a este tipo de problemáticas por lo que la eficiencia energética y sustentabilidad en la construcción posee una directriz importante en el desarrollo de materiales sustentables. Debido a esto, el desarrollo de un material de construcción que utiliza agregados lignocelulósicos de Agave aportándole ventajas sobre su desempeño energético para aislar viviendas y reducir demandas de climatización pretende tener un impacto sobre la construcción en México valorizando recursos en una cadena productiva importante, además de generar ahorros energéticos que se pueden traducir en menores costos económicos de parte de los habitantes logrando mantener mejores condiciones de habitabilidad e impidiendo patologías en las viviendas a largo y mediano plazo.

Se espera, además, que este tipo de iniciativas en cuanto a la eficiencia energética de la construcción en todas sus facetas de ciclo de vida a futuro cuenten con un respaldo legal de parte de la entidad gubernamental competente que fomente la utilización de este tipo de materiales estableciendo límites de transmitancia térmica sobre la envolvente de una edificación como medida para ahorro de energía.

## **CAPÍTULO 2 - GENERALIDADES**

## Introducción

Se considera que el cemento es un término general que se puede aplicar a todos los materiales aglutinantes. Desde la antigüedad, los constructores han estado usando adhesivos, piedras y rocas para formar estructuras más estables. Las primeras civilizaciones de Egipto, Grecia y Roma lo fabricaron directamente a través del proceso de calcinación de piedra caliza, que proporcionó cal viva [35]. Cuando se mezcla con agua, la cal apagada (hidróxido de calcio) se forma rápidamente, y cuando se mezcla con más agua para formar una pasta (ahora llamada mortero de cal) se endurece lentamente al reaccionar con el dióxido de carbono presente en el aire formando carbonato de calcio. El proceso de producción en la industria química es antiguo y su reacción se puede describir como se observa en la figura 8, proceso también conocido como el ciclo de la cal [24][36].

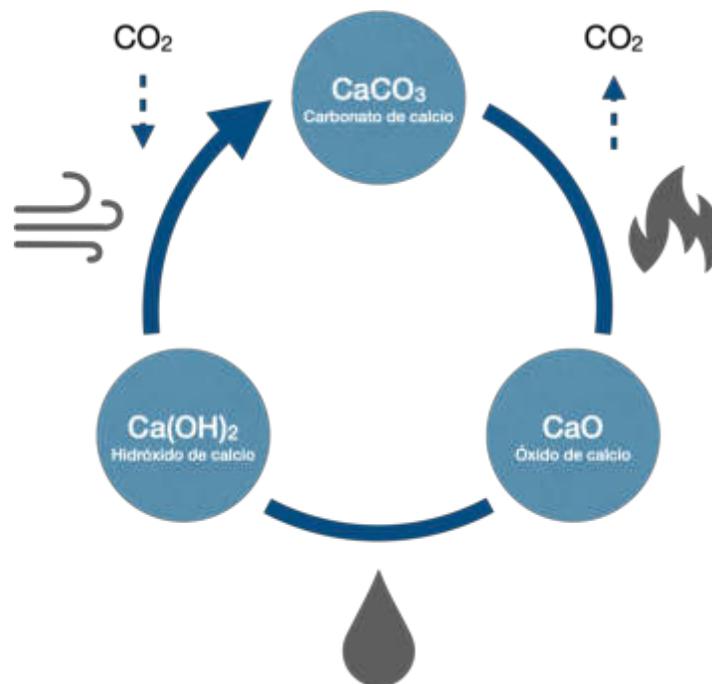


Figura 8 - Ciclo de la cal. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, los griegos y romanos encontraron que cuando mezclaban escoria volcánica (ceniza volcánica) y ladrillos hechos con cal viva, obtenían un cemento de mayor calidad que el simple mortero de cal, el cual es denominado comúnmente como "cemento romano". Estos morteros endurecen lentamente y alcanzan su máxima resistencia al ser sometidos a un curado en agua. La reacción del

cemento hidráulico romano demostró su calidad siendo el responsable de que hasta hoy en día podamos encontrar construcciones de aquella época histórica [24][36].

## **Cemento Portland**

Según la ASTM C-150 , el cemento Portland es un es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí y que se produce mediante la pulverización de Clinker que consiste esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos, con uno o más tipos de sulfato de calcio [36][37].

### **Consumo a nivel mundial de cemento Portland**

El concreto es el material de construcción más importante y su consumo está aumentando en todos los países y regiones de nuestro planeta. Las razones son múltiples: sus componentes están disponibles en todas partes y son relativamente baratos, su producción puede ser relativamente sencilla, su aplicación abarca una gran variedad de obras de construcción e infraestructura civil. La única desventaja del concreto es su fragilidad, es decir, su relajación y resistencia a la tracción y resistencia a la apertura y propagación de grietas, por lo tanto, el refuerzo juega un papel importante [2][38].

La producción de cemento a nivel mundial pasó en un siglo de ser de 10 millones de toneladas en el año 1900 a 1500 millones de toneladas en el año 2000. Se sabe que su producción comenzó a aumentar significativamente a principios de los años sesenta en los países industrializados. Si se compara la producción de cemento entre 1900 y 2000, se puede ver que el uso del cemento Portland se desarrolló al mismo tiempo que el aumento del nivel de vida durante el último siglo. De hecho, en la mayoría de los países, el consumo de cemento puede vincularse al producto interno bruto (PIB) per cápita. En la figura 9 se presenta el consumo mundial de cemento per cápita.

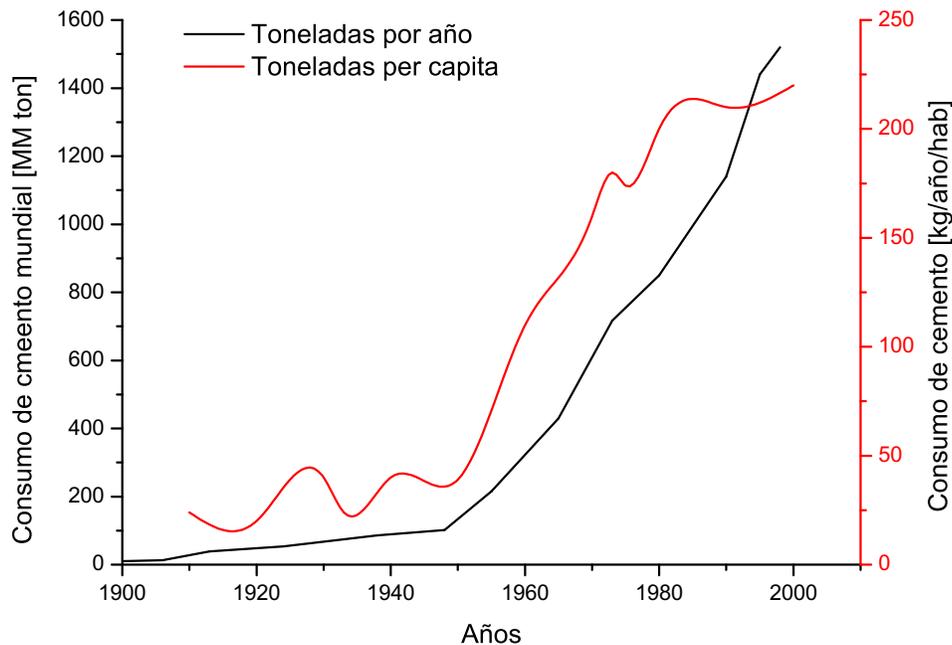


Figura 9 - Consumo de cemento anual

En la actualidad, es difícil hacer proyecciones sobre el consumo de cemento a largo plazo en todo el mundo, porque el futuro de las industrias del cemento y el hormigón está estrechamente vinculado no sólo al desarrollo demográfico, sino también a la rapidez con que se aplicará una política de desarrollo sostenible en todas las actividades humanas.

Es evidente que existen grandes disparidades en el consumo de cemento en todo el mundo. Los tres principales productores de cemento son China, Japón y los Estados Unidos. Por supuesto, el consumo de cemento depende de muchos otros factores además de la PIB per cápita. Factores económicos como la disponibilidad de materiales de construcción que compiten entre sí (madera, acero, aluminio, plásticos, materiales compuestos, vidrio, etc.), factores geográficos (países planos o montañosos), factores demográficos (densidad de población, grado de urbanización), factores climáticos (los belgas que pasan más tiempo en sus casas en invierno necesitan casas y apartamentos más grandes que los franceses o los españoles por ejemplo), factores culturales (los arquitectos e ingenieros anglosajones prefieren diseñar con acero, mientras que sus homólogos latinos prefieren el hormigón y sus homólogos escandinavos la madera). Muchos otros factores de naturaleza histórica, comercial, política y fiscal influyen en el uso del cemento y el hormigón en un país.

El objetivo principal de las industrias del cemento y el hormigón es satisfacer las necesidades de la industria de la construcción. No son las industrias del cemento y el hormigón las que obligan a la gente a consumir cemento y hormigón; la gente está usando más hormigón para mejorar su nivel de vida. Algunas personas ven en el cemento y el hormigón los elementos esenciales que apoyan la mejora del nivel de vida experimentada en los últimos cincuenta años en los países industrializados. Aunque el consumo de cemento tiende actualmente a disminuir en los países industrializados, por el contrario, está aumentando rápidamente en muchos países subdesarrollados. Las empresas de cemento y hormigón saben que tendrán que trasladar sus principales actividades de los países desarrollados a los países en desarrollo construyendo plantas de cemento en países políticamente estables, unidades de molienda en países menos seguros, o tal vez sólo construyan una terminal en los países menos estables. El cemento Portland fluirá de los países industrializados a los países en desarrollo.

### **Producción de cemento Portland**

El procesamiento de la materia prima y la producción de cemento Portland han evolucionado a lo largo de los años. Para poder competir con los cementos naturales, se desarrolló un proceso de homogeneización eficiente para tratar grandes cantidades de materias primas. En un comienzo la homogeneización se realizaba mediante el llamado proceso húmedo mezclando la harina cruda pulverizada con agua para formar una lechada homogénea. El proceso húmedo es un proceso por lotes que presenta la ventaja de ajustar muy precisamente la composición química de la harina cruda antes de su introducción en el horno. Sin embargo, destinar grandes cantidades de energía a la evaporación hizo surgir el proceso seco y parcialmente húmedo que consistían esencialmente en granular o extrudir una pasta que contenía un 35% de agua antes de secarla primero mecánicamente en prensas de filtro y finalmente con el calor recuperado del enfriamiento del Clinker o con el gas que salía del horno. La cocción de la harina cruda trajo importantes resultados. Al principio, los primeros Clinker se cocieron en hornos verticales muy parecidos a los hornos de cal. El uso de hornos rotativos dio lugar, en sólo cinco años, a una multiplicación por diez de la producción de cemento. Durante la década de 1950, se desarrollaron los primeros precalentadores. En los cuales la harina cruda es parcialmente descarbonizada en un grado de 40% a través de una serie de ciclones por los gases calientes provenientes del horno. Por último, en el decenio de 1970 se desarrollaron los primeros pre

calcinadores que hoy en día están instalados en casi todos los hornos modernos. En consecuencia, el horno de cemento puede acortarse y aumentar su diámetro reduciendo las pérdidas energéticas.

### Composición química del cemento Portland

El cemento Portland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material está conformado básicamente por cuatro compuestos principales que corresponden al 90% de la masa del cemento, los cuales al ser adicionados en diferentes cantidades proporcionan distintas propiedades al concreto una vez que estas reaccionen. Estos compuestos son Alita, Belita, Celita y Ferrita [24] los cuales quedan descritos en la tabla 2.

Tabla 2 - Escritura simplificada de las fases cristalinas mas importantes que componen el cemento Portland [24]

Fase Pura	Nombre	Escritura simplificada	Fase impura
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	$\text{C}_3\text{S}$	Alita
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato bicálcico	$\text{C}_2\text{S}$	Belita
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	$\text{C}_3\text{A}$	Celita
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferroaluminato tetracálcico	$\text{C}_4\text{AF}$	Felita
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de calcio	$\text{C}\check{\text{S}}$	----
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	$\text{C}\check{\text{S}}_2\text{H}$	----
----	Silicato de calcio hidratado	$\text{C}\cdot\text{S}\cdot\text{H}$	----

El cemento con alto contenido de  $\text{C}_3\text{S}$  produce que el concreto endurezca muy rápido y es el principal responsable del inicio del fraguado. El  $\text{C}_2\text{S}$  tiende a hacer al cemento menos reactivo, con lo cual la hidratación es más lenta. Sin embargo, la resistencia se adquiere a edades prolongadas. El  $\text{C}_3\text{A}$  en altos contenidos llega a ser contraproducente ya que puede reaccionar con los sulfatos y propiciar un efecto negativo en la durabilidad del concreto. Por otro lado, en cantidades moderadas, contribuye a la hidratación y endurecimiento a edades tempranas. El  $\text{C}_4\text{AF}$  contribuye muy poco a la resistencia y proporciona el color característico al cemento. En la composición química del cemento también se encuentran otros compuestos en menor cantidad como lo es el sulfato de calcio, yeso u óxidos. El cemento Portland de cada uno de los diez tipos indicados en la normativa ASTM C 150 [37] debe ajustarse a los respectivos requisitos químicos en cuanto a la composición de óxidos y fases cristalinas estándar prescritos en la tabla 3.

Tabla 3 - Requerimientos de composición estandarizados [37]

Compuesto	Tipo de cemento					
	I	II	III	IV	V	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	6.0	---	---	---	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	6.0		---	---	
MgO	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	
SO <sub>3</sub>	Con C <sub>3</sub> A menor a 8%	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
	Con C <sub>3</sub> A mayor a 8%	3.5	---	4.5	---	---
Pérdida por ignición	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0	
C <sub>3</sub> S	---	---	---	35	---	
C <sub>2</sub> S	---	---	---	40	---	
C <sub>3</sub> A	---	8.0	15	7	5	
C <sub>4</sub> AF+2(C <sub>3</sub> A)	---	---	---	---	25	

Como se muestra en la tabla 3, esta composición química se da en términos de contenido de óxido. El contenido de CaO y el SiO<sub>2</sub> puede representar más del 85% de la composición química del cemento de Portland [35].

Tabla 4 - Composición de óxidos en el cemento Portland [35]

Óxido	Contenido máximo [%]	Contenido promedio [%]
CaO	60 - 69	65
SiO <sub>2</sub>	18 - 24	21
Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4 - 8	6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 8	3
MgO	<5	2
K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O	<2	1
SO <sub>3</sub>	<3	1

Una forma sencilla de identificar las diferentes fases minerales presentes en un sólido cristalizado es realizar una Difracción de Rayos X como se muestra en la figura 10, en donde se observa que el cemento Portland es un material multifásico complejo compuesto esencialmente de silicato tricálcico y bicálcico y de otras fases minerales que existen en proporciones mucho menores, lo que hace que sean bastante difíciles de identificar como el aluminato tricálcico, el ferroaluminato tetracálcico, el sulfato de calcio y la periclasa (MgO). Por ende, el cemento Portland es esencialmente una mezcla de silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico [35].

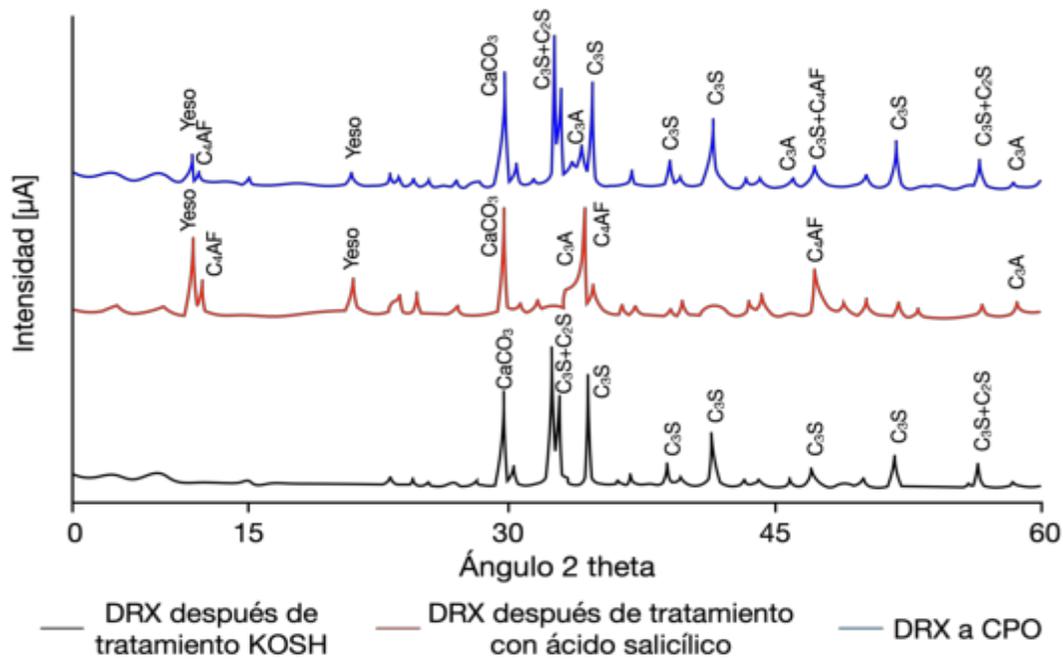


Figura 10 - Difractograma de rayos X de un cemento Portland

La morfología de los granos de Clinker puede observarse con un escáner microscopio electrónico como se muestra en la figura 11 en donde se representa las superficies fracturadas de dos Clinker en las que se pueden observar grandes cristales poligonales (silicato tricálcico), así como redondos estriados (silicato bicálcico). Entre estos cristales se puede observar la fase intersticial compuesta por aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico y que actúa como ligante que une las fases de silicato dentro de las partículas de Clinker. Un análisis químico puntual muestra que no existen fases puras en el Clinker de cemento Portland, sino más bien fases impuras por lo que se les dio diferentes nombres: alita para el silicato tricálcico, belita para el silicato bicálcico, Celita para el aluminato tricálcico y ferrita para el ferroaluminato tetracálcico.

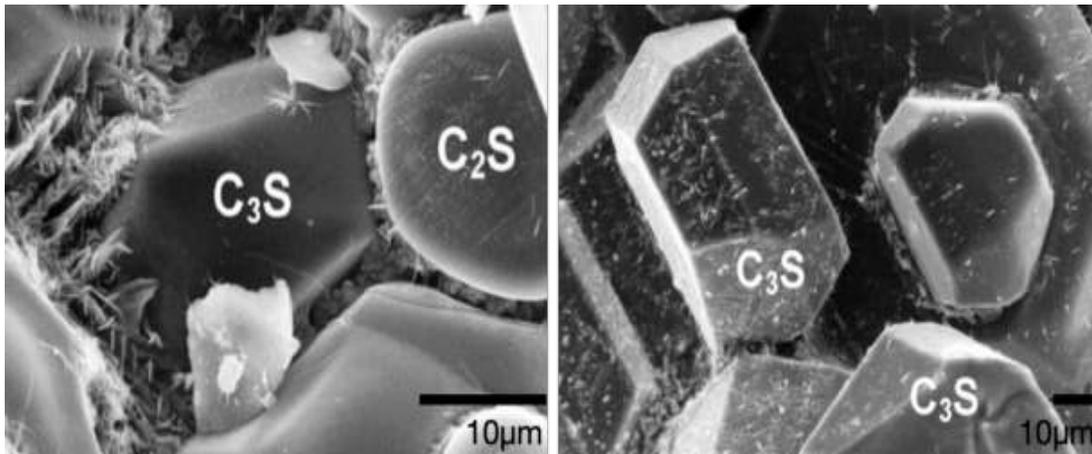


Figura 11 - izquierda) Sulfatos alcalinos depositados en el  $C_3S$  y el  $C_2S$  y en la fase intersticial; derecha) Sulfatos alcalinos en los cristales de  $C_3S$

Los exámenes microscópicos ópticos y electrónicos muestran definitivamente que el cemento Portland está compuesto por dos fases de silicato de grano grueso compuestas de cristales impuros de silicato di y tricálcico cementado por una fase intersticial compuesta de fases de aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico más o menos bien cristalizados. El examen del Clinker de cemento Portland producido en diferentes plantas de cemento confirma tal patrón cristalográfico. Los silicatos tricálcico y bicálcico son bastante toscos y están bien definidos, mientras que la morfología de la fase intersticial es más variable de un Clinker a otro.

El esquema de la figura 12 representa todos los productos químicos transformaciones de la materia prima hasta el apagado final del Clinker de cemento Portland. Si se observa  $L_o$  y  $L_f$  se da cuenta que para producir 1 tonelada de Clinker es necesario introducir alrededor de 1,5 toneladas de materia prima en el horno. En primer lugar, entre 500 y 600°C, se pierde el agua de la arcilla. Luego, el cuarzo  $\beta$  se transforma en cuarzo  $\alpha$  a 565°C. Posteriormente entre 700°C y 900°C; se produce la descarbonatación de la caliza. Los primeros grupos de CaO que se liberan son bastante activos y se combinan con el  $Al_2O_3$  para formar  $C_{12}A_7$  y con  $Fe^{3+}$  y  $Al^{3+}$  para formar  $C_2(A, F)$ .

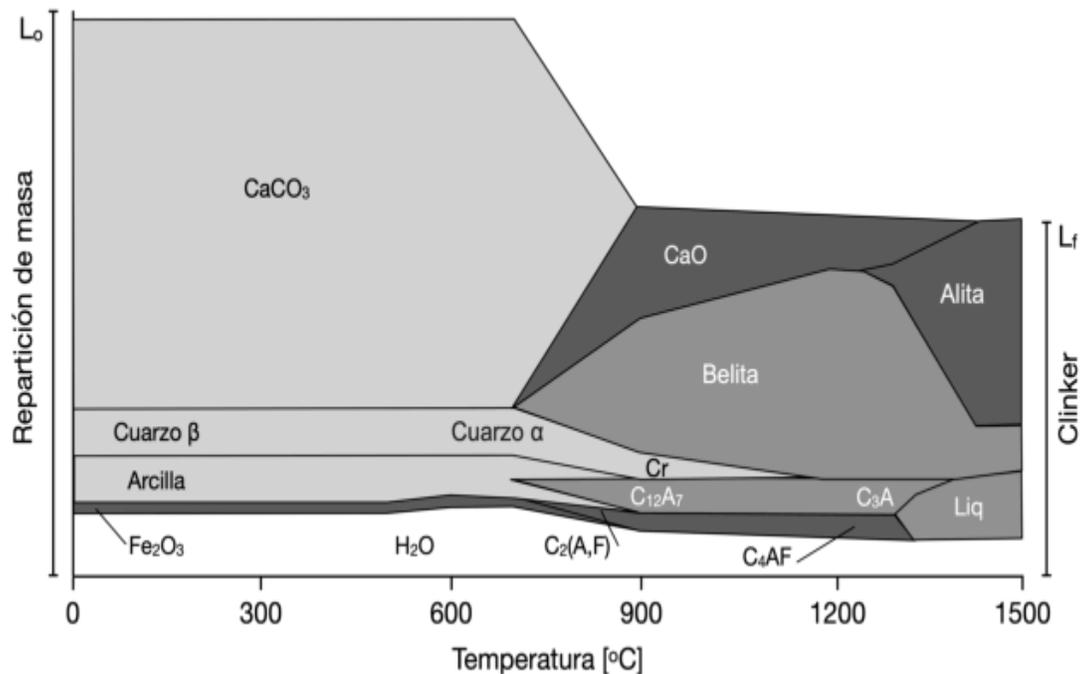


Figura 12 - Transformación de la harina cruda en Clinker

A 900°C toda la piedra caliza ha sido descarbonizada, se ha formado  $C_{12}A_7$  producto de la reacción de la alúmina con la cal. Alguna cal ha reaccionado con  $Al^{3+}$  y  $Fe^{3+}$  para formar  $C_2(A,F)$ , una parte de la cal se transforma en belita ( $C_2S$ ). Sin embargo, existe una porción importante de cal que no se ha combinado y de  $SiO_2$  en forma de cuarzo  $\alpha$ . Posterior a los 900°C, se forman cristales de  $C_3A$  y  $C_4AF$  y el cuarzo  $\alpha$  es transformado en cristobalita. A 1100°C, la cristobalita se funde, lo que acelera su combinación con la cal. A 1300°C, la mezcla de  $C_3A$  y  $C_4AF$  empiezan a fundirse. Durante este tiempo, el derretimiento del calcio ferroaluminoso actúa como catalizador para la transformación de belita en alita, difundiendo iones de  $Ca^{2+}$  en los cristales de belita. Por encima de los 1425°C, prácticamente no hay más exceso de cal. Habiéndose realizado todas las reacciones químicas y mineralógicas necesarias para transformar la harina cruda en cemento Portland, se han formado tres fases diferentes: alita ( $C_3S$  impuro), belita ( $C_2S$  impuro) y una fase intersticial líquida. Cuando el Clinker ha sido expuesto a la temperatura de clinkerización, es necesario apagarlo para fijar el  $C_3S$  y  $C_2S$  en su forma activa. De este modo la fase intersticial tendrá tiempo o no de empezar a cristalizar o simplemente de cristalizar parcialmente y por ende es importante desde el punto de vista reológico.

## Pasta de cemento

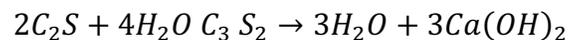
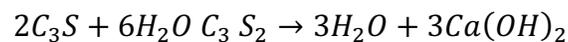
Se le denomina pasta de cemento a la mezcla entre cemento y agua la cual está sujeta a endurecimiento. Los tiempos de fraguado de la pasta de cemento o del mortero (cemento, agua y arena) son determinados y se caracterizan por el fraguado inicial y final. En el estado inicial de fraguado es cuando es trabajable y se puede colocar el cemento sin esfuerzo mayoritario de energía en cierto lapso, además de exhibir una pérdida del revenimiento en el transcurso de los minutos; en cambio dentro del periodo de fraguado final comienza a endurecer la mezcla. Para el periodo de fraguado inicial de la pasta de cemento, empezará la hidratación de la fase  $C_3S$ . Esto se puede observar por la cristalización de la etringita como factor inicial de este comportamiento inicial. El estado de fraguado final generalmente ocurre justo antes de que la pasta de cemento muestre una velocidad máxima del calor de hidratación antes del final del tercer periodo dentro de la conducción calorimétrica [39] [40].

La microestructura de la pasta de cemento se puede determinar a partir de la naturaleza química y estructura cristalina. La microestructura es el conjunto del cuerpo sólido y una porción del cuerpo no sólido; la estructura de poros [41][24]. Algunos factores que dependen de la microestructura son las propiedades físicas y químicas del tipo de cemento, el tipo y cantidad de aditivos agregados, la temperatura y el periodo de hidratación y la relación agua/cementante. Para el estudio de la fase sólida se pueden incluir técnicas de caracterización para observar su morfología (tipo y tamaño), enlace de superficies, área superficial y densidad. Por otro lado, para el estudio de la porción no sólida están los análisis enfocados a la porosidad, tipo de poro y distribución del tamaño de poro. Esto permitirá relacionar las propiedades microestructurales con pruebas físico-mecánicas de la pasta de cemento [41].

## Hidratación del cemento Portland

La hidráulica es la aptitud de un material pulverizado de fraguar y endurecer en presencia de agua y de formar compuestos estables. En este caso, el mismo cemento Portland tiene el principio de potencial hidráulico, ya que bajo el agua puede fraguar y endurecer [24]. La hidratación del cemento es un proceso fisicoquímico bastante complejo que ocurre desde que entra en contacto con el agua, cambiando de un estado fluido a uno sólido. Es fundamental conocer los mecanismos de hidratación para conocer las propiedades finales del concreto. El conocimiento de la velocidad de reacción entre el

cemento y el agua es importante porque determina el tiempo de fraguado y endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta permitiendo transportar y colocar el concreto. Una vez que el concreto ha sido colocado y acabado, es deseable un endurecimiento rápido. El yeso, que se añade en el molino de cemento cuando al molerse el Clinker, actúa como un regulador del fraguado inicial del cemento Portland. La finura del cemento, aditivos, cantidad de agua adicionada y temperatura de los materiales en el momento de la mezcla son otros factores que influyen la tasa de hidratación [42]. El silicato dicálcico y el tricálcico constituyen aproximadamente un 75% en peso del cemento Portland, y cuando estos componentes reaccionan con el agua, producen como principal producto de hidratación el silicato tricálcico hidratado, además de hidróxido cálcico, que es un material cristalino. Las reacciones que tienen lugar son:



El silicato tricálcico es el principal responsable de la temprana resistencia del cemento Portland. Según la extensión en que se completan las reacciones de hidratación, se determina la resistencia y durabilidad del hormigón como se muestra en la figura 13 en función de la relación agua/cemento [43].

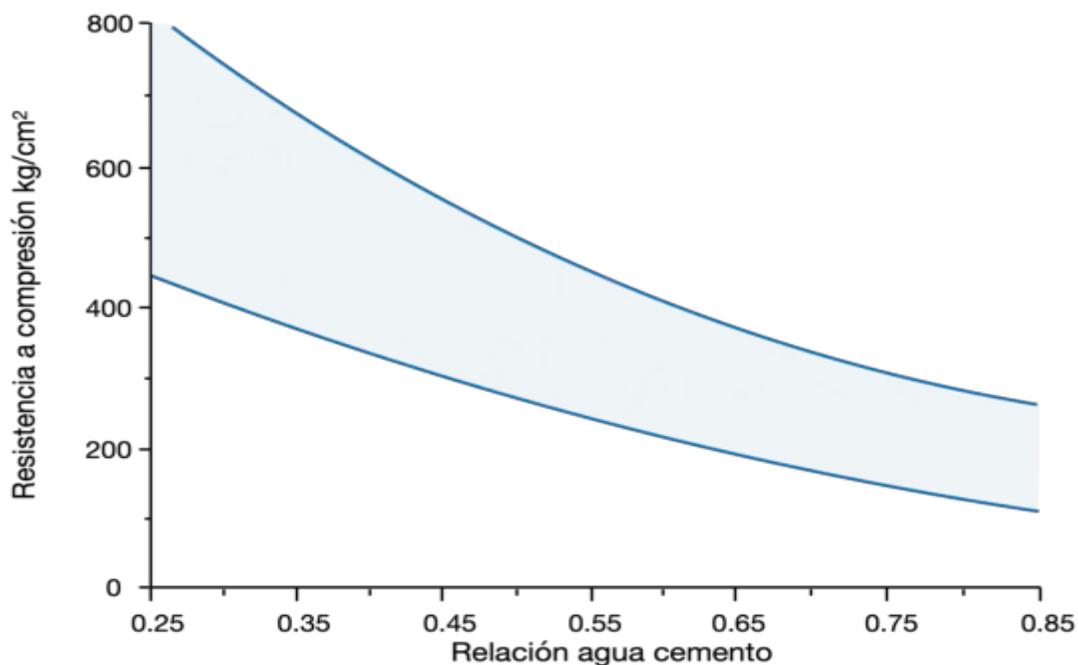


Figura 13 - Variación de resistencias típicas para diversas relaciones agua-cemento

Cronológicamente, el proceso comienza en el momento en que el cemento entra en contacto con el agua, llevando a cabo cinco etapas de hidratación. La primera etapa es la de disolución que dura aproximadamente una hora, en la que el cemento se mezcla con el agua. Durante esta etapa se forma  $\text{Ca(OH)}_2$ , etringita y comienza la hidratación del silicato tricálcico. Durante la segunda etapa, después de la primera hora y hasta las tres horas y media, aproximadamente, los productos de hidratación crecen hasta estar en contacto los unos con los otros, se forma silicato de calcio hidratado, más etringita y  $\text{Ca(OH)}_2$ . La tercera etapa se conoce también como fraguado de la pasta y tiene lugar entre las tres horas y media y las siete horas en donde la pasta pierde movilidad y por lo tanto su comportamiento plástico, comenzando a comportarse como un sólido. Durante este período domina la hidratación del silicato tricálcico observándose una importante producción de silicato de calcio hidratado y  $\text{Ca(OH)}_2$ . Cuando la pasta ya fraguó, comienza su endurecimiento. Se termina de consumir el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) presente en el cemento y la etringita se transforma en monosulfatos, que tienen mayor densidad. Mientras tanto el silicato tricálcico continúa hidratándose, aumentando el contenido de silicato de calcio hidratado en la pasta endurecida. Posteriormente, comienza un proceso difusivo, por lo que el proceso desacelera. La hidratación continúa pero de forma más lenta [44].

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días. La resistencia a la compresión del concreto es función de la relación agua/cementantes y ha sido estudiada desde el final del siglo XIX y principio del siglo XX. El aumento de la resistencia con la edad continúa desde que:

- el cemento no hidratado aún esté presente,
- el concreto permanezca húmedo o la humedad relativa del aire esté arriba de aproximadamente 80%,
- la temperatura del concreto permanezca favorable y
- haya suficiente espacio para la formación de los productos de hidratación

La figura 14 enseña la relación entre incremento de resistencia y curado húmedo, en donde puede observarse que existen formas de optimizar las propiedades mecánicas de un concreto en función de variables que se han descrito extensamente en la literatura científica.

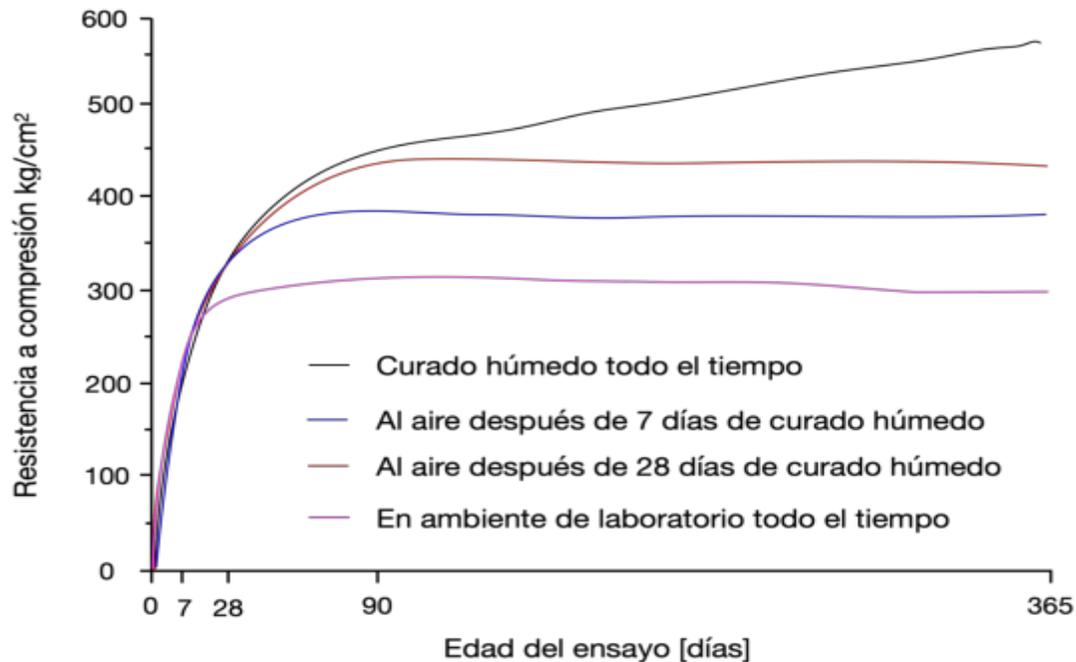


Figura 14 - Aumento de la resistencia con la edad de curado en función de una humedad y temperatura favorables para la hidratación del cemento [42]

## Fibras naturales

### Agroindustria y bioresiduos

La agroindustria es un sector que atiende principalmente a la agricultura para satisfacer la demanda de suministro de alimentos. Recientemente, se ha descubierto que determinadas industrias, como la azucarera, tienen un gran potencial para introducir algunos de sus cultivos en la producción de bioenergéticos y como resultado, se han realizado estudios sobre cómo convertir estas plantas en productos industriales y energéticos. Una vez procesados estos materiales, dejan residuos que pueden utilizarse en la industria de la construcción. La problemática de los residuos industriales es el mal manejo de su disposición final. Para comprender un poco de esto primeramente es necesario definir un subproducto, el cual es un producto secundario, bien conocido, generalmente útil, comercializable y por lo tanto con valor agregado, que resulta de un proceso industrial. El término residuo, se aplica a aquellos

que pueden tener o no un valor comercial, porque son poco comunes o porque se generan en bajas cantidades. Sin embargo, algunos de sus constituyentes aún en baja proporción, le pueden conferir algún interés para su utilización. Desde este punto de vista, los términos subproducto y residuo podrían utilizarse como sinónimos, no así el término desecho, que está referido a aquellos materiales que no tienen algún valor comercial, ni poseen atributos de interés para ser utilizados en algún proceso, por lo que se consideran como basura y se les debe dar una disposición [45].

En la agroindustria, existen procesos que generan subproductos, los cuales no se reciclan ni se reutilizan y causan problemas ambientales. Sin embargo, debido a su contenido químico (calcio, magnesio, silicio, alúmina, así como etanol, celulosa, lignina, etc.), estos materiales son una fuente de recursos viable y atractiva y pueden utilizarse plenamente cuando son transformados mediante algún tratamiento físico o químico. El uso de estos subproductos, como los desechos agrícolas industriales, puede traer enormes beneficios para reducir el costo de la mayoría de las industrias del mundo como la alimenticia, la biotecnología, la construcción, entre otras [46].

### **Fibras naturales vegetales**

Dependiendo de su naturaleza es importante diferenciar las fibras naturales de las fibras sintéticas. Como su nombre lo indica, las primeras se obtienen a partir de elementos que se encuentran de forma espontánea en el medio natural, mientras que las fibras sintéticas se obtienen mediante procesos químicos y físicos complejos, dirigidos por el hombre, como es el caso del nylon, el polietileno o el polipropileno. Las fibras vegetales son parte de las fibras naturales como se observa en la figura 15 y se pueden extraer de diferentes partes de las plantas, como hojas, tallos, semillas o frutos [47].

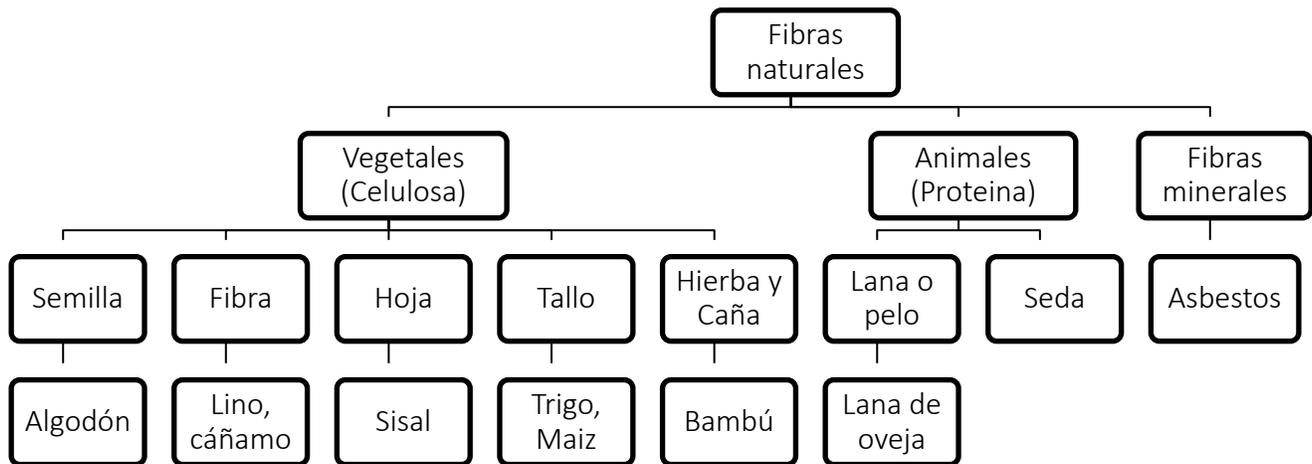


Figura 15 - Clasificación de fibras naturales [47][48]

### Propiedades de las fibras vegetales

Debido a los problemas económicos actuales a nivel mundial, el aumento de los precios y el dilema del efecto invernadero, todo ello ha creado una demanda central para reconocer alternativas comparables como estrategia para reducir el calentamiento global. La contaminación ambiental, el calentamiento global y el futuro de la producción de petróleo son algunas de las principales causas del interés público y privado en los recursos naturales de base biológica [49]. Es por esto por lo que en los últimos años el interés hacia la utilización de los materiales lignocelulósicos ha ido en constante aumento. Su uso y aplicación han mantenido la atención en dos áreas importantes: La obtención de productos químicos y energéticos a partir de fuentes renovables que sustituyan parcial o totalmente la utilización de reservas fósiles como el petróleo, gas o el carbón y el aprovechamiento de materiales residuales procedentes de los bosques y de los cultivos [50].

Las fibras vegetales se pueden encontrar en una amplia variedad de morfologías (diámetro, relación de aspecto, longitud y rugosidad de la superficie), además, su superficie puede modificarse fácilmente para tener un carácter más hidrófilo o hidrófobo. Las principales ventajas y desventajas de la utilización de fibras vegetales en materiales compuestos quedan expuestas en la tabla 5 [48][51][52].

Tabla 5 - Ventajas y desventajas de las fibras lignocelulósicas [52]

Ventajas	Desventajas
- Bajo peso específico que resulta en una mas alta resistencia y dureza que el vidrio	- Baja resistencia, especialmente resistencia al impacto
- Recurso renovable, su producción requiere poca energía y bajas emisiones de CO <sub>2</sub>	- Calidad de la fibra variable influenciada por el agua
- Producción con baja inversión y costos	- Pobre resistencia a la humedad la cual causa hinchazón de la fibra
- Procesamiento amigable que no requiere herramientas sofisticadas	- Procesamiento restringido por la temperatura
- Alta resistencia eléctrica	- Baja durabilidad
- Buen aislante térmico y acústico	- Baja resistencia al fuego
- Biodegradable	- Baja adhesión entre la fibra y la matriz
- Es posible el reciclaje térmico	- Precio variable por resultados de cosechas y políticas afines

El costo y la disponibilidad de las fibras naturales vegetales dependen en gran medida del lugar, la región, los mercados de importación y las aplicaciones de la competencia. Aunque las fibras agrícolas no madereras y los desechos de fibras agrícolas son abundantes en todo el mundo, su fuente puede ser difusa y la infraestructura de recolección, purificación y entrega a veces es limitada representado una de las principales dificultades en la explotación de este tipo de materiales [50][51]. En comparación con las fibras de acero, debido a su flexibilidad, las fibras vegetales son fáciles de manejar, especialmente cuando se utiliza un gran porcentaje de fibra [13].

### Clasificación de fibras vegetales

En función de la localización de la fibra en la planta, habitualmente se clasifican en dos grandes grupos: fibras blandas y fibras duras. Las fibras blandas son aquellas que se encuentran en los tallos de las dicotiledóneas (plantas con dos cotiledones en la semilla); en este grupo se incluyen el lino, el yute o el cáñamo. Por su parte, las fibras duras se obtienen principalmente a partir de las hojas de las monocotiledóneas (plantas con un único cotiledón en la semilla), donde se disponen en forma de haces que se superponen unos con otros, lo que las hace más fuertes debido a su mayor grado de lignificación,

esto es, que adquieren una mayor consistencia al acumularse más celulosa. Ejemplos de este tipo de fibras son las del esparto, la yuca o el sisal, entre otras. Aunque su localización más frecuente radica en los tejidos vasculares, hay quien establece una tercera categoría, denominada fibras de superficie, donde se incluyen aquellas fibras que corresponden a los pelos de la epidermis de la semilla, como ocurre por ejemplo en el caso del algodón [53].

Según su origen y composición, las fibras son clasificadas como no madereras y fibras de madera. Las fibras no maderables se pueden clasificar en cuatro grupos principales dependiendo de la parte de la planta utilizada para extraer las fibras: fibras de líber (cáñamo, yute, kenaf, lino, ramio y otros), fibras de hoja (sisal, henequén, piña, palma aceitera, plátano y otros), fibras de tallo (paja y cañas) y fibras de semilla (algodón, coco y otros). Las fibras de madera se agrupan según su origen en fibras blandas (obtenidas de pinos, abetos, etc.) y fibras duras (de abedul, eucalipto, haya, etc.). Además de su origen, los refuerzos a base de fibras lignocelulósicas se pueden clasificar por su forma. Así, las fibras de celulosa se pueden encontrar en filamentos (fibras largas con longitudes entre 20 y 100 cm), fibras cortadas (fibras cortas que pueden ser hiladas), o pulpa (fibras muy cortas de 1-10 mm de longitud que deben ser dispersadas en el agua para separarlas). Las hebras o fibras discontinuas se obtienen a partir de fibras vegetales o silvestres, directamente de las plantas o después de un proceso de enriamiento con agua. En este grupo se incluyen las fibras de celulosa utilizadas tradicionalmente por la industria textil que se caracterizan por su alta relación de aspecto y baja masa lineal. Las pastas se obtienen generalmente de fuentes de madera por medio de un proceso de pulpeo. Dependiendo del tratamiento utilizado para destruir o debilitar los enlaces entre fibras, los procesos de pulpeo pueden ser mecánicos, térmicos, químicos o alguna combinación de estos tratamientos. Las pulpas también pueden obtenerse de fuentes no madereras. Las propiedades fisicoquímicas de las fibras vegetales a menudo dependen de las fuentes, de los métodos de cultivo y cosecha y de la transformación, así como de su forma [2].

### **Composición de fibras vegetales**

Las fibras vegetales están constituidas por celulosa, lignina y hemicelulosa en una relación aproximada de 4:3:3 variando sensiblemente según las diferentes especies, además de otros componentes minoritarios, como agua, proteínas, péptidos y compuestos inorgánicos. La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, esta biomasa producida por la fotosíntesis es la fuente

de carbono renovable más prometedora para solucionar los problemas actuales de energía y materias primas [54]. La holocelulosa puede ser identificada como el resultado de la combinación de celulosa y hemicelulosa como puede observarse en la figura 16 [55]. Todas las plantas vasculares que se encuentran en la naturaleza pueden ser utilizadas como fuentes de fibras celulósicas. Sin embargo, el uso de una planta en particular como fuente de fibra para una aplicación dada dependerá de su disponibilidad y costo de extracción [19].

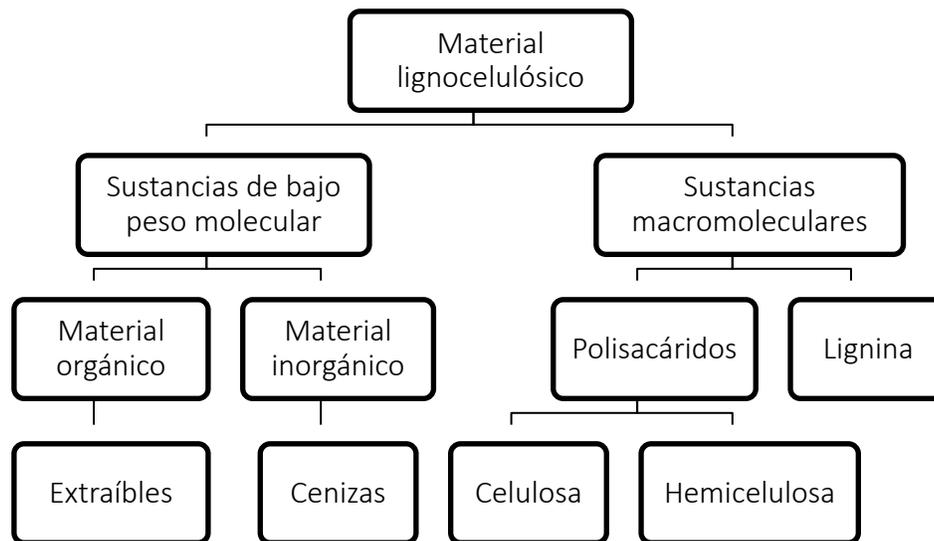


Figura 16 - Principales componentes químicos de los materiales lignocelulósicos [50].

La celulosa es un polímero de glucosa hidrófilo que contiene una cadena lineal de 1,4-βanidrogucosa unidades, y que contiene grupos hidroxilos alcohólicos. Estos grupos hidroxilos forman enlaces de hidrógeno intermoleculares con la propia macromolécula y también con otras macromoléculas de celulosa o moléculas polares. Por lo tanto, todas las fibras naturales son de naturaleza hidrófila. Aunque la estructura química de la celulosa de diferentes fibras naturales es la misma, el grado de polimerización varía otorgando diferentes propiedades mecánicas asociadas. Durante la síntesis biológica de las paredes celulares de las plantas, se produce la celulosa y la hemicelulosa, y simultáneamente la lignina llena los espacios entre las fibras de estos polisacáridos cementándolas entre sí. Este proceso de lignificación provoca un endurecimiento de las paredes celulares, protegiendo al carbohidrato de daños químicos y físicos. La lignina es un polímero bioquímico que funciona como material de soporte estructural en las plantas, es un compuesto fenólico de alto peso molecular,

generalmente resistente a la degradación microbiana [17][51][56]. La figura 17, muestra de manera esquemática los diferentes componentes que se pueden encontrar como constituyentes del material lignocelulósico.

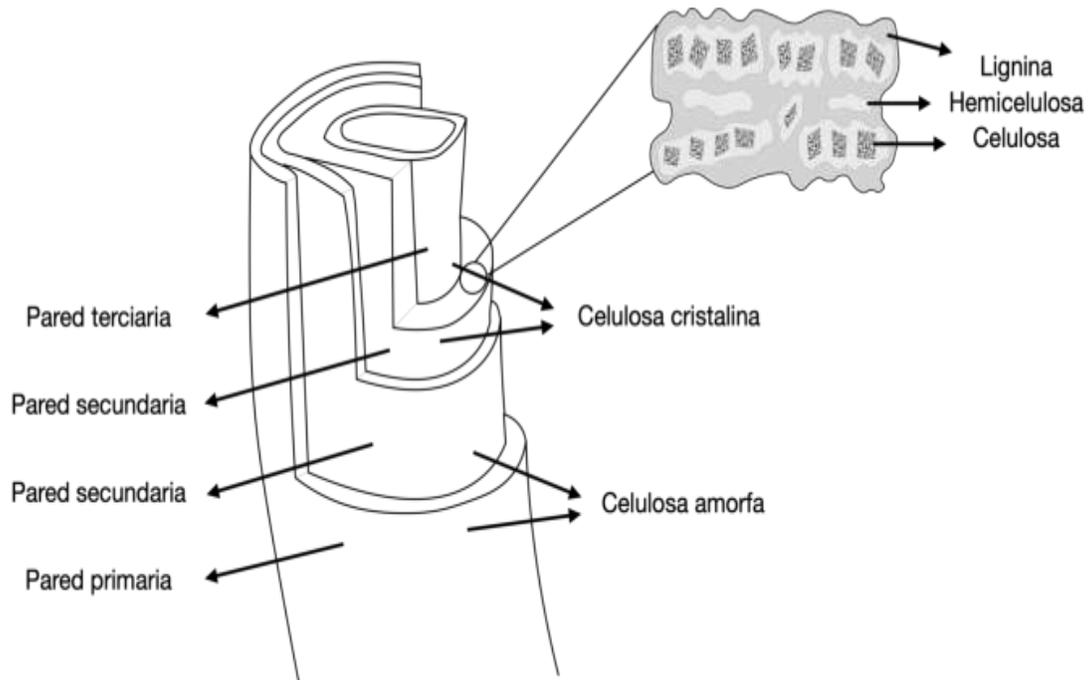


Figura 17 - Estructura y microestructura de los principales tres constituyentes de las fibras naturales [8] [52].

La fibra vegetal consta de una célula primaria en las paredes periféricas y tres secundarias en el interior y una luz en el centro. La pared celular principal está formada por redes de microfibrillas de cristal de celulosa dispuestas de manera desordenada como puede verse en la figura 18. En las paredes secundarias, las microfibrillas cristalinas de celulosa están dispuestas de forma helicoidal, con la dirección principal de la fibra [52][57].

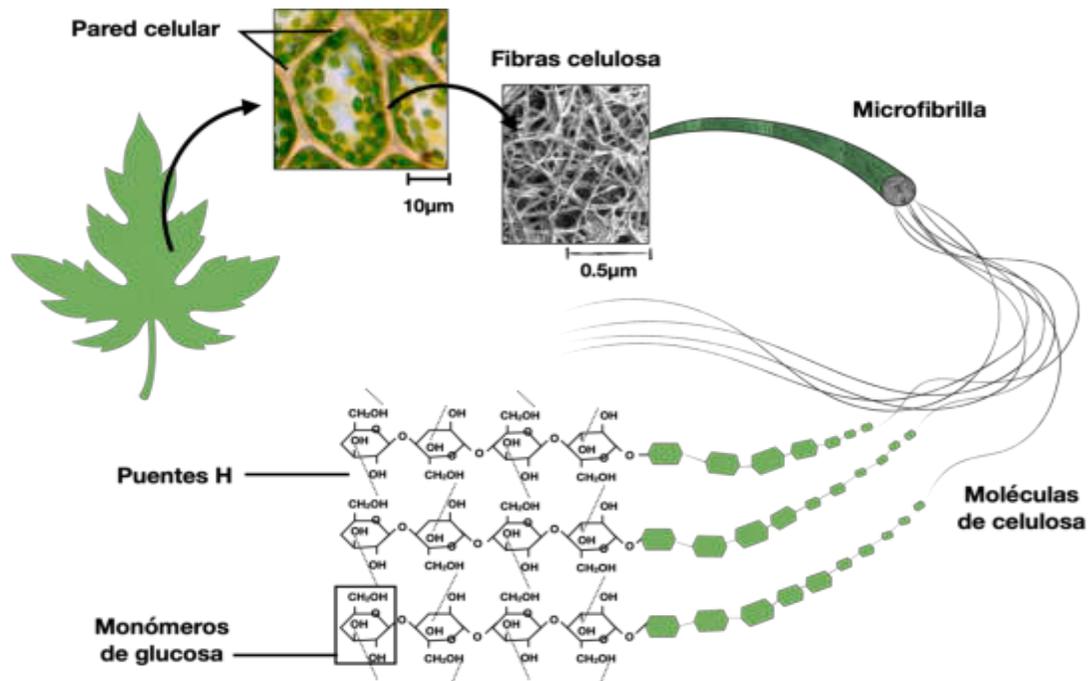


Figura 18 - Diagrama de celulosa con la estructura de las membranas celulares de la planta

De una manera más detallada se describen a continuación las sustancias de bajo peso molecular como también las macromoleculares que componen los materiales lignocelulósicos:

- **Celulosa:** La celulosa de fórmula química  $(C_6H_{10}O_5)_n$  es un polímero glucano hidrófilo que consiste en una cadena lineal de 1,4-β unidades de anhidro glucosa, cada una de las cuales contiene tres grupos hidroxilos alcohólicos como se observa en la figura 19. El número de unidades de glucosa en una molécula de celulosa se denomina grado de polimerización, cuyo promedio para la celulosa en fibras naturales es de alrededor de 10000 y puede variar desde 15000 para algunas plantas de algodón hasta valores cercanos a 50 para ciertas celulosas microcristalinas. Esta característica puede afectar significativamente a la capacidad mecánica de las fibras [50].

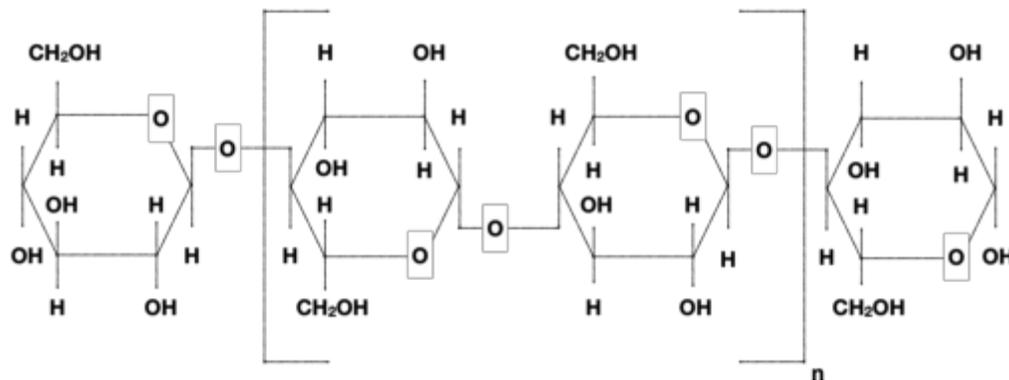


Figura 19 - Estructura química de la celulosa [55].

Las cadenas lineales de celulosa se asocian en subunidades de aproximadamente 3x4nm, que a su vez se unen por enlaces de hidrógeno intermoleculares formando microfibrillas con un espesor aproximado a los 25nm. Estas microfibrillas se agrupan en haces mayores denominados fibrillas que representan las unidades básicas de las fibras de celulosa en la pared celular. Las fibrillas contienen secuencias alternadas de zonas con estructura cristalina y zonas amorfas. También se puede distinguir entre celulosa accesible y no accesible. En cuanto a la celulosa cristalina, sólo la parte superficial es accesible, mientras que la mayor parte de la celulosa amorfa es accesible. La mayor parte de la celulosa derivada de la madera contiene más del 65% de las regiones cristalinas [55], mientras que para el agave azul se determinó que la cristalinidad corresponde a un 70% de la fibra [58]. Los núcleos cristalinos denominados cristalitas, presentan una elevada resistencia química a las reacciones de hidrólisis por lo que éstas se desarrollan con diferente velocidad según sea la zona donde se produzca el ataque. Se conocen en la actualidad diferentes estructuras cristalinas adoptadas por la celulosa en función de los tratamientos que ha experimentado a lo largo de su aislamiento y purificación, así como en su proceso de derivación. Para caracterizar cuantitativamente la proporción de zonas cristalinas en una celulosa se utiliza el “índice de cristalinidad” [50] el cual se puede calcular mediante la siguiente ecuación [59]:

$$IC [\%] = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100$$

En esta ecuación,  $I_{002}$  es la intensidad máxima detectada en el ensayo de DRX, y el valor de  $I_{am}$  corresponde al valor detectado en las mismas unidades para  $2\theta = 18^\circ$ .

- **Hemicelulosa:** La hemicelulosa combina muchos polisacáridos diferentes, compuestos de 5 y 6 azúcares del anillo de carbono más ácidos glucurónico y galacturónico. Las hemicelulosas tienen un menor grado de polimerización que la celulosa y presentan una estructura heterogénea, amorfa y ramificada. Constituyen la matriz de soporte de las microfibrillas de celulosa. Las hemicelulosas son altamente hidrófilas, fácilmente hidrolizadas por ácidos y solubles en soluciones alcalinas diluidas. Esta propiedad podría afectar notablemente a la durabilidad de los áridos vegetales de una matriz mineral alcalina (cemento, cal, etc.) y a los mecanismos de unión en la interface de estos materiales compuestos [50][55]. El papel biológico más importante de las hemicelulosas es su contribución al fortalecimiento de la pared celular mediante la interacción con la celulosa y, en algunas paredes, con la lignina [60].
- **Lignina:** Aunque la naturaleza química exacta de la lignina sigue siendo desconocida, se han identificado grupos y unidades funcionales. Las ligninas pueden describirse como polímeros amorfos, altamente complejos, tridimensionales y principalmente aromáticos de unidades de fenilpropano. Durante la síntesis de las paredes celulares de las plantas, la producción de celulosa y hemicelulosa se acompaña del relleno de los espacios entre estos dos polisacáridos con ligninas, uniéndolos entre sí. Esto se denomina proceso de lignificación y conduce al endurecimiento de las paredes celulares. El papel principal de la lignina en las plantas es, por lo tanto, apoyarlas y protegerlas de la degradación química y física. Además, la lignina es generalmente resistente al ataque microbiano. La naturaleza y la cantidad de lignina afectan la durabilidad y la biodegradabilidad de los diferentes materiales vegetales. La lignina también juega un papel importante en el transporte de agua, proporcionando la superficie hidrofóbica que permite la circulación del agua dentro de las plantas. La lignina se encuentra principalmente en la lámina media del haz de fibras, y también en el núcleo leñoso y en las células epidérmicas y corticales del tallo de la planta [55] [50].
- **Pectinas:** Pectina es un nombre colectivo para diferentes formas de polisacáridos compuestos de unidades repetidoras de ácido galacturónico ligado a  $\alpha$ -1,4. Las pectinas están contenidas en la pared celular primaria de la mayoría de las plantas, pero también son un componente importante de la lámina media. Las pectinas aseguran una variedad de funciones incluyendo propiedades mecánicas, adhesión célula-célula, porosidad de la pared y unión de iones. Pueden

hidrolizarse fácilmente a altas temperaturas y son degradados por las bacterias y el moho durante el proceso de enriamiento que se aplica a las plantas fibrosas (incluido el cáñamo y el lino) para separar las fibras de la parte no fibrosa. Las pectinas pueden crear geles cuando los cationes divalentes, como el calcio o el magnesio, forman enlaces cruzados entre polímeros adyacentes. Esta afinidad con los cationes podría interactuar con los mecanismos de fraguado del ligante mineral como el cemento Portland o la cal utilizada en los compuestos a base de bioagregados [55].

- **Extraíbles:** Esta categoría reúne diferentes componentes químicos no estructurales que pueden ser fácilmente extraídos utilizando disolventes polares o no polares (generalmente agua, etanol, tolueno y éter). Los extractos incluyen algunos carbohidratos, lípidos, proteínas, hidrocarburos, compuestos fenólicos y materiales inorgánicos. Su concentración en las plantas es relativamente baja (<10%) pero puede ser localmente mayor. En el caso de bioagregados incorporados a una matriz mineral, estos extractivos pueden interactuar con las especies minerales del ligante y degradar sus propiedades [50][55].
- **Ceniza:** La ceniza se define como la materia inorgánica de la biomasa. Estos componentes pueden ser estructurales, es decir, ligados a la estructura física de la biomasa, o extraíbles, si pueden eliminarse mediante lavado o extracción. El contenido de ceniza suele ser bajo, aunque este parámetro puede variar considerablemente entre especies, ya que depende de factores genéticos y ambientales, así como de las características fisiológicas y morfológicas de los cultivos [50]. El contenido de este mineral puede ser significativamente mayor en plantas con alto contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), especialmente en arroz o paja de trigo. Para la mayoría de las fibras vegetales, el contenido de minerales estructurales se mantiene por debajo del 2%. Algunas plantas (lino, cáñamo y algodón) también pueden acumular metales pesados como plomo, cobre, zinc y cadmio. No obstante, este punto podría suscitar algunas preocupaciones en materia de salud para su uso posterior como bioagregados en aplicaciones de la construcción [55].
- **Agua:** En los materiales vegetales, el contenido de humedad consiste en agua con iones libres disueltos. Su contenido varía normalmente entre el 10 y el 60%, pero en algunas especies de biomasa cruda puede llegar hasta el 80 y el 90%. El agua está ampliamente presente en las paredes celulares y puede influir en algunas de sus propiedades. Las paredes hidratadas son más

flexibles y extensibles que las paredes no hidratadas. El contenido de humedad de los agregados vegetales podría afectar significativamente sus propiedades macroscópicas, especialmente su capacidad de compresión. Esta característica puede modificar en gran medida el rendimiento fresco y endurecido de los materiales compuestos [55].

Los distintos componentes principales descritos (celulosa, hemicelulosa y lignina) se encuentran de manera variada en cada una de las fibras lignocelulósicas que podemos encontrar en la naturaleza. Esta variabilidad en la composición es la que otorga diferentes características físicas y químicas a las diferentes fibras naturales vegetales lo cual permite una amplia variedad de usos para la fabricación de materiales con distintas aplicaciones. Algunos de las fibras más utilizadas que han sido caracterizadas químicamente quedan descritas en la tabla 6.

Tabla 6 – Composición química de fibras naturales reportadas en la literatura científica

Especie	Celulosa [%]	Hemicelulosa [%]	Lignina [%]	Fuente
Bagazo de caña de azúcar	57	20	19	[56]
Cascarilla de arroz	34.4	18.9	23	[56]
Pino	84.9	15.3	ND	[56]
Eucaliptus	79 - 89	21	0.5	[56][61]
Cáñamo	35 - 52	9 - 27	17 - 28	[55][62]
Lino	43 - 47	24 - 26	21 - 23	[5]
Girasol	42.1	29.7	13.4	[5][62]
Trigo	44.5	33.2	22.3	[62]
Avena	31 - 37	27 - 38	16 - 19	[50]
Coco	35 - 60	15 - 28	20 - 48	[61]
Sisal	43 - 88	9 - 27	3.8 - 9.9	[50][61]
Agave azul	73.6	ND	21.1	[58]
Abacá	60.8	15 - 17	8.8	[50]
Agave lechuguilla Torr	17.72	17.15	7.32	[63][64]
Henequén	77.6	8 - 20	77.8	[50]

El uso generalizado de fibras naturales y sus productos se atribuye a propiedades como baja densidad, alta resistencia eléctrica, módulo y rigidez específicos, sus propiedades no abrasivas y su biodegradabilidad entre otras. Por otro lado, las fibras naturales son materias primas de fuentes renovables y de alta disponibilidad, por lo que se utilizan en industrias como el automóvil, la construcción, el calzado y el mueble, aunque para utilizarlas correctamente es necesario conocerlas de manera mas detallada en cuanto a sus propiedades y limitaciones para que puedan ser incluidas en nuevos proyectos. El uso de estas fibras ha permitido disponer de materiales de construcción baratos, biodegradables y reciclables, a partir de recursos renovables. Sin embargo, una limitante a tener en cuenta cuando se usan fibras naturales en matrices de distintas naturalezas en la industria de la construcción es la tendencia a la degradación por exposición al medio ambiente, para lo cual se recomienda aplicar recubrimientos protectores o funcionalizar las fibras. Bajo ciertas condiciones de preparación, el efecto reforzante de las fibras naturales es comparable con el de otras sintéticas ampliamente utilizadas en la industria, como la fibra de vidrio. Sin embargo, las fibras naturales presentan mayor variabilidad en sus propiedades mecánicas que las fibras sintéticas, lo cual puede tolerarse en diversas aplicaciones considerando la dificultad para reciclar las de origen sintético [65].

## **Ensayos y caracterización aplicables**

### **Composición química**

La composición química permite determinar la composición elemental de los compuestos como en este caso de las materias primas. En la actualidad existen formas complejas para lograr resultados confiables y en un tiempo breve, por lo que existen otros métodos térmicos que se utilizan para seguir cambios de fase en compuestos sin cambio en su composición, así como técnicas que por el contrario generan cambios sustanciales en ellas [66].

### **Método experimental Taguchi**

El método Taguchi es un diseño robusto que tiene su origen en las ideas del ingeniero japonés Genichi Taguchi que combina métodos de ingeniería y estadística para obtener mejoras en los costos y la calidad de los productos con el objetivo de del diseño robusto de parámetros logrando productos y procesos

frente a las causas de la variabilidad (ruidos), que hacen que las características funcionales de un producto se desvíen de los valores óptimos [67].

Los arreglos ortogonales son diseños propuestos por Taguchi que tienen la propiedad de ortogonalidad. Los 6 arreglos ortogonales de uso más frecuente son:  $L_4$ ,  $L_8$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{16}$ ,  $L_9$  y  $L_{18}$  en donde para cada arreglo se deben identificar el número de parámetros o variables que influyen en los valores de respuesta que se registran y en cuántos niveles se estudiarán [67][68]. La busca de combinaciones óptimas de las variables de entrada da lugar al diseño experimental, que es una prueba (o un conjunto de pruebas) durante la cual se realizan cambios sistemáticos y controlados a las variables de entrada para medir el efecto sobre la variable de salida. El diseño experimental utiliza técnicas como la regresión múltiple, la respuesta superficial y varias extensiones del análisis de varianza [69].

### Conductividad térmica [ $\lambda$ ]

El calor es una forma de energía que se transfiere de manera espontánea entre distintas zonas de un cuerpo o desde un cuerpo hacia otro [70]. La energía calórica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, en un proceso que va acompañado de un cambio de entropía hasta que se alcanza, si es posible, el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas. La termodinámica de los procesos reversibles estudia la transferencia de energía en un proceso de intercambio de calor entre cuerpos a distintas temperaturas, en tanto se mantenga una diferencia finita de temperaturas entre los mismos habrá un flujo irreversible de calor entre dichos cuerpos y no tendremos estados de equilibrio [71].

La transmisión de calor tiene lugar por tres mecanismos básicos:

- **Conducción:** La energía calórica se transmite durante el contacto directo entre cuerpos a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema (unas en zonas más calientes, con mayor energía térmica y otras en las zonas más frías, con menor energía térmica), aunque no haya un movimiento macroscópico de las moléculas, o el material sea transparente a la radiación.
- **Convección:** La energía calórica se transmite por el movimiento físico de moléculas “calientes” de las zonas de alta temperatura a las zonas de baja temperatura y viceversa, equilibrándose las temperaturas.

- **Radiación:** La energía calórica se transmite en forma de energía de la radiación electromagnética, emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura determinada, y que se propaga a la velocidad de la luz y puede ser absorbida por los cuerpos, aumentando su temperatura. La radiación es el único medio de transmisión del calor cuando ésta tiene lugar a través del vacío.

Estos mecanismos básicos actuarán de forma combinada, no sólo para dar la temperatura final del recinto que estamos estudiando, sino en combinación con otros elementos como la humedad del aire, para dar el grado de comodidad o confort del ser humano en el espacio considerado [70]. De los tres mecanismos de transferencia de calor, la conducción es el que mas fácilmente puede observarse en la cotidianidad dependiendo de cuatro factores básicos: el gradiente de temperatura, la sección transversal de los materiales involucrados, la longitud de su trayectoria y las propiedades de esos materiales. Cuando se trata de conducir el calor, no todas las sustancias trabajan de igual manera. Los metales se consideran buenos conductores ya que pueden transferir rápidamente el calor, mientras que materiales como la madera, el papel, el aire y la tela son pobres conductores de calor [71].

La conductividad térmica corresponde a la cantidad de calor que en condiciones estacionarias se transmite por unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de material homogéneo de extensión infinita, de caras planas y paralelas y de espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. Se expresa en W/mK. La conductividad térmica de algunos materiales empleados en construcción quedan expuestos en la tabla 7 [72].

Tabla 7 - Conductividad térmica de algunos materiales de construcción [72]

Material	Conductividad térmica [W/mK]
Aire quieto	0.0024
Concreto armado	1.63
Ladrillo de arcilla	0.6
Mortero de cemento	1.4
Madera de pino insigne	0.104
Poliestireno expandido	0.043

### Transmitancia térmica [U]

La resistencia térmica [R] esta definida por la oposición al paso del calor que presentan los elementos de construcción. Para una capa material de caras planas y paralelas, de espesor “e” , conformada por un material homogéneo de conductividad térmica “λ”, la resistencia térmica, queda dada por [72]:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Este valor se expresa en m<sup>2</sup>K/W. La transmitancia térmica [U] corresponde al flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por dicho elemento. Se expresa en W/m<sup>2</sup>K y puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

En donde:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}}$$

$\frac{e}{\lambda}$  = Resistencia térmica de las capas materiales

$R_{si}$  = Resistencia superficial interior

$R_{se}$  = Resistencia superficial exterior

Los valores de resistencia superficial interior y exterior se determinan según el sentido del flujo de calor, la posición y situación del elemento separador y la velocidad del viento como se muestra en la tabla 8 [72].

Tabla 8 - Resistencia térmica de superficies [m<sup>2</sup>K/W] [72]

Posición del elemento y sentido del flujo de calor	Situación del elemento					
	De separación con espacio exterior			De separación con otro local		
	$R_{si}$	$R_{se}$	$R_{si} + R_{se}$	$R_{si}$	$R_{se}$	$R_{si} + R_{se}$
Flujo horizontal en elementos verticales	0.12	0.05	0.17	0.12	0.12	0.24
Flujo ascendente en elementos horizontales	0.09	0.05	0.14	0.10	0.10	0.20
Flujo descendente en elementos horizontales	0.17	0.05	0.22	0.17	0.17	0.34

### **Difracción de rayos X [DRX]**

El análisis de fases por medio de la técnica de difracción de rayos X, es ampliamente utilizado en el estudio de materiales cristalinos, la técnica se basa en la obtención de un patrón de difracción para una fase cristalina individual correspondiente a un conjunto de picos con una intensidad y un  $2\theta$  difractados específico [84].

La difracción de rayos X (DRX) es una de las técnicas más eficaces para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases cristalinas de cualquier tipo de material, tanto natural como sintético. Los rayos X son radiaciones electromagnéticas de la misma naturaleza que la luz, pero de longitud de onda mucho más corta. La unidad de medida en la región de los rayos X es el Angstrom ( $\text{\AA}$ ), equivalente a  $10^{-10}$  m, y los rayos X usados en difracción tienen longitudes de onda en el rango 0.5-2.5 $\text{\AA}$  mientras que la longitud de onda de la luz visible está en el orden de 6000 $\text{\AA}$  [83].

### **Fluorescencia de Rayos X [FRX]**

La fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, entre los que se encuentran sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos [82]. El análisis de FRX esta basado en la excitación de átomos en una muestra. Un rayo X primario, típicamente generado en un tubo de rayos X, golpea un electrón de capa interna del átomo y expulsa la elección del átomo. La posición abierta es ocupada por un electrón desde otra capa externa y se emite radiación fluorescente. La energía de fluorescencia es igual a la diferencia de energía entre las dos capas electorales. Por lo tanto, la energía de esta radiación es característica del átomo e indica qué átomo está presente en la muestra. Como muchos átomos están presentes en la muestra, emitirá varios rayos X con diferente energía. En un instrumento de FRX de energía dispersiva, la radiación de fluorescencia es recogida por un detector de semiconductores. Los rayos X crean señales en el detector, que dependen de la energía de la radiación entrante. Las señales se recogen en un analizador multicanal. La tecnología del FRX ha sido aplicada para obtener resultados cualitativos, determinando solamente que elementos están presentes en la muestra, los equipos modernos de FRX pueden determinar las concentraciones de cada elemento presente y para mayor precisión en resultados se puede obtener la cuantificación a un nivel de determinar las partes por millón (ppm) [83].

## Análisis de espectroscopia infrarroja [FTIR]

La espectroscopia infrarroja corresponde a una técnica relativamente reciente de caracterización que abarca diversas áreas de la ciencia. Esta técnica se fundamenta en la absorción de radiación en el espectro infrarrojo por la sustancia en estudio, lo que tiene un efecto de vibración de distintos tipos sobre los enlaces. Una molécula será capaz de absorber energía cuando la energía incidente sea igual a la necesaria para que se de una transición vibracional de la molécula. Esta vibración se logra de manera característica para cada enlace en función de la longitud de onda lo que permite su detección mediante la técnica [76]. La radiación infrarroja es un tipo de onda electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible pero menor que las microondas como puede observarse en la figura 20.

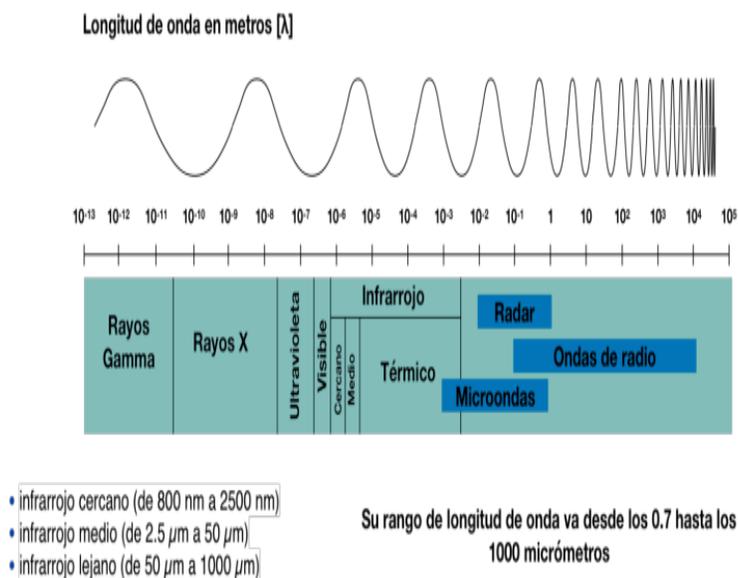


Figura 20 - Espectro electromagnético

### Vibraciones de tensión, radial o estiramiento



### Vibraciones de flexión o longitudinal

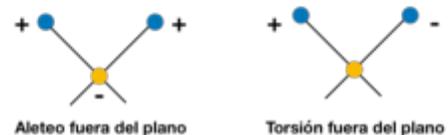


Figura 21 - Tipos de vibraciones moleculares por IR

Pueden distinguirse dos categorías básicas de vibraciones: de tensión y de flexión. Las vibraciones de tensión son cambios en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos. Las vibraciones de flexión están originadas por cambios en el ángulo que forman dos enlaces. En la figura 21 se representan los diferentes tipos de vibraciones moleculares [76].

En principio, cada molécula presenta un espectro IR característico (huella dactilar), debido a que todas las moléculas (excepto las especies diatómicas homonucleares como O<sub>2</sub> y Br<sub>2</sub>) tienen algunas vibraciones que, al activarse, provocan la absorción de una determinada longitud de onda en la zona del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo. De esta forma, analizando cuales son las

longitudes de onda que absorber una sustancia en la zona del infrarrojo, podemos obtener información acerca de las moléculas que componen dicha sustancia [76]. En la zona del espectro electromagnético IR con longitudes de onda del infrarrojo medio (entre  $4000$  y  $1300\text{ cm}^{-1}$ ) se suelen observar una serie de bandas de absorción provocadas por las vibraciones entre únicamente dos átomos de la molécula. Estas vibraciones derivan de grupos que contienen hidrógeno o de grupos con dobles o triples enlaces aislados. En la zona del espectro electromagnético IR con longitudes de onda comprendidas entre  $1300$  y  $400\text{ cm}^{-1}$  (infrarrojo lejano) es la denominada huella dactilar, y la asignación de las bandas de absorción a vibraciones moleculares es más difícil de realizar, debido a que cada una de ellas está generada por absorciones individuales sumadas (multiplicidad de las bandas). En esta zona de longitudes de onda, pequeñas diferencias en la estructura y constitución de las moléculas dan lugar a variaciones importantes en los máximos de absorción [76][77]. Un ejemplo de lo anterior se observa en la figura 22.

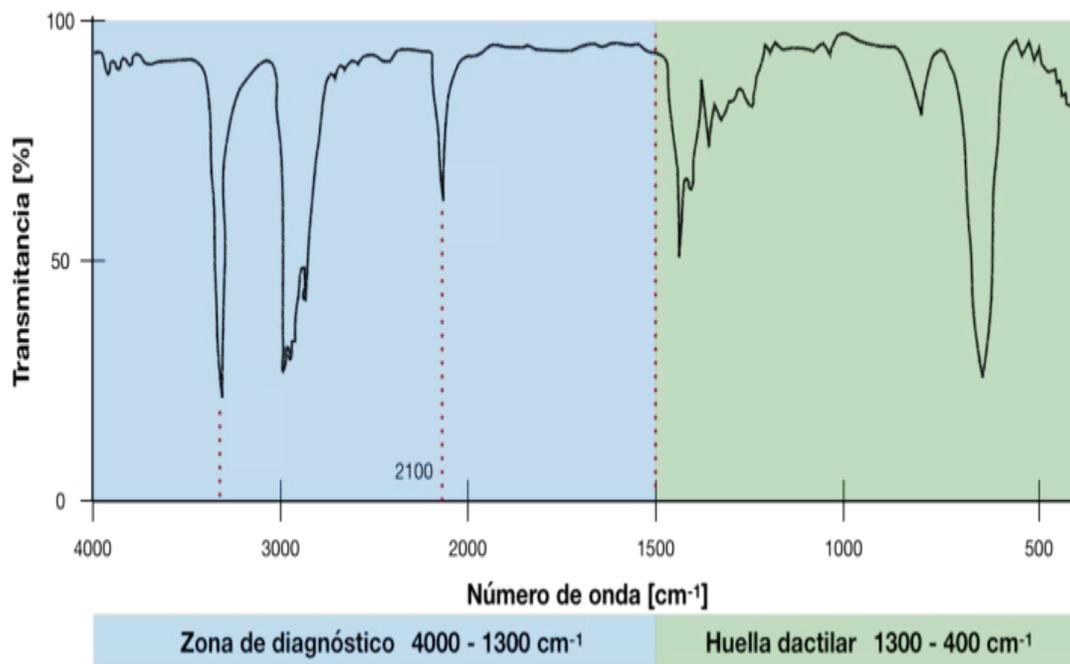


Figura 22 - Zonas de absorción de radiación infrarroja

En la gráfica de la figura 22 podemos distinguir en el eje de las abscisas el número de onda. El número de onda corresponde al inverso de la longitud de onda dada en centímetros, es decir, si tenemos una longitud de onda de  $0.002\text{ cm}$  el número de onda corresponde a  $500\text{ cm}^{-1}$  por lo tanto cada número de onda se corresponde a una longitud de onda específica que a su vez se relaciona con la frecuencia y la velocidad de la luz. Por otra parte, en el eje de las ordenadas podemos observar el porcentaje de luz

infrarroja que fue absorbida o transmitida al pasar por la sustancia en estudio. Cada molécula presenta un espectro IR propio o característico asociado a la longitud de onda en específico que son capaces de absorber provocando la vibración siendo esto graficado mediante los valores de absorbancia o transmitancia. La aplicación de los IR es bien conocida en los campos de la química, la física, la ciencia de los materiales, etc. La aplicación de esta técnica en el campo del cemento y el hormigón se remonta al Simposio de Tokio (1968). El estudio de IR está ganando mucha importancia con el desarrollo de equipos fáciles de usar y la continua investigación en la identificación y caracterización de productos de reacción y nuevos materiales [78].

### **Termo gravimetría [TGA]**

El Análisis Termogravimétrico (TGA), mide la masa (pérdida o ganancia) de una muestra cuando ésta se somete a un programa controlado de temperatura. Por esta técnica pueden determinarse: el porcentaje de pérdida de peso por descomposición, por deshidratación, por pérdida de disolvente, por pérdida de plastificante, etc. También puede determinarse la estabilidad térmica u oxidativa, la descarboxilación, la pirólisis y el porcentaje de aditivos [73].

En un TGA se registra continuamente la masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada, en función de la temperatura o del tiempo, al ir aumentando la temperatura de la muestra (normalmente de forma lineal con el tiempo). La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica [74].

De forma genérica, se puede decir que la técnica de termogravimetría se basa en la modificación en el peso que experimenta una muestra durante su calentamiento/enfriamiento controlado dentro de un horno. Un experimento típico consiste en la introducción del material objeto de estudio dentro de un crisol, el cual se deposita en una termo balanza en una atmósfera controlada y es sometido a una rampa térmica. De esta manera, es posible registrar las pérdidas de masa debidas a la evaporación de agua o disolventes, pirolisis o descarboxilación. Por su parte, si la atmósfera es oxidante, se podrán registrar incrementos de masa debidas a los fenómenos de oxidación que tengan lugar [75].

### **Ensayo de compresión**

Considerando un cuerpo sólido sometido a la acción de un sistema de fuerzas exteriores en equilibrio, es decir, que las fuerzas de interacción sobre una superficie "S" son iguales en magnitud y dirección, pero

en sentidos opuestos según exige el principio de acción y reacción. Considerando un punto sobre la superficie y un entorno de dicho punto de área  $\Delta S$ . Se llamará  $\Delta F$  a la fuerza que una parte del cuerpo ejerce sobre otra a través del área  $\Delta S$ . La fuerza por unidad de área vale entonces [79]:

$$t_m = \frac{\Delta F}{\Delta S}$$

A esta fuerza por unidad de área  $t_m$  se le llama tensión media sobre la superficie  $S$  en el punto considerado [79]. La intensidad de la fuerza perpendicular o normal a la sección se llama esfuerzo normal a un punto. Por otra parte, aquellos que empujan contra ella son esfuerzos de compresión [80].

El ensayo de compresión corresponde a una prueba de resistencia mecánica que permite determinar las propiedades de un material frente a una solución axial negativa, es decir, mediante esta prueba se comprime la probeta que está siendo estudiada. El objetivo de este ensayo es determinar las propiedades de un material o su comportamiento frente a una sollicitación externa. En el caso de pruebas realizadas sobre compuestos a base de un material cementante, las probetas deben ser diseñadas de acuerdo con lo estipulado en alguna normativa que se use de referencia que estipula las dimensiones además como los controles de la mezcla estableciendo las proporciones y el procedimiento detallado para generar la mezcla entre el material cementante, los áridos, el agua y eventualmente algún aditivo [81].

Entre los resultados se puede estudiar el comportamiento de los elementos ensayados principalmente enfocados en los límites de trabajo como la fuerza máxima, deformación a rotura, inicio de grieta, módulo de Young entre otros. Para que el ensayo se realice de forma precisa y repetitiva, se necesita una máquina de ensayo que garantice que tanto las mediciones como el control, como su comportamiento son por lo menos como lo requiere la norma, además de un software de ensayo de materiales capaz de permitir al usuario configurar el ensayo, realizar los cálculos acorde a la normativa en cuestión, representar gráficas y analizar valores [81].

## **CAPÍTULO 3 - ANTECEDENTES**

## Concreto Vegetal

### Generalidades

El hormigón es, con mucho, el material de construcción más importante y su consumo está aumentando en todos los países y regiones de nuestro planeta. Las razones son múltiples: sus componentes están disponibles en todas partes y son relativamente baratos, su producción puede ser relativamente sencilla, su aplicación abarca una gran variedad de obras de construcción e infraestructura civil. Además, desde hace unos 30 años, su desarrollo ha tomado nuevas direcciones [38].

El uso de agregados de origen vegetal se considera hoy en día como una forma esencial de fabricar materiales de construcción respetuosos con el medio ambiente. Existen muchos agregados de este tipo y se utilizan en la industria de la construcción, ya sea en estructuras nuevas o en la renovación de edificios existentes, por ejemplo, los agregados de girasol y cáñamo, entre otros. A diferencia de los agregados de origen mineral, los agregados de origen vegetal son materiales renovables y neutrales en cuanto al carbono. También tienen otras ventajas como buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico. Sin embargo, el mayor inconveniente está relacionado con su bajo rendimiento mecánico [85].

Dado que la fabricación de cemento es intensiva en recursos y energía, la utilización de un superplastificante permite disminuir la relación agua/cemento manteniendo una buena capacidad de trabajo y un mayor rendimiento mecánico. Además, los desechos de otros procesos de producción industrial pueden utilizarse para sustituir los componentes del cemento o añadirse al hormigón a fin de reducir su uso. Los desechos se definen como cualquier subproducto material de la actividad humana e industrial que no tiene valor residual. En consecuencia, muchas investigaciones han obtenido valiosos resultados explotando los desechos industriales en diversas formas de producción de hormigón, por ejemplo, el uso de agregados reciclados procedentes de escombros de construcción y demolición, desechos de caucho o de los agregados naturales. Los agregados ocupan la mayor fracción de volumen en el hormigón: los principales componentes del hormigón convencional suelen ser los agregados naturales, las piedras trituradas y las piedras de río. Hoy en día, la trituración de los áridos gruesos y la extracción de los naturales de los lechos de los ríos representan un ulterior agotamiento de las materias primas. Por lo tanto, otra forma de transformar el hormigón en un material de construcción más sostenible es sustituir los áridos por otros alternativos. Con la explotación de los agregados vegetales se

ha logrado un triple propósito: la preservación de las materias primas naturales, la reutilización de los desechos y el ahorro de energía. Además, el uso de agregados naturales en sustitución de los convencionales es una forma de reducir el peso propio del hormigón y su conductividad térmica. De este tipo de desarrollos se pueden derivar una serie de otros valores: bajo peso, respetuoso con el medio ambiente, fácilmente industrializable y fácil de moldear in situ. Por consiguiente, las aplicaciones en el hormigón en las construcciones de edificios pueden ser una solución interesante para mejorar la sustentabilidad y la eficiencia energética de los edificios [12].

En términos generales, los materiales compuestos son atractivos porque combinan las propiedades de los materiales en formas que no se encuentran en la naturaleza. Estos materiales a menudo dan como resultado estructuras ligeras con una alta rigidez y propiedades a medida para aplicaciones específicas, lo que permite ahorrar peso y reducir las necesidades energéticas. La oferta mundial de recursos naturales está disminuyendo y la demanda de materias primas sostenibles y renovables sigue aumentando. En 1997, se produjeron en todo el mundo aproximadamente 25 millones de toneladas métricas de fibras artificiales y alrededor de 20 millones de toneladas de fibras naturales. Los subproductos agrícolas proporcionan partículas ligeras que pueden ser incorporados en matrices minerales en sustitución de los agregados minerales convencionales. Los compuestos reforzados con fibras naturales representan una fuente potencial de ingresos no tradicional y de valor agregado para la comunidad agrícola. Los subproductos agrícolas proporcionan partículas ligeras que pueden ser incorporados en matrices minerales en sustitución de los agregados minerales convencionales [1][3][17]. Un hormigón en el sentido convencional de la palabra consiste en una mezcla heterogénea entre un aglutinante mineral y granulados (también de origen mineral) de dimensiones graduadas. Del mismo modo, lo que definimos como concreto vegetal, consiste en una mezcla entre granulados de materia vegetal lignocelulósica procedente directa o indirectamente de la agricultura o la silvicultura, que constituyen la mayor parte del volumen, y un aglutinante mineral. Estudios científicos de los últimos 30 años han demostrado que la incorporación de material lignocelulósico en matrices cementantes tiene efectos mejorados sobre las propiedades higrotérmicas e impactos ambientales menores a los concretos convencionales [2][4][23][61][86][87]. Las propiedades higrotérmicas mejoradas podrían atribuirse principalmente al aumento de la porosidad del compuesto debido a la formación de huecos entre el agregado vegetal y el ligante y a la baja densidad intrínseca de estos [5][13][23]. A medida que

aumenta el contenido de masa de los agregados vegetales, aumenta también la proporción de macro poros y, en consecuencia, disminuye la conductividad térmica del compuesto. Por lo tanto, los agregados lignocelulósicos mejoran en gran medida la conductividad térmica del compuesto [12]. De hecho, muchos proyectos tienen como objetivo crear materiales de construcción utilizando una o más formas de materia lignocelulósica como refuerzo estructural o con un propósito aislante. Los materiales utilizados son generalmente fibras que sirven para mejorar la resistencia a la tracción, la ductilidad y el comportamiento post-fractura de los hormigones compuestos fabricados de esta manera. Más recientemente, los proyectos han utilizado diversas fuentes de bioagregados, como la madera, el coco, el sisal, la palma, el bambú y el bagazo entre otros [5]. Se pueden utilizar varios aglutinantes para fabricar materiales de construcción a base de granulados y fibras de origen vegetal. La elección se realiza fundamentalmente en función de las principales propiedades, que dependerán del uso del material, del proceso de fabricación y del lugar de construcción. La elección también puede estar guiada por consideraciones financieras y factores medioambientales. Su uso, como material de construcción, para mejorar las propiedades de los materiales compuestos cuesta muy poco en comparación con el coste total de los materiales compuestos, además, generalmente son maleables, muy porosos y con una baja densidad aparente, características muy diferentes a las que aportan agregados minerales típicamente usados en concretos. Entre los aglutinantes más utilizados se encuentran los cementos Portland y los cementos hidráulicos o la cal, la mayoría de las veces asociados a aditivos puzolánicos, la escoria de alto horno y el metacaolín [2][5][8][88][89].

### **Comportamiento mecánico de concretos vegetales**

Cada vez se utilizan más materiales compuestos basados en materias primas renovables y respetuosos con el medio ambiente, para sustituir los materiales convencionales formados a partir de compuestos de materiales sintéticos que permiten reducir el efecto de las emisiones de gases de efecto invernadero [52].

Hoy en día, la necesidad de materiales de construcción sostenibles y energéticamente eficientes ha orientado una extensa investigación sobre materiales alternativos para producir productos de construcción respetuosos con el medio ambiente. Para construir viviendas sostenibles y asequibles para el futuro es ventajoso crear vínculos entre la agricultura y la industria de la construcción [90]. Las

aplicaciones de los compuestos con fibras vegetales se dirigen básicamente a la construcción no estructural de materiales [1][2].

La capacidad mecánica del concreto vegetal depende del aglutinante y de la cantidad de fibra utilizada, de su geometría (relación longitud/espesor), y de su distribución y adhesión a la matriz [2]. También es útil destacar otra particularidad: la variabilidad del comportamiento en función de la formulación nos permite ajustar y optimizar las prestaciones de este material para diversas aplicaciones. Dependiendo de la concentración de aglutinante, tres tipos de comportamientos se observan por ejemplo en la utilización de fibras de cáñamo para la fabricación de concreto vegetal como se observa en la figura 23. Para pequeñas dosis de ligante, disponemos de un material con baja resistencia mecánica y un módulo elástico inferior a 5 MPa. Los niveles de deformación son muy altos (>15%). Este material se comporta como una muestra de partículas sueltas con puentes de ligante que las conectan. Está predestinado para aplicaciones en las que el aislamiento térmico o acústico es importante. Para dosis intermedias, el nivel de rendimiento aumenta con la cantidad de ligante. El comportamiento del material se va asemejando progresivamente al de los materiales con grandes dosis de ligante. El comportamiento está guiado por la matriz de aglutinante. Para grandes dosis de ligante, el material es comparable a una matriz de ligante continua en la que las partículas de la planta están enterradas. Las prestaciones mecánicas aumentan y tienden hacia las del aglutinante puro [5], tal como se observa en la figura 23. La resistencia de los hormigones lignocelulósicos se sabe que es muy baja en comparación con los materiales de construcción habituales. De hecho, el mejor resultado en su desarrollo se encuentra entre el valor más bajo posible de conductividad térmica y la mayor resistencia a la compresión, generalmente inferior a 2 MPa. Es obvio que las propiedades mecánicas no tienen comparación con las del hormigón estructural con áridos minerales, pero su aplicación es totalmente diferente. Es importante tener en cuenta que los profesionales en la construcción recomiendan garantizar un valor mínimo de 0,2 MPa para la resistencia a la compresión y de 15 MPa para el módulo de Young [86]. Es por esto que los principales objetivos por alcanzar para desarrollar compuestos con propiedades mecánicas bien equilibradas son una dispersión homogénea de las fibras en la matriz, una interacción bien balanceada entre la matriz de cemento y las fibras y un porcentaje optimizado de fibras: suficiente para reforzar el material y permitir una continuidad de la matriz [2]. El aumento del contenido de agregados de vegetal reduce el peso del hormigón al disminuir claramente su densidad. Los resultados de la prueba de

resistencia a la compresión indican que las propiedades mecánicas disminuyen con la disminución de la densidad [12].

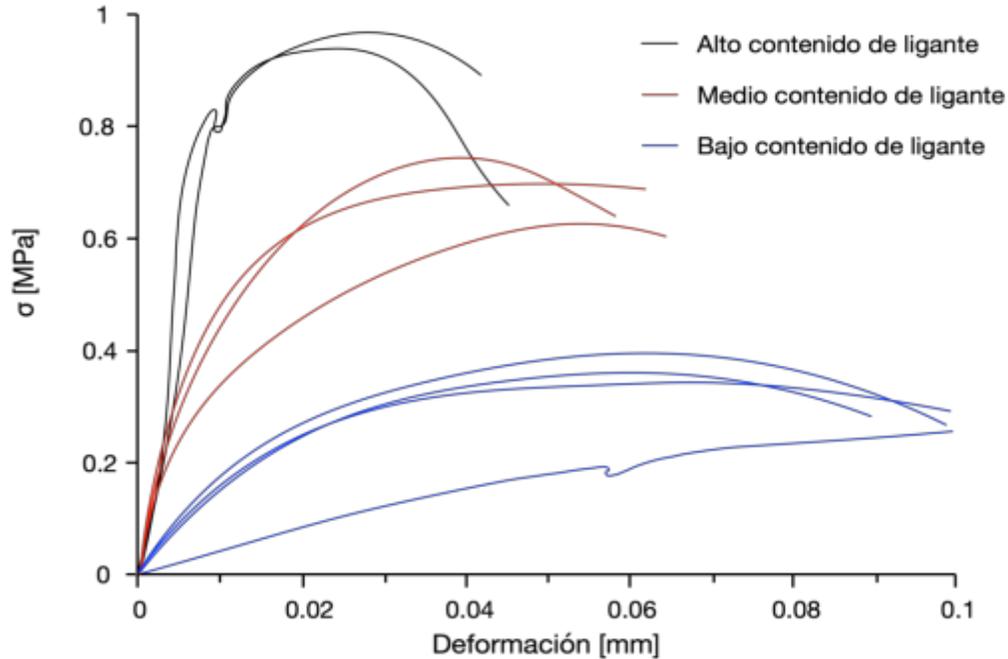


Figura 23 - Influencia de la dosis de aglutinante en la resistencia a la compresión del concreto vegetal con fibras de cáñamo después de 1 año de endurecimiento [5]

La bibliografía ha reportado diversas formas de concreto vegetal estudiadas por diferentes grupos de investigación a nivel mundial. La tabla 9 muestra diversas propiedades mecánicas y físicas de compuestos desarrollados:

Tabla 9 - Propiedades físicas y mecánicas de diferentes compuestos con agregado vegetal lignocelulósico

Tipo de concreto	Edad ensayo	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistencia compresión [MPa]	Conductividad térmica [W/mK]	Fuente
Concreto	28 días	2000 - 2500	12 - 80	1.5	[86][91]
50% cal y 50% metacaolín	28 días	ND	10.1	ND	[1]
66% caliza arcillosa y 33% Girasol	60 días	284 - 469	0.5	0.089	[86]
Yeso y fibra de palma (1 - 10%)	28 días	1130 - 743	7.32 - 8.2	0.15 - 0.213	[23]
Fibra de coco (1%) y cal	28 días	ND	0.72	ND	[92]
Fibra de cáñamo	28 días	800	0.3	0.06 - 0.14	[86][93]
34% cal, 16% cáñamo y 50% agua	28 días	291 - 485	0.225 - 0.675	0.179 - 0.485	[94]
Fibra de palma (20 - 50%) y cal	30 días	950 - 680	0.6 - 0.2	0.201 - 0.091	[13]
37.5% CaO, 7.5% de Ca(OH) <sub>2</sub> , 5% puzolana y 50% Girasol	60 días	297 - 473	0.1	0.105	[86]
cemento y fibra de coco (1.5%), 1% carbonato glicerol	28 días	ND	51	ND	[4]
cemento puzolánico y girasol	49 días	ND	1.1 - 5.5	0.115	[95]
Cal hidratada, piedra pómez y cáñamo	28 días	1184 - 1266	2.77	ND	[62]
Cal hidratada, piedra pómez y girasol	28 días	1084 - 1204	2.52	ND	[62]
Cal y cáñamo	28 días	ND	0.15 - 0.83	ND	[90]
50% Cal, 50% metacaolín, 1% fibra de cáñamo	28 días	ND	11.8	ND	[1]
50% Cal, 50% metacaolín, 1% fibra de lino	28 días	ND	12.7	ND	[1]
cemento Portland y pino en 4, 8 y 12%	28 días	1460 - 1690	ND	ND	[91]
cemento Portland y sisa en 4, 8 y 12%	28 días	1410 - 1700	ND	ND	[91]
cemento Portland y fibra banana en 4, 8 y 12%	28 días	2820 - 3210	ND	ND	[91]
cemento Portland y eucaliptos en 4, 8 y 12%	28 días	1470 - 1780	ND	ND	[91]
cemento Portland y 5% fibra de coco	28 días	2242	36.1	ND	[88]
Bloque de metacaolín, cal y fibra de cáñamo	—	466	—	0.103 - 0.112	[93]
cemento Portland y 50% de agregado vegetal de girasol	28 días	1850	13.61	0.096	[96]
cemento Portland y viruta de madera	28 días	—	1.75 - 3.7	0.2	[12]

Como puede observarse, los resultados presentan una gran variación en todos los parámetros de interés de estudio, en donde juega un papel importante la naturaleza de las materias primas, así como las variables del proceso de fabricación que influyen tanto en la conductividad térmica, la resistencia mecánica y la densidad (o peso volumétrico) de los compuestos resultantes. Es por esto por lo que debe estudiarse con especial atención cada uno de los casos ya que es difícil extrapolar resultados entre compuestos a base de diferentes materiales constituyentes.

### **Comportamiento higrotérmico de concretos vegetales**

Los materiales de aislamiento térmico juegan un papel importante en lograr la eficiencia energética de los edificios. Los materiales naturales tienen numerosas ventajas sobre otros materiales y, por lo tanto, son los más prometedores para la construcción, creando un gran interés en todo el mundo sobre las posibles aplicaciones de las fibras naturales como materiales compuestos con propiedades mejoradas en esta directriz [23][97].

De acuerdo con las investigaciones realizadas por diferentes grupos a nivel mundial sobre el desarrollo de aislantes naturales, la fibra de cáñamo es la materia prima que muestra una mayor tendencia seguida del lino, arroz, hojas de piña y maíz. Si se amplía la búsqueda considerando biocompuestos aislantes, la caña de azúcar, la paja y el maíz son las materias primas que más han sido estudiadas y utilizadas para estas aplicaciones [98].

Con respecto a la cantidad de estudios que se han publicado, se observa un incremento de artículos científicos a partir del año 2000 con una fuerte alza a partir del año 2010 como se observa en la figura 24. Esto se puede atribuir al interés que se generó hacia el área estudiada, ya que, durante los últimos años, el auge por la producción y aplicación de materiales naturales en el sector de la construcción ha ido en aumento. Otro punto que se debe destacar es el hecho de la conciencia social que se ha generado durante el último tiempo hacia el medio ambiente y junto a esto el objetivo por lograr conseguir beneficios ambientales provenientes del uso de materiales naturales ha incrementado. Para lo cual se llevan a cabo análisis en conjunto con evaluaciones, con la finalidad de conseguir resultados y lograr implementar mejoras e innovar en el uso de materiales y nuevas o mejores tecnologías constructivas [98].

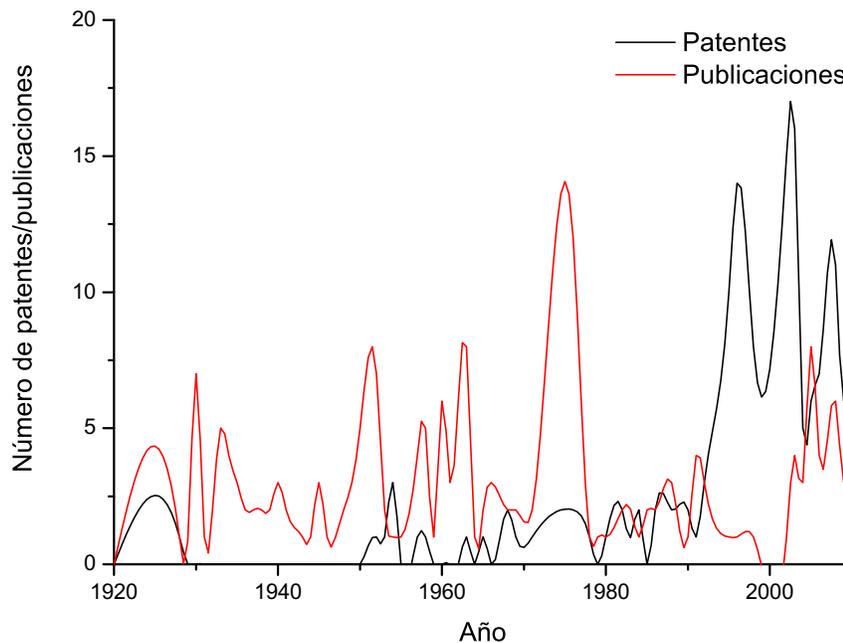


Figura 24 - Publicaciones científicas y patentes sobre aislantes a base de fibras naturales por año [98]

La conductividad térmica es la cantidad de calor que se transmite a través de un espesor unitario en una dirección normal a una superficie de área unitaria, debido a un gradiente de temperatura unitario en condiciones de estado estable. El conocimiento exacto de la conductividad térmica y de otras propiedades de transporte térmico de los materiales de construcción que intervienen en el proceso de transferencia de calor es esencial para predecir el perfil de temperatura y el flujo de calor a través del material. El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados, por lo que el conocimiento de su conductividad térmica es muy importante. El problema de la transferencia de calor en este material es complicado debido a que no tiene una composición homogénea con burbujas de aire. A lo largo de muchos estudios, para facilitar la mejor comprensión del fenómeno de la conducción, el hormigón se subdivide en sus componentes y facetas. La transferencia de calor se estudia a través de cada una de ellas para comprender la importancia relativa y la contribución de la transferencia de calor de los componentes al comportamiento térmico general de la mezcla. Una revisión de las investigaciones anteriores revela que el tipo de árido, la porosidad y el contenido de humedad influyen al máximo en la conductividad térmica del hormigón, a diferencia de los hidratos de cemento, cuya conductividad térmica no está sujeta a grandes variaciones. Así pues, la conductividad térmica de los

agregados determina principalmente la calidad aislante del hormigón. Como es evidente, los áridos con menor conductividad térmica producen un hormigón menos conductor, mientras que los áridos más conductores producen un hormigón más conductor. El tipo de agregado puede causar casi el doble de aumento de la conductividad térmica del hormigón [12].

Los materiales de construcción que utilizan agregados lignocelulósicos se utilizan cada vez más en la construcción ecológica. Este tipo de hormigón hecho de agregados vegetales tiene propiedades térmicas e higroscópicas particularmente atractivas [2][86]. En términos generales, el comportamiento mecánico del compuesto dependerá del tipo de fibra, longitud, diámetro, relación de aspecto y textura de las fibras [2][8].

Los compuestos a base de fibras vegetales tienen ventajas en términos de aislamiento térmico y acústico y de capacidad para regular la humedad en el interior de los edificios mediante la absorción y/o desorción de vapor de agua en función de la humedad relativa del aire. La razón particular detrás de este hecho es su alta porosidad (entre el 70% y el 80%), lo que resulta en excelentes propiedades aislantes. Por lo tanto, el uso de estos materiales es un excelente medio para regular pasivamente la temperatura interior y reducir así las necesidades energéticas del edificio. Además, resultados muestran una regulación de la humedad relativa en la envolvente debido a los constantes intercambios de vapor de agua entre los ambientes interiores y exteriores, modulando los cambios bruscos de temperatura. Por lo tanto, estos materiales son capaces de mejorar el confort en verano e invierno, y estabilizar la temperatura interior entre el día y la noche, mientras previenen los fenómenos de condensación y humedad en las paredes [5]. Además, los compuestos a base de fibras naturales presentan bajo costo, peso específico, reducción de contracción plástica del concreto, ligereza, con una abundancia de materias primas, procesamiento sencillo y respetuoso con el medio ambiente, excelente resistencia eléctrica, presentan una imagen de diseño natural estéticamente agradable, resistencia y rigidez específicas comparables a las de los compuestos de fibra tradicionales y menor consumo de energía para la producción asociado a una baja emisión de CO<sub>2</sub> [1][13][52][61][89][97]. Otra ventaja importante es que se pueden eliminar fácilmente al final de su ciclo de vida mediante compostaje o mediante la recuperación de su valor calorífico en un horno, lo que no es posible por ejemplo con la fibra de vidrio [5][23].

## Durabilidad de concretos vegetales

A pesar de todas las ventajas mencionadas anteriormente, la producción de materiales compuestos a base de cemento con fibras vegetales está actualmente limitada por la durabilidad a largo plazo de estos materiales. La durabilidad es la característica de los materiales que mantienen sus propiedades a lo largo del tiempo. La durabilidad termina cuando hay que sustituir el objeto o el material o, en su caso, cuando se pone fin al uso que el material tenía o a la obra de la que forma parte. La durabilidad es un indicador que informa de hasta qué punto un material mantiene sus necesidades originales a lo largo del tiempo. Cuanto mayor sea la durabilidad del material, menor será el tiempo y los recursos necesarios para su mantenimiento [14]. El problema de la durabilidad se asocia con un aumento de la fractura de la fibra debido a la debilidad de las fibras frente a medios alcalino. La mineralización de la fibra debido a la migración de los productos de hidratación a los lúmenes, y la variación del espacio y del volumen debido a su alta absorción de agua afecta un enlace interfacial adecuado entre la fibra y la matriz, no asegurando la durabilidad del material [2]. Por lo tanto, la degradación mecánica de los materiales compuestos reforzados con fibra natural se debe principalmente a la absorción de agua y a la inestabilidad térmica de las fibras naturales relacionadas con sus microestructuras, configuraciones moleculares, componentes químicos y contenidos de constituyentes [97].

Estudios han demostrado que el uso de cemento Portland presenta problemas de compatibilidad con agregados vegetales debido a que la presencia de carbohidratos polisacáridos interactúa con las reacciones de hidratación del aglutinante retardando formación de hidratos impidiendo o retrasando el fraguado. Por esta razón el cemento para la producción de concreto vegetal debe ser reemplazado por cal hidráulica y/o aditivos puzolánicos [61][62][86][99][100]. El cemento Portland se endurece por hidratación de compuestos anhidros que dan lugar a silicato de calcio hidratado (gel CSH), etringita e hidróxido de calcio o Portlandita. Aunque la relación estequiométrica agua/cemento es de alrededor de 0,23, es necesario añadir más agua para mezclar los componentes. Este exceso de agua se evapora durante la etapa de curado, dando lugar a una red de poros. Esta porosidad es una de las causas de la falta de durabilidad de las pastas de cemento, ya que permite el acceso de agua que puede contener diferentes sustancias disueltas (cloruros, sales de sulfato o ácidos, entre otros) o gases del exterior al interior del material de cemento. Bajo estas condiciones, el agua intersticial disuelve el hidróxido de calcio para formar una solución tamponada de  $\text{pH} > 13$ . Muchos estudios han relacionado la presencia de

este hidróxido de calcio con la degradación del agregado vegetal y, por lo tanto, con la pérdida de durabilidad de los compuestos [2][61][62][101].

En el concreto vegetal se observa una zona interfacial de unas decenas de micrómetros de espesor alrededor de los agregados vegetales. En esta zona, el fraguado del ligante se ve inhibido o retrasado por el agregado o por los correspondientes degradados en un ambiente alcalino. Esta zona de transición se caracteriza por un aumento de la porosidad entre el agregado y el ligante. Estas áreas de despegado también pueden estar relacionadas con los cambios dimensionales de las fibras vegetales dependiendo del contenido de humedad del material y también pueden observarse cuando se utiliza un aglutinante con un pH alcalino [5].

La zona de transición de la matriz a base de cemento Portland es el carácter de alta porosidad, formando con mucha frecuencia un hueco (despegue) alrededor de la fibra vegetal como puede observarse en la figura 25 reportada por el investigador V. Agopyan. La zona de transición también revela una mayor concentración de Portlandita. La alta porosidad se ha explicado por la muy alta absorción inicial de agua de las fibras mientras que la brecha entre la fibra y la matriz puede explicarse por la mayor contracción de desecación de la fibra vegetal [61].

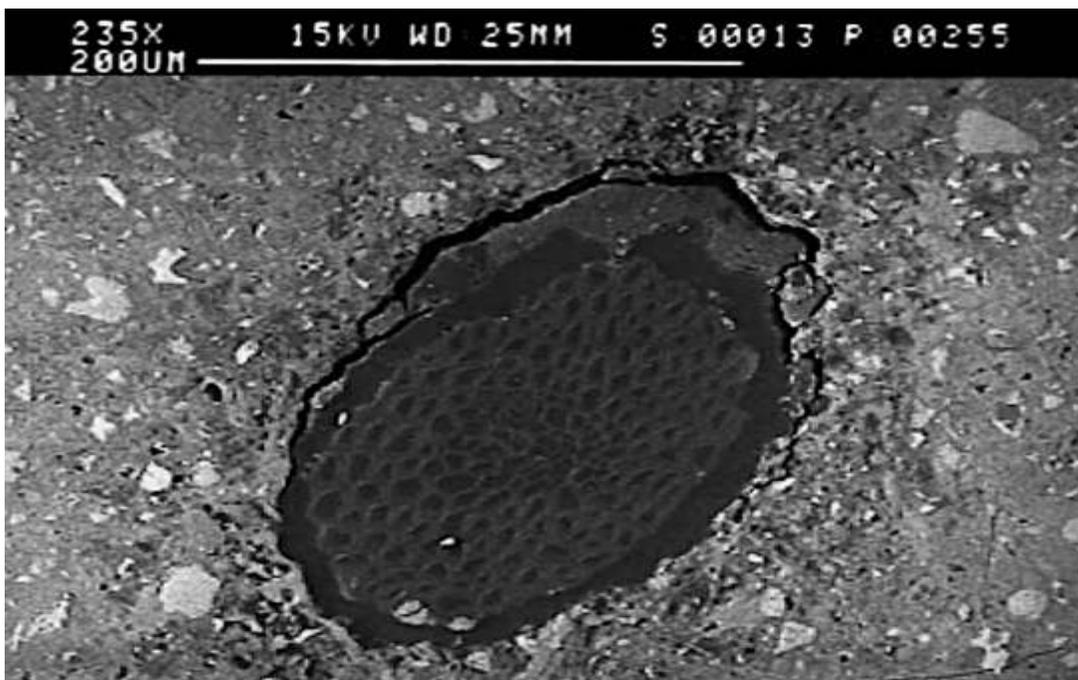


Figura 25 - Despegue en la zona de transición entre una matriz a base de cemento Portland y una fibra de coco después de un curado de 28 días [61]

Existen básicamente dos estrategias para mejorar la durabilidad de los compuestos a base de material cementante y agregados vegetales. Una posibilidad es modificar la composición de la matriz para reducir o eliminar los compuestos alcalinos. La segunda forma de aumentar la durabilidad de estos compuestos es modificar las fibras con tratamientos químicos o físicos para aumentar su estabilidad en la matriz cementosa o practicar un recubrimiento de agregados vegetales antes de su incorporación al ligante [2][3][16][61]. La parte medular en el desarrollo de este tipo de materiales es mejorar la compatibilidad del material lignocelulósico con las matrices utilizadas, para lo cual, se utiliza una infinidad de métodos de modificación superficial. Todas estas modificaciones superficiales tienen como objetivo final el de mejorar las propiedades del material compuesto desarrollado [54].

### **Tratamiento superficial (recubrimiento)**

Para reducir la cantidad de agua que puede absorber el agregado vegetal, y adicionalmente darle una protección contra el medio alcalino de la pasta de cemento, se ha considerado utilizar sustancias que fueran hidrófobas y económicas para no encarecer el proceso: aceite de linaza, parafina, sellador para madera y creosota entre otros [102].

### **Tratamiento químico**

El uso de un tratamiento químico en las fibras naturales permite reducir sus características hidrofílicas. El tratamiento de las fibras naturales por NaOH es el más común el cual permite eliminar el contenido amorfo, la hemicelulosa y la lignina superficial, lo que provoca que la superficie de la fibra se vuelva áspera promoviendo un fuerte vínculo de unión interfacial. Los tratamientos químicos tienen como objetivo reducir la naturaleza hidrófila de las fibras, pero los tratamientos superficiales pueden no sólo modificar la superficie de la fibra, sino que además pueden mejorar los mecanismos de adhesión entre la superficie del agregado y la matriz del polímero [52][87][102]. Se han investigado las propiedades termofísicas de los materiales compuestos mostrando que la conductividad y la difusividad térmicas de estos compuestos disminuyeron después de tratar las fibras con diferentes concentraciones de NaOH [48]. También se ha reportado la utilización de un tratamiento químico a base de silicato de sodio con reducción de hasta un 75% en la absorción de agua para fibras de girasol lo cual tiene consecuencias directas sobre la densidad, resistencia mecánica y conductividad térmica del concreto resultante [96].

El tratamiento de las fibras naturales con NaOH es el más común. Este abarca cuatro prácticas diferentes, como 1) una concentración constante de NaOH durante un período de tiempo constante; 2) utilizando diferentes concentraciones de NaOH durante un período de tiempo constante; 3) manteniendo una concentración constante de NaOH para diferentes períodos de tiempo y 4) utilizando diferentes concentraciones de NaOH para diferentes períodos de tiempo. El segundo y tercer método de práctica son los tratamientos más comunes para determinar las condiciones óptimas para la modificación de las fibras naturales. Después de esta práctica química las fibras se neutralizan, limpian y secan. El efecto del tratamiento sobre las fibras busca remover el contenido amorfo, parte de la hemicelulosa y lignina los cuales permitiendo rugosidad en la superficie de la fibra. De esta manera se promueve una mayor adherencia entre la fibra y la matriz cementante [52].

### **Tratamiento de hornificación**

Un método barato y sencillo utilizado con éxito por grupos de investigación para obtener compuestos de cemento más duraderos es la hornificación de fibras de celulosa. La hornificación es un efecto irreversible que se produce en las fibras sometidas a ciclos de secado y rehumectación principalmente. Las fibras horneadas tienen una mayor estabilidad dimensional y menores valores de retención de agua. La menor permeabilidad de las fibras resulta en una menor degradación de éstas. Además se ha reportado un aumento de la fuerza de adhesión y fricción del 40% y 50%, respectivamente para las fibras [2].

Este comportamiento puede explicarse por el endurecimiento de la estructura polimérica de las fibrocélulas que se produce durante el proceso de humidificación y secado. Las cadenas de polisacáridos de la celulosa se disponen más estrechamente con la eliminación del agua durante el secado y con ello se añaden las microfibrillas, en estado seco, como resultado del mayor empaquetamiento. Los vacíos capilares de fibra se cierran progresivamente con el secado y ya no se pueden volver a abrir completamente con la rehumectación [103][104][105].

## **CAPÍTULO 4 – HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

## **Hipótesis**

En función de los antecedentes expuestos, la siguiente hipótesis es planteada para este trabajo:

La utilización de agregado lignocelulósico residual obtenido de la planta de Agave salmiana disponible en México como sustitución al agregado mineral fino en una matriz a base de cemento Portland, permitirá la obtención de un mortero con prestaciones mecánicas que permitan su utilización como material de construcción, con un mejor desempeño térmico aplicado en edificaciones y un menor impacto ambiental que el de los concretos convencionales.

## **Objetivo general**

Desarrollar un mortero vegetal consistente en una matriz a base de cemento Portland con agregado lignocelulósico residual de Agave salmiana disponible en México como sustituto a los agregados pétreos.

## **Objetivos específicos**

- Determinar los niveles de producción, valorización y/o disposición final de los residuos de Agave de la producción de destilados producidos en México y ver su factibilidad como potencial uso en la creación de concretos vegetales.
- Caracterizar física, química y mecánicamente las fibras lignocelulósicas de Agave para el estudio, como también el cemento Portland CPO40R definido para la elaboración del mortero.
- Evaluar los diferentes tratamientos reportados en la bibliografía para proteger al agregado lignocelulósico de Agave al medio alcalino al que será expuesto y así mejorar la compatibilidad entre las materias primas.
- Evaluar las variables identificadas en el proceso productivo para determinar su influencia en las propiedades de compuesto resultante mediante una matriz experimental Taguchi.
- Determinar comportamiento energético térmico del material compuesto resultante para ser comparado con materiales convencionales de construcción.

## **CAPÍTULO 5 - METODOLOGÍA**

## Introducción

El enfoque experimental se centra en la determinación de las condiciones óptimas para el desarrollo y fabricación de un mortero vegetal con agregado lignocelulósico de Agave, así como también en la optimización de los parámetros involucrados en los resultados de conductividad térmica, densidad y resistencia mecánica del compuesto resultante. La metodología se estructuró pensando en cinco fases como se observa en la figura 26.

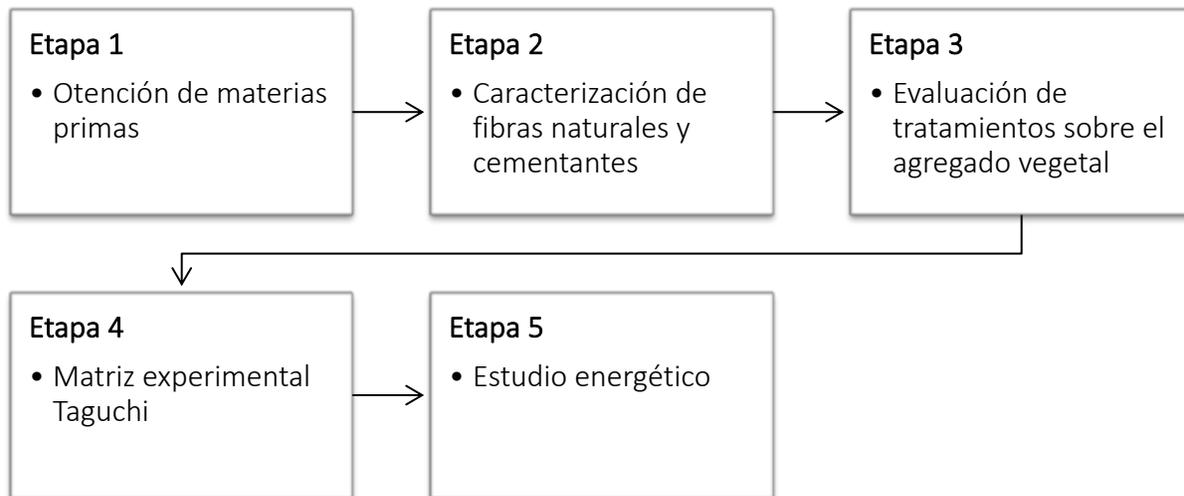


Figura 26 – Esquema de la metodología experimental propuesta

La etapa uno se enfocó en la definición del trabajo a realizar, considerando la estipulación de la metodología que se emplearía para alcanzar los objetivos propuestos en función de la literatura científica consultada. Además, se adquirieron las materias primas para la realización de la investigación.

La etapa dos del proyecto de investigación consistió en la caracterización de las fibras naturales con ensayos físicos, químicos y microestructurales. Lo mismo se realizó con el material cementante empleado en donde además se estudió el desempeño del producto de hidratación bajo ciertas variables que permitan comprender de mejor manera el proceso de fabricación del mortero vegetal.

En la etapa tres de la experimentación, se evaluaron 4 distintos tratamientos empleados sobre el agregado vegetal de Agave salmiana con el fin de obtener mejores resultados sobre la resistencia mecánica y las propiedades térmicas en el compuesto desarrollado. Los tratamientos estudiados fueron seleccionados de acuerdo con lo estipulado en la literatura considerando un tratamiento de hornificación, un tratamiento químico de cocción de la fibra en NaOH, un tratamiento de recubrimiento

con parafina sólida y un tratamiento de congelamiento los cuales fueron comparados con un compuesto fabricado bajo las mismas condiciones, pero con el agregado vegetal en estado natural (sin la aplicación de un tratamiento).

La cuarta etapa consta de una metodología experimental Taguchi pensando una optimización del mortero vegetal en función de las principales variables involucradas en el proceso de fabricación. En este caso se consideran variables de entrada el contenido de agregado vegetal, la relación agua cemento y la incorporación de aditivo superfluidificante. Cada una de estas variables se estudian en dos niveles evaluando como respuesta la conductividad térmica, la densidad y la resistencia a la compresión del compuesto resultante.

La quinta etapa de este proyecto busca cuantificar una aplicación del compuesto desarrollado para un caso de estudio en México considerando dos diferentes climas y pudiendo observar los ahorros energéticos potenciales por el empleo del mortero vegetal en edificaciones residenciales mediante el método de grado-día.

Mediante la metodología propuesta se pretende dar cumplimiento a los objetivos planteados en el capítulo anterior. Cada una de estas etapas y las condiciones experimentales definidas se exponen de manera mas detallada a continuación.

## **Etapas 1 – Obtención de materias primas**

Las materias primas obtenidas para el desarrollo experimental se obtuvieron de dos fuentes principales:

- El cementante correspondiente a CPO40R fue proporcionado por la empresa Cemex de su planta ubicada en Monterrey y almacenado en las dependencias del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- El Agave salmiana se obtuvo de las dependencias del Laboratorio de Química Analítica de la Unidad B de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León y fue almacenado en las mismas dependencias.
- Los reactivos empleados en los diferentes procedimientos realizados fueron adquiridos por diversos proveedores locales asegurando los niveles de pureza adecuados para evitar la alteración de los resultados de los ensayos de laboratorio.

La investigación se realizó en los laboratorios del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, así como también en las dependencias del laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Ciencias Biológicas de la misma universidad conforme fueran requeridos diversos equipos e instrumentación.

## **Etapas 2 – Caracterización de cementante y fibras naturales**

### **Caracterización de cementante – Estado original**

El cemento CPO40R fue caracterizado en su estado original (polvo) mediante diversas técnicas y ensayos cuyos parámetros y consideraciones experimentales quedan descritos a continuación:

#### **Distribución del tamaño de partícula del polvo de cemento**

La distribución individual del tamaño de partículas del cementante fue medida con un analizador de tamaño de partículas basado en la difracción láser marca MICROTRAC modelo S3500. Se utilizó alcohol isopropílico con grado de pureza de 99.5% en conjunto con un minuto de ultrasonido a 40 Watts de potencia para dispersar posibles aglomeraciones de material que el equipo pudiera interpretar como partículas de mayor tamaño [106][107]. El procedimiento se realizó en triplicado.

#### **Densidad de polvo de cemento**

La densidad del polvo de cemento se llevó a cabo utilizando un equipo Multipicnómetro de la marca Quantachrome Instruments realizando un análisis en triplicado utilizando la celda de 4.5cm<sup>3</sup> pesando previamente las muestras en una balanza analítica de precisión  $\pm 0.0001$  y presurizando hasta aproximadamente los 17psi. El procedimiento se realizó siguiendo las indicaciones del fabricante empleando gas nitrógeno [108]. Los resultados fueron corroborados por la información proporcionada por el fabricante [106].

#### **Difracción de rayos X (DRX) sobre el polvo de cemento**

El material cementante en su estado original (polvo) fue sometida a un análisis de Difracción de Rayos X en triplicado para determinar las fases cristalinas presentes. El ensayo por el método de polvo fue realizado en un difractómetro X PERT Pro MRD con radiación  $\text{CuK}\alpha$   $\lambda = 1.5405\text{\AA}$ . Los datos fueron obtenidos en el rango  $2\theta = 8$  a 80 grados con una velocidad de rotación de 15rpm y un tamaño de paso de  $0.0508714^\circ 2\theta$  [107][84].

### **Fluorescencia de rayos X (FRX) sobre el polvo de cemento**

La composición química del material cementante se obtuvo mediante un análisis de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva de masa bajo atmósfera de Helio en el equipo PANalytical-Epsilon 3. El análisis se realizó en triplicado

### **Espectroscopia infrarroja (FTIR) sobre el polvo de cemento**

Se llevó a cabo un análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en triplicado para la muestra de CPO40R. Para este análisis las muestras se colocaron en el soporte de muestra de un espectrómetro Agilent Cary 630 con la interfaz de muestra Diamond ATR. La resolución del espectrofotómetro se fijó en  $4\text{cm}^{-1}$ , y se obtuvieron 64 barridos en la región espectral de  $4000 - 400\text{cm}^{-1}$  [44].

### **Análisis termo gravimétrico (TGA) sobre el polvo de cemento**

La muestra de CPO40R fue analizada mediante un ensayo de termogravimetría con un equipo TA Instrument Calorimetry (SDT Q600, United States) en un rango de temperatura desde los  $30^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente) hasta los  $900^{\circ}\text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$  en una atmósfera de  $\text{N}_2$  [84].

## **Caracterización del cementante – Estado endurecido**

Posterior a la caracterización del cemento Portland en estado natural (polvo) fue necesario estudiar el desarrollo de la resistencia de la pasta de cemento en base a diversas variables que fueron tomadas en consideración para la fabricación del mortero vegetal. Es por esto por lo que se estudió el peso volumétrico, la resistencia a la compresión y la conductividad térmica de la pasta de cemento endurecida a 7 y 28 días variando la relación agua/cemento, el tipo de curado y la incorporación de un aditivo superfluidificante en la mezcla. Posteriormente se estudiaron las variaciones de los parámetros físicos observados mediante análisis microestructurales como DRX, FRX, FTIR y TGA.

### **Dosificación de pastas de cemento**

En el estudio de la hidratación del cemento Portland se analizó la variación en los parámetros físicos y mecánicos de peso volumétrico, conductividad térmica y resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. Estos parámetros se consideran variables de respuestas a la variación de la relación agua/cemento en

0.35 y 0.55; la incorporación del aditivo superfluidificante Plastol Precast Plus a base de policarboxilatos de la marca Eucomex, en un 1% de la masa del agua de reacción y considerando un curado en agua saturada en cal y un curado en condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa. La dosificación de la pasta de cemento se expone en la tabla 10.

Tabla 10 - Dosificación de la pasta de cemento de CPO40R

Muestra	Relación a/c	CPO [g]	Aditivo		Agua	
			[%]	[g]	Reacción [g]	Mezcla [g]
1	0.35	700	0	0	245.0	245.0
2	0.35	700	1	2.45	245.0	242.6
3	0.55	700	0	0	330.0	330.0
4	0.55	700	1	3.3	330.0	326.7

### Fabricación de especímenes de pasta de cemento

Los especímenes de pasta de cemento fueron fabricados de acuerdo con lo estipulado en la normativa ASTM C305 [109], para lo cual se pone toda el agua en la olla, se agrega el cemento esperando 30 segundos para propiciar la absorción, después se mezcla a velocidad baja durante 30 segundos. Se detiene durante 15 segundos para retirar la pasta adherida a las paredes. Por último, se mezcla durante un minuto a velocidad media.

Los moldes en que se fabricaron los cubos de 5x5x5 centímetros eran de acero, con las superficies interiores paralelas entre sí y con una base metálica que aguante el molde e impida las fugas. Fue esencial mantener el molde limpio y lubricado ligeramente con vaselina para impedir que la pasta se adhiera a las paredes. Los especímenes cúbicos de 50 milímetros de arista fueron llenados en dos capas procedentes de la misma mezcla. Cada capa fue apisonada 32 veces como lo estipula la normativa asegurando un acabado liso en la superficie. Posteriormente, el molde con la muestra es envuelto en papel nylon impidiendo la pérdida de humedad por el ambiente durante 24 horas. Después, las muestras fueron desmoldadas, rotuladas y curadas conforme a lo definido. La figura 27 muestra partes del proceso de fabricación de especímenes.



Figura 27 - Proceso de fabricación de especímenes de pasta de cemento

### Trabajabilidad en estado fresco de la pasta de cemento

Las propiedades en estado fresco de la mezcla se evaluaron mediante la realización de pruebas de trabajabilidad conforme a lo estipulado en la normativa ASTM C1437 [110] para lo cual se limpió y secó la mesa de compactación. Se ubicó el molde, agregando la mezcla en dos capas rasando la superficie dejando un acabado plano. Se levantó el molde del mortero dejando caer la mesa 25 veces en 15 segundos obteniendo una fluidez de la mezcla como la que se observa en la figura 28.



Figura 28 - Muestras de pasta de cemento con distinta fluidez después de haber sido compactadas

### **Curado de las muestras de pasta de cemento**

Las muestras de pasta de cemento fueron curadas mediante dos métodos reportados en la literatura:

- El primer método consiste en un curado normal durante un periodo de 7 y 28 días en un tanque de curación lleno de agua saturada en cal a  $22\pm 2^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente de laboratorio) [111].
- El segundo método consiste en dejar los especímenes curando en condiciones ambientales de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  y  $50\pm 5\%$  de humedad relativa durante 7 y 28 días hasta que se probaron [91].

El objetivo de probar estos dos métodos de curado es poder cuantificar los efectos sobre la pasta de cemento debido a que la fabricación de especímenes de mortero vegetal es mediante un curado en condiciones ambientales por la presencia del agregado y su naturaleza.

### **Detención de proceso de hidratación de la pasta de cemento**

Después de la realización de los ensayos de resistencia mecánica, los fragmentos resultantes fueron sumergidos en un recipiente con acetona durante 48 horas para detener el proceso de hidratación del mortero. Luego se secaron en vacío en un horno a  $50^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas [113][114][115].

### **Peso volumétrico de la pasta de cemento endurecida**

El peso volumétrico es determinado dividiendo la masa de los especímenes cúbicos en gramos por la media del volumen obtenido de dos medidas con vernier de el ancho, alto y largo de las probetas cúbicas como cociente de la masa en gramos como se estipula en la normativa ASTM C138 [112].

### **Conductividad térmica de la pasta de cemento endurecida**

Para las pruebas de conductividad térmica se fabricaron especímenes de  $4\times 4\times 16\text{cm}$  con las mismas dosificaciones expuestas en el apartado anterior, los cuales fueron cortados por la mitad y sometidos a los dos distintos métodos de curado en estudio. Los especímenes fueron perforados con una broca de 4mm de espesor con una profundidad de 60mm para ajustarse al tamaño de la sonda del equipo de medición. Las mediciones de conductividades realizadas a los prototipos se determinaron usando el método de fuente de calor de línea transitoria “Transient Line Heat Source”, usando el equipo analizador de propiedades térmicas TEMPOS de la marca Meter Environment que cumple las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334- 08. El ciclo de calentamiento y enfriamiento se definió en 10 minutos logrando una precisión de  $\pm 0.01\text{W/mK}$ . De acuerdo a la naturaleza de las muestras y a la especificación del fabricante, se utilizó el sensor RK-3 el cual fue

introducido con pasta térmica para eliminar el aire que pueda haber entre la sonda y la muestra alterando los resultados [23][116]. El procedimiento empleado puede observarse en la figura 29.



Figura 29 - Medición de conductividad sobre muestras prismáticas de pasta de cemento Portland CPO40R

### **Resistencia a la compresión de la pasta de cemento endurecida**

Para evaluar las propiedades mecánicas de la pasta de cemento CPO40R se realizaron pruebas de resistencia a la compresión sobre muestras cúbicas de 50x50x50 milímetros curadas en dos condiciones diferentes a edades de 7 y 28 días como se estipuló anteriormente. Para cada ensayo se prepararon muestras en triplicado y fue realizado mediante una máquina hidráulica de ensayo marca INSTRON 600DX como se observa en la figura 30.



Figura 30 - Ensayo realizado sobre una muestra de pasta de cemento

La resistencia a la compresión se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

donde  $R_c$  es la resistencia a la compresión (MPa),  $F_c$  es la carga máxima aplicada en la prueba de compresión (N) y  $A$  es la sección transversal ( $\text{mm}^2$ ) [13][23]. La sección transversal se obtiene del promedio de dos medidas del ancho y largo de cada probeta sobre la cara que es expuesta a la carga en el ensayo. El ensayo de compresión fue realizado en condiciones ambientales de 20°C y 50% de humedad relativa con una velocidad de carga de 90kg por segundo [86].

#### **DRX sobre la pasta de cemento endurecida**

Las muestras de los núcleos de los especímenes de hormigón se trituraron en trozos pequeños utilizando un mazo y luego se pulverizaron finamente utilizando un mortero y una maja. Las muestras pulverizadas se analizaron a continuación por el método de difracción de rayos X en polvo. El ensayo fue realizado en un difractómetro X PERT Pro MRD con radiación  $\text{CuK}\alpha$   $\lambda = 1.5405\text{\AA}$ . Los datos fueron obtenidos en el rango  $2\theta = 8$  a 80 grados con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso de  $0.0508714^\circ 2\theta$ .

### FTIR sobre la pasta de cemento endurecida

Se llevó a cabo un análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para la muestra de pasta de cemento CPO40R pulverizada. Para este análisis las muestras se colocaron en el soporte de muestra de un espectrómetro FTIR Agilent Cary 630 con la interfaz de muestra Diamond ATR. La resolución del espectrofotómetro se fijó en  $4\text{cm}^{-1}$ , y se obtuvieron 64 barridos en la región espectral de  $4000 - 400\text{cm}^{-1}$  [44].

### TGA sobre la pasta de cemento endurecida

La muestra de CPO40R posterior a su curado y después de haber sido molidas hasta obtener polvos, fue analizada mediante un ensayo de termogravimetría mediante un equipo TA Instrument Calorimetry (SDT Q600, United States) en un rango de temperatura desde los  $30^\circ\text{C}$  hasta los  $900^\circ\text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $10^\circ\text{C}/\text{minuto}$  en una atmósfera de  $\text{N}_2$ .

## Caracterización del agregado vegetal lignocelulósico de Agave

### Caracterización morfológica de la penca de Agave salmiana

El agave utilizado para la elaboración de destilados consta de diversas partes en su morfología, cuyo aprovechamiento esta enfocado principalmente en la destilación de la piña como se observa en la figura 31 (izquierda). Sin embargo, el proyecto de investigación actual se basa en el aprovechamiento de las pencas de la planta las cuales son extraídas y no poseen una disposición final bien definida (figura 31, derecha).

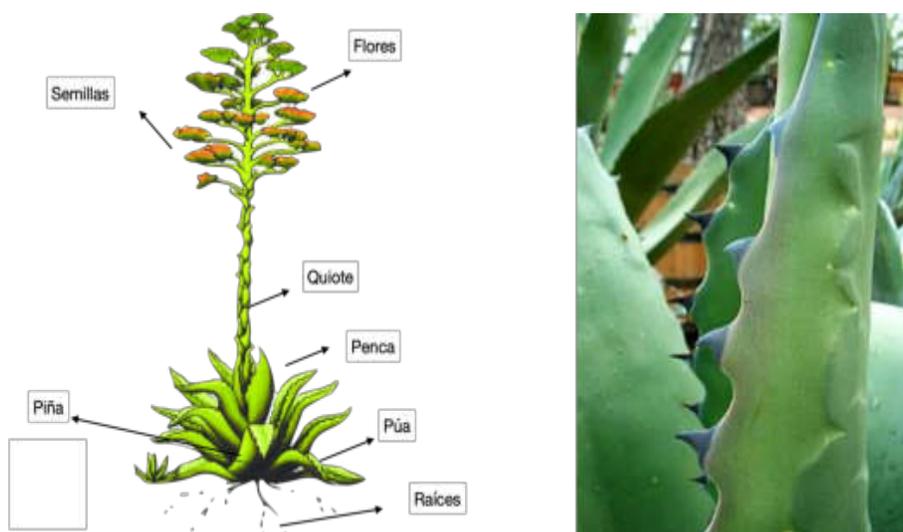


Figura 31 - Izquierda) Ilustración de una planta de agave con sus partes. Derecha) Fotografía en detalle de la penca del Agave salmiana

### Contenido inicial de agua de la penca de Agave salmiana

Se tomó una penca de tamaño promedio separando la zona de médula, médula con cáscara y cáscara picadas en cubos de aproximadamente 5 milímetros de arista. Se midió la masa inicial de cada muestra y se registró como  $M_0$ , para posteriormente ser secadas en horno con circulación de aire a  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta que alcanzaron una masa constante (es decir, que la masa no presentó una variación mayor a un 0.1% en un plazo de 24 horas). En la figura 32 puede observarse el cambio que sufren las fibras por el secado.



Figura 32 - Cambio en la apariencia de la médula de la penca de Agave al ser sometida al proceso de secado

Posteriormente, se pesaron las masas secas y se registraron como  $M_D$  calculando el contenido inicial de agua respecto al peso seco registrado como  $W$  mediante la siguiente ecuación [3][90][117]:

$$W = \frac{M_0 - M_D}{M_D} \times 100$$

### Preparación de la muestra de Agave salmiana

Las pencas de agave fueron adquiridas de manera gradual conforme se iban procesando para evitar que estas sufrieran algún proceso de descomposición o deshidratación de manera natural [90]. En función de los objetivos propuestos para esta investigación, se procedió a cortar el Agave con tal de obtener una granulometría aceptable para la fabricación de un mortero, es decir, con un tamaño de partícula inferior a 4.75 milímetros. Para esto el Agave se cortó de manera manual siendo secado en un horno con circulación de aire a una temperatura de  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta que alcanzó una masa constante (variación

inferior al 0,1% entre dos lecturas a las 24 horas) para lo cual se deja reposar en una bolsa hermética dentro de un desecador de silica equilibrándose con la temperatura ambiente [117]. Posteriormente, la muestra seca fue tamizada rechazando la fracción retenida en el tamiz Nro. 4 (abertura de 4.75 milímetros) y la fracción con un tamaño de partícula inferior a 0.6 milímetros considerada como polvo.

### **Densidad Aparente de la penca de Agave salmiana**

La densidad aparente se determinó mediante un procedimiento en que se seca el material a  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que alcanzó una masa constante (variación inferior al 0,1% entre dos lecturas a las 24 horas) para lo cual se dejó reposar en una bolsa hermética dentro de un desecador de silica equilibrándose con la temperatura ambiente. Para la experimentación se utilizó un recipiente cilíndrico, se pesó el recipiente sin contenido para posteriormente agregar el material seco ajustándolo aproximadamente a la mitad del volumen del cilindro. Posteriormente se procedió a volcar el cilindro diez veces y luego se agitó para obtener una superficie horizontal. Se colocó un disco de cartón en la superficie del contenido y se midió la altura interior hasta la zona superior del recipiente. Se pesó el cilindro nuevamente con el contenido del agregado vegetal y se calculó su volumen [90][117]. El procedimiento fue realizado en triplicado para cada una de las muestras. Con los antecedentes ya obtenidos se calculó la densidad aparente del agregado vegetal a partir de la masa y el volumen de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

donde  $\rho$  es la densidad aparente [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ],  $m$  es la masa del agregado vegetal [ $\text{g}$ ] y “ $v$ ” es el volumen [ $\text{cm}^3$ ] de la muestra.

### **Conductividad térmica de la fibra de Agave salmiana**

La conductividad térmica del agregado lignocelulósico se midió sobre una muestra de agave previamente secado en horno a  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  y utilizando el método de fuente de calor de línea transitoria “Transient Line Heat Source”, usando el equipo analizador de propiedades térmicas TEMPOS de la marca Meter Environment que cumple las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334- 08. De acuerdo con la naturaleza de las muestras se empleó el sensor KS-3 para lo cual se introdujo una muestra del agregado en un frasco ajustando la masa a la densidad medida anteriormente para el volumen del recipiente utilizado. Posteriormente se introdujo la sonda con el adaptador que

proporciona el fabricante para el adosamiento al recipiente de vidrio y se procedió a la medición como se observa en la figura 33.



Figura 33 - Procedimiento empleado para la determinación de la conductividad térmica del agregado vegetal de Agave

El ciclo de calentamiento y enfriamiento se definió en 10 minutos logrando una precisión de  $\pm 0.01 \text{ W/mK}$  [116][117]. El procedimiento fue realizado en triplicado para cada una de las muestras.

#### **Absorción de agua de la penca de Agave salmiana**

Previo a la realización del ensayo fue necesario colocar una bolsa permeable sintética con perforaciones de alrededor de  $1 \text{ mm}^2$  en agua y asegurar una completa humectación. Después de este proceso, se colocó la bolsa en una "centrífuga de ensalada" girándola 100 veces a aproximadamente 2 rotaciones por segundo. Se taró la bolsa permeable centrifugada registrando el valor de su masa seca previamente. Para la prueba de absorción de agua se tomó una muestra seca de 25 gramos del agregado en estudio, se introdujo en la bolsa y se sumergió durante 1 minuto en agua asegurando una completa humectación. Después se colocó la bolsa con la muestra en la centrífuga girando 100 veces a aproximadamente 2 rotaciones por segundo. El procedimiento puede ser observado en la figura 34.



Figura 34 - Sumergimiento de la fibra dentro de bolsa permeable para determinar su absorción de agua

Se registraron el valor de su masa descontando el peso de la bolsa húmeda utilizada. El procedimiento se repitió con tiempos de sumergimiento de 15, 240, 1440 y 2880 minutos [55][86][117]. La absorción de agua se calculó mediante la siguiente ecuación [1]:

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{W_{\text{humedo}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{seco}}} \times 100$$

En donde  $W_{\text{húmedo}}$  es el peso después de la inmersión en agua y el secado superficial mediante centrifugado, y  $W_{\text{seco}}$  es el peso inicial después del secado en horno.

#### Observación morfológica de la fibra de Agave salmiana

De manera complementaria, se realizó una microscopia de las fibras en el formato descrito anteriormente para corroborar la porosidad existente en cada una de las partes de la penca en estudio [3]. Las muestras se montaron en una placa Petri para ser observadas mediante un microscopio de luz invertida a 4 aumentos. Para poder obtener conclusiones sobre la morfología generalizada de las muestras, se tomaron partículas representativas a las cuales se les observaban cortes limpios y por ende caras planas [118].

#### Difracción de rayos X (DRX) de la penca de Agave salmiana

El DRX es una técnica analítica rápida y no destructiva que es utilizada principalmente para identificar la estructura cristalográfica y la composición química de las fibras naturales. La difracción de rayos X

permitió escanear las fibras naturales en un rango  $2\theta$  que varía entre  $8^\circ$  y  $80^\circ$ . Los estudios de difracción de rayos X se llevaron a cabo utilizando un difractómetro X PERT Pro MRD con radiación  $\text{CuK}\alpha$   $\lambda=1.5405\text{\AA}$ . Los datos fueron obtenidos con una velocidad de rotación de 15rpm y un tamaño de paso de  $0.0508714^\circ$   $2\theta$  para determinar la cristalinidad de la fibra siguiendo el método de difracción regular [52][58].

Para determinar el porcentaje de cristalinidad del Agave salmiana se definió la siguiente relación, para determinar el "Índice de Cristalinidad" [59]:

$$\text{IC} [\%] = \frac{I_{002} - I_{\text{am}}}{I_{002}} \times 100$$

En esta ecuación,  $I_{002}$  es la intensidad máxima detectada en el ensayo de DRX que para este caso corresponde a 10760uA, y el valor de  $I_{\text{am}}$  corresponde al valor detectado en las mismas unidades para  $2\theta = 18^\circ$  equivalente a 9108uA.

#### **Fluorescencia de rayos X (FRX) de la penca de Agave salmiana**

La composición química del Agave salmiana se obtuvo mediante un análisis de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva de masa bajo atmósfera de Helio con un equipo PANalytical-Epsilon 3.

#### **Espectroscopia infrarroja (FTIR) de la penca de Agave salmiana**

El análisis FTIR se considera un análisis no destructivo que puede proporcionar detalles cualitativos de las fibras naturales [52]. Se llevó a cabo un análisis de FTIR para una muestra en triplicado de la penca de Agave en estudio. Para este análisis las muestras finamente molidas se colocaron en el soporte de muestra de un espectrómetro FTIR Agilent Cary 630 con la interfaz de muestra Diamond ATR [116]. La resolución del espectrofotómetro se fijó en  $4\text{cm}^{-1}$ , y se obtuvieron 140 barridos en la región comprendida entre  $4000 - 400\text{cm}^{-1}$  [118].

#### **Análisis termo gravimétrico (TGA) de la penca de Agave salmiana**

El método TGA permite medir el rendimiento térmico de la fibra cuando el peso del material cambia [52]. La muestra de penca de agave fue analizada mediante un ensayo de termogravimetría mediante un equipo TA Instrument Calorimetry (SDT Q600, United States) en un rango de temperatura desde los  $20^\circ\text{C}$  hasta los  $800^\circ\text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $10^\circ\text{C}/\text{minuto}$  [116] en una atmósfera de  $\text{N}_2$  (inerte), que impide la combustión y permite que la degradación de los componentes tenga lugar uno a uno, lo que permite identificar las regiones de degradación de los componentes de las fibras [58][118]

## Caracterización química de la penca de Agave salmiana

El método experimental empleado en la caracterización química de la biomasa se llevó a cabo conforme a lo estipulado en las normativas Tappi y procedimientos experimentales que se describen a continuación en detalle:

- **Toma y preparación de muestras para análisis:** La normativa Tappi T 257 cm-85 [119] define el procedimiento a seguir para la realización de una toma de muestra significativa de la materia prima y su posterior preparación para ser sometida a los diferentes análisis químicos. De acuerdo con lo indicado en la norma, la materia en estudio se divide en grupos homogéneos por tamaño y características, tomando al menos dos muestras de cada subdivisión. La materia prima se sometió a molienda en una licuadora, el material obtenido se tamizó seleccionando la fracción comprendida entre 0.40 y 0.25mm. Las muestras fueron almacenadas en bolsas herméticas con su respectivo rotulado [87][63][120].
- **Análisis de la humedad:** La humedad de las muestras corresponde a la humedad de equilibrio y es tomada en cuenta en posteriores análisis. La humedad de las muestras preparadas según la norma TAPPI 257 cm-85 [119] se determinó de acuerdo a la normativa Tappi T264 cm-97 [121], pesando  $2.00 \pm 0.01$  g de muestra ( $m_o$ ) en un crisol tarado libre de humedad, luego, el conjunto se colocó en horno a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo de secado, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente dentro de un desecador, utilizando como agente desecante silica gel. Una vez atemperadas las muestras se pesaron, registrando la masa final ( $m_f$ ) y se determinó la humedad de acuerdo con la siguiente fórmula [63][87]:

$$\% \text{ humedad} = \left[ \frac{(m_o - m_f)}{m_o} \times 100 \right]$$

- **Análisis de ceniza:** El ensayo se llevó a cabo de acuerdo con lo estipulado en la normativa Tappi T211 om-93 [122], sobre  $1.00 \pm 0.01$ g de materia prima a la humedad de equilibrio ( $m_o$ ), puesta en un crisol de porcelana tarado libre de humedad, preparada según la norma TAPPI 257 cm-85 [119], que fue sometido a calcinación en mufla marca Terlab modelo MA12D a  $525^\circ\text{C}$  durante 3 horas. El crisol debió ser atemperado dentro de un desecador utilizando como agente desecante

silica gel. Una vez atemperado se pesó el conjunto ( $m_f$ ) y se calculó el porcentaje de cenizas de acuerdo con la siguiente ecuación [52][58][63][87]:

$$\% \text{ ceniza} = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

La figura 35 muestra fotografías del proceso realizado y de las muestras empleadas para la determinación del análisis de ceniza.

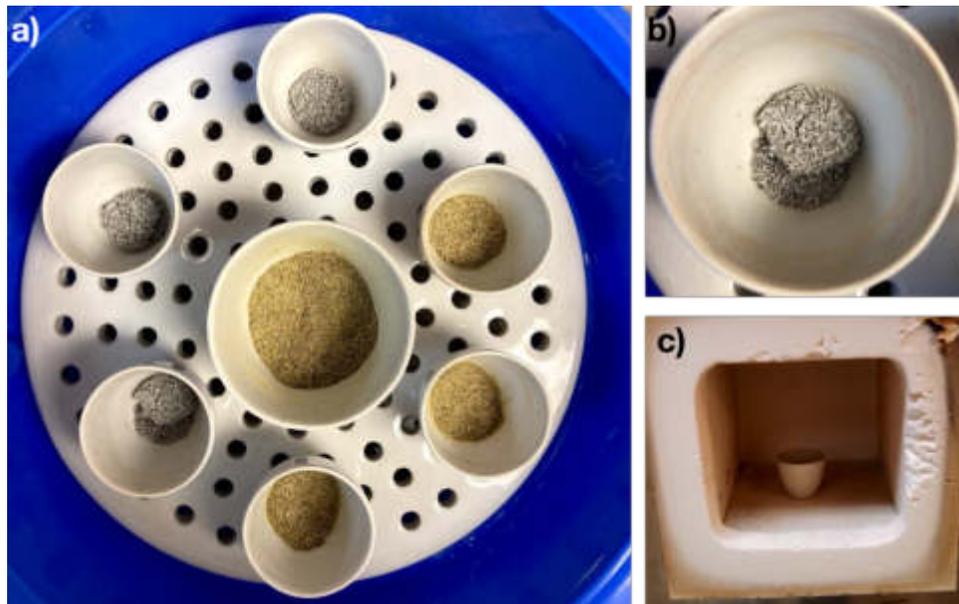


Figura 35 - Procedimiento experimental para el análisis de ceniza. a) Imagen comparativa del antes y después de la materia vegetal sometida a calcinación. b) Imagen detalle de las cenizas. c) Crisol en la mufla

- **Extraíbles con etanol-tolueno:** El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con la normativa Tappi T204 cm-97 [123]. Mediante este método se determinó la cantidad de compuestos no volátiles extraíbles con disolventes orgánicos que presenta la materia prima, como ceras, grasas, algunas resinas, hidrocarburos no volátiles, carbohidratos de bajo peso molecular y algunas sales. Para su determinación, se utilizaron  $4.0 \pm 0.1$ g de muestra ( $m_o$ ) a la humedad de equilibrio, preparada según la norma TAPPI 257 cm-85 [119]. La materia prima se dispuso en un cartucho de papel filtro, previamente pesado. El conjunto se colocó en un Soxhlet y se añadieron 150ml de mezcla etanol-tolueno (1:2 v/v). El Soxhlet se acopló a un matraz y un condensador calentándose a reflujo en campana, llevando la mezcla a ebullición. El procedimiento se llevó a cabo hasta agotar la extracción. Posteriormente, se desacopló el Soxhlet y se dejó evaporar

parcialmente el disolvente del matraz bola en un vaso de precipitado a temperatura ambiente. El procedimiento descrito puede observarse en las fotografías de la figura 36.

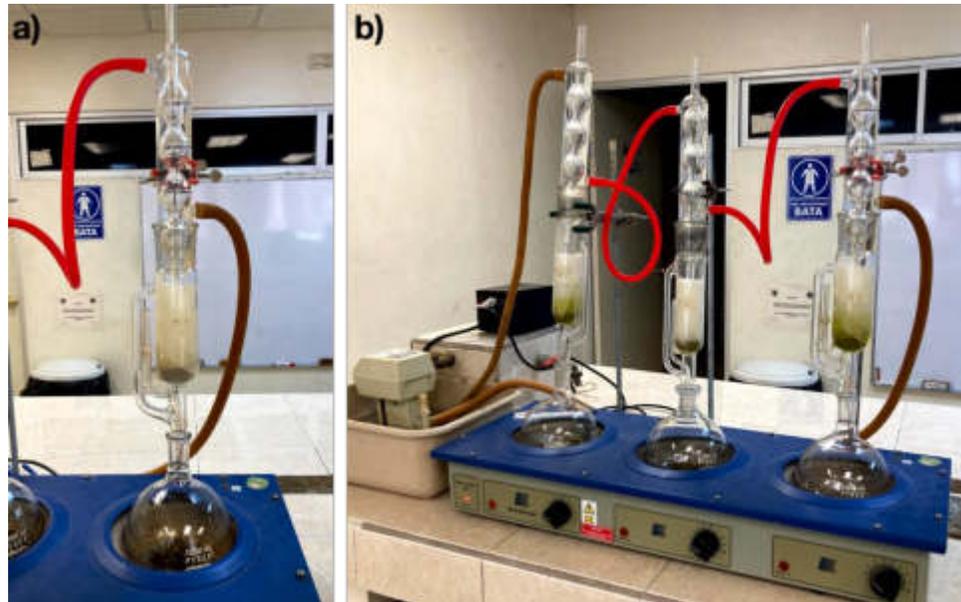


Figura 36 – a) y b) Procedimiento para determinación de extraíbles polares por Etanol-Tolueno

Posteriormente, el cartucho con la muestra se recogió para posteriores análisis, secándolo en estufa a 105°C durante 24 horas hasta que el extracto estaba seco. Finalmente, se pesó y se obtuvo la masa extraída ( $m_f$ ). El resultado del análisis se expresa en base a la muestra seca y el porcentaje de extraíbles se obtiene mediante la siguiente fórmula [58][63][87]:

$$\% \text{ extraíbles } E - T = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

- **Contenido en lignina insoluble en ácido:** El procedimiento se lleva a cabo mediante lo estipulado en la normativa Tappi T222 om-98 [124]. Mediante la aplicación de este método los carbohidratos de la materia prima fueron hidrolizados y solubilizados con ácido sulfúrico, de forma que la lignina insoluble en ácido quedó aislada. El procedimiento consistió en pesar 1.0±0.1g de la muestra libre de extraíbles preparada según la norma TAPPI T204 cm-97 [123]. Luego, se adicionaron 15ml de ácido sulfúrico al 72%, agitando de vez en cuando durante 2 horas a temperatura ambiente. Después se trasvasó el contenido a un matraz de 1000ml y se añadieron 560ml de agua destilada llevándolo a ebullición con reflujo durante 4 horas. La

disolución se filtró en un filtro Whatman número 3 previamente pesado y se lavó con agua caliente hasta pH neutro. El procedimiento queda expuesto en las fotografías de la figura 37.



Figura 37 - Procedimiento empleado para la determinación de la lignina insoluble en ácido. a) Muestras en reposo. b) Proceso de filtrado. c) ebullición de la muestra

Para terminar, el filtro se secó en estufa a 105°C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, el filtro se colocó en un desecador de vidrio utilizando silica gel como agente desecante para evitar la absorción de humedad. Una vez frío, se pesó y se determinó el porcentaje de lignina mediante la siguiente ecuación [58][63][87]:

$$\% \text{ lignina} = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

- **Contenido en holocelulosa:** La holocelulosa se define como la fracción de carbohidratos insoluble en agua presentes en las materias primas vegetales. Incluye, por lo tanto, la celulosa y hemicelulosas presentes en los sustratos. El método de Wise y col [125] por el cual se determinó este parámetro en la presente investigación se basa en que el dióxido de cloro que se desprende en los sucesivos tratamientos con clorito sódico disuelve la lignina mientras los hidratos de carbono permanecen inalterados. Para llevar a cabo dicho método se parte de 2.5±0.1g de muestras libres de extractos preparada según la norma TAPPI T204 cm-97 [123] y secas que se dispusieron en un matraz Erlenmeyer, donde se añadieron 80ml de agua destilada caliente (70-

80°C) sumergiendo la mezcla en un baño termostatzado a 70°C, agitando periódicamente con una varilla a fin de homogenizarla. A continuación, se añadieron cada 60 minutos 0.5ml de ácido acético glacial y 2.6ml de clorito sódico al 25%, hasta cubrir un total de 7 horas. Después de transcurrido ese tiempo la mezcla se mantuvo en el baño durante 12 horas sin nuevas adiciones. La figura 38 muestra fotografías del procedimiento descrito.

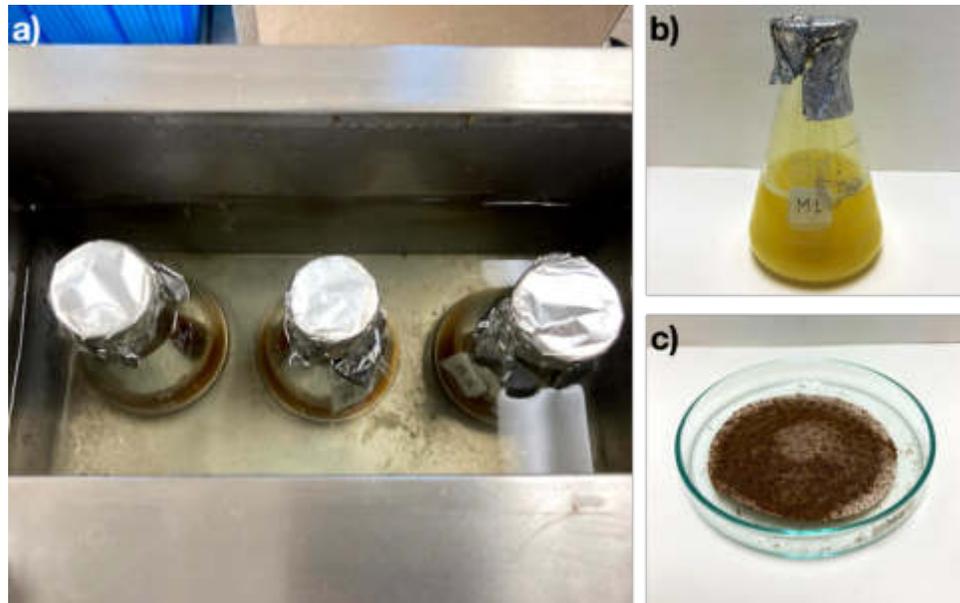


Figura 38 - Procedimiento realizado para la determinación de holocelulosa. a) Muestras en baño termostatzado. b) Muestras en reposo. c) Filtro Whatman con la muestra posterior al proceso de filtrado

Para finalizar, el residuo sólido (holocelulosa) se filtró en un filtro Whatman número 2, se secó durante 24 horas en una estufa a 105°C, se atemperó en un desecador y se determinó su cantidad mediante la masa con la siguiente ecuación [57][58][63][87]:

$$\% \text{ holocelulosa} = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

- **Determinación de  $\alpha$ -celulosa y hemicelulosas:** Dado que la norma TAPPI T203 om-93 (Determinación de  $\alpha$ -,  $\beta$ - y  $\gamma$ -celulosa en pastas) está definida únicamente para pastas de papel, y hace especial énfasis sobre ello, se optó por utilizar el protocolo propuesto por Rowell [126] para determinar el contenido en  $\alpha$ -celulosa y hemicelulosas en muestras de madera. El término hemicelulosas se define en este método como los componentes de la pared celular vegetal que son solubilizados mediante el tratamiento con hidróxido de sodio y ácido acético que se expone

a continuación, mientras que la  $\alpha$ -celulosa corresponde a la fracción de holocelulosa que permanece insoluble tras dicho tratamiento.

Según indica el método empleado, se pesaron  $2.00 \pm 0.01$ g de muestra de holocelulosa seca y libre de extractos, extraída del sustrato según el método de Wise y col [125]. Se añadieron 10ml de NaOH al 17.5% agitando hasta lograr una correcta dispersión. Posteriormente, se añadieron 5ml de NaOH al 17.5% cada 5 minutos hasta completar un total de 25ml (3 adiciones de 5ml). Tras la última adición se dejó reposar 30 min a  $20^{\circ}\text{C}$  (tiempo total de reacción de 45 minutos). Después, se añadieron 33ml de agua destilada a  $20^{\circ}\text{C}$  agitando bien toda la dispersión y se dejó reposar 1 hora antes de proceder a su filtrado en un filtro de porosidad media número 2. Posteriormente se lavó el residuo sólido con 100ml de disolución de NaOH al 8.3% tras lo cuál se lavó con agua destilada dos veces más. Se añadieron 15ml de ácido acético al 10%, dejándolo reaccionar 3 minutos antes de conectar el vacío. Finalmente, se lavó con agua destilada hasta que el filtrado quedó libre de ácido (pH neutro). Se secó a  $105^{\circ}\text{C}$ , se atemperó en desecador y se determinó la  $\alpha$ -celulosa gravimétricamente, correspondiente a la fracción que permanece insoluble a lo largo de todo el tratamiento. El procedimiento puede observarse en las fotografías expuestas en la figura 39.

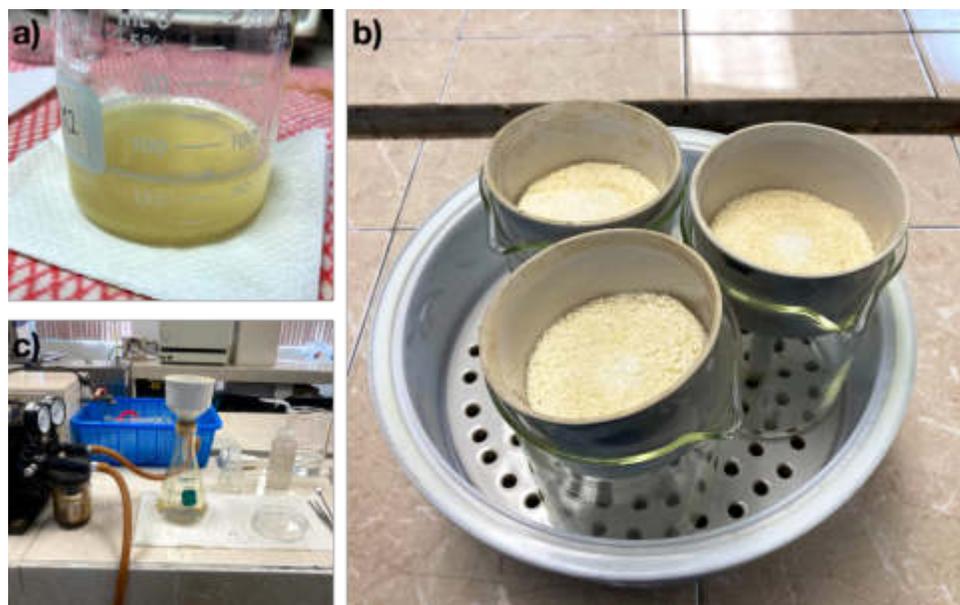


Figura 39- Procedimiento empleado para la determinación de  $\alpha$ -celulosa y hemicelulosas. a) Muestras en reposo. b) Muestras posterior al filtrado y secado en horno. c) Filtrado de las muestras

Las hemicelulosas se calculan por diferencia con la muestra inicial. Las cantidades se obtienen de las siguientes ecuaciones [58][63][87][116]:

$$\% \text{ celulosa} = \frac{m_f}{m_o} \times 100 \quad \% \text{ hemicelulosas} = \% \text{ holocelulosa} - \% \text{ celulosa}$$

### **Eta**pa 3 - Tratamiento y evaluación de la fibra

De acuerdo con la literatura, la incorporación de materias primas lignocelulósicas puede traer diversas consecuencias sobre el mortero vegetal resultante, que va desde efectos sobre la durabilidad hasta disminución severa de las propiedades producto de la migración de compuestos que interfieren con el proceso de hidratación de la pasta de cemento. En cualquiera de estos casos, se obtienen rendimientos de las propiedades del material compuesto resultante disminuidas por lo que se han reportados diversos tipos de tratamientos que abarcan dos directrices: La modificación del material cementante y la modificación de las fibras naturales.

En cuanto a la modificación del material cementante, lo que se busca es la incorporación de materiales cementantes alternativos como geopolímeros que otorguen un carácter de sustentabilidad mejorado, así como también que modifiquen el pH de la pasta de cemento para evitar la degradación de la fibra principalmente en caso de que sea utilizada como refuerzo mecánico como por ejemplo en el caso de las fibras de lechuguilla empleadas para otorgar mejoras en las propiedades de resistencia a la flexión en concretos.

Por otra parte, los tratamientos efectuados sobre las fibras naturales se basan en dar algún tipo de protección al material para prevenir su degradación al estar en contacto con una matriz o bien realizando modificaciones superficiales para alterar su carácter hidrofílico incrementando su hidrofobicidad y así impedir el ingreso de agua con compuestos disueltos que puedan dañarla o bien evitando la migración de hidrosolubles que puedan alterar la reacción de hidratación del material cementante [2].

Para la presente investigación, en función de los objetivos propuestos, se definió el estudio de 4 tratamientos sobre el agregado vegetal a modo de analizar las propiedades del compuesto resultante. Los tratamientos seleccionados corresponden a 3 procedimientos que han sido reportados en la literatura como lo es un tratamiento químico a base de NaOH, un tratamiento físico de hornificación y

un tratamiento de recubrimiento a base de parafina sólida; además de un cuarto tratamiento propuesto debido a que la observación permitió establecer un mejoramiento sobre las propiedades de densidad y conductividad térmica de la fibra natural empleada mediante su congelamiento y posterior secado.

## **Preparación de muestras**

Las pencas utilizadas para el procedimiento, en primer lugar, son recolectadas de la planta de manera directa realizándoles un corte procurando aprovechar la mayor cantidad de la materia prima posible. Posteriormente se procedió a limpiar la penca utilizando jabón y abundante agua, además de retirar las espigas que pudieran dificultar su manipulación. Después, la penca es cortada de manera manual en su totalidad sin separar los distintos componentes de la planta identificados en los apartados anteriores. Los cortes del agregado vegetal se realizaron dejando partículas cúbicas de 5 milímetros de arista aproximadamente. Ya teniendo el material debidamente cortado, se deposita en bandejas de aluminio para ser secado en horno con recirculación de aire a una temperatura programada de  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta tener una masa constante. El agregado vegetal resultante en estado seco es tamizado descartando la fracción con un tamaño superior a 4.75mm e inferior a 0.6mm. El material es guardado en bolsas herméticas con un adecuado rotulado que identifique cada muestra de manera adecuada.

## **Tratamientos sobre el agregado lignocelulósico de Agave salmiana**

Como se mencionó anteriormente, el agregado vegetal fue sometido a cuatro distintos tratamientos reportados en la literatura los cuales debido a su naturaleza actúan de manera distinta en presencia de una matriz cementante y es por esto lo importante de evaluar sus propiedades intrínsecas, así como también en la fabricación de un mortero vegetal para poder estudiar sus efectos sobre las propiedades finales del material compuesto resultante.

### **Agregado vegetal sin tratamiento [S/T]**

A modo de poder evaluar la efectividad de los tratamientos y poder determinar las variaciones que se producen sobre el agregado vegetal, es necesario tener una muestra de control a la que no se le aplique ningún tratamiento de los anteriormente descritos y de esta forma realizar un análisis comparativo. Para esto se toma una muestra del agregado vegetal seco en horno a  $60^{\circ}\text{C}$ . El agregado seco se guardó en

bolsas herméticas con su respectivo etiquetado. En este caso y para posteriores estudios, se utilizó la abreviatura “S/T”.

#### Tratamiento de congelamiento de la fibra [T/C]

La fibra natural a modo de ser preservada en el tiempo fue dispuesta en bolsas plásticas a las cuales se les retiro el aire y fueron congeladas a  $-20^{\circ}\text{C}$  en un equipo del laboratorio. Posteriormente, al momento de su utilización, las fibras fueron retiradas y dispuestas a temperatura ambiente durante un tiempo para posteriormente ser colocadas en horno a  $60^{\circ}\text{C}$  hasta obtener masa constante. Si bien este procedimiento fue realizado para evitar la degradación del agregado vegetal debido a un periodo de inactividad entre su extracción hasta su utilización, la observación y posteriores estudios mostraron que este procedimiento era capaz de alterar sus propiedades físicas reduciendo su valor de densidad aparente y disminuyendo su conductividad térmica por lo que fue considerado como un tratamiento alternativo para la fabricación de mortero vegetal. En la figura 40, se puede ver un comparativo de la apariencia adquirida por el agregado vegetal que fue sometido al proceso de congelamiento en donde se aprecia una coloración café oscura de la fibra y un tamaño de partícula mayor y mas regular. El agregado con el tratamiento de congelamiento se guardó en bolsas herméticas con su respectivo etiquetado. En este caso y para posteriores estudios, se utilizó la abreviatura “T/C”.



Figura 40 – Imagen comparativa que muestra a la izquierda el agregado vegetal seco mediante el procedimiento estándar y a la derecha una muestra de agregado vegetal sometido a congelamiento antes de ser secado en horno

### Tratamiento físico de hornificación [T/H]

El tratamiento de hornificación consistió en sumergir las fibras en agua a temperatura ambiente (23°C) y retirarlas para su secado después de la saturación. El agregado se colocó en un recipiente de agua donde permanecieron durante 3 horas, tiempo suficiente para alcanzar la saturación. Luego, el secado se inició en un horno a 80°C equipado con control de temperatura y flujo de aire y permaneciendo a esta temperatura durante 16 horas. Después la muestra fue atemperada a 23°C para evitar un posible choque térmico de las fibras. Todo este procedimiento corresponde a un ciclo y fue repetido diez veces. La figura 41 muestra un esquema del procedimiento unitario realizado [59][103]. El agregado con el tratamiento de hornificación se guardó en bolsas herméticas con su respectivo etiquetado. En este caso y para posteriores estudios, se utilizó la abreviatura “T/H”.

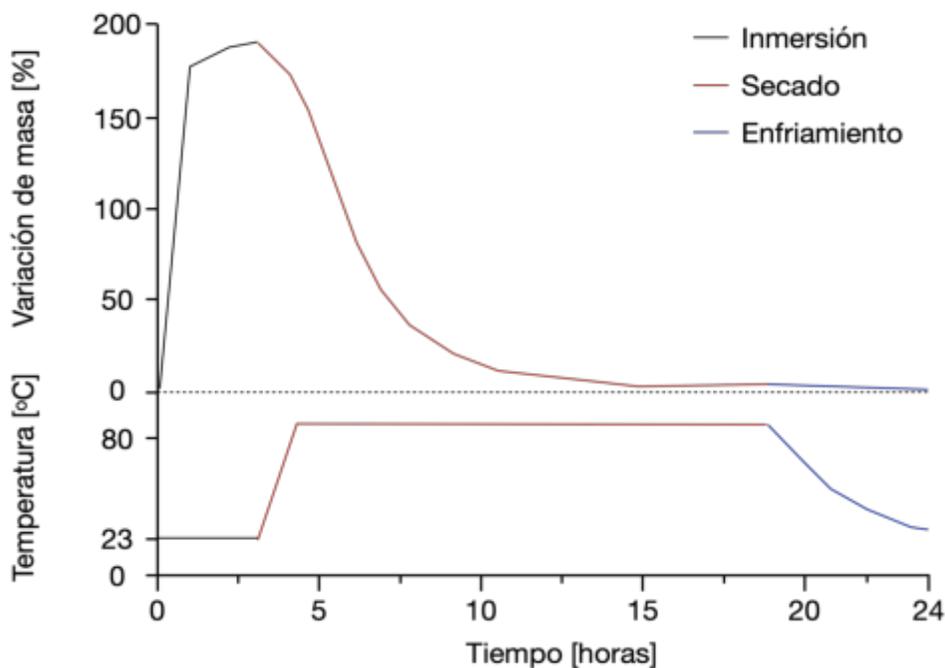


Figura 41 - Esquema metodológico del proceso de hornificación del agregado vegetal

### Tratamiento químico de NaOH [T/NaOH]

El tratamiento químico a base de NaOH consistió en sumergir el agregado vegetal en una solución al 1% de Hidróxido de sodio la cual se puso a hervir durante una hora bajo campana. Posteriormente, la fibra se retiró y se depositó en un desecador empleando silica durante 30 minutos para lograr su ambientación de manera gradual. El agregado vegetal se lavó con agua destilada, centrifugado y puesto

a secar en un horno a 60°C hasta obtener una masa constante (aproximadamente durante 48 horas) [52][87][102]. La figura 42 muestra fotografías del procedimiento llevado a cabo. El agregado con el tratamiento químico de NaOH se guardó en bolsas herméticas con su respectivo etiquetado. En este caso y para posteriores estudios, se utilizó la abreviatura “T/NaOH”.

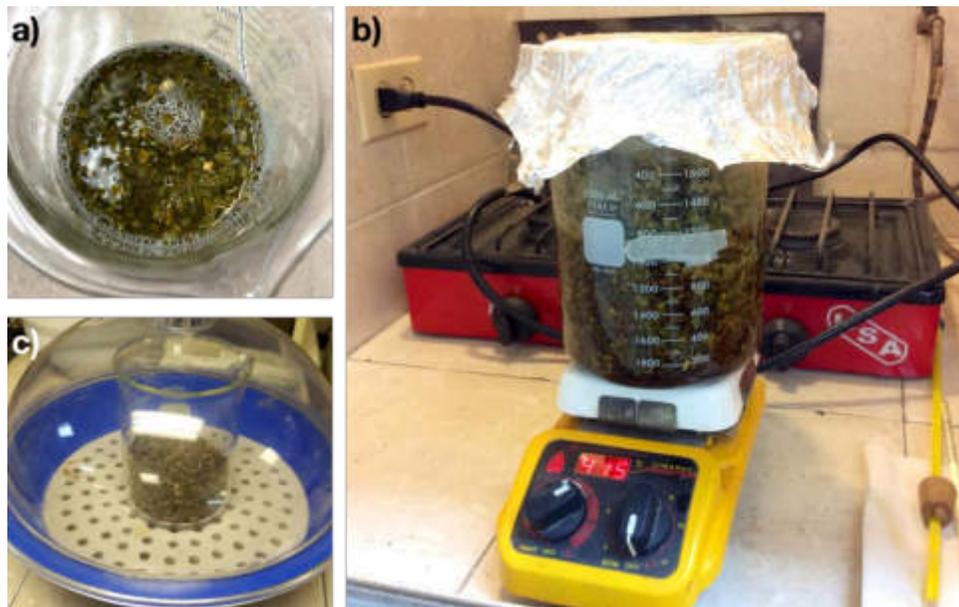


Figura 42 - Procedimiento llevado a cabo para realización del tratamiento químico a base de NaOH. a) y b) Procedimiento de cocción de la fibra en solución con NaOH. c) Proceso de enfriamiento de la fibra en desecador

### Tratamiento de recubrimiento a base de parafina sólida [T/P]

Para el procedimiento de recubrimiento, la parafina sólida se calentó hasta los 100°C de manera homogénea, sumergiendo la fibra seca en la sustancia durante 5 min. La fibra impregnada se colocó dentro de un horno a 105°C durante 15min con papel absorbente en la base del recipiente que lo contenía para eliminar el exceso, disminuyendo la formación de grumos de parafina en las fibras y mejorando la disgregación de estas antes y durante el mezclado [3][102]. La figura 43 muestra fotografías del procedimiento que se realizó sobre el agregado vegetal para este tratamiento. El agregado con el tratamiento de recubrimiento a base de parafina sólida se guardó en bolsas herméticas con su respectivo etiquetado. En este caso y para posteriores estudios, se utilizó la abreviatura “T/P”.

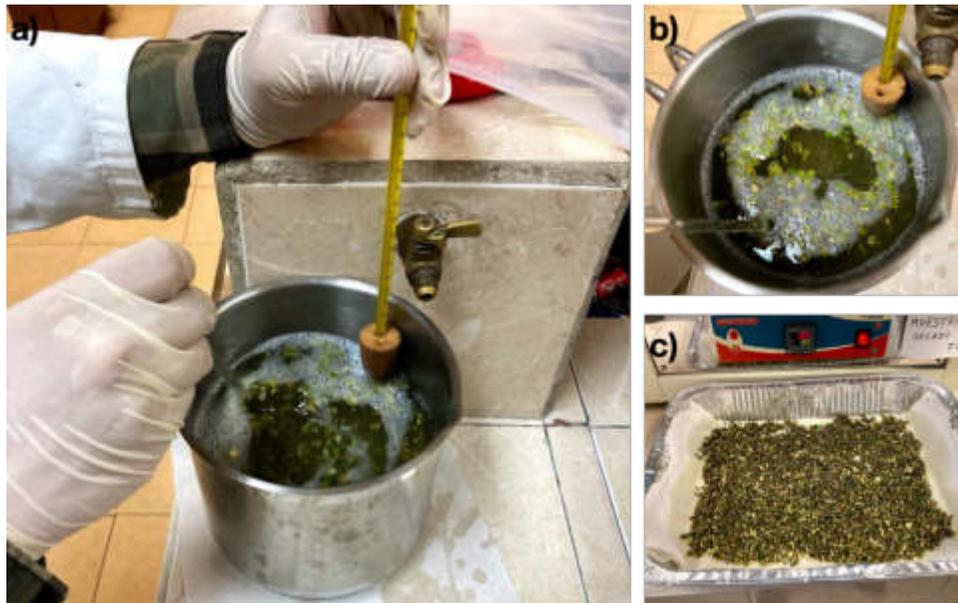


Figura 43- Procedimiento llevado a cabo para la realización del tratamiento de recubrimiento con parafina sólida. a) y b) Proceso de sumergimiento de la fibra en parafina calentada. c) Agregado vegetal antes de ser dispuesta en horno para eliminar exceso de parafina

## Caracterización del agregado vegetal post tratamientos

### Tamaño de partícula del agregado vegetal después del tratamiento

Debido a la incorporación de sustancias que interactúan con el agregado vegetal al realizar los diferentes tratamientos, y además por las modificaciones morfológicas intrínsecas del agregado, es necesario determinar el tamaño de partículas posteriormente. Las muestras tratadas fueron tamizadas rechazando la fracción retenida en el tamiz Nro. 4 (abertura de 4.75 milímetros) y la fracción con un tamaño de partícula inferior a 0.6 milímetros considerada como polvo [117].

### Absorción de agua del agregado vegetal después del tratamiento

Para la prueba de absorción de agua se tomó una muestra seca de 25 gramos del agregado con cada uno de los tratamientos en estudio, se introdujo en la bolsa permeable y se sumergió durante 1 minuto en agua asegurando una completa humectación. Después se colocó la bolsa con la muestra en la centrifuga girando 100 veces a aproximadamente 2 rotaciones por segundo. Se registró el valor de su masa descontando el peso de la bolsa húmeda utilizada. El procedimiento se realizó en triplicado y se repitió con tiempos de sumergimiento de 15, 240, 1440 y 2880 minutos [1][55][86][117].

### **Densidad Aparente del agregado vegetal después del tratamiento**

La densidad aparente del agregado vegetal posterior a los diferentes tratamientos a los que se sometió se determinó mediante el procedimiento estipulado anteriormente. Utilizando el recipiente cilíndrico volcándolo diez veces y agitándolo para obtener una superficie horizontal. Con los antecedentes obtenidos se calculó la densidad aparente del agregado vegetal para cada uno de los tratamientos definidos a partir de la masa y el volumen determinados [90][117].

### **Conductividad térmica del agregado vegetal después del tratamiento**

La conductividad térmica del agregado lignocelulósico después de haber sido tratado se midió utilizando el método de fuente de calor de línea transitoria, usando el equipo analizador de propiedades térmicas TEMPOS de la marca Meter Environment. De acuerdo con la naturaleza de las muestras se empleó el sensor KS-3. El ciclo de calentamiento y enfriamiento se definió en 10 minutos logrando una precisión de  $\pm 0.01\text{W}/(\text{mK})$  [116][117].

### **Observación morfológica del agregado vegetal después del tratamiento**

Se realizó una microscopia de las fibras con los diferentes tratamientos [3] montando las muestras en una placa Petri para ser observadas mediante un microscopio de luz invertida a 4 aumentos. Para poder obtener conclusiones sobre la morfología generalizada de las muestras, se tomaron partículas representativas de cada tratamiento [118].

## **Evaluación de los tratamientos en la fabricación de mortero vegetal**

### **Fabricación de especímenes de mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra**

La fabricación de los especímenes se realizó considerando lo estudiado en la literatura en particular por la investigadora Véronique Cerezo [127] quien en su trabajo estipula una metodología estudiada para la fabricación de concretos vegetales así como un procedimiento para su dosificación en función de los estudios y antecedentes que se tienen para la fabricación de morteros vegetales a base de fibra de cáñamo. La metodología empleada queda descrita en la tabla 11.

Tabla 11 - Procedimiento para la fabricación de concreto vegetal

Tiempo [minutos]	Tiempo acumulado [minutos]	Actividad
0	0	Colocar la fibra en la mezcladora
1	1	Homogeneización de la fibra
1	2	Agregar agua de premezcla
1	3	Homogeneizar
1	4	Agregar material cementante
2	6	Homogeneizar
1	7	Agregar agua de reacción
4	11	Homogeneizar
0	11	Quitar mortero de las paredes y detener proceso

La dosificación empleada para la fabricación de especímenes se definió para cada uno de los tratamientos en estudio en función de los valores de densidad aparente y absorción de agua. Se consideró como parámetro estándar en la fabricación de cubos de 5x5x5 centímetros, con una relación volumétrica entre el agregado vegetal y la pasta de cemento de 0.36, así como una relación agua/cementante de 0.35. La dosificación queda descrita en la tabla 12:

Tabla 12 - Dosificación empleada en la fabricación de mortero vegetal para evaluar tratamientos sobre el agregado

Muestra	Agregado vegetal [g]	Agua de premezcla [g]	Cemento [g]	Agua de reacción [g]
S/T	46.6155	21.8120	546	191.1
T/Congelamiento	29.1735	19.7192	546	191.1
T/Hornificación	39.6090	23.8059	546	191.1
T/NaOH	52.2315	23.0637	546	191.1
T/Parafina	56.5515	20.1366	546	191.1

### Curado de las muestras de mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra

Las muestras de mortero vegetal fueron curadas siguiendo lo reportado en la literatura dejando los especímenes en condiciones ambientales de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y  $50 \pm 5\%$  de humedad relativa durante 7 y 28 días hasta que se probaron [91]. Para esto se utilizó una cámara marca Matest con un controlador de humedad y temperatura Eurotherm 3504 para asegurar las condiciones de curado durante el tiempo definido antes de proceder a los ensayos de caracterización.

### **Detención del proceso de hidratación del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra**

Después de la realización de los ensayos de resistencia mecánica, los fragmentos resultantes fueron sumergidos en un recipiente con acetona durante 48 horas para detener el proceso de hidratación del mortero. Luego se secaron en vacío en un horno a 50°C durante 24 horas [24][113][114][115].

### **Peso volumétrico del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra**

El peso volumétrico es determinado dividiendo la masa de los especímenes cúbicos en gramos por la media del volumen obtenido de dos medidas con vernier de el ancho, alto y largo de las probetas cúbicas como se estipula en la normativa ASTM C138 [112].

### **Conductividad térmica del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra**

Para las pruebas de conductividad térmica se fabricaron especímenes de 4x4x16cm con las mismas dosificaciones expuestas en el apartado anterior, los cuales fueron cortados por la mitad y sometidos a curado durante 28 días. Las mediciones de conductividades realizadas a los prototipos se determinaron usando el método de fuente de calor de línea transitoria, con un equipo analizador de propiedades térmicas TEMPOS de la marca Meter Environment. El ciclo de calentamiento y enfriamiento se definió en 10 minutos logrando una precisión de  $\pm 0.01\text{W/mK}$ . De acuerdo a la naturaleza de las muestras y a la especificación del fabricante, se utilizó el sensor RK-3 el cual fue introducido con pasta térmica para eliminar el aire que pueda haber entre la sonda y la muestra evitando alterar los resultados [23][116].

### **Resistencia a la compresión del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra**

Para evaluar las propiedades mecánicas de los especímenes de mortero vegetal se realizaron pruebas de resistencia a la compresión sobre muestras cúbicas de 50x50x50 milímetros curadas en dos condiciones diferentes a edades de 7 y 28 días como se estipuló anteriormente.

El ensayo de compresión fue realizado en condiciones ambientales de  $20\pm 2^\circ\text{C}$  y  $50\pm 5\%$  de humedad relativa con una velocidad de carga de 5 milímetros por minuto [86][94].

### **Difracción de rayos X (DRX) de la pasta de cemento del mortero vegetal**

La difracción de rayos X se configuró en un rango  $2\theta$  que varía entre  $10^\circ$  y  $80^\circ$ . Los estudios de difracción de rayos X (XRD) se llevaron a cabo utilizando un difractómetro X PERT Pro MRD con radiación  $\text{CuK}\alpha$   $\lambda=1.5405\text{\AA}$ . Los datos fueron obtenidos con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso de  $0.0508714^\circ$   $2\theta$ .

### **Espectroscopia infrarroja (FTIR) de la pasta de cemento del mortero vegetal**

Para este análisis sobre la pasta de cemento del mortero vegetal se utilizó un equipo FTIR Agilent Cary 630 con la interfaz de muestra Diamond ATR. La resolución del espectrofotómetro se fijó en  $4\text{cm}^{-1}$ , obteniendo 140 escáneres en la región espectral de  $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$  [118].

### **Análisis termo gravimétrico (TGA) de la pasta de cemento del mortero vegetal**

Las muestras de pasta de cemento obtenidas del mortero vegetal fabricado con los diferentes tratamientos fueron analizadas mediante un ensayo de termogravimetría usando un equipo TA Instrument Calorimetry (SDT Q600, United States) en un rango de temperatura desde los  $25^{\circ}\text{C}$  hasta los  $900^{\circ}\text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$  en una atmósfera de  $\text{N}_2$  (inerte).

### **Observación morfológica sobre la pasta de cemento del mortero vegetal**

Se realizó una microscopia del mortero vegetal para cada una de las muestras en estudio con los diferentes tratamientos [3] montando las muestras en una placa Petri para ser observadas mediante un microscopio de luz invertida a 4 aumentos.

## **Etapas 4 - Metodología experimental Taguchi**

### **Metodología experimental Taguchi**

Se seleccionó una metodología experimental Taguchi para investigar y determinar el efecto de los diferentes parámetros identificados que tienen implicancia en los resultados del mortero vegetal fabricado con agregado de Agave con tratamiento de hornificación [116]. En este caso se trabajó con una matriz  $\text{P}_3 \text{L}_2$ ; es decir, tres variables de entrada (Relación volumétrica agregado vegetal/pasta de cemento; relación agua/cemento y contenido de aditivo), cada una evaluada en dos niveles [128]. Los parámetros quedan expuestos en la tabla 13.

Tabla 13 - Variables y niveles de evaluación en matriz experimental Taguchi

Variables	Niveles de evaluación	
	I	II
A Relación AV/PC	0.43	2.33
B Relación A/C	0.35	0.55
C Aditivo	0%	1%

La dosificación de los parámetros en función de la matriz Taguchi que se definió para la evaluación de los resultados queda definida en la tabla 14.

Tabla 14 - Diseño experimental Taguchi para evaluación de variables

Muestras	A	B	C
	Relación AV/PC	Relación A/C	Aditivo
1	0.43	0.35	0%
2	0.43	0.55	1%
3	2.33	0.35	1%
4	2.33	0.55	0%

Se fabricaron especímenes de 5x5x5 centímetros siguiendo el procedimiento descrito por la investigadora Véronique Cerezo [127], y que fue el mismo procedimiento para la evaluación de los diferentes tratamientos en la fabricación de morteros vegetales.

El curado de las muestras se realizó en cámara ambiental en condiciones de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  y  $50\pm 5\%$  de humedad relativa durante 28 días [90][129] para posteriormente ser ensayadas y caracterizadas. Las variables de respuestas definidas para el mortero vegetal son el peso volumétrico [112], la conductividad térmica [23][116] y la resistencia mecánica [13][23][86][94]; cuyos parámetros son estudiados siguiendo lo estipulado para la evaluación de los morteros vegetales con los diferentes tratamientos sobre la fibra [94].

## **Etapas 5 - Estudio energético**

El estudio ambiental contempla el cálculo de la demanda energética potencial de muros de una vivienda con características promedio de acuerdo con su locación y dimensiones [130]. Para el cálculo de la demanda energética se definió un muro de 20 centímetros de espesor de materialidad de hormigón armado, mortero convencional y mortero con agregado vegetal de Agave. Además, se ubicó la vivienda en el Estado de México y Nuevo León para determinar como varía el comportamiento de acuerdo con las solicitudes según el clima respectivo.

La gráfica de la figura 44 muestra de manera esquemática la temperatura media mensual [131] para ambos estados, así como el esfuerzo energético que se debe realizar cada mes para alcanzar la temperatura de confort establecida en  $20^{\circ}\text{C}$  ya sea mediante climatización o calefacción.

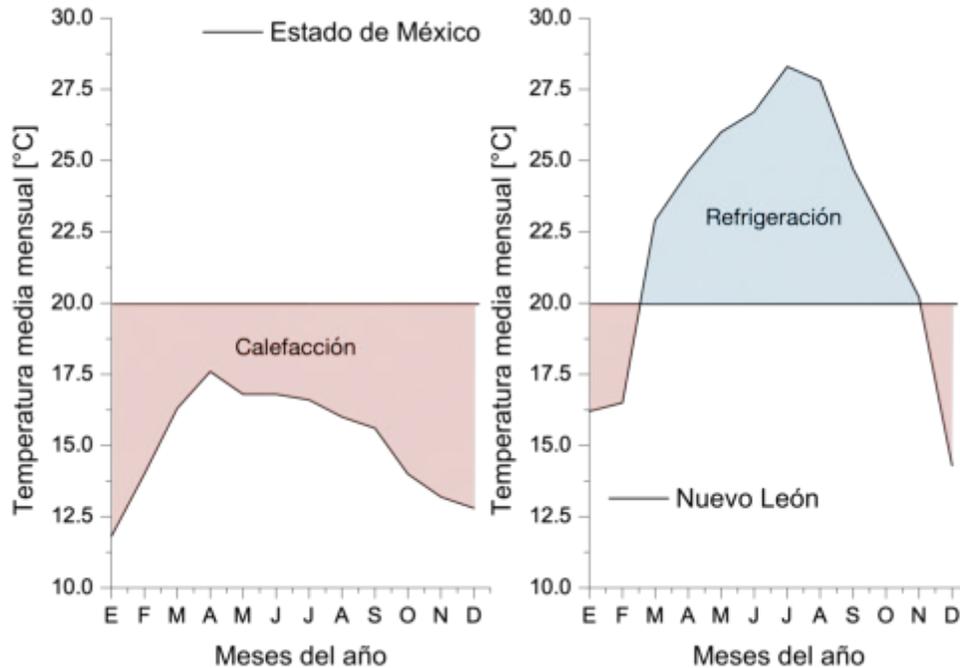


Figura 44 - Temperatura media mensual para el Estado de México y Nuevo León

Considerando estos valores de temperatura media mensual, se procedió a calcular los grados días [GD] para un periodo de un año mediante la siguiente formula:

$$GD_{año} = \sum (20 - TMM) \times 24horas \times DM$$

En donde TMM corresponde a la temperatura media mensual y DM al número de días que posee el mes respectivo

El método Grados días es de suma importancia para determinar de manera rápida la demanda energética tanto en refrigeración como en calefacción considerando una línea base definidos como temperatura de confort.

Los grados días se definen como los requerimientos energéticos de calefacción o refrigeración en grados Celsius (necesarios para alcanzar la zona de confort) acumulados en un cierto periodo de tiempo. Este parámetro consiste en la sumatoria para cada hora en un periodo de tiempo (basándose en temperaturas promedio) de todos los grados requeridos para mantener la línea base definida (o temperatura de confort).

En función de la ecuación y los antecedentes para ambos estados, se procede a calcular los  $GD_{año}$  cuyos resultados quedan expuestos en la tabla 15.

Tabla 15 - Cálculos de los grados anual días para el Estado de México y Nuevo León

Mes	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
EM	11.8	14	16.3	17.6	16.8	16.8	16.6	16	15.6	14	13.2	12.8	42688.8
GD EM	6100.8	4032	2752.8	1728	2380.8	2304	2529.6	2976	3168	4464	4896	5356.8	
NL	16.2	16.5	22.9	24.6	26	26.7	28.3	27.8	24.7	22.5	20.2	14.3	43416
GD NL	2827.2	2352	-2157	-3312	-4464	-4824	-6175	-5803	-3384	-1860	-144	4240.8	

Como puede observarse, debido a las condiciones climáticas de cada estado, se considera que para el estado de México la climatización requiere de calefacción mientras que para el estado de Nuevo León será requerido mayoritariamente un sistema de refrigeración en la Vivienda considerando algunos meses con calefacción, sin embargo al momento de cuantificar la demanda energética la refrigeración y la calefacción se suman por separado y por ende en valor total anual corresponde al valor absoluto de los requerimientos de climatización.

## **CAPÍTULO 6 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

## Etapa 2 – Caracterización de cementantes y fibras naturales

### Caracterización de cementantes – Estado original

#### Distribución del tamaño de partícula del polvo de cemento

El procedimiento utilizado para determinar el tamaño de partícula del cemento Portland CPO40R se realizó en triplicado y los resultados son expuestos en la figura 45.

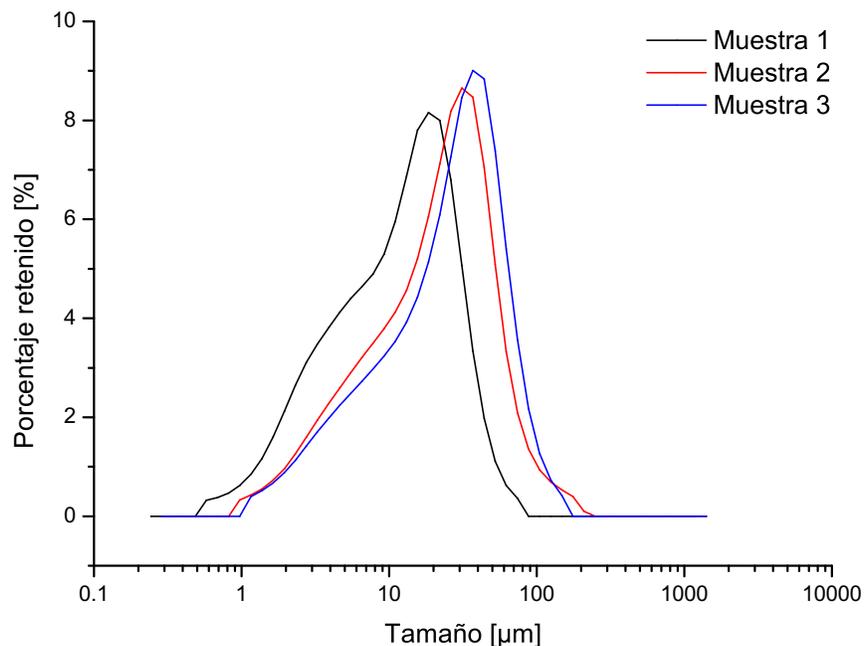


Figura 45 - Gráfica de distribución de tamaño de partícula para tres muestras de cemento Portland CPO40R

De acuerdo con los resultados expuestos en la gráfica, se obtiene que el diámetro medio de la distribución es de  $23.55 \pm 6.57 \mu\text{m}$  con un área superficial de  $0.7053 \text{m}^2/\text{cm}^3$ . Estos valores obtenidos se ajustan a lo estipulado por el fabricante y corresponden a valores típicos para materiales cementantes de similar naturaleza.

#### Densidad del polvo de cemento

Los resultados obtenidos de la medición de la densidad del polvo de cemento se muestran en la tabla 16.

Tabla 16 - Resultados del análisis de densidad del polvo de cemento CPO40R

Muestra	Peso de la muestra [g]	Densidad de la muestra [g/cm <sup>3</sup> ]			Media [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad CPO40R [g/cm <sup>3</sup> ]
		$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$		
1	11.8439	3.0142	3.0391	3.0449	3.0327	
2	9.9710	3.0523	2.9879	3.0531	3.0311	<b>3.0354</b>
3	11.5605	3.0469	3.0427	3.0377	3.0424	

Como se observa, los resultados de la densidad del cemento empleado en la investigación son del orden de los 3.0354 g/cm<sup>3</sup>, ajustándose a lo estipulado por el fabricante. Además, concuerda con lo reportado por otros autores en la literatura científica y por ende se considera una densidad típica para este tipo de cementantes [132].

### Difracción de rayos X (DRX) sobre el polvo de cemento

En la gráfica de la figura 46, se observan los resultados de un ensayo de DRX sobre una muestra de polvo de cemento CPO40R.

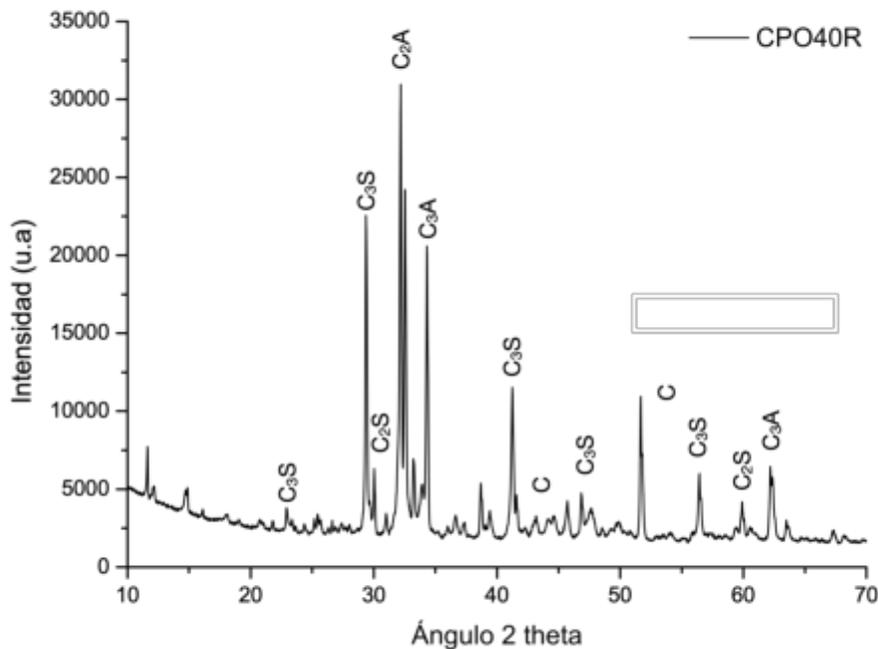


Figura 46 - Gráfica de DRX sobre la muestra de cemento Portland CPO40R

El análisis indica que el material cementante está compuesto principalmente por tres fases similares: silicato bicálcico (C<sub>2</sub>S) con las reflexiones más altas entre los ángulos 30.02° y 59.88°. Silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) con los picos de mayor intensidad entre los ángulos 29.37° y 41.24° y, por último, la fase aluminato

tricálcico (C<sub>3</sub>A) con los picos de mayor intensidad entre 34.30° y 62.19°. Esto se ajusta a lo expuesto en la literatura científica respectiva [84].

### Fluorescencia de rayos X (FRX) sobre el polvo de cemento

El análisis se realizó en triplicado y los resultados se observan en la tabla 17 [107].

Tabla 17 - Resultados de ensayo FRX del CPO40R

Compuesto	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Concentración [%]	0.1755	1.4260	20.7133	6.0898	1.3575	66.7828	0.2883	2.7788

De la tabla se puede observar que el contenido de SO<sub>3</sub> es superior a un 6% lo cual pudiera considerarse un poco mas elevado si se compara con otros cementos de características similares [114]. Además, podemos ver que el principal constituyente del cemento Portland corresponde al CaO con un 66.7828% lo que es atribuido al contenido de caliza empleado en su fabricación y el SiO<sub>2</sub> con un 20.7133% [84]. Es importante considerar que los niveles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> generalmente son del orden del 6% y el SO<sub>3</sub> del 1% por lo que se debe tener en consideración por las implicancias que pudiera tener en esta u otras investigaciones.

### Espectroscopia infrarroja (FTIR) sobre el polvo de cemento

El resultado de la prueba de FTIR sobre la muestra de CPO40R se expone en la gráfica de la figura 47.

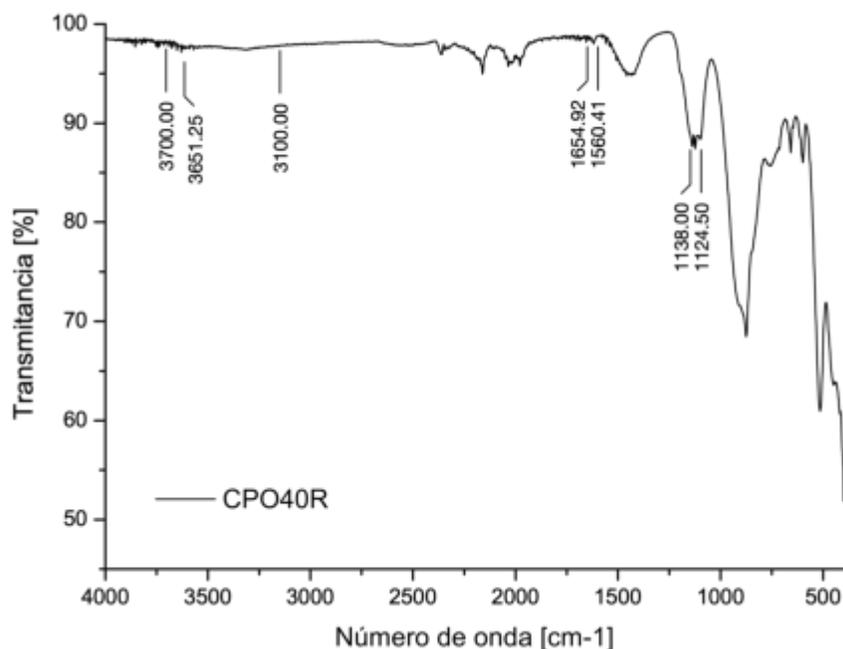


Figura 47 - Análisis FTIR sobre muestra de polvo de cemento Portland CPO40R

Los picos de la vibración del enlace S-O se encuentran en el rango de  $1100\text{-}1700\text{cm}^{-1}$  lo cual, donde se encuentran numerosos picos dentro de ese rango para las muestras de cemento no hidratado. Se observan picos en el rango de los  $1560.41$  y  $1654.92\text{cm}^{-1}$  que, de acuerdo con la literatura, pueden ser atribuido a la presencia de agua absorbida por los sulfatos. Los sulfatos presentes en el cemento Portland originalmente son yeso, sulfato de calcio semihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) y sulfato de calcio anhídrido ( $\text{CaSO}_4$ ) cuyas bandas características se encuentran en el rango entre los  $1100\text{-}1200\text{cm}^{-1}$  y en donde se destacan los picos presentes en  $1124.5$  y  $1138\text{cm}^{-1}$  [44].

En el rango entre  $3100$  y los  $3700\text{cm}^{-1}$  aparecen las bandas de  $\text{H}_2\text{O}$  y de  $\text{OH}^-$  las cuales tienen presencia en el cemento no hidratado debido a la presencia de compuestos altamente higroscópico además de la posibilidad de que exista humedad residual en la muestra analizada. El pico relacionado a  $\text{OH}^-$  se asocia al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y se destaca en el rango de los  $3651.25\text{cm}^{-1}$  [44].

#### **Análisis termo gravimétrico (TGA) del polvo de cemento**

El gráfico de la figura 48 muestra el resultado obtenido del análisis termogravimétrico sobre la muestra de CPO40R empleada en este estudio.

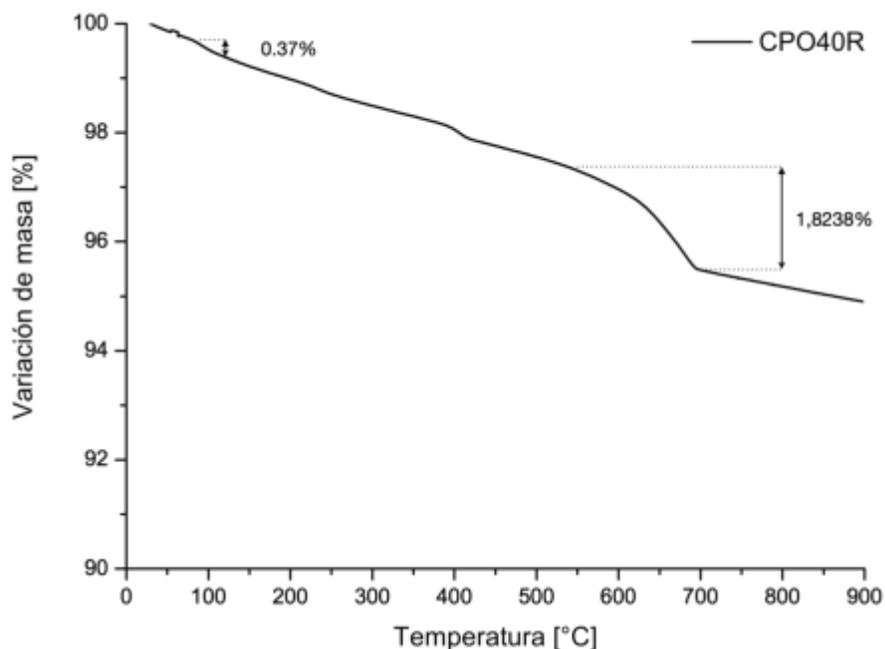


Figura 48 - Resultado del análisis termogravimétrico sobre la muestra de cemento CPO40R

Los resultados del TGA en la muestra de CPO40R indican que existe una pérdida menor de masa asociado a la evaporación de agua del sulfato de calcio dihidratado o yeso en el orden de entre los 75 a 125°C con un 0.37% lo cual se debe al estado seco de la muestra de cemento Portland que había sido puesta en horno y almacenada cuidadosamente. Un punto importante por considerar es la pérdida de masa que existe entre los 550 y 700°C equivalente a un 1.8238% y que se atribuye a la descomposición de carbonatos como el  $\text{CaCO}_3$  y que es típica de este tipo de materias primas.

## Caracterización de cementantes – Estado endurecido

### Trabajabilidad en estado fresco de la pasta de cemento

Los resultados obtenidos para las 4 muestras diseñadas se exponen en la tabla 18.

Tabla 18 - resultados del ensayo de fluidez sobre las dosificaciones en estudio (ND: No determinado)

Muestra	Relación a/c	Aditivo	Fluidez
1	0.35	0%	5.67
2	0.35	1%	21.37
3	0.55	0%	20.15
4	0.55	1%	ND

Los resultados muestran que conforme aumenta la relación agua/cemento en la mezcla, también aumenta su fluidez debido al mayor contenido de agua, su plasticidad y trabajabilidad. Lo mismo sucede en los casos en que se incorpora un aditivo superfluidificante a tal punto que la mezcla número 4 posee una fluidez mayor a la que puede ser medida con la mesa de compactación. Como se observa, la Muestra 1 fue la que mostró el menor revenimiento lo que se traduce en una consistencia seca. Las muestras 2 y 3 tienen revenimientos similares siendo que poseen relaciones agua/cemento de 0.35 y 0.55 respectivamente, sin embargo, el uso de un aditivo superfluidificante permite tener una fluidez del mismo rango. Mediante esta prueba se puede inferir que la relación agua/cemento, así como la incorporación de un aditivo permiten una consistencia mas fluida la pasta en estado fresco aumentando su trabajabilidad conforme aumenta el contenido de agua de mezcla [43].

Estos parámetros son importantes a considerar para tener una referencia comparativa al momento de estudiar la trabajabilidad de mezclas de mortero vegetal, en donde la literatura reporta una menor

fluidez debido a la naturaleza del agregado lignocelulósico que permite el ingreso de agua al interior de las partículas vegetales interfiriendo de manera directa este parámetro.

### Peso volumétrico de la pasta de cemento endurecida

La tabla 19 muestra los resultados obtenidos de las mediciones de peso volumétrico ( $\rho$ ) para las muestras en estudio, considerando la variación de la relación agua/cemento, la incorporación del aditivo superfluidificante, la edad y el tipo de curado. Además, las figuras 49 y 50 muestran los resultados obtenidos por separado para el curado en condiciones ambientales en horno y el curado de las muestras expuestas en agua saturada con cal.

Tabla 19 - Resultados obtenidos del peso volumétrico de las muestras en estudio

Muestra	a/c	Aditivo	7 días (horno)	28 días (horno)	7 días (cal)	28 días (cal)
			$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]			
1	0.35	0%	1.9878	1.9317	2.0192	2.0566
2		1%	1.9668	1.9351	2.0321	2.0485
3	0.55	0%	1.6969	1.6116	1.8272	1.8353
4		1%	1.7363	1.5894	1.8560	1.8539

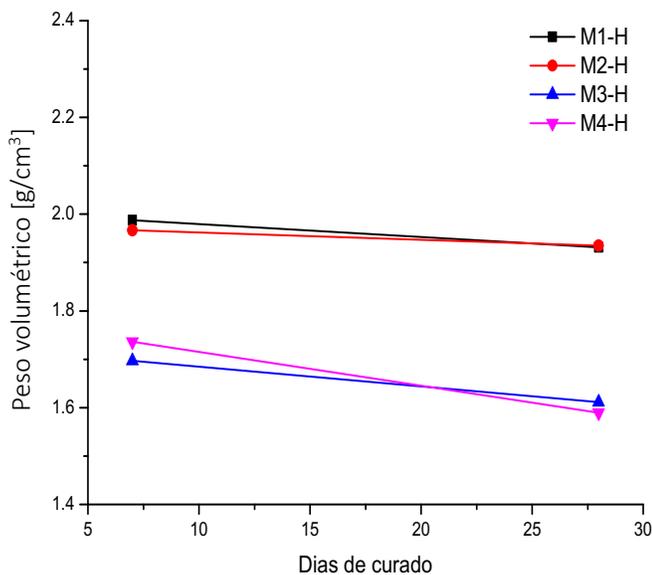


Figura 49 – Peso volumétrico de muestras curadas en horno

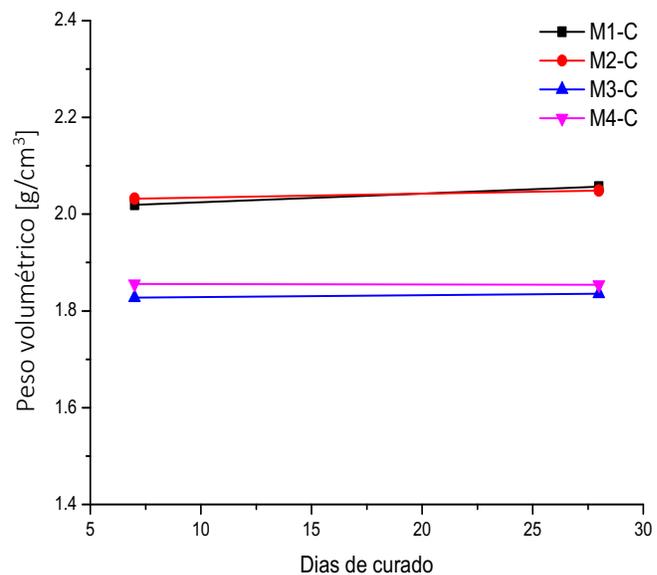


Figura 50 – Peso volumétrico de muestras curadas en agua saturada con cal

Con respecto al peso volumétrico, los resultados de las gráficas muestran dos tendencias muy marcadas. La gráfica de la figura 49 que muestra los resultados obtenidos de las muestras curadas en horno,

permite apreciar que la tendencia es a disminuir los valores conforme aumenta el tiempo de curado en promedio en un  $4.77 \pm 3.35\%$  respecto al valor de las muestras con edad de 7 días. Por el contrario, el peso volumétrico de las muestras que fueron curadas en agua saturada en cal presentó un comportamiento opuesto, en donde las muestras tuvieron una leve alza en promedio de un  $0.7359\%$ , lo cual se atribuye a la densificación de la matriz debido a la formación de productos de hidratación propiciados por la exposición a la solución. El comportamiento dispar de ambas muestras conforme al tipo de curado se puede explicar además por la formación de micro fisuras producto de la retracción de la pasta para el curado en horno debido a la evaporación de una parte del agua de mezcla que permiten la incorporación del aire reduciendo los valores de peso volumétrico.

Además, es importante notar que las muestras hechas con una relación de agua/cemento de 0.35 tuvieron para ambos casos un peso volumétrico mayor a las muestras hechas con la relación agua/cemento de 0.55. Este fenómeno se debe a que para un volumen dado de cemento, la pasta con el mayor contenido de agua tendrá el mayor volumen total de espacio disponible, pero después de la hidratación completa, todas las pastas contendrán la misma cantidad de productos sólidos resultantes de tal proceso, por lo que la pasta con el mayor espacio total termina en un correspondiente mayor volumen de huecos capilares [43].

### Conductividad térmica de la pasta de cemento endurecida

La tabla 20 muestra los resultados obtenidos en la medición de conductividad térmica de las muestras en estudio. Estos resultados son expuestos en la gráfica de las figuras 51 y 52 para cada uno de los tipos de curado que se están evaluando.

Tabla 20 - Resultados de conductividad térmica de las muestras de pasta de cemento con dos diferentes métodos de curado

Muestra	a/c	Aditivo	7 días (horno)	28 días (horno)	7 días (cal)	28 días (cal)
			$\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ [W/mK]
1	0.35	0%	0.7667	0.7460	0.7136	0.8853
2		1%	0.6868	0.6627	1.0322	0.9889
3	0.55	0%	0.6701	0.6028	0.9094	0.8926
4		1%	0.6953	0.4954	0.9439	1.2973

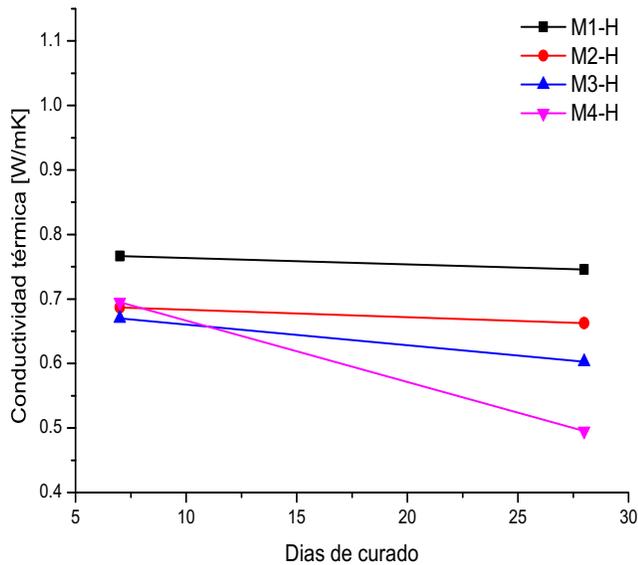


Figura 51 - Conductividad térmica para muestras curadas en horno

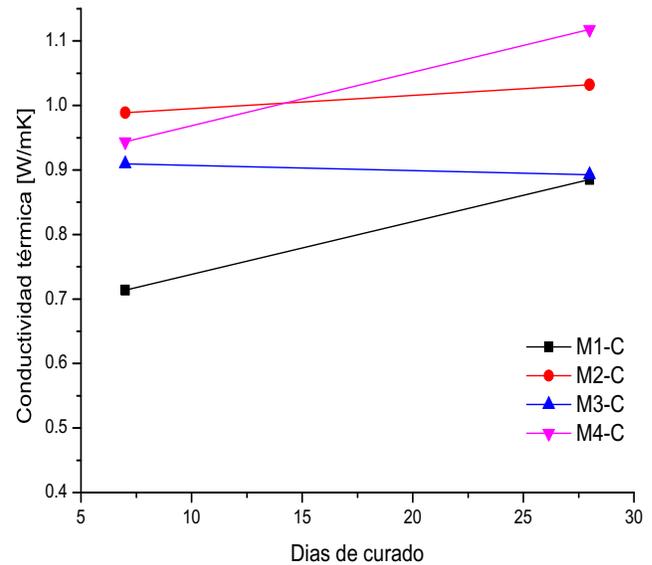


Figura 52 - Conductividad térmica de muestras curadas con cal

De acuerdo con los resultados expuestos en la tabla 20 y las gráficas de las figuras 51 y 52, se puede observar que los valores de conductividad térmica de las muestras de pasta de cemento curadas en horno son inferiores a los de las muestras curadas en agua saturada con cal. Si bien existe poca literatura al respecto, se puede inferir que este comportamiento que está ligado a la porosidad de los materiales y su capacidad de contener aire en el interior, se debe a la poca densificación de la matriz respecto a las muestras que han sido curadas en un ambiente propicio para la formación de gel C-S-H. Esto puede demostrarse si se observan en conjunto los resultados de densidad y resistencia a la compresión, los cuales confirman que la densificación del material medido por el peso volumétrico permite obtener propiedades mecánicas superiores, así como valores de conductividad mas elevados debido al desplazamiento del potencial aire que pueda contener.

### Resistencia a la compresión de la pasta de cemento endurecida

La tabla 21 muestra los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia mecánica a esfuerzos de compresión sobre las muestras en estudio. Estos resultados son graficados y expuestos en la figura 53 para su mejor análisis.

Tabla 21 - Resultados de resistencia mecánica de las muestras de pasta de cemento con dos diferentes métodos de curado

Muestra	a/c	Aditivo	7 días (horno)	28 días (horno)	7 días (cal)	28 días (cal)
			f'cr [MPa]	f'cr [MPa]	f'cr [MPa]	f'cr [MPa]
1	0.35	0%	72.1743	76.1571	68.8052	85.3919
2		1%	73.2772	86.2289	76.0052	91.8736
3	0.55	0%	29.1681	36.1530	35.6273	52.6110
4		1%	31.1755	40.2009	33.1234	43.4339

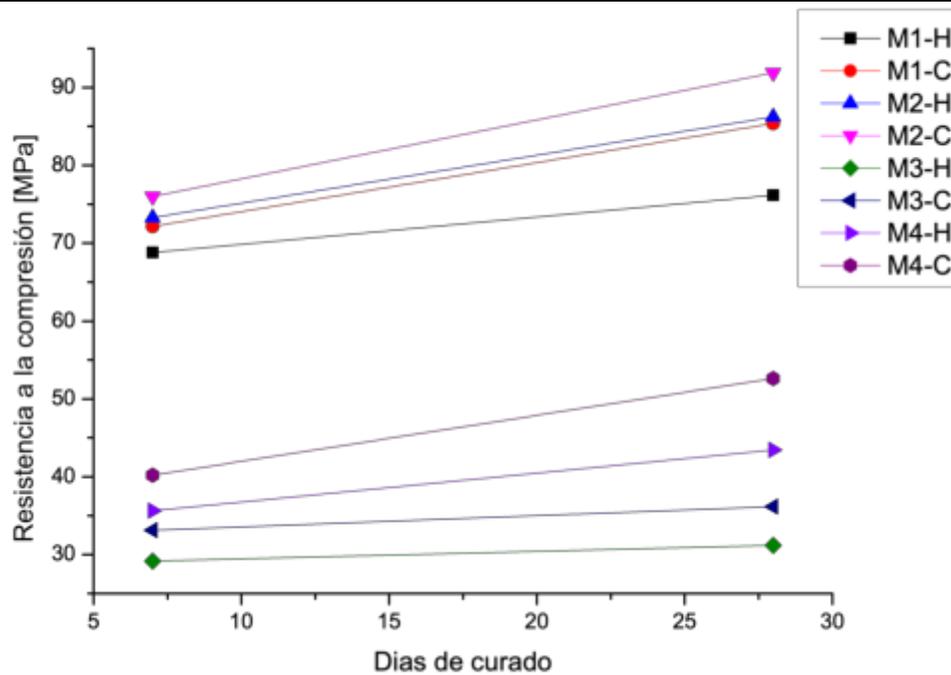


Figura 53 - Resistencia mecánica a la compresión de especímenes curados en horno y en agua saturada en cal

Como puede observarse en la tabla 21, las variables en estudio tienen una relación directa sobre los resultados de resistencia a compresión de los especímenes y en particular destaca la influencia de la relación agua/cemento y los dos métodos de curado que se están estudiando. De acuerdo con estos resultados se puede observar que existen dos grupos bien acotados en base a la relación agua/cemento en donde para el caso sin aditivo, las muestras con una relación agua/cemento de 0.35 poseen un 62.3082% más de resistencia a la compresión que su similar con una relación de agua/cemento de 0.55 siendo este parámetro el más importante sobre la capacidad resistente de las muestras. Con respecto a los tipos de curado, los resultados obtenidos para los especímenes a la edad de 28 días muestran en promedio un 19.1160% más de resistencia a la compresión si estos han sido curados en agua saturada

de cal, respecto a las muestras curadas en horno. Por lo tanto, se puede afirmar que la resistencia de la pasta de cemento depende altamente de la relación por peso entre el agua y el cemento utilizado [43]. Un aspecto importante que se puede concluir de esta prueba es la variación en la resistencia mecánica de los especímenes a los que se les incorporó un aditivo fluidificante ya que los resultados muestran dos comportamientos opuestos en función de la relación agua/cemento con que la que se trabajó. Por una parte, se tiene que para una relación agua cemento de 0.35 la incorporación del aditivo permitió obtener una resistencia a la compresión mejorando este parámetro en un 7.5905% para el caso de los especímenes curados en agua saturada en cal. Esta particularidad, se debe a que los aditivos reductores de agua se absorben en la superficie de las partículas de cemento produciendo la repulsión entre ellas debido a fuerzas electrostáticas y como consecuencia se obtiene la defloculación de estas reduciendo su área superficial y optimizando el proceso de interacción entre las partículas de cemento y el agua generando un ambiente propicio para la generación de productos de hidratación (gel C-S-H) [133]. Para el caso de las muestras con una relación de agua cemento de 0.55, la plasticidad de la mezcla es tal que permite la decantación de los componentes sólidos (partículas de cemento) en desmedro del proceso de curado y no permitiendo una resistencia final del mortero óptima para la relación agua cemento establecida.

### **DRX de la pasta de cemento endurecida**

El gráfico de la figura 54, muestra los resultados de manera comparativa para las muestras en estudio considerando las distintas variables.

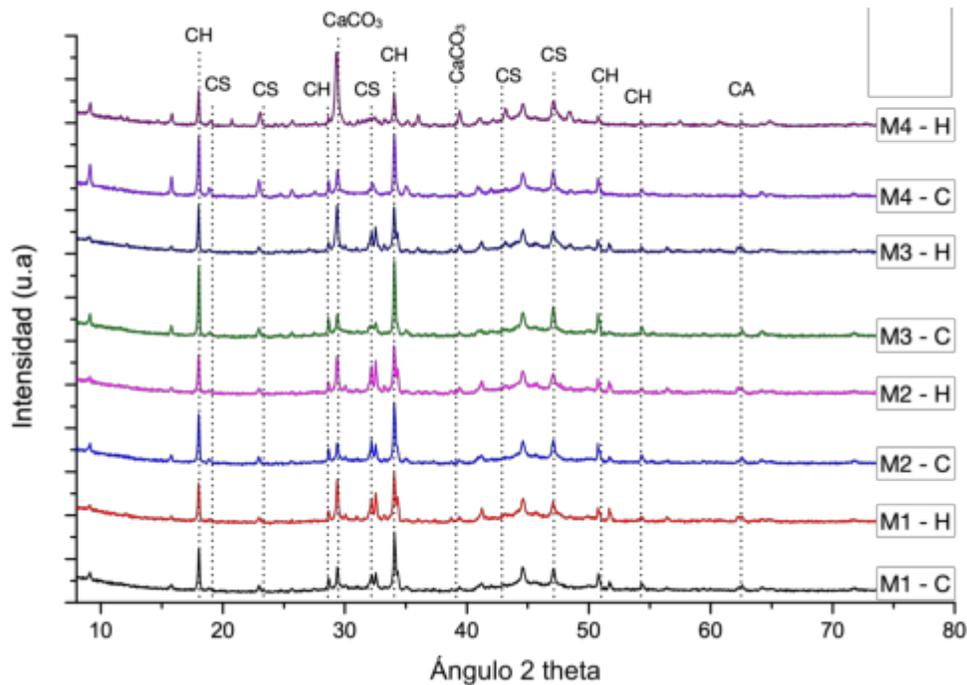


Figura 54 - Resultado de DRX sobre las muestras de pasta de cemento en estudio

En la gráfica comparativa de la figura 54, se puede observar que los resultados concuerdan con los resultados obtenidos de la caracterización física, así como con las demás pruebas de caracterización microestructural. Dentro de los resultados se aprecia que el tipo de curado interfiere con la reducción de silicatos de calcio (CS). Otro aspecto importante que confirma las diferencias entre las variables en estudio es el consumo de CaCO<sub>3</sub> en donde para las muestras con curado en cal, este compuesto se redujo por la formación de gel C-S-H y por ende se obtienen mejores resultados de resistencia mecánica, y además producto de la densificación de la pasta un mayor peso volumétrico y una conductividad térmica mas elevada.

#### FTIR de la pasta de cemento endurecida

Los gráficos de la figura 55 muestran los resultados obtenidos del ensayo FTIR para cada una de las muestras en estudio. Estas gráficas se agruparon por muestra para tener un comparativo entre ambos tipos de curado que se quieren analizar.

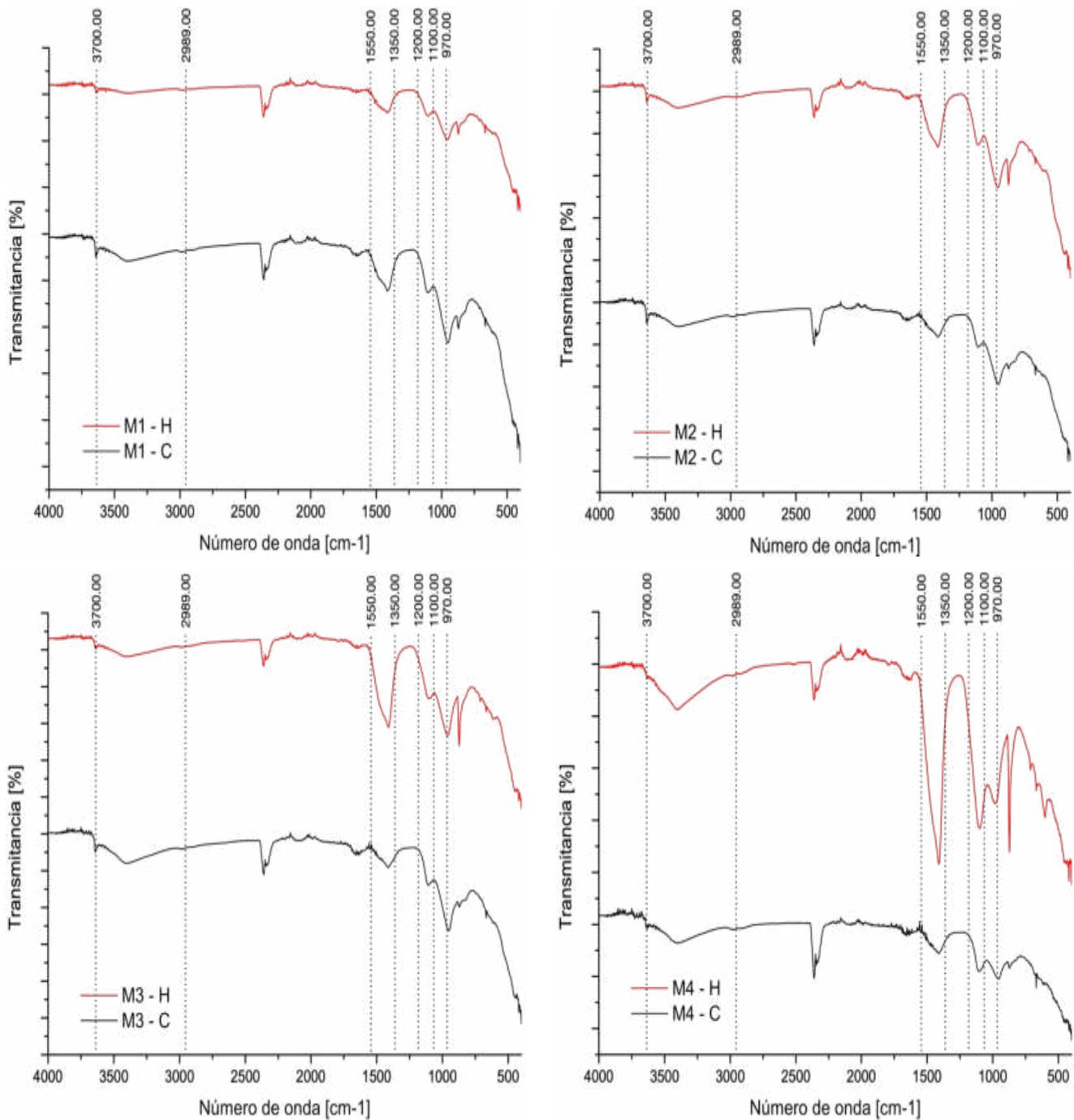


Figura 55 - Resultados de FTIR para cada una de las muestras en estudio comparando los tipos de curado

De acuerdo con la literatura, se presentan diferentes asignaciones que permiten interpretar las diferentes bandas encontradas en los espectros expuestos en las gráficas de la figura 55 y que son expuestos en la tabla 22.

Tabla 22 - Asignaciones para interpretación de FTIR sobre pastas de cemento [44]

Longitud de onda [ $\text{cm}^{-1}$ ]	Asignación posible
656 – 658; 1100 – 1200	$\text{SiO}_4$
714; 877; 1400 – 1500	$\text{CO}_3$
847 – 848	Al-O; Al-OH
1620 – 1624; 1682 – 1684	Agua ligada a sulfatos
1640 – 1650; 3398 – 3408; 3457	$\text{H}_2\text{O}$
1795 – 1796; 2513 – 2514; 2875 – 2879; 2983 – 2984	$\text{CaCO}_3$
3319 – 3327	Singenita, thenardita
3557	Agua ligada al yeso
3611	Sulfato de calcio anhidro
3641 – 3644	$\text{Ca(OH)}_2$

El indicador mas claro del estado de hidratación de la pasta de cemento endurecida se observa con el pico a  $2989\text{cm}^{-1}$  y entre  $1350\text{-}1550\text{cm}^{-1}$ , el cual esta asociado a la porción de carbonato de calcio presente en el cemento y el cual se observa que se disipa conforme se propicia el proceso de hidratación en los casos en que los especímenes son curados en agua con cal.

El progreso de la hidratación puede verse también en un cambio en el pico del S-O que se mueve hacia un número de ondas de  $926\text{-}970\text{cm}^{-1}$  debido a la reacción del  $\text{SiO}_4^{2-}$  durante la formación de C-S-H. El crecimiento del gel C-S-H está asociado a intensidades en el rango desde los  $970$  a los  $1100\text{cm}^{-1}$ , lo cual puede apreciarse en las cuatro gráficas, en donde se observan picos de mayor intensidad para las muestras curadas en agua saturada en cal en comparación a las muestras curadas en horno. La formación de este producto de hidratación esta directamente relacionado con las propiedades mecánicas del mortero resultante lo cual a su vez se correlaciona con las propiedades físicas de densidad (o en este caso peso volumétrico) y conductividad térmica.

Los sulfatos presentes en el cemento Portland son yeso, sulfato de calcio semihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) y sulfato de calcio anhídrido ( $\text{CaSO}_4$ ). Cuando se añade agua al cemento los sulfatos reaccionan con los aluminatos produciendo etringita. Las bandas características de los sulfatos se encuentran generalmente en el rango de los  $1100\text{-}1200\text{cm}^{-1}$ . Resulta difícil interpretar esta área del espectro debido a que los sulfatos generan numerosos picos y se generan superposiciones, es por esto por lo que no se hace un análisis en profundidad de esta zona del espectro.

En el rango de  $3100\text{-}3700\text{cm}^{-1}$  aparecen las bandas correspondientes al agua y  $\text{OH}^-$ . Estas bandas también están presentes en el espectro de la pasta seca. Se registra un aumento, en comparación con la pasta seca, de la banda del  $\text{OH}^-$  asociada a las moléculas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , en los  $3643\text{cm}^{-1}$ . Sobre los  $3700\text{cm}^{-1}$  se observa un pico que corresponde al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que se va formando conforme se disuelven las fases de silicato y cuya intensidad se aprecia de mayor forma en las muestras que contemplan el curado en cal. El seguimiento en el tiempo de los espectros, así como su comparación con el espectro del cemento seco permite determinar el grado de hidratación [44].

### TGA de la pasta de cemento

Los resultados del ensayo TGA sobre las muestras de pasta de cemento se exponen en la figura 56.

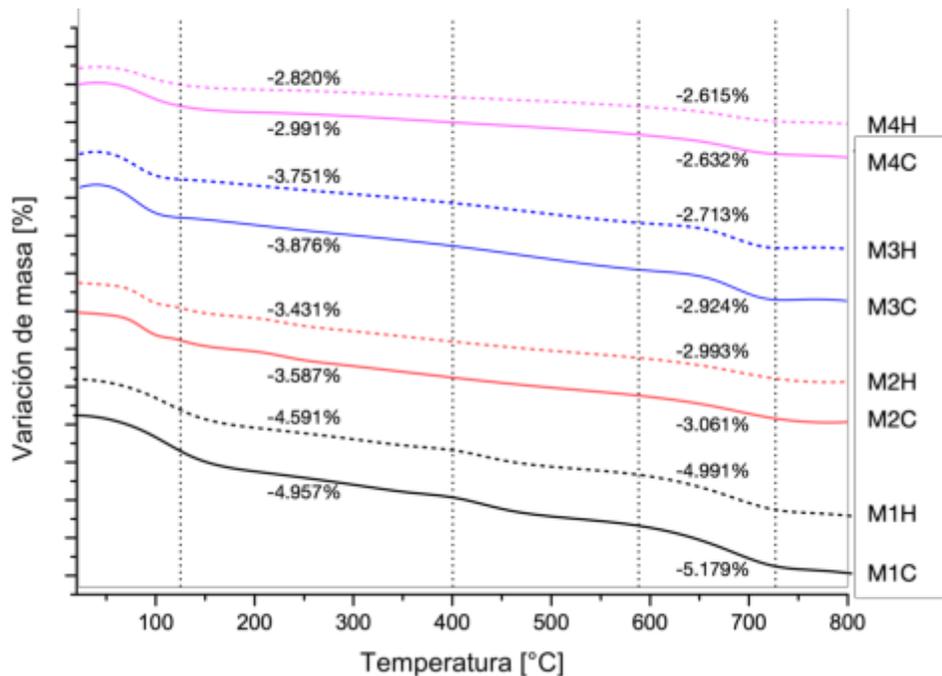


Figura 56 – Resultado de ensayo TGA sobre las muestras de pasta de cemento en estudio

Las gráficas de la figura 56 muestran que se produce una reacción endotérmica que tiene lugar a  $125\text{-}400^\circ\text{C}$  debido a la deshidratación principalmente del C-S-H lo que nos muestra que las muestras que fueron curadas en cal tienen una mayor pérdida de masa lo que indica la presencia de más gel de C-S-H en estas probetas [136]. De igual manera, puede observarse una pérdida de masa significativa atribuida a la descomposición del  $\text{CaCO}_3$ , desprendiendo  $\text{CO}_2$  a temperaturas de  $600\text{ a }725^\circ\text{C}$ , lo que indica una

mayor presencia de este compuesto con una reducción de masa importante en los casos ya mencionados [136].

## Caracterización del agregado vegetal lignocelulósico de agave

### Caracterización morfológica de la penca de *Agave salmiana*

Las pencas obtenidas de la planta fueron obtenidas de manera directa y analizadas según se observa en la figura 57 siguiendo el procedimiento empleado en la literatura científica [32].

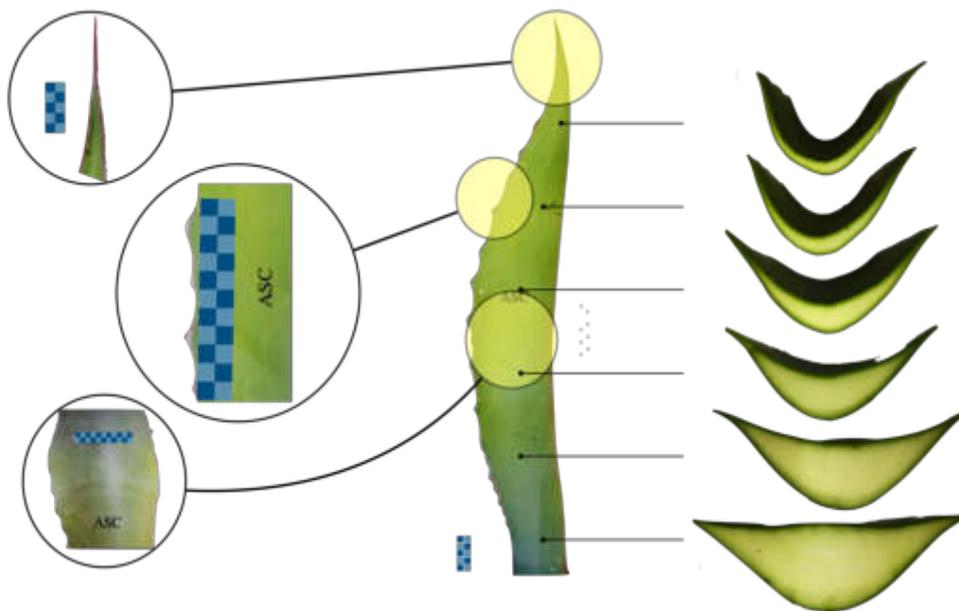


Figura 57 - Morfología de una penca de *Agave salmiana*

Como puede observarse en la figura 57, al analizar los cortes transversales podemos observar que la zona de la penca más próxima a la piña posee un mayor contenido de médula (zona blanca) en relación con la cáscara (zona verde superficial de la penca). Sin embargo, conforme se avanza en sentido longitudinal hacia el otro extremo podemos ver que el contenido de médula va decreciendo, adelgazando la penca. Esto es importante poder caracterizarlo debido a que la literatura científica, en lo que respecta a la utilización de fibras naturales, discrimina ciertas zonas de la planta que considera no son de aprovechamiento para la función que se busca de acuerdo con las propiedades. Es por esto por lo que se llevaron a cabo diversos ensayos de caracterización física para determinar las propiedades de cada una de las zonas identificadas en la penca y poder estipular si para el objetivo propuesto es mejor

la utilización de la médula, la cáscara o ambas en conjunto. Debido a esto, al momento de procesarlas se debió hacer una separación de las partes como se observa en la figura 58.



Figura 58 - Corte transversal de la penca donde se observa 1) zona de médula, 2) zona de cáscara con médula y 3) zona de cáscara

Como puede observarse en la figura 58; se distinguen tres componentes de la penca de *Agave salmiana* correspondientes a la médula, la cáscara y la médula con cáscara. Estos tres componentes como se mencionó anteriormente fueron estudiados en sus propiedades físicas de manera separada para poder discriminar su utilización conforme los propósitos de esta investigación.

### Contenido inicial de agua de la penca de *Agave salmiana*

El resumen de los resultados obtenidos de la experimentación para determinar el contenido inicial de agua queda expuesto en la tabla 23.

Tabla 23 - Resultados promedios obtenidos de la determinación del contenido inicial de humedad

Muestra	Masa húmeda $M_0$ [g]	Masa seca $M_D$ [g]	Contenido de humedad [%]
Médula	342.0000	25.5333	92.5341
Médula con cáscara	427.0667	62.9667	85.2560
Cáscara	310.4333	53.8000	82.6694
Agave completa	1080.1000	142.3000	86.8253

Como puede observarse, la médula es la contiene una mayor cantidad de agua en la penca de *Agave* siendo este de un 92.5341% respecto a su peso seco lo cual es alto si se compara por ejemplo con muestras reportadas en la literatura como hojas de cáñamo ( $\approx 10.65\%$ ) lo que se atribuye a propiedades

intrínsecas de la especie vegetal y que tendrá implicancias en los parámetros físicos de interés así como en la energía requerida para el secado en horno [85].

### Preparación de la muestra de Agave salmiana

La penca de Agave fue cortada en su totalidad en partículas cúbicas de aproximadamente 5 milímetros, sin embargo, posterior al secado y producto de la retracción por la eliminación del agua intersticial se produce una disminución del tamaño longitudinal por lo que fue tamizado. Los resultados de tamaño de partícula quedan descritos en la tabla 24 y graficados en la figura 59.

Tabla 24 - Resultados obtenidos del cribado de las partículas de agave posterior a su secado

Tamiz		Masa retenida [g]	Porcentaje retenido [%]	Porcentaje retenido acumulado [%]
Abertura [mm]	Designación			
4.75	Nro. 4	73.4000	6.2904%	6.2904%
2.36	Nro. 8	1005.0000	86.1281%	92.4185%
1.18	Nro. 16	86.7000	7.4302%	99.8486%
0.6	Nro. 30	1.1471	0.0983%	99.9469%
< 0.6 milímetros		0.6192	0.0531%	100.0000%
Total		1166.8663	100.0000%	----

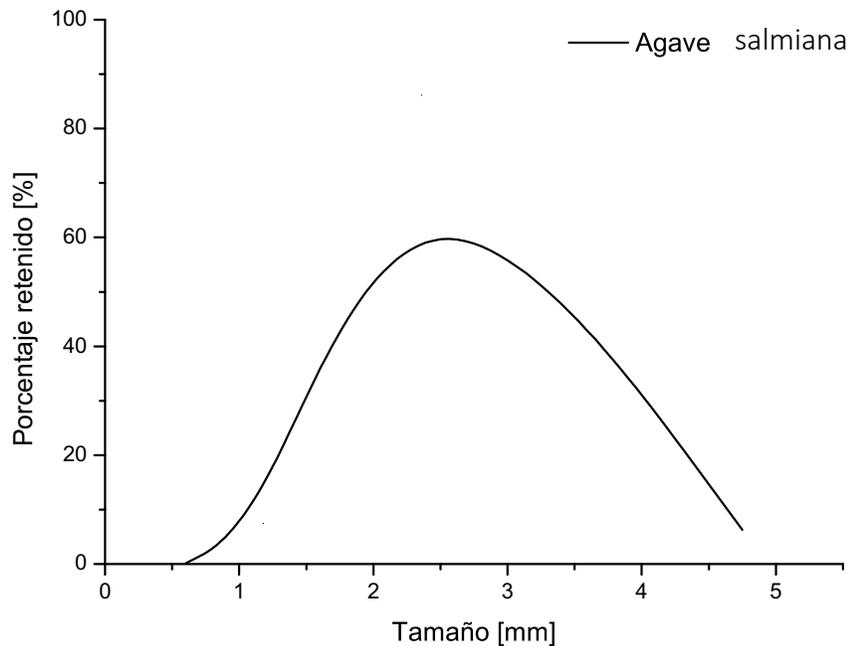


Figura 59 - Distribución de tamaño de partícula del agregado vegetal

### Absorción de agua de la fibra de Agave salmiana

Los resultados de las mediciones de absorción de agua quedan descritos en la tabla 25 y para poder tener una mejor perspectiva de los resultados de la prueba de absorción de agua de la fibra, se grafican los valores obtenidos en la figura 60.

Tabla 25 - Resultados de absorción de agua para cada uno de los componentes identificados que componen la penca de Agave

Muestra	1'	15'	240'	1440'	2880'
Médula	173.3778%	301.0292%	361.1864%	382.1241%	438.4397%
Médula con cáscara	135.7220%	202.7601%	290.4322%	333.4698%	330.5507%
Cáscara	131.1272%	168.3396%	285.1089%	331.8199%	332.6563%

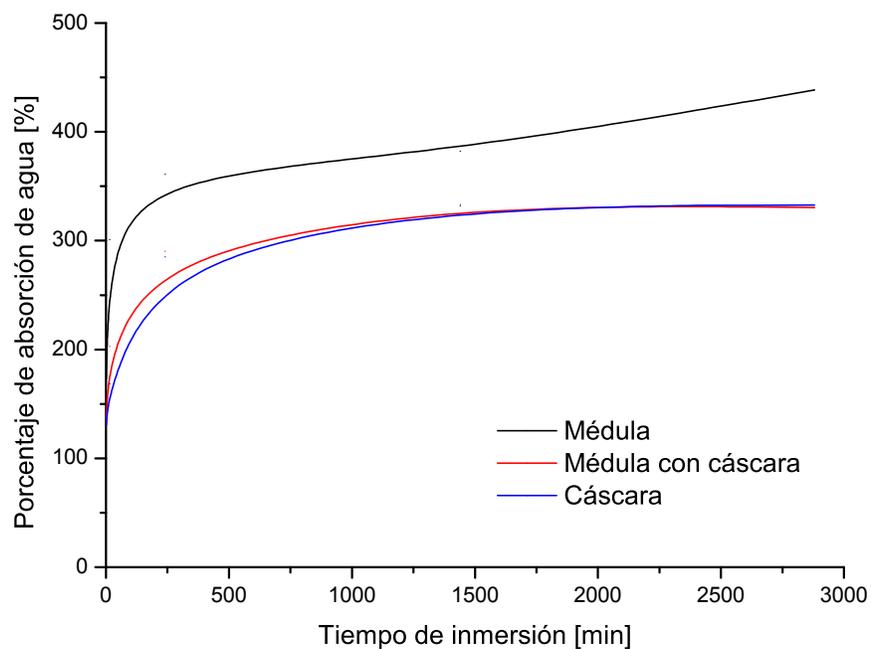


Figura 60 - Gráfica de los resultados de absorción de agua del agregado lignocelulósico en estudio

Como puede observarse, los resultados son bastante claros en mostrar la mayor absorción de agua por parte de la médula en un 24.1272% más que la cáscara. Los resultados concuerdan con lo descrito en la literatura científica que atribuye los altos niveles de absorción y retención de agua con la porosidad y la estructura interna de las fibras naturales vegetales [62]. Estos resultados, además, se condicen con los obtenidos de las pruebas de contenido inicial de agua, densidad y conductividad térmica, en donde estos parámetros muestran una mayor porosidad de la médula y por ende un mayor contenido de cavidades con potencial capacidad de retención de agua. En cuanto a la cinética de absorción, se puede

inferir por la gráfica que para la médula la absorción de agua los primeros 250 minutos ocurre de forma mucho mas acelerada, sin embargo, posterior a este tiempo, la velocidad de absorción tiende a ser igual al medido para la cáscara.

Si bien este factor es perjudicial por la interacción que puede tener con el agua de reacción y/o de mezcla en la fabricación de mortero, además, de requerir extensos tiempos de secado [3], hay que tener en consideración al mismo tiempo, que la porosidad es la principal característica que aporta las propiedades aislantes a la fibra natural haciéndola atractiva para su utilización como material de construcción. Aun así, la cáscara posee de igual forma un buen desempeño aislante debido a su naturaleza.

### Densidad Aparente de la penca de Agave salmiana

Los resultados obtenidos de la densidad aparente para cada una de las partes constituyentes de la penca de Agave quedan descritos en la tabla 26.

Tabla 26 - Resultados promedios obtenidos de la determinación de la densidad aparente para cada parte identificada de la penca de Agave

Muestra	Masa [g]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Densidad aparente [g/cm <sup>3</sup> ]
Médula	88.6000	295.8769	0.2994
Médula con cáscara	243.3000	726.2066	0.3350
Cáscara	213.9667	567.3664	0.3771

De acuerdo con los resultados expuestos, la cáscara posee una densidad aparente superior a la médula en un 79.3850%. Al ser este un parámetro relacionado con la porosidad de la fibra debido al contenido de aire que puede contener, se relacionan estos resultados con los valores de conductividad térmica y de capacidad de absorción de agua. Esto se corrobora con los resultados de las pruebas respectivas que se expondrán a continuación.

### Conductividad térmica de la fibra de Agave salmiana

El procedimiento fue realizado en triplicado para cada una de las muestras y los resultados de las mediciones quedan descritos en la tabla 27.

Tabla 27 - Resultados de conductividad térmica para cada uno de los componentes de la penca de agave

Muestra	Conductividad térmica [W/mK]	Resistencia térmica [°C.cm/W]
Médula	0.0682	1467.6500
Médula con cáscara	0.0733	1364.5500
Cáscara	0.0810	1234.6500

Los resultados muestran que la cáscara posee una conductividad térmica 18.7683% más alta que la médula y eso se relaciona con la diferencia de la densidad entre ambos componentes de la penca.

### Observación morfológica de la penca de *Agave salmiana*

Los resultados se observan en las figuras 61 y 62.

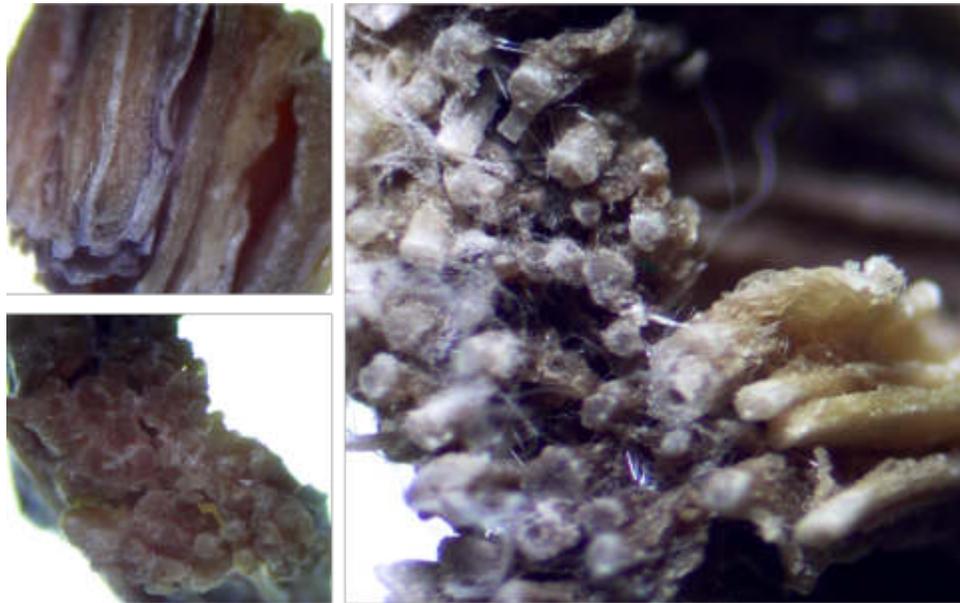


Figura 61 - Microscopía para análisis morfológico de la médula

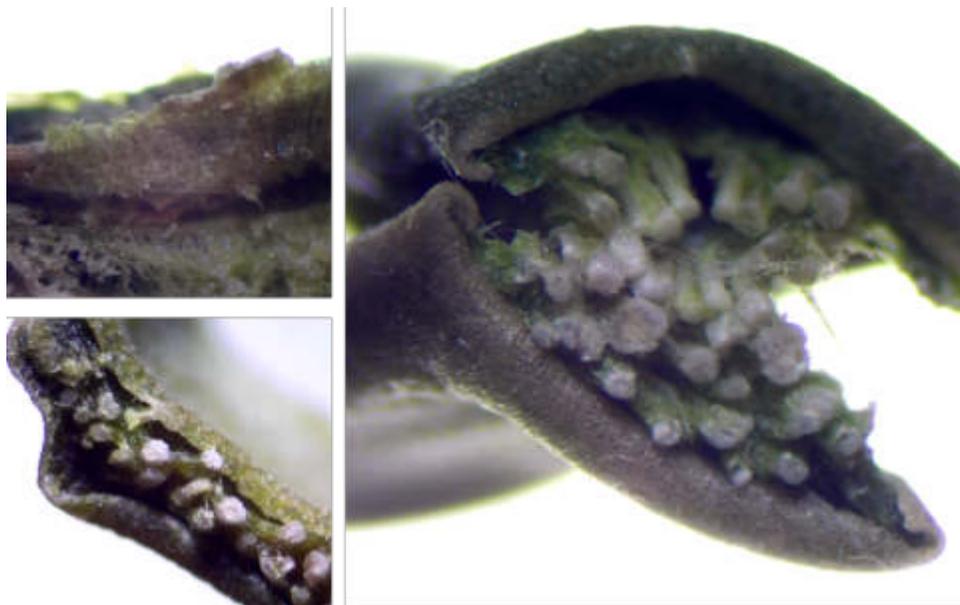


Figura 62 - Microscopía para análisis morfológico de la cáscara

Como puede observarse en las figuras 61 y 62, la médula está compuestas de fibras cuyo crecimiento es en sentido longitudinal de la penca de Agave. Estas fibras tienen un aspecto cilíndrico con diámetros de aproximadamente  $450\mu\text{m}$  en donde puede observarse una porosidad muy baja de acuerdo con las imágenes obtenidas mediante SEM y que se reportan en la figura 63.

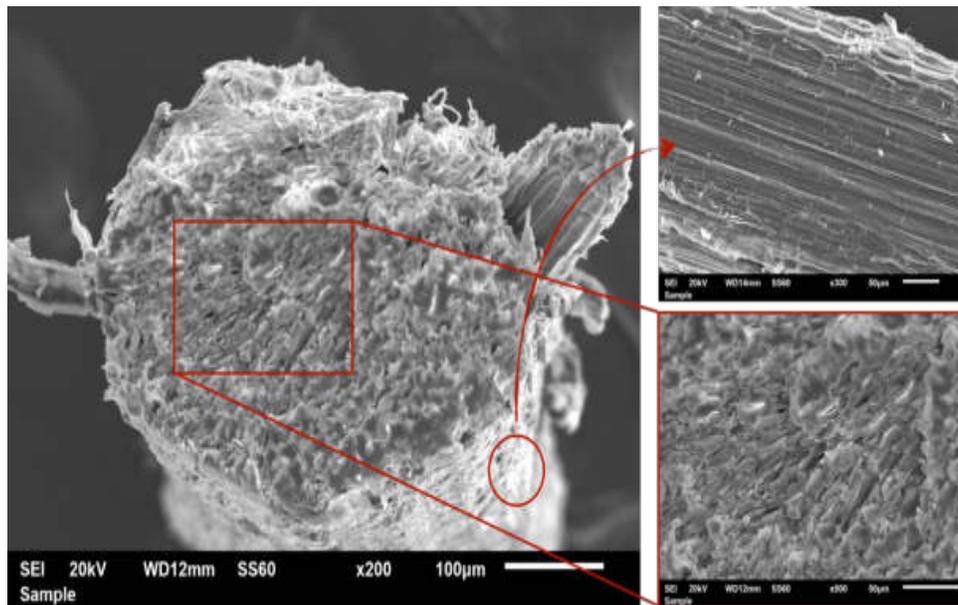


Figura 63 - Microscopía electrónica de barrido para fibra medular

La figura 63 muestra el detalle de una fibra medular en la que se puede observar que las células están estrechamente empaquetadas presentando un lumen irregular. El detalle de la imagen superior derecha muestra que esta estructura esta conformada de variadas microfibrillas con material aglutinante y pítico entre ellas. Los defectos superficiales son evidentes y se atribuyen a defectos propios de la estructuras y a consecuencias del proceso de extracción [52][58]. Las fibras medulares forman un entramado que permite la contención de agua en el estado natural de la planta. Cuando las partículas de agregado vegetal son secadas en horno, se elimina el agua produciendo una contracción en sentido transversal al de las fibras dejando cavidades de aire que permiten una baja densidad del material y una baja conductividad térmica.

Por otra parte, la cáscara de la penca de Agave, como puede observarse en la figura 62, corresponde a una estructura mucho mas compacta con una mayor densidad intrínseca y una baja permeabilidad al agua, por lo que su presencia favorece la hidrofobicidad del agregado en relación con la estudiada por la médula de la penca.

## Difracción de rayos X (DRX) de la penca de Agave salmiana

La gráfica resultante de esta prueba se observa en la figura 64.

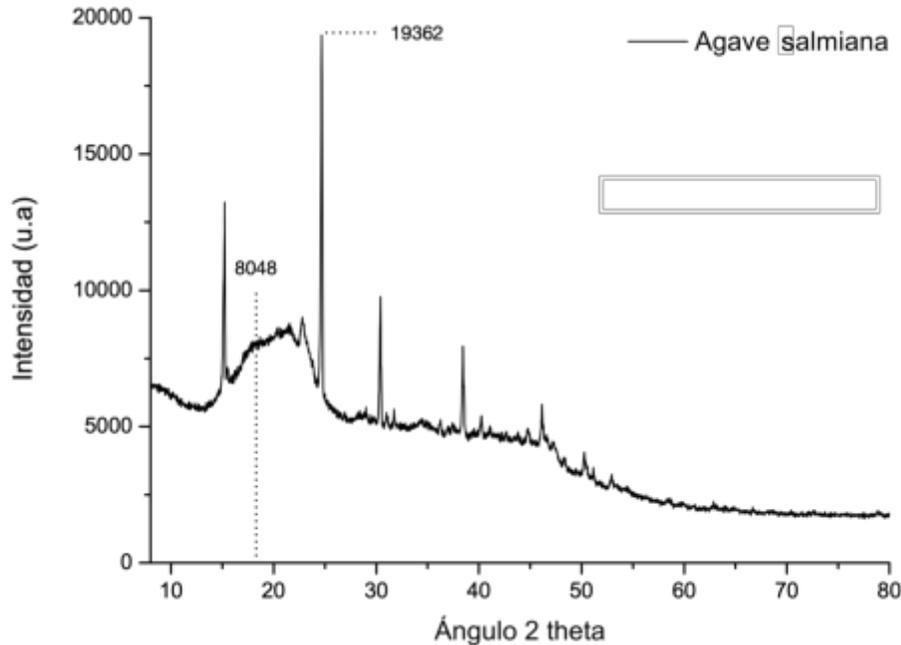


Figura 64 - Difracción de rayos X sobre una muestra de penca de Agave salmiana

De acuerdo con la literatura, las estructuras de celulosa presentan tres tipos de conformaciones moleculares ordenadas y estables siendo la celulosa la más predominante generalmente. En la gráfica de la figura 64, los máximos observados son producidos por reflexiones específicas de las regiones cristalinas. Para determinar el porcentaje de cristalinidad del Agave (o índice de cristalinidad) se definió la siguiente relación [59]:

$$IC [\%] = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100$$

En esta ecuación,  $I_{002}$  es la intensidad máxima detectada en el ensayo de DRX que para este caso corresponde a 19362uA, y el valor de  $I_{am}$  corresponde al valor detectado en las mismas unidades para  $2\theta = 18^\circ$  equivalente a 8048uA. En el caso del Agave salmiana definida para el estudio, el índice de Cristalinidad es de un 58,43%. Si bien este valor es menor por ejemplo al obtenido en el Agave azul o el Lino que es del orden del 70%, puede ser comparado con otras fibras como el Yute o la Piña que se exponen en la tabla 28 y que también son empleadas en la fabricación de compuestos o materiales [48]. Es importante considerar el Índice de Cristalinidad a la hora de estudiar la durabilidad de compuestos

que utilicen Agave como materia prima ya que la cristalinidad de la celulosa se asocia a la estabilidad del compuesto en presencia de otras sustancias que pueden eventualmente reaccionar o degradarla [58][59][87].

Tabla 28 - Valores de Índice de Cristalinidad para otras fibras naturales utilizadas en la fabricación de compuestos [48]

Fibra Natural	Índice de Cristalinidad
Agave salmiana	58.43%
Lino	70%
Cáñamo	87.9%
Agave Azul	70%
Coco	68%
Yute	58.9%
Piña	58.6%

### Fluorescencia de rayos X (FRX) de la penca de Agave salmiana

Los resultados obtenidos del análisis por fluorescencia de rayos X muestran la presencia de CaO y K<sub>2</sub>O en un alto porcentaje como se observa en la tabla 29.

Tabla 29 - Resultados de FRX sobre una muestra de penca de Agave salmiana

Compuesto	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Concentración	0.454%	1.840%	0.978%	15.645%	79.876%	350.6ppm	0.317%

De acuerdo con los resultados, los principales compuestos detectados en la penca de Agave salmiana son CaO en un 79.876% y K<sub>2</sub>O en un 15.645%. Ambos compuestos se encuentran en proporciones diferentes para la médula y la cáscara de la penca. En el caso de la cáscara, el CaO se encuentra presente en un 76.509% y el K<sub>2</sub>O en un 18.864% mientras que para el caso de la médula las proporciones son en un 85.634% y un 9.832% respectivamente. Esto nos muestra de manera empírica la composición en cada una de las partes que se definieron para la penca con la que se está trabajando. Además, la alta presencia de óxido de calcio permite establecer algunas aplicaciones futuras para la materia prima que se está estudiando.

### Espectroscopía infrarroja (FTIR) de la penca de Agave salmiana

El gráfico de la figura 65 muestra el resultado del ensayo FTIR sobre la muestra de penca de Agave salmiana.

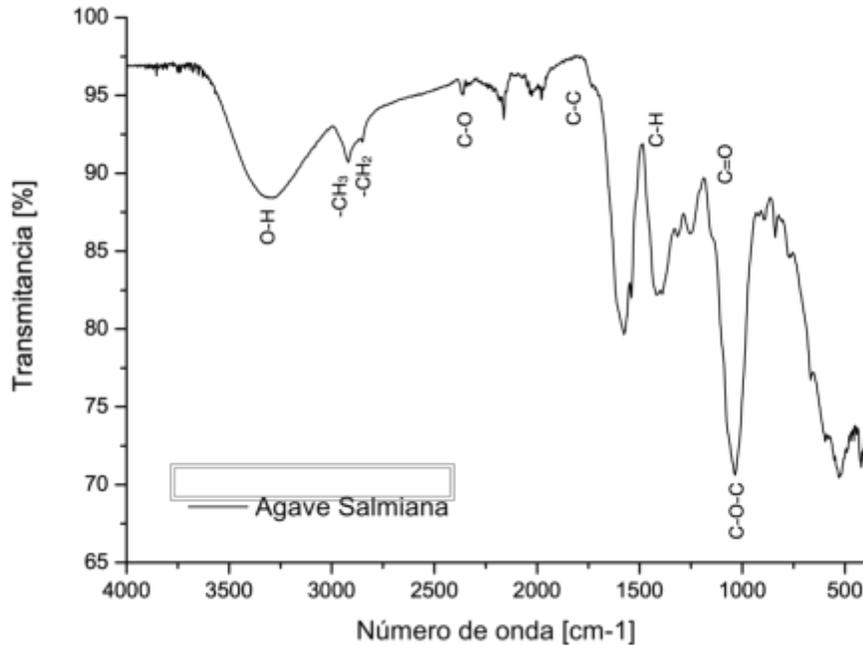


Figura 65 - Gráfica de los resultados de análisis FTIR sobre una muestra de penca de Agave salmiana

El análisis FTIR confirmó que la muestra de penca de Agave salmiana tienen bandas de absorción típicas de materiales lignocelulósicos; aunque sus magnitudes difieren. Dada su naturaleza compleja, sus espectros FTIR suelen estar separados en dos secciones principales; -OH y -CH que se extienden en la región de 3800 a 2700 $\text{cm}^{-1}$ , y la región de huella digital que se asigna a las vibraciones de estiramiento de diferentes grupos de componentes de estos materiales lignocelulósicos que va desde los 1500 a 400 $\text{cm}^{-1}$ . El pico amplio en el rango 3400 $\text{cm}^{-1}$  se relaciona con el grupo hidroxilo de la vibración de estiramiento de O-H. La señal detectada a los 2920.23 $\text{cm}^{-1}$  corresponde a grupos metil y metileno (-CH<sub>3</sub> y -CH<sub>2</sub>), y se atribuye al mayor contenido extractivo de esta materia prima. Las señales registradas entre 1575 $\text{cm}^{-1}$  y 1400 $\text{cm}^{-1}$  son características del estiramiento y torsión de diferentes grupos de carbohidratos. Las bandas de Agave salmiana atribuibles al estiramiento simétrico y asimétrico del C-O-C en enlaces glucosídicos, se presentaron a 1085 $\text{cm}^{-1}$  corresponden a los enlaces  $\beta$ -1,4-glicosídicos que unen unidades de glucosa en celulosa y hemicelulosa [52][63][116].

#### Análisis termo gravimétrico (TGA) de la penca de Agave salmiana

El gráfico de la figura 66 muestra los resultados obtenidos del ensayo TGA sobre una muestra de penca de Agave salmiana.

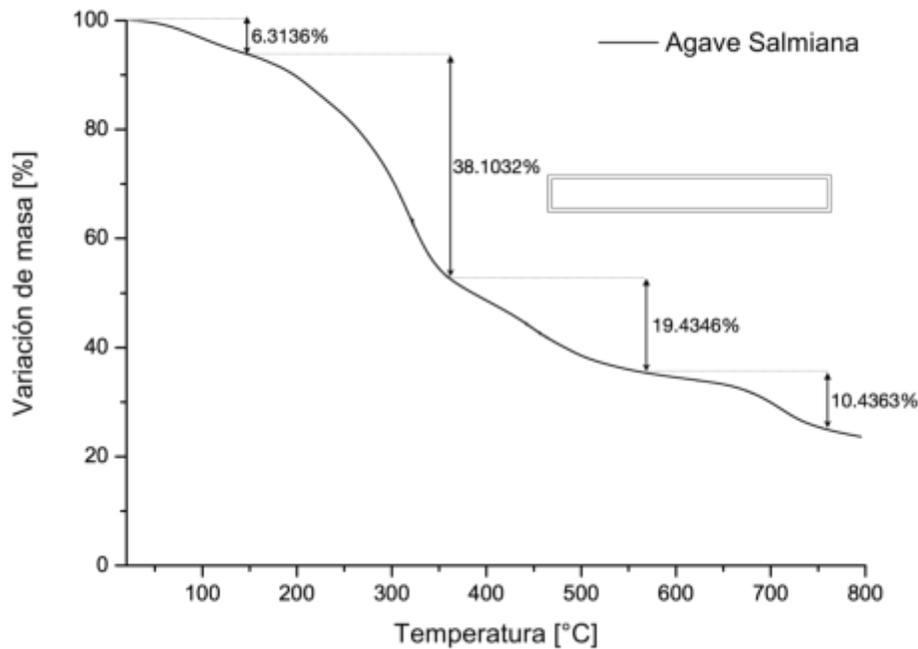


Figura 66 - Resultado del análisis termogravimétrico sobre la muestra de cemento CPO40R

El análisis TGA entrega información sobre la estabilidad térmica de la fibra y la composición en términos de sustancias volátiles, constituyentes orgánicos y residuos inorgánicos [116]. La primera fase de pérdida de masa producto del aumento de la temperatura en la prueba termogravimétrica corresponde a la deshidratación producto de la liberación de líquidos y sustancias volátiles en el rango de temperatura de hasta los 150°C. A medida que la temperatura aumenta y por sobre los 150°C comienza la descomposición de los componentes estructurales de la fibra natural junto con sustancias gaseosas que se liberan al ambiente. La combustión de los compuestos orgánicos y la formación de ceniza es producida por la exposición a temperaturas superiores a 500°C lo cual se ve reflejado por la variación de masa que se produce entre los 350 y 550°C equivalente a un 19.4346% de pérdida de masa. Los elementos estructurales poseen distintos rangos de descomposición. La lignina sufre una descomposición gradual en los rangos de temperatura de 150 a 350°C. La hemicelulosa y los polisacáridos de bajo peso molecular comienzan su proceso de descomposición por encima de los 180°C. La celulosa presente, se descompone en el rango de temperatura de 260 a 350°C produciendo gases, compuestos volátiles y alquitranes. Debido a la descomposición de estas sustancias, se produce una importante variación de masa sobre la muestra equivalente a un 38.1032%. Por sobre los 230±30°C

se dan lugar las reacciones exotérmicas que se caracterizan por las altas emisiones de productos gaseoso de descomposición que generalmente contienen un 70% de CO<sub>2</sub> incombustible y un 30% de CO combustible [24]. Por sobre los 650°C se visualiza una pérdida de masa de un 10.4363% atribuido al porcentaje de ceniza [116].

Debido a que la fibra de Agave salmiana presenta estabilidad térmica hasta aproximadamente los 150°C, se sugiere que estas fibras pueden utilizarse con seguridad hasta ese rango de temperatura, siendo este inferior a lo estipulado en la literatura para el Agave Azul, las fibras de plátano brasileño o las fibras de bagazo de caña de azúcar. La estabilidad térmica se debe a los valores de cristalinidad obtenidos y a su contenido de lignina [58].

### Caracterización química de la penca de Agave salmiana

Los resultados obtenidos de la caracterización química de la muestra de Agave salmiana quedan expuestos en la tabla 30.

Tabla 30 - Resultados de caracterización química de la muestra de Agave salmiana

Prueba	Promedio
Análisis de humedad	5.2039±0.0343%
Análisis de ceniza	15.7652±1.8974%
Extraíbles con Etanol-Tolueno	23.4697±2.4493%
Contenido de lignina insoluble en ácido	10.6079±0.2355%
Contenido de holocelulosa	42.6417±1.0954%
Contenido de celulosa	49.6367±0.8341%
Contenido de hemicelulosa	50.3633±0.8341%

Los resultados de caracterización química muestran que la fibra natural de la penca de Agave esta constituida principalmente por celulosa con un valor promedio de 49.6367±0.8341% similar al valor reportado para fibras de cáñamo o girasol [62]; holocelulosa en un 42.6417±1.0954% y lignina en un 10.6079±0.2355%. Estos componentes se asocian a la rigidez que puede presentar la fibra y que también le permite aportar propiedades mecánicas en estudios en donde se utiliza como filamentos o en otras aplicaciones relacionadas. Un aspecto importante para considerar es el alto contenido de compuestos polares que fueron extraídos con la solución de etanol-tolueno preparada equivalente a un 23.4697%, lo cual es elevado en comparación otras fibras como la cáscara de eucalipto con un 4.19% [116] o la paja de avena con un 8.7% [128]. Si bien, la velocidad de extracción se ve favorecido por las

condiciones inducidas en las que se desarrolla el ensayo y la naturaleza de los solventes utilizados, es importante considerar este antecedente debido a que el agua tendría capacidad potencial de extraer compuestos hidrosolubles que pudieran interferir en matrices para otros procesos químicos como lo son los azúcares.

### **Etapas 3 - Tratamiento y evaluación de la fibra**

#### **Caracterización del agregado vegetal post tratamientos**

##### **Tamaño de partícula del agregado vegetal después del tratamiento**

Los resultados obtenidos de la distribución de tamaño de partícula para el agregado vegetal después de ser sometido a los tratamientos en estudio quedan expuestos en la gráfica de la figura 67.

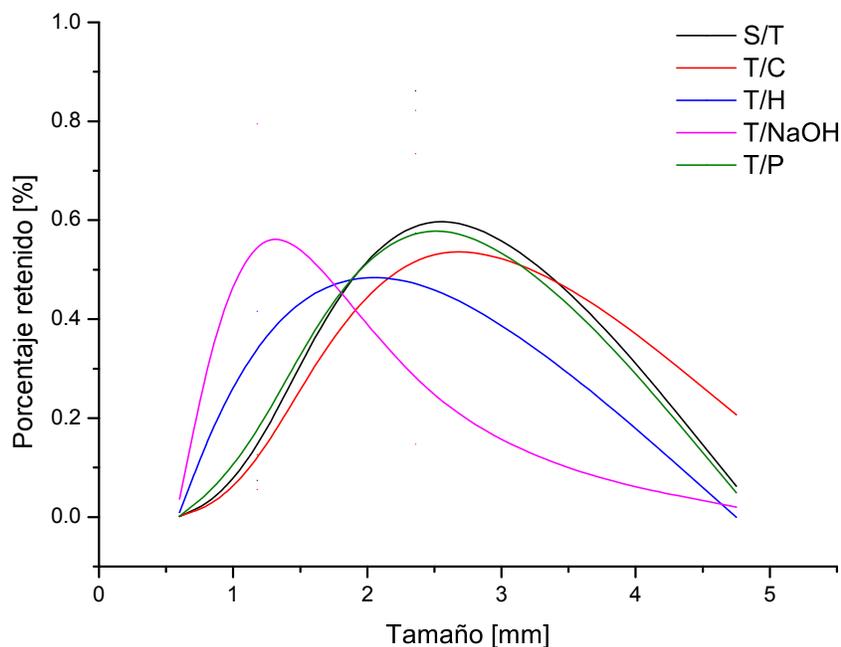


Figura 67 - Gráfica de distribución de tamaño de partículas para el agregado vegetal sometido a los diferentes tratamientos

Como puede observarse en el gráfico de la figura 67, la fibra al ser sometida a un tratamiento en específico genera cambios morfológicos relacionados con el tamaño de partícula. Si se toma como referencia la curva en la gráfica para el agregado S/T, se observa que el T/H y en especial el tratamiento T/NaOH producen una reducción en el tamaño de las partículas lo cual tendrá consecuencias principalmente sobre las propiedades de densidad y conductividad térmica. Además, se observa que el

tratamiento de congelamiento produce un leve aumento sobre su granulometría, lo cual, al igual que para los casos recién mencionados producirá alteraciones respecto a la muestra de referencia sin tratamiento. Sobre el tratamiento de parafina (T/P), se observa que la distribución de tamaños se mantiene casi igual a la muestra de referencia.

### Absorción de agua del agregado vegetal después de los tratamientos

Los resultados de la prueba de absorción de agua para el agregado vegetal después de ser sometido a los distintos tratamientos en estudio se observan en la gráfica de la figura 68.

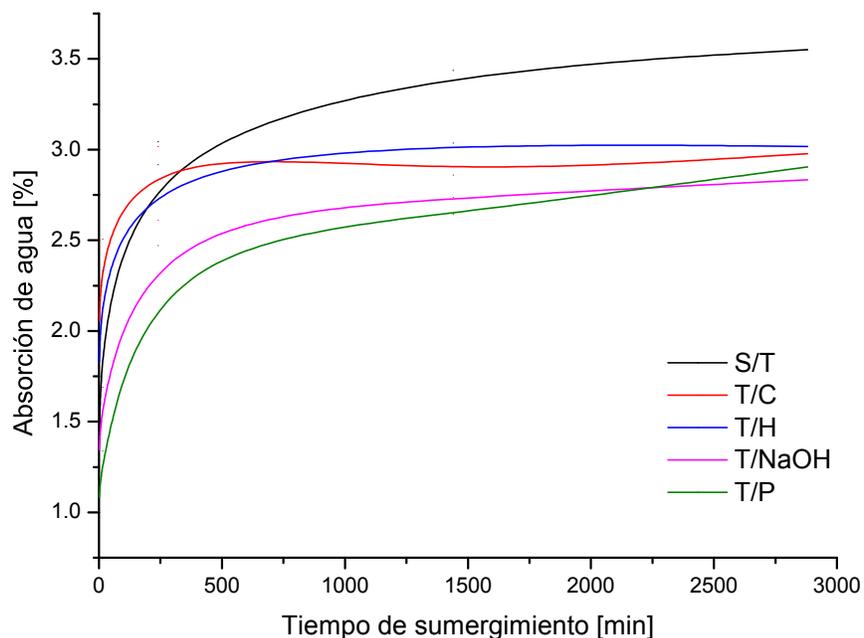


Figura 68 - Curvas de absorción de agua para el agregado vegetal sometido a los distintos tratamientos en estudio

La absorción de agua corresponde a un proceso que de igual manera responde a la porosidad de los agregados, así como de su estructura y capacidad de deformación. Es por esto por lo que el sometimiento de los agregados vegetales a tratamientos permite modificar parámetros de la fibra que propician una mayor hidrofobicidad respecto a la muestra de referencia (S/T). De acuerdo con los resultados expuestos en la gráfica de la figura 68, se puede observar que la absorción de agua del agregado vegetal sometido a un tratamiento en estudio disminuyó entre un 15.0269 y un 20.2244% similar a los valores obtenidos en tratamientos aplicados a otras fibras [102]. En términos generales, se observa que para el caso de la fibra sometida al tratamiento de hornificación, hidróxido de sodio y de

parafina, la curva resultante se desplaza hacia abajo en el gráfico por lo que el comportamiento ocurre de una manera similar al de la fibra sin tratamiento, pero permitiendo un menor ingreso de agua. Para el caso del tratamiento de congelamiento, como ya se mencionó anteriormente, las partículas adquieren una estabilidad morfológica debido al rompimiento de componentes estructurales, por lo tanto, conserva en su interior espacios de aire por donde en los primeros 500 minutos de sumergimiento en agua, la velocidad es mayor que el de los demás tratamientos, sin embargo, esta misma estabilidad impide su hinchamiento por lo que conforme se van saturando los poros internos desplazando el aire existente, el ingreso de agua se estanca llegando a su punto máximo aproximadamente a los 1000 minutos de sumergimiento.

Los agregados vegetales se caracterizan por un nivel de absorción de agua muy elevado debido a la humectabilidad superficial de las partículas vegetales. La elevada porosidad interna de la médula es propicia para la absorción de agua dentro de los agregados. Si bien, diversos autores han reportado que una ventaja es que la médula favorece el suministro interno de agua para evitar la contracción del mortero, lo cierto es que una alta absorción de agua no es deseable para la fabricación de morteros vegetales debido a los problemas de interfaz ligante-agregados de este tipo de material [86].

La reducción de la capacidad absorbente del material vegetal tendrá implicancias directas a la hora de fabricar el mortero vegetal debido a que interferirá en menor medida con la generación de productos de hidratación en la matriz cementante y de esta manera propiciar un mejor comportamiento mecánico de resistencia a la compresión del compuesto resultante. Esto se debe a que, en el momento de la fabricación del material, cuando se mezclan los componentes anhidros y el agua, las partículas vegetales absorben y retienen una gran cantidad de agua que ya no estará disponible para la hidratación del ligante. Para evitar este problema y obtener una trabajabilidad conveniente, se aumenta mucho la cantidad de agua añadida, pero esto conduce a un tiempo de secado muy largo después del desmolde [3].

Otro aspecto en el que podría resultar beneficiosa la reducción de la capacidad de absorción de agua, corresponde al aspecto de durabilidad de la fibra debido a que la literatura señala que la interacción del material lignocelulósico con soluciones alcalinas permite su degradación en el tiempo y por lo tanto, dependiendo el formato en que se utilice la fibra y las propiedades que se quieran obtener en el compuesto desarrollado, la disminución de este parámetro permitiría un mejor desempeño en el tiempo

pese a la exposición. Es importante considerar que el parámetro medido presenta un valor elevado al ser comparado con fibras como el coco o el sisal, lo cual debe ser estudiado en cuanto a sus implicancias sobre el compuesto resultante [61].

### Densidad Aparente del agregado vegetal después del tratamiento

Los resultados de densidad aparente del agregado vegetal para cada tratamiento quedan expuestos en la figura 69.

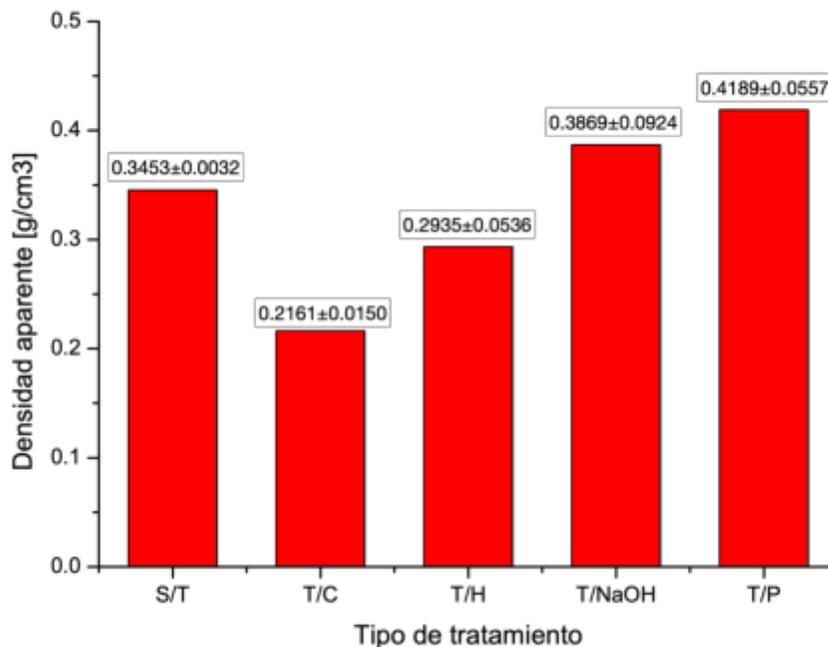


Figura 69 - Resultados de densidad aparente del agregado vegetal para cada uno de los tratamientos en estudio

Como puede observarse en la gráfica de la figura 69, la densidad es un parámetro físico que se ve afectado producto de la aplicación de tratamientos sobre el agregado vegetal de Agave salmiana. Podemos dividir los resultados en dos grupos, los que aumentan su densidad aparente y los que la disminuyen. En el primer grupo vemos que el tratamiento con hidróxido de sodio aumenta en un 12.0294% el valor lo cual concuerda con la reducción de su morfología desplazando el aire contenido dentro de las partículas y por lo tanto para un mismo volumen se requiere una mayor masa de muestra para ser rellenado. En el caso de la fibra sometida al tratamiento con parafina sólida, si bien el tamaño de las partículas se mantuvo casi intacto en referencia a la muestra sin ningún tratamiento, la parafina al convertirse en estado líquido por acción de la temperatura, es capaz de penetrar los poros de las

partículas introduciéndose y desplazando el aire contenido aumentando su masa y por ende su densidad aparente. En el caso del tratamiento por congelamiento, la fibra no altera su tamaño original (al ser cortada directamente de la penca de Agave) después de ser congelada y secada en horno por lo que al evaporar el agua contenida y mantener su tamaño, la porosidad se ve favorecida. Este fenómeno es atribuible al rompimiento de enlaces que conforman la estructura de la fibra producto de la acción del agua contenida al ser congelada y por ende al presentar roturas, pierde la capacidad de contraerse conforme pierde agua por el secado manteniendo su forma original y permitiendo una disminución de su densidad aparente en un 37.4059%. Para el caso del tratamiento de hornificación, se observa que el agregado vegetal al igual que el tratamiento de congelamiento redujo su densidad aparente en un 15.0498% lo cual concuerda con la mayor uniformidad de tamaños que presenta la fibra posterior al tratamiento. Este comportamiento puede explicarse por la rigidez de la estructura polimérica de las fibras-celdas que se produce durante el proceso de humectación y secado. En este caso, las cadenas de celulosa de los polisacáridos se ordenan de forma más compacta con la eliminación del agua durante el proceso de secado y, por tanto, las microfibrillas se unen entre sí en el estado seco como resultado del mayor empaquetamiento, pero conservando aire en su interior que permite este fenómeno [103].

### Conductividad térmica del agregado vegetal después del tratamiento

Los resultados de conductividad térmica sobre el agregado vegetal posterior a la aplicación de tratamientos quedan expuestos en la gráfica de la figura 70.

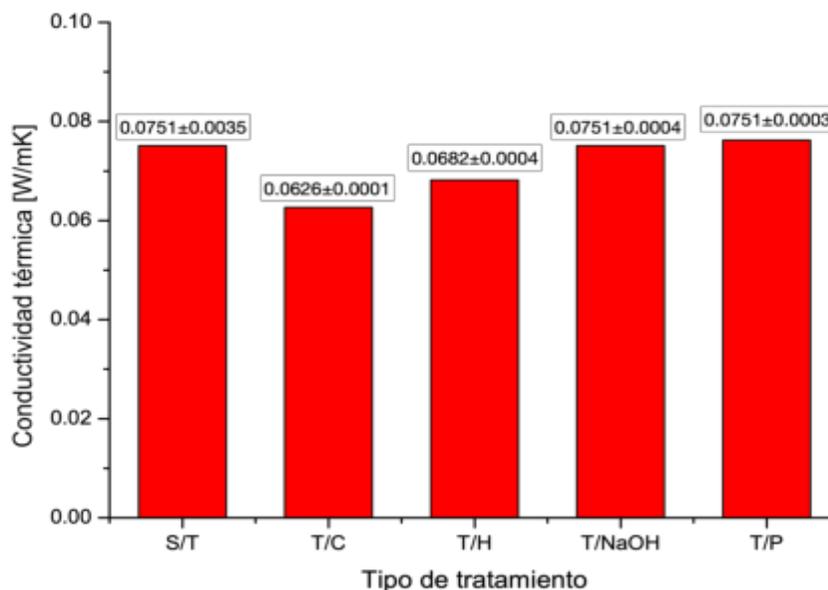


Figura 70 - Resultados de conductividad térmica del agregado vegetal en cada uno de los tratamientos en estudio

Los resultados obtenidos muestran que, para el caso del tratamiento con hidróxido de sodio, la conductividad térmica del agregado aumentó debido al desplazamiento del aire contenido en las partículas por la reducción de su tamaño. Algo similar para el caso del tratamiento con parafina en donde el aire fue desplazado por un material con una conductividad térmica del orden de los 0.25W/mK [134], lo cual es propicio para aumentar su valor general. En el caso del tratamiento por congelamiento y por hornificación, su alta porosidad en relación con la muestra de referencia sin ningún tratamiento explica la disminución en los valores de conductividad térmica reportados en la gráfica en estudio.

La conductividad térmica es una propiedad física que esta directamente relacionada con la densidad de los materiales y de su naturaleza, lo cual puede evidenciarse en la figura 71. En cuanto a la densidad, la correlación existente se debe a la capacidad de retención de pequeñas cavidades con aire estaco que disipan la propagación de calor por conducción debido a la baja conductividad térmica del aire del orden de los 0.028W/mK [72].

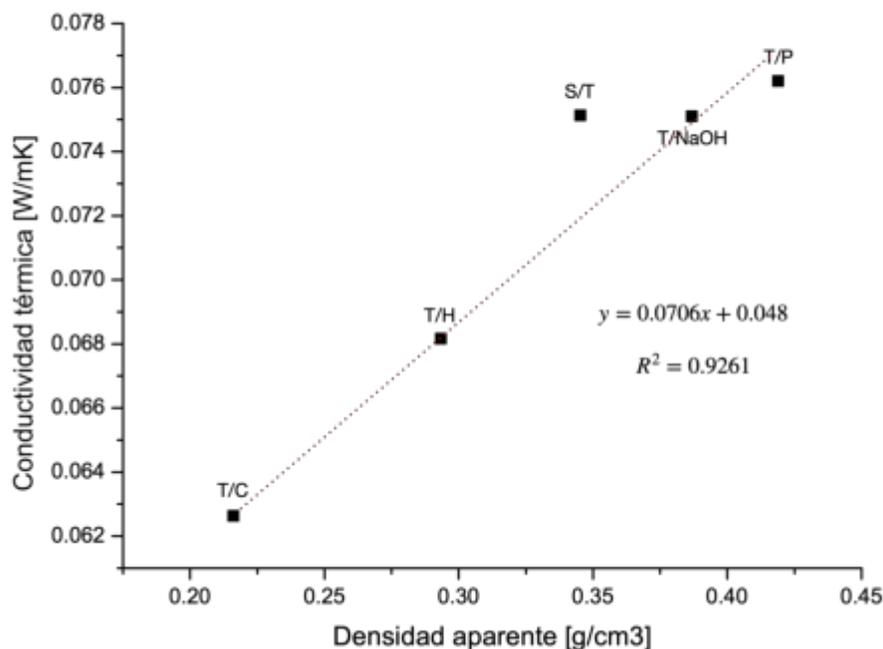


Figura 71 - Gráfico de relación entre densidad aparente y conductividad térmica de los agregados con los diferentes tratamientos

Los resultados obtenidos que se observan en la gráfica de la figura 70, se condicen con los valores obtenidos de densidad aparente de la fibra para cada uno de los casos en estudio en donde puede observarse claramente la relación directamente proporcional que existe entre estos parámetros [5].

### Observación morfológica del agregado vegetal después del tratamiento

Las figuras 72 a 76, muestran fotografías microscópicas sobre los agregados sometidos a los tratamientos en estudio para determinar patrones que permitan explicar el comportamiento caracterizado.

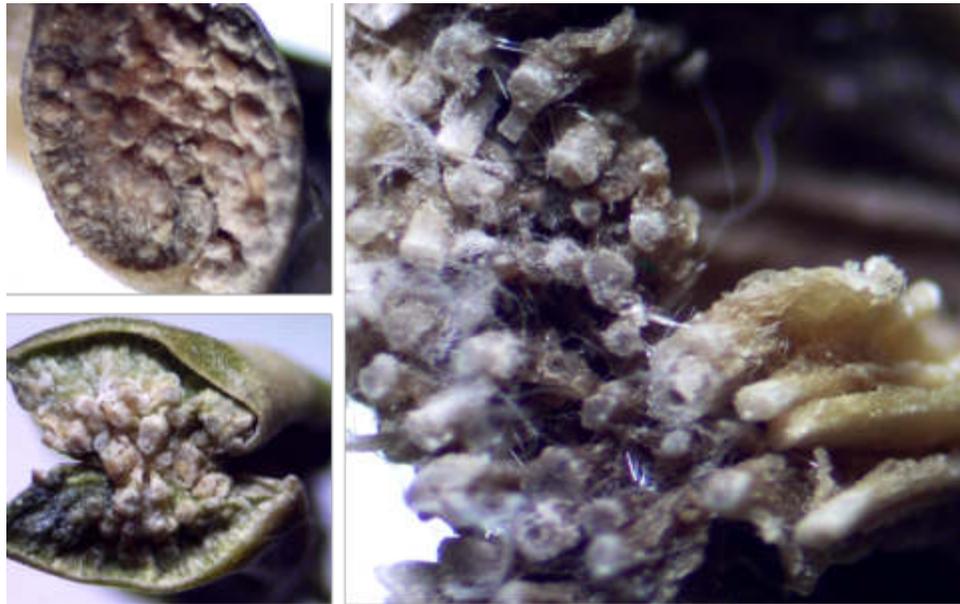


Figura 72 - Micrografía realizada a una muestra de agregado vegetal S/T (4X)

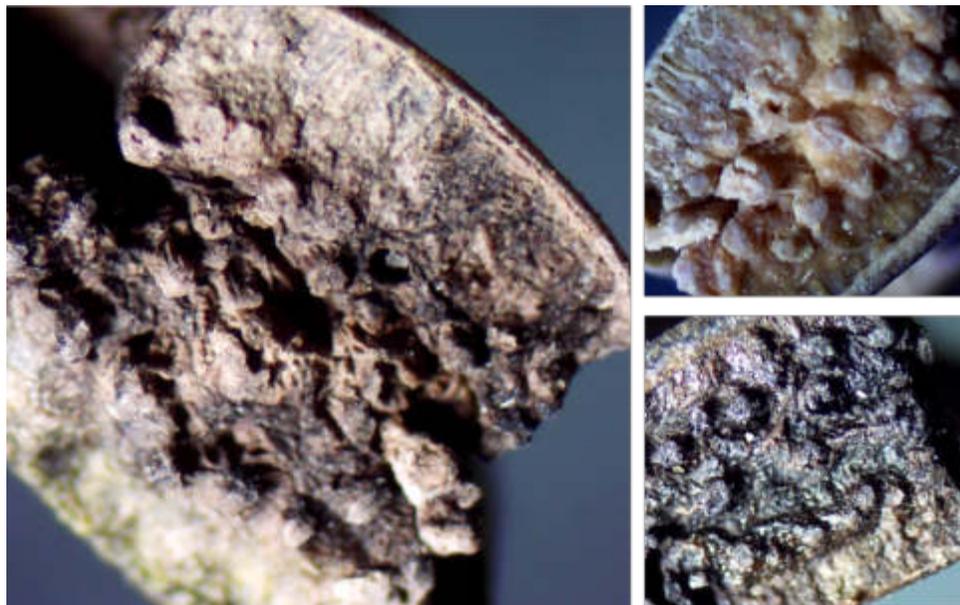


Figura 73 - Micrografía realizada a una muestra de agregado vegetal T/C (4X)

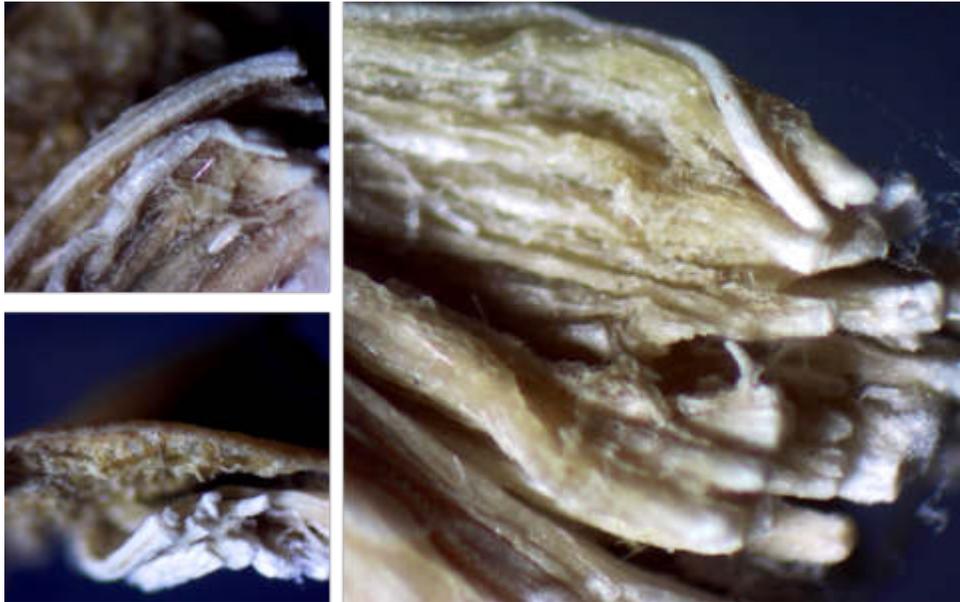


Figura 74 - Micrografía realizada a una muestra de agregado vegetal T/H (4X)

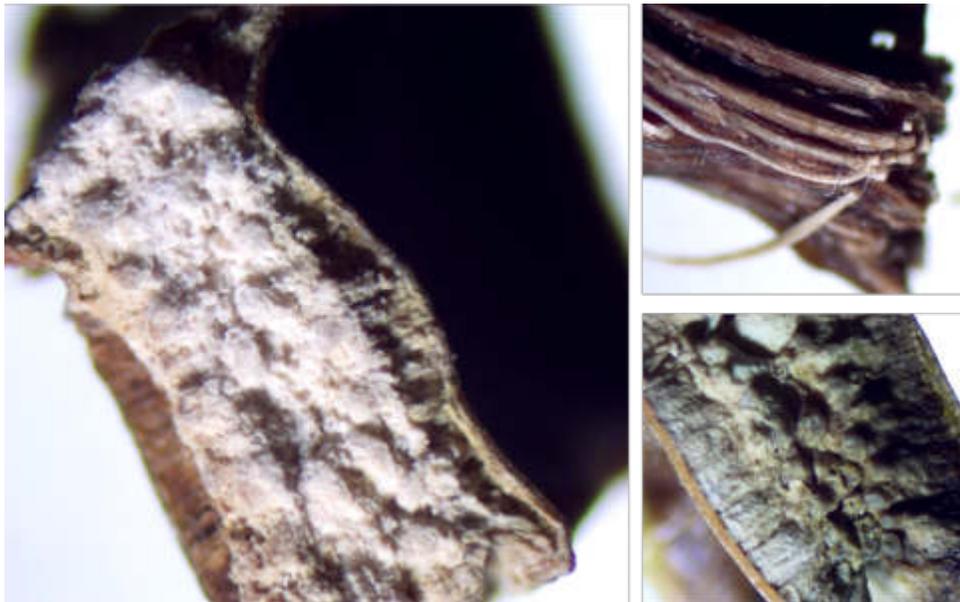


Figura 75 - Micrografía realizada a una muestra de agregado vegetal T/NaOH (4X)

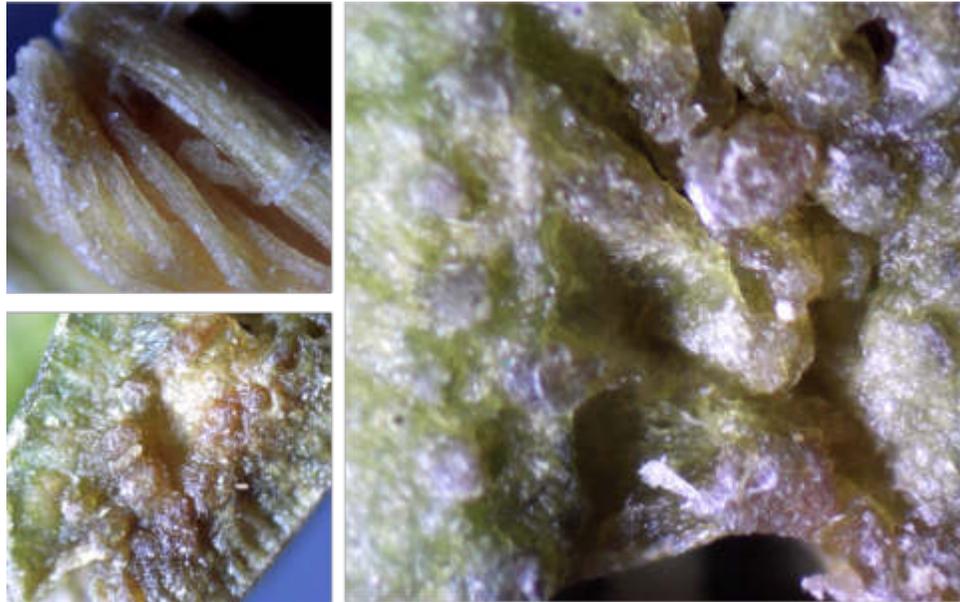


Figura 76 - Micrografía realizada a una muestra de agregado vegetal T/P (4X)

Para poder obtener conclusiones sobre la morfología generalizada de las muestras, se tomaron partículas representativas de cada tratamiento, a las cuales se les observaron cortes limpios y por ende caras planas [3][118].

Las micrografías en las figuras 72 a 76, demuestran los cambios morfológicos que han sufrido los agregados vegetales después de ser sometidos a los distintos tratamientos en estudio en donde se puede observar la retracción transversal que ocurre en las fibras con tratamiento de hornificación y de hidróxido de sodio debido a la eliminación de agua por secado en horno. Para el caso de las fibras con tratamiento de congelamiento, en la figura se observa que la distancia existente entre las fibras internas de la penca (constituyentes de la médula) se mantienen su posición y eso explicaría los fenómenos de reducción de conductividad térmica y densidad respecto a la muestra de referencia sin tratamiento. Algo similar ocurre en las fibras con tratamiento de parafina sólida, en donde puede observarse por el brillo superficial como este polímero forma un recubrimiento en la superficie de las partículas rellenando los poros más expuestos y permitiendo una disminución en su capacidad de absorción de agua.

En las imágenes de la figura 75, correspondientes al agregado T/NaOH, se puede observar que las fibras se encuentran más pulcras, lo cual es un efecto propio del tratamiento en que se eliminan impurezas superficiales [118]. El tratamiento de hornificación muestra que las fibras medulares se ordenan de

manera mas compacta con la eliminación del agua durante el proceso de secado provocando un mayor empaquetamiento de éstas. Las cavidades se van cerrando gradualmente conforme aumenta el número de ciclos y van perdiendo la capacidad de abrirse con la rehumidificación lo que consecuentemente reduce la capacidad de absorción de agua de la fibra [104].

## Evaluación de los tratamientos en la fabricación de mortero vegetal

Además de ser estudiadas las fibras en cuando a sus propiedades físicas por separado para cada uno de los tratamientos, fue importante evaluar su compatibilidad al ser incorporadas en una matriz a base de cemento CPO40R. Es por esto por lo que se diseñaron muestras estándares como se expuso en el capítulo de metodología para determinar el tratamiento más adecuado para este tipo de agregado.

### Peso volumétrico del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra

Los resultados del peso volumétrico obtenido para los especímenes de mortero vegetal fabricados con agregados sometidos a los distintos tratamientos en estudio se muestran en la gráfica de la figura 77.

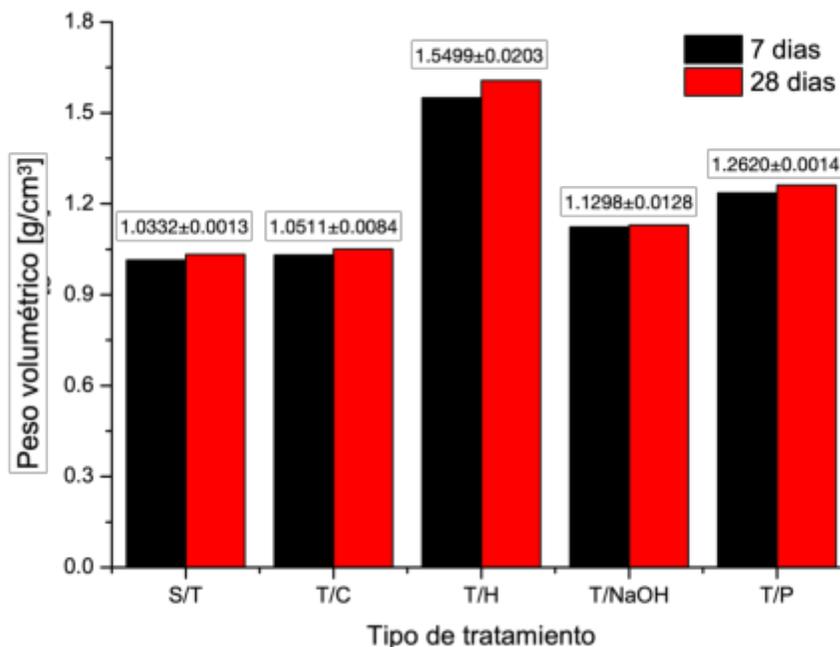


Figura 77 - Resultados del peso volumétrico sobre los especímenes de mortero vegetal fabricados con agregado sometido a distintos tratamientos

El peso volumétrico de las muestras se relaciona con la densidad aparente del agregado vegetal y la densificación de la matriz cementante. Un hecho importante que resulta de la fabricación de mortero

vegetal utilizando agregado lignocelulósico de Agave salmiana es la importante cantidad de saponinas y compuestos hidrosolubles que es capaz de extraer el agua en contacto con el agregado. Esto puede evidenciarse de manera contundente al momento de fabricar la mezcla y observar la espuma de saponina que se forma por el proceso de mezclado lo cual puede observarse en la figura 78 a) y b).

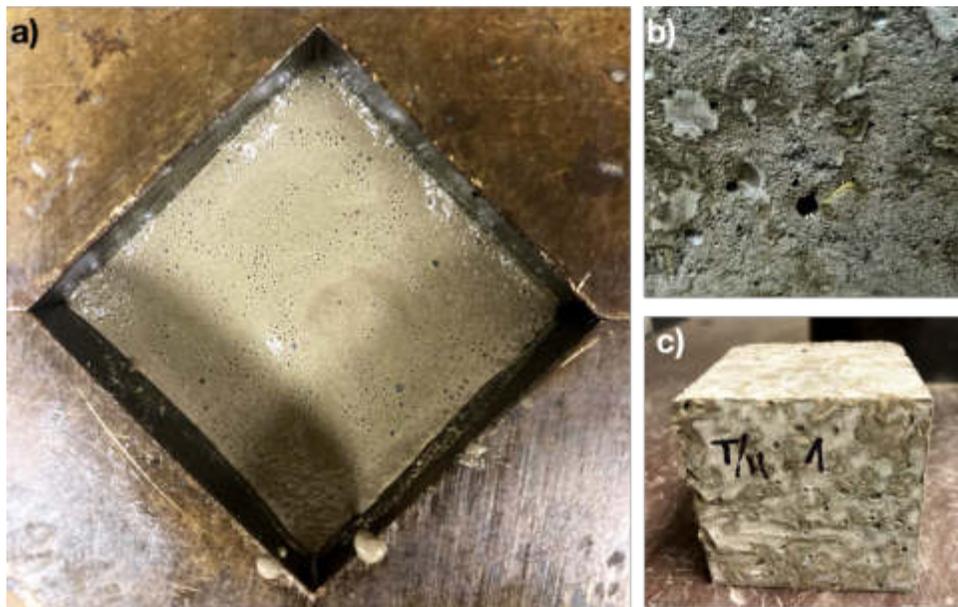


Figura 78 - a) fabricación de especímenes de mortero vegetal con presencia abundante de burbujas de aire; b) porosidad en matriz cementante producto de saponinas en el agregado vegetal; c) matriz cementante densificada para T/H

En la figura 78 a) puede observarse el efecto de la saponina presente en el agregado vegetal que es extraído por el agua de reacción del cemento y que genera burbujas de aire que quedan retenidas en la matriz cementante lo cual va en desmedro de la densificación del mortero y sus propiedades mecánicas de resistencia a la compresión. Esto puede observarse de igual manera en la figura 78 b) que corresponde a una muestra de mortero vegetal con agregado S/T en donde se observa la porosidad resultante debido a la presencia de las burbujas de aire. Sin embargo, en la figura 78 c), se observa un espécimen de mortero vegetal con agregado T/H en donde se aprecia que la pasta ha logrado una densificación adecuada y esto se ve reflejado en los resultados de la gráfica de peso volumétrico de la figura 77. Esto se debe a que durante el proceso de fabricación no se observó la presencia de burbujas de aire como en los demás casos en estudio. Si se compara el peso volumétrico del mortero vegetal con morteros o concretos estándares, se puede observar que con la incorporación del agregado vegetal este

parámetro disminuye considerablemente debido a la densidad aparente de las partículas de agregado [12].

### Conductividad térmica del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra

Los resultados de conductividad térmica obtenidos de los morteros vegetales fabricados con agregados sometidos a los distintos tratamientos en estudio se pueden observar en la gráfica de la figura 79.

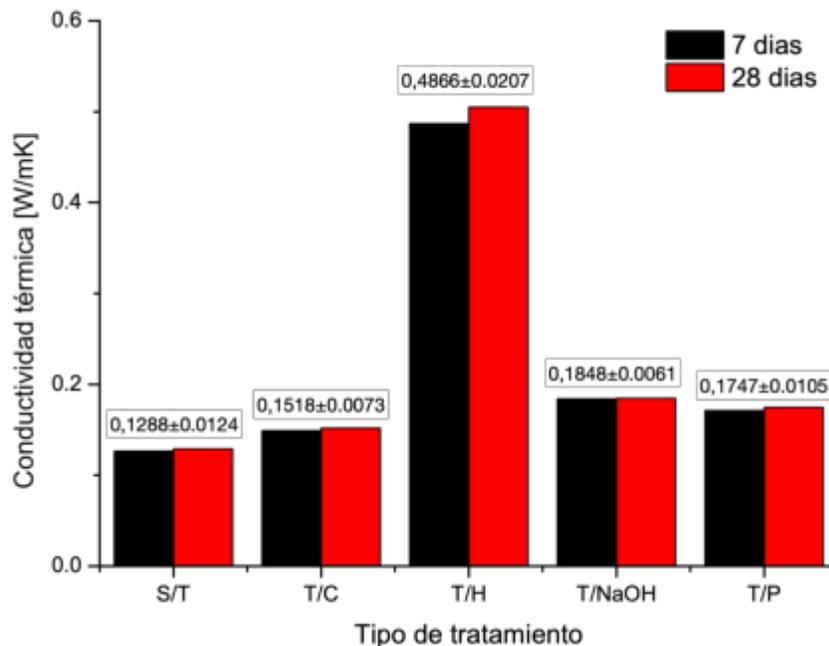


Figura 79 - Resultados de conductividad térmica de mortero vegetal con agregado sometido a diferentes tratamientos

A modo general, la incorporación de agregado lignocelulósico en el mortero fabricado ha reducido el peso volumétrico del material en una medida considerable y en consecuencia, se ha mejorado la conductividad térmica [12]. De acuerdo con los resultados expuestos en la gráfica de la figura 79, se puede observar que la conductividad térmica de los especímenes posee un comportamiento muy relacionado con el peso volumétrico obtenido. Este fenómeno ha sido reportado por diversos autores que han empleado agregados vegetales de diferentes naturalezas [13][86]. Puede observarse que el tratamiento de hornificación generó los valores de conductividad térmica más elevados del orden de 0.4866W/mK lo que corresponde a un 277.795% más que la muestra de referencia sin tratamiento. Se observa además que el comportamiento generalizado de las muestras con los distintos tratamientos lo que puede ser atribuido a la menor cantidad de burbujas producto de la acción de saponinas debido a la

acción individual de cada tratamiento, sin embargo, los niveles de conductividad térmica alcanzados son bastante mejorados en comparación con morteros convencionales, para los cuales la literatura estipula una conductividad térmica de 1.4W/mK [72].

La relación existente entre el peso volumétrico de los especímenes y la conductividad térmica se expone en el gráfico de la figura 80.

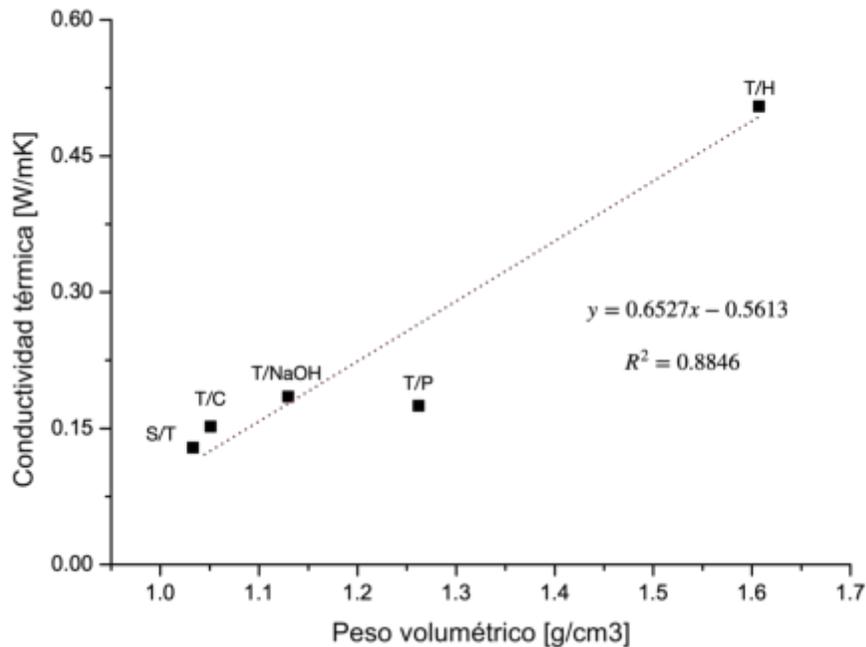


Figura 80 - Gráfico de relación existente entre el peso volumétrico y la conductividad térmica de los especímenes de mortero vegetal

El gráfico concuerda con la literatura científica en que las propiedades físicas de las matrices de base cementosa reforzadas con fibras naturales de origen vegetal están altamente influenciadas por el contenido de fibra. Se puede observar que la conductividad térmica de los materiales compuestos aumenta cuando se incrementa la densidad mostrando una relación directa entre la densidad de los materiales compuestos y la conductividad térmica. El aumento de los vacíos de aire conduce a la disminución de la densidad de los materiales resultantes, lo que produce una mayor resistencia térmica y una menor conductividad térmica [3][23][94].

### Resistencia a la compresión del mortero vegetal con los distintos tratamientos de la fibra

La resistencia mecánica obtenida por los especímenes de mortero vegetal fabricados con agregado sometido a los diferentes tratamientos que se están estudiando, queda expuesta en el gráfico de la figura 81.

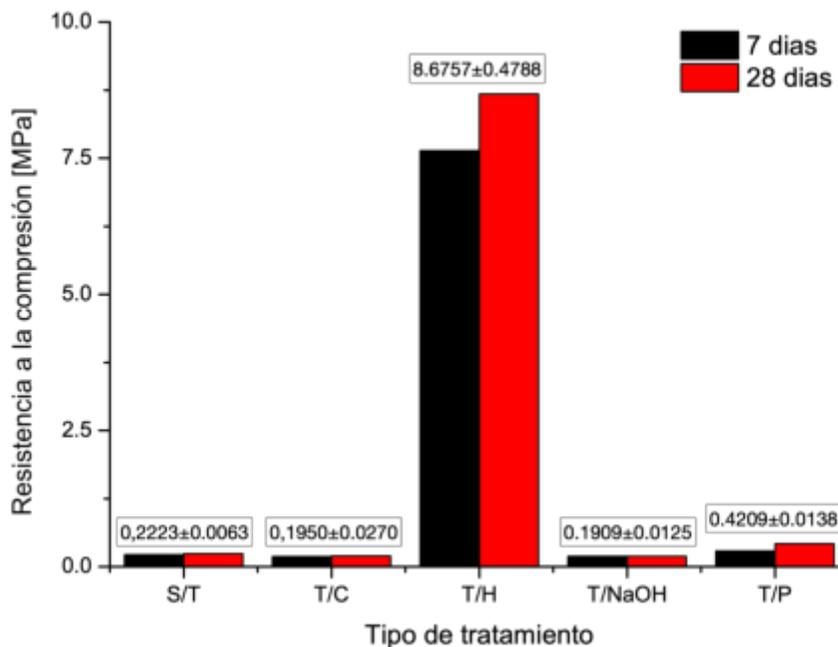


Figura 81 - Resultados de resistencia a la compresión del mortero vegetal fabricado con agregado sometido a distintos tratamientos

Si bien los resultados de densidad y peso volumétrico muestran que los especímenes fabricados con tratamiento de hornificación poseen propiedades físicas con valores más elevados debido a la menor cantidad de vacíos creados por la incorporación del agregado con este tratamiento [3][4], las propiedades mecánicas demuestran una variación respecto al caso de referencia con agregado S/T que posee una resistencia a la compresión de 0.2223MPa de un 3902.6991% con un valor de 8.6757MPa.

Los resultados obtenidos muestran que el tratamiento de hornificación permite una hidratación del cemento mucho más efectiva por los niveles de resistencia a la compresión alcanzados. Esto puede ser explicado debido a que el tratamiento de hornificación estipula 10 ciclos de humectación y secado lo que permite un lavado progresivo del agregado logrando la extracción de compuestos hidrosolubles, además de consecuencias sobre la estabilidad morfológica de las partículas frente a la exposición al agua involucrada en el proceso de fabricación del mortero vegetal. Estos antecedentes combinados, permiten que el agregado vegetal de Agave salmiana se comporte de una forma más inerte en el proceso de

mezclado con los demás componentes para la fabricación del mortero vegetal y por ende permite condiciones propicias para la hidratación adecuada del cemento lo que conlleva resultados óptimos de resistencia mecánica. El alto valor obtenido permite estipular que este tratamiento es altamente efectivo respecto a los demás tratamientos en estudio ya que como se mencionó anteriormente, este tipo de morteros no esta enfocado en aplicaciones estructurales por lo que la resistencia mínima aceptable es de 0.2MPa. Al tener aproximadamente un 30% del volumen ocupado por el agregado (valor estándar definido para todos los especímenes en estudio conforme a los valores de densidad aparente del agregado para cada tratamiento aplicado) y una resistencia tan superior al resto de los casos, se considera que este tratamiento merece ser estudiado en profundidad debido a que permite la incorporación de un volumen mayor de agregado vegetal, disminuyendo aún más la cantidad de pasta de cemento requerida y mejorando los valores de peso volumétrico y conductividad térmica.

### Espectrofotometría del agregado vegetal después de los tratamientos

Para comprobar los niveles de hidrosolubles extraídos, se realizó un ensayo de espectrofotometría en donde se comparó por medio de la coloración del agua en la que se mantuvo una muestra de agave durante un tiempo estándar. Los resultados obtenidos son categóricos y demuestran que el proceso de hornificación permite una extracción progresiva de estos compuestos permitiendo que se extraiga casi la totalidad de compuestos que pueden ser liberados al agua de reacción del mortero interfiriendo la reacción de hidratación e impidiendo la formación de gel C-S-H.

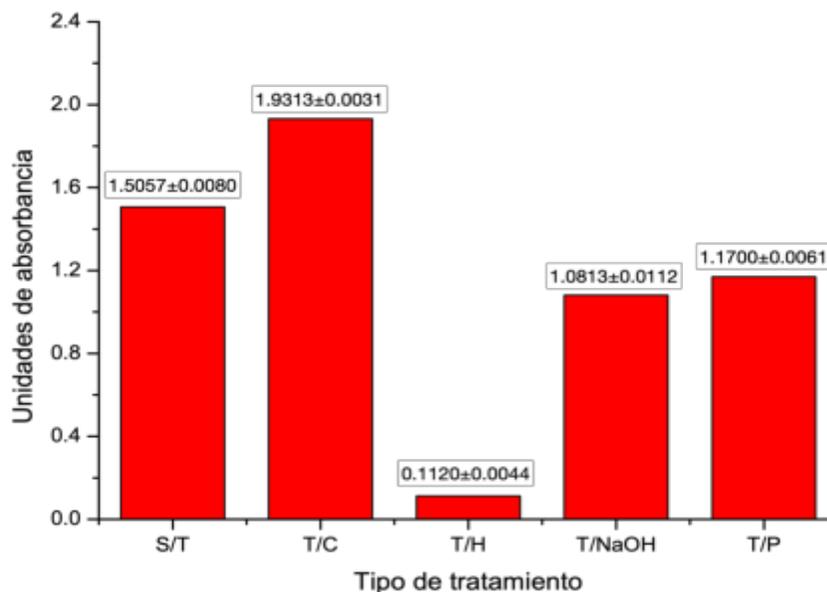


Figura 82 - Resultados de espectrofotometría para cada tratamiento en estudio

Como puede observarse en la gráfica de la figura 82, los resultados de absorbancia muestran que el tratamiento de hornificación resultó efectivo en la extracción de compuestos hidrosolubles que pueden intervenir con la reacción de hidratación del cemento Portland y esto se demuestra con el valor de 0.112 unidades de absorbancia similar al valor de referencia de 0.097 para una muestra de agua destilada, respecto a los demás tratamientos que reportan valores de entre 1.08133 y 1.93133 UA. Esto se hace aun más evidente en la fotografía de la figura 83 en donde se muestran comparativamente las muestras empleadas que son el resultado del sumergimiento de una muestra estándar de agregado vegetal en un tiempo de 2 horas en agua destilada a temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ .



Figura 83 - Imagen comparativa de hidrosolubles extraídos sobre una masa de agregado vegetal después de haber sido sumergida en agua durante dos horas

Si bien no es objeto de esta investigación, se puede mencionar en función de la literatura que la hidrólisis de fructanos podría ser una fuente abundante de oligosacáridos y monosacáridos como glucosa y fructosa. Los fructanos son la principal reserva de carbohidratos solubles en agua de algunas fibras vegetales y su contenido representa el principal componente de varias especies (35% a 70% base peso seco). Además, su hidrólisis puede liberar de 80% a 86% de fructosa y de 10% a 15% de glucosa; componentes que interfieren con las reacciones de hidratación del CPO [46].

## Análisis sobre el tratamiento de hornificación

### FTIR sobre la fibra tratada mediante hornificación

El gráfico de la figura 84 muestra un análisis FTIR de la muestra de agregado sometido al tratamiento de hornificación y su comparativo con la muestra de referencia del agregado sin tratamiento.

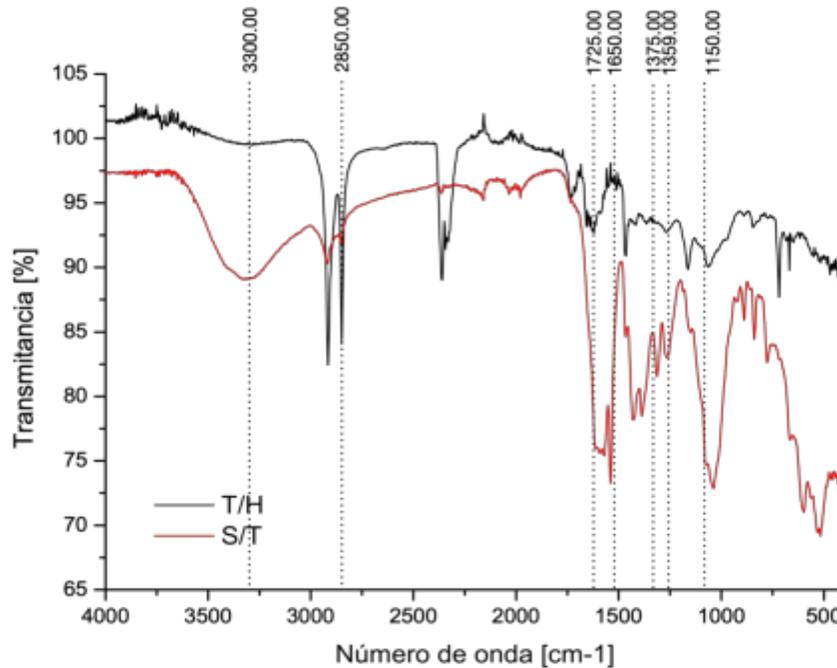


Figura 84 - FTIR comparativo entre las fibras T/H y S/T

El análisis de FTIR otorga una indicación rápida y cualitativa sobre el cambio en la estructura química del agregado vegetal antes y después del tratamiento de hornificación. El análisis FTIR muestra la desaparición de grupos funcionales debido a la descomposición de los compuestos poliméricos como acción del procedimiento de hidrólisis y secado del agregado vegetal. Este comportamiento sucede mediante otros mecanismos en fibras expuestas a soluciones alcalinas y que han sido reportadas en la literatura [52].

En el gráfico se puede observar una banda de absorción alrededor de  $3300\text{cm}^{-1}$  correspondiente al enlace O-H, que representa un estiramiento por vibraciones de celulosa y de enlaces de hidrógeno de los grupos hidroxilo, la cual se disipa considerablemente en las muestras sometidas al tratamiento. En el pico de  $2850\text{cm}^{-1}$  se aprecia una banda característica de alquilo C-H, en donde se tiene simétricas y asimétricas vibraciones de tensión de celulosa, el cual aumenta debido a la mayor exposición de este

componente por la degradación de su empaquetamiento. Se disminuyen considerablemente tres picos a  $1725\text{cm}^{-1}$  asociado a la disociación de los enlaces carbonilo (C=O), a los  $1646,9\text{cm}^{-1}$  asociado a la disociación del doble enlace carbono-carbono (C=C) y a los  $1376,6\text{cm}^{-1}$  por el grupo metilo ( $\text{CH}_3$ ). En la región de  $1150\text{cm}^{-1}$ , las absorciones pueden atribuirse principalmente a los hidratos de carbono C-O (celulosa y lignina) [116]. El pico a cercano al que se observa a los  $1650\text{cm}^{-1}$  en el espectro indica la absorción de agua en la celulosa cristalina, y esta banda disminuyó tras el tratamiento producto del empaquetamiento de la fibra por los ciclos de humectación y secado que favorecen la hidrofobicidad. La banda de absorción a  $1359\text{cm}^{-1}$  se asigna a la flexión C-H en la hemicelulosa y la lignina [48].

Estos resultados muestran una gran similitud entre la estructura química de las fibras antes y después del tratamiento debido a que no se altera la naturaleza de la materia prima ni se introducen sustancias químicas. Los resultados de FTIR indican una alteración en la estructura química de las fibras con y sin el tratamiento en donde la hidrólisis se encarga de extraer moléculas de hidrosolubles generando un lavado de la fibra como se mencionó anteriormente [118].

## **Análisis sobre la pasta de cemento del mortero vegetal**

### **Difracción de rayos X (DRX) de la pasta de cemento del mortero vegetal**

El gráfico de la figura 85 muestra de manera comparativa los resultados obtenidos del análisis DRX sobre la pasta de cemento en los morteros vegetales fabricados con agregado sometido a distintos tratamientos.

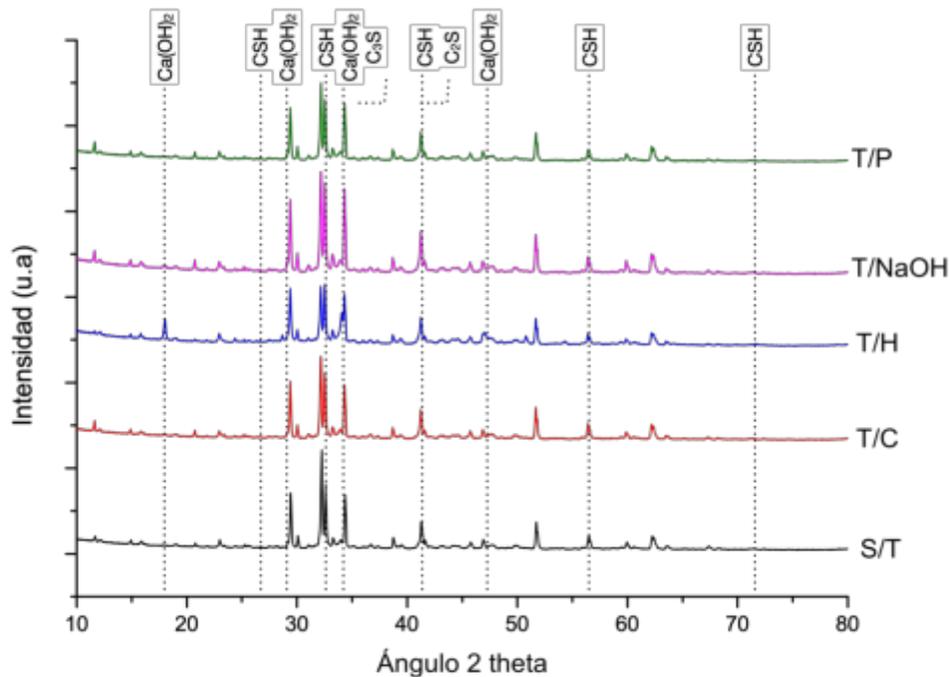


Figura 85 - Gráfica comparativa de mediciones de DRX sobre la pasta de cemento en cada uno de los casos de estudio de mortero vegetal. La gráfica de la figura 85 muestra los resultados comparativos de DRX para cada una de las muestras en estudio luego de 28 días de curado en horno. Los picos correspondientes al silicato de calcio hidratado (CSH) se observan en los valores de  $2\theta$  de  $26.8^\circ$ ,  $33.1^\circ$ ,  $40.9^\circ$ ,  $58.8^\circ$ ,  $70.8^\circ$  y  $81.3^\circ$ . La muestra de mortero vegetal con agregado T/H posee picos de productos de hidratación con alta intensidad que son atribuibles a la formación de gel C-S-H mejorando las propiedades mecánicas en las mezclas de mortero vegetal. Los resultados de la prueba DRX concuerdan con los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión [135].

Otro indicador del grado de hidratación de la pasta de cemento es mediante la detección de los picos asociados al  $\text{Ca(OH)}_2$  en los ángulos  $18.1^\circ$ ,  $28.7^\circ$ ,  $34.1^\circ$  y  $47.1^\circ$ ; la alita  $\text{C}_3\text{S}$  principalmente a los  $34.4^\circ$  y la belita  $\text{C}_2\text{S}$  a los  $32.1^\circ$ ,  $34.4^\circ$ , y  $41.2^\circ$  [87]. El aumento de los picos de  $\text{Ca(OH)}_2$  esta asociado a un aumento en su concentración debido que es un producto de la hidratación del CPO40R, y la reducción de los picos de alita y belita indican la aceleración de la hidratación del cemento [113].

### Espectroscopía infrarroja (FTIR) de la pasta de cemento del mortero vegetal

La gráfica de la figura 86 muestra los resultados obtenidos de la prueba de FTIR sobre la pasta de cemento utilizada en la fabricación de mortero vegetal para cada uno de los tratamientos en estudio a la edad de 28 días de curado en horno.

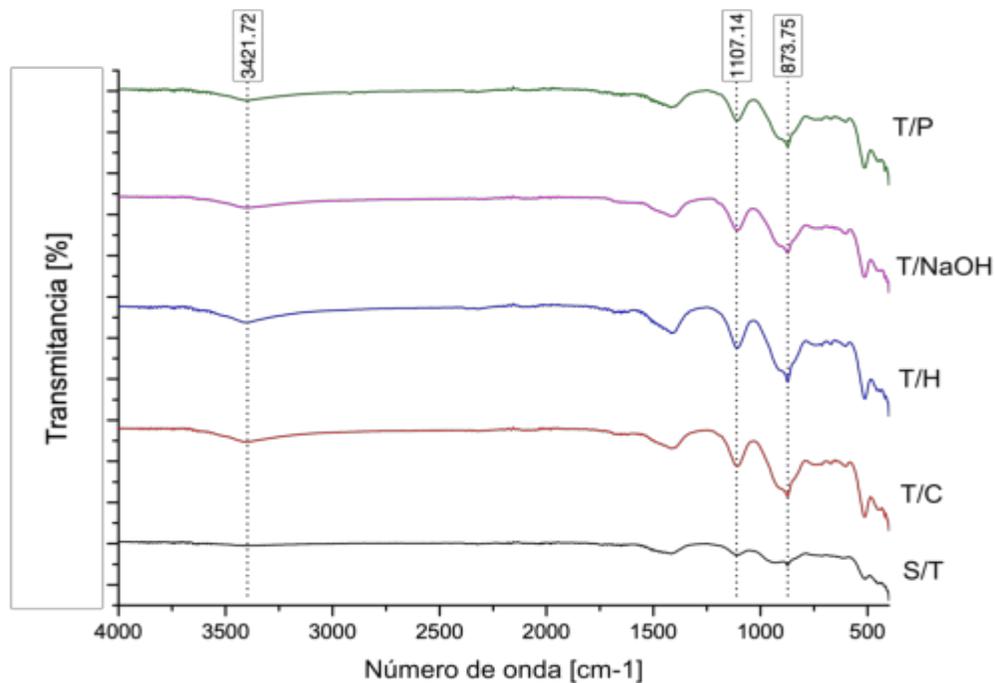


Figura 86 - Gráfica comparativa de FTIR sobre la pasta de cemento para cada uno de los casos de estudio de mortero vegetal

La interpretación de los antecedentes expuestos en la figura 86, puede llevarse a cabo mediante tres picos claros que aparecen en la gráfica de FTIR, asociados a productos de hidratación y que concuerdan con los resultados anteriormente descritos. El crecimiento del gel C-S-H se relaciona al pico que tiene lugar a los  $873.75\text{cm}^{-1}$ , en el cual se observa claramente una mayor intensidad para la gráfica de la pasta de cemento que incorporó agregados con tratamiento de hornificación. En segundo lugar, los sulfatos presentes en el CPO40R reaccionan con el agua produciendo entre otras cosas Etringita. El pico asociado a los sulfatos aparece en esta gráfica en los  $1107.14\text{cm}^{-1}$ , en donde de igual forma se observa una mayor intensidad para el mortero vegetal con agregado con tratamiento de hornificación. Por último, como se mencionó anteriormente, en el rango de  $3100\text{-}3700\text{cm}^{-1}$  aparecen las bandas correspondientes al agua y OH-, para lo cual se registra un pico, en la banda del OH- asociada a las moléculas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a los  $3421.72\text{cm}^{-1}$  que es mas pronunciada para el mortero que involucra el T/H. Todos los antecedentes

expuestos concuerdan con los resultados de resistencia mecánica en donde se observa que este parámetro mecánico está asociado a la generación de productos de hidratación en la pasta de cemento, cuyos compuestos son identificados mediante la prueba de FTIR realizada que muestra mayores intensidades relacionadas sobre la muestra de mortero vegetal que involucra el agregado con tratamiento de hornificación [44].

### Análisis termo gravimétrico (TGA) de la pasta de cemento del mortero vegetal

La gráfica de la figura 87 muestra los resultados de manera comparativa para el análisis TGA de las pastas de cemento en los morteros vegetales fabricados con agregado de Agave con diferentes tratamientos.

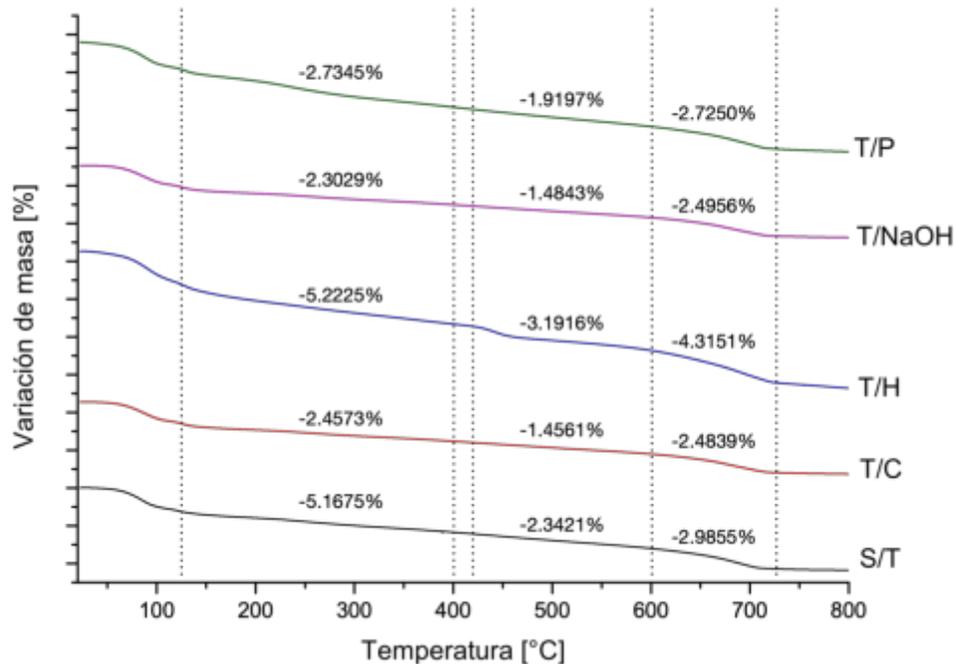


Figura 87 - Gráfica comparativa de TGA sobre la pasta de cemento para cada uno de los casos en estudio de mortero vegetal

El análisis TGA de las probetas de hormigón ofrece una evaluación cuantitativa de la pérdida de peso debida a reacciones endotérmicas como la deshidratación del C-S-H, la descomposición del CH y la descomposición del  $\text{CaCO}_3$ . Las gráficas de la figura 87 muestran que para la reacción endotérmica que tiene lugar a 125-400°C debido a la deshidratación del C-S-H y de las fases minoritarias de aluminatos y sulfoaluminatos (AFm y AFt), la pérdida de peso fue mayor en las probetas de mortero vegetal con el agregado con el tratamiento T/H con una disminución del 5.2225% de la masa lo que indica la presencia

de más gel de C-S-H en estas probetas. Esto evidencia los resultados de resistencia a la compresión obtenidos en donde se destaca las muestras con T/H y en el caso de las probetas con tratamiento T/P, si bien, los resultados son significativamente menores a los obtenidos por la muestra con tratamiento T/H, los resultados obtenidos son un 89.3387% superiores al de las muestras de referencia S/T [136].

Para la reacción endotérmica que ocurre entre los 420-600°C y que es atribuible a la descomposición del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  donde se desprende agua y queda el  $\text{CaO}$ , podemos observar que la muestra con T/H fue la que mayor variación de masa obtuvo con una reducción de un 3.1916% lo cual la diferencia de las demás muestras respecto a los productos de hidratación que se formaron y que le otorgan mejores propiedades de resistencia a la compresión. Lo mismo puede observarse respecto a la pérdida de masa producto de la descomposición del  $\text{CaCO}_3$ , desprendiéndose  $\text{CO}_2$  en forma de gas en temperaturas entre los 600 y 730°C, lo que indica una mayor presencia de este compuesto con una reducción de masa de un 4.3152% [136].

#### Observación morfológica sobre la pasta de cemento del mortero vegetal

Las fotografías de la imagen 88 muestra la zona interfacial entre el agregado vegetal con distintos tratamientos y la matriz a base de cemento Portland.

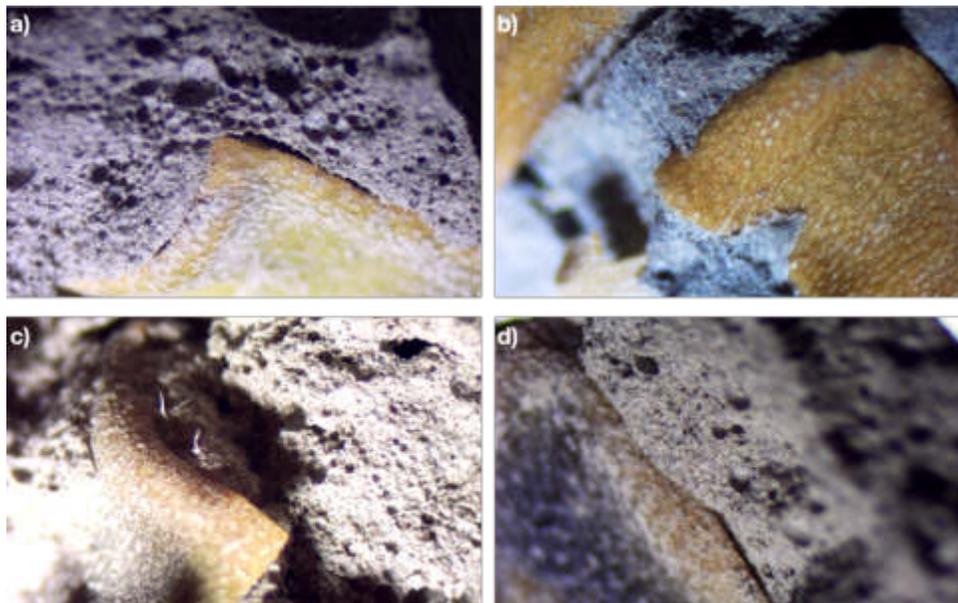


Figura 88 - Microscopía realizada sobre muestras de mortero vegetal. a) S/T; b) T/H; c) T/NaOH; d) T/P

De acuerdo con las imágenes obtenidas de la microscopía realizada sobre las muestras de mortero vegetal, se tiene que la muestra sin tratamiento posee una porosidad distribuida uniformemente sobre

toda la matriz debido a la acción de saponinas, además de un notorio desprendimiento de la fibra generando un espacio de aire. De acuerdo con la literatura, en la zona de transición se deposita una mayor cantidad de Portlandita y el tamaño de esta cavidad tiene directa relación con la relación agua/cemento empleada disminuyendo conforme aumenta el tiempo de curado y en cuanto menos sea la diferencia de contracción por desecación de las fibras vegetales respecto a la de la pasta de cemento [61].

El material cementante hidroliza y mineraliza las fibras vegetales. Esta hidrólisis provoca principalmente la pérdida de hemicelulosas, no afectando de manera considerable a la lignina. La imagen b) de la figura 88 que muestra un espécimen de mortero vegetal con tratamiento de hornificación permite observar que, debido a la eliminación de hidrosolubles, así como de la estabilidad morfológica generada por el tratamiento, se obtiene una buena adherencia en la zona entre las partículas y la matriz lo que concuerda con los resultados de caracterización física y mecánica. La mineralización se produce por la precipitación gradual de las partículas de hidróxido de calcio en la superficie y/o en el lumen de las fibras [87].

Por último, las muestras c) y d) correspondientes a morteros vegetales fabricados con agregado sometido a pruebas de NaOH y parafina respectivamente los cuales presentan una buena adhesión matriz agregado debido a la modificación superficial de las partículas y debido a la estabilidad volumétrica obtenida. Sin embargo, debido a que conservan compuestos hidrosolubles, en la matriz se observan constantes burbujas de aire que tuvieron incidencia en los resultados finales.

La disminución de la capacidad de absorción de las fibras permite que la precipitación de compuestos orgánicos solo ocurra en la superficie de las partículas de agregado. Posteriormente y conforme aumenta el curado de las muestras se produce un efecto de "bombeo" debido al aumento y reducción del tamaño de las partículas permitiendo la densificación de la superficie y el lumen de las fibras con productos de alta alcalinidad [87].

## Etapa 4 - Metodología experimental Taguchi

### Metodología experimental Taguchi

Las respuestas obtenidas de la matriz Taguchi realizada se observan en la tabla 31.

Tabla 31 - Variables de entrada y respuesta de la matriz Taguchi diseñada

Muestra	A	B	C	Respuesta 1	Respuesta 2	Respuesta 3
	Relación AV/PC	Relación A/C	Aditivo	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	f'cr [MPa]
1	0.43	0.35	0%	0.4675	1.5387	4.3916
2	0.43	0.55	1%	0.1119	1.2583	1.5841
3	2.33	0.35	1%	0.0786	0.6641	0.0407
4	2.33	0.55	0%	----	----	0.0078
5	0.36	0.35	0%	0.5056	1.6072	8.6757

Es importante mencionar que los resultados de conductividad térmica y peso volumétrico de la muestra 4 no se reportan debido a que las muestras resultantes presentaron dificultades para su manipulación, por lo que la medición de los parámetros no pudo llevarse a cabo. Debido a esto, se ha incluido como muestra 5 los resultados obtenidos del mortero vegetal fabricado para la evaluación de los tratamientos.

Otro aspecto importante es advertir que la optimización del material mediante la metodología experimental empleada requiere de un análisis más detallado para poder determinar con un mayor grado de precisión la influencia de las variables en las respuestas que se estudian, así como también la inclusión de otras variables que de acuerdo con la literatura intervienen en la obtención de respuestas mejoradas.

El principal parámetro en estudio corresponde a la variación de la relación AV/PC, incluyendo distintas cantidades de volumen de agregado vegetal en los especímenes estudiados. Los resultados de resistencia mecánica, densidad y conductividad térmica quedan expuestos en las gráficas de la figura 89 y 90.

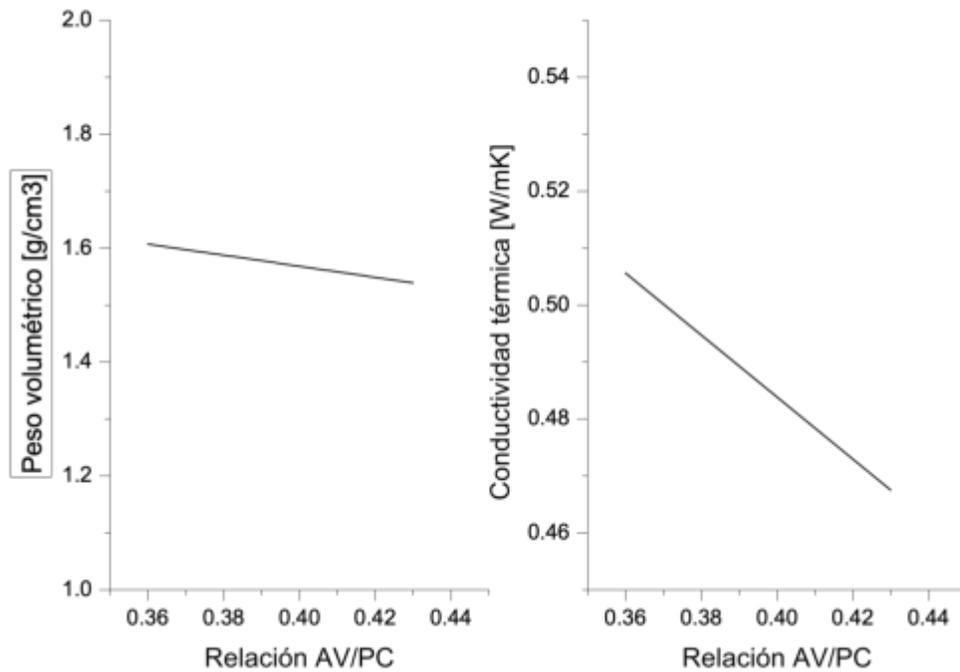


Figura 89 - Resultados de peso volumétrico y conductividad térmica sobre las muestras en estudio

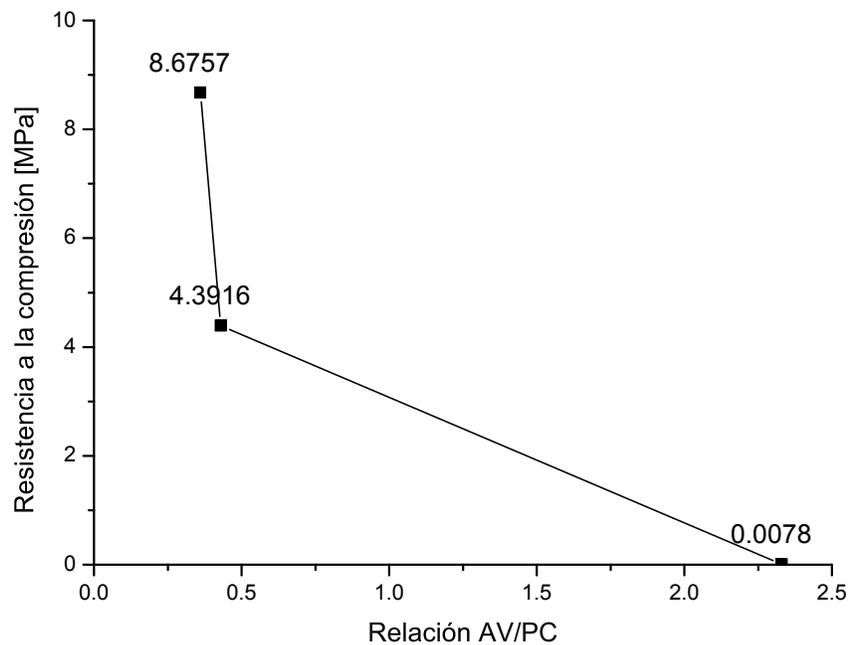


Figura 90 - Resultados de resistencia a la compresión de las muestras en estudio

Como se observa, la conductividad térmica disminuye con el aumento del contenido agregado vegetal con tratamiento de hornificación, comportamiento que muestra similar tendencia en los resultados de

densidad. Los trabajos de investigación anteriores sobre el efecto de las fibras naturales en las propiedades de los compuestos de base biológica indicaban que la incorporación de fibras tenía efectos positivos en la mejora de la capacidad de aislamiento. Esto puede atribuirse principalmente al aumento de la porosidad del compuesto debido a la formación de huecos entre la matriz y el refuerzo, así como también por la porosidad intrínseca del agregado vegetal.

La gráfica de la figura 91, muestra la relación que existe entre la densidad y la conductividad térmica y resistencia a la compresión de los especímenes fabricados.

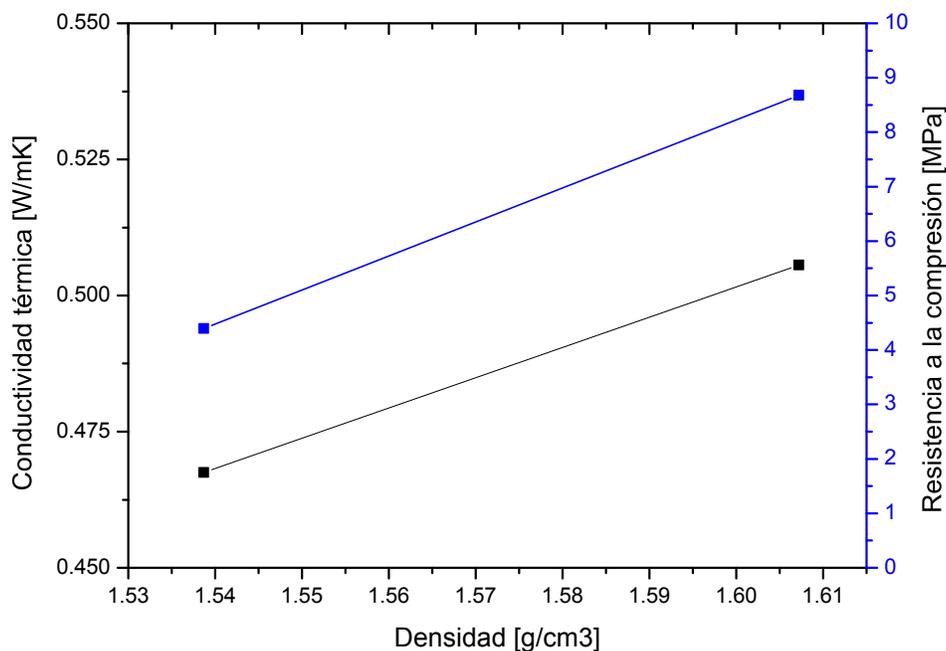


Figura 91 - Relación existente entre las variables de respuesta para las muestras en estudio

De acuerdo con el gráfico de la figura 91, las muestras con menor densidad tendrían una menor conductividad térmica y menor resistencia a la compresión. Los datos experimentales de conductividad térmica van de 0,4675 a 0,5056 W/mK para las muestras con relación agua/cemento de 0.35 y sin la inclusión de un aditivo reductor de agua, mientras que la densidad va de 1.5687 a 1.6072g/cm<sup>3</sup>. Una disminución de la densidad de aproximadamente un 4.2620% redujo la conductividad en un 7.5356% y la resistencia a la compresión en un 49.3805% por lo que se puede inferir que la variable más sensible a la incorporación de un mayor volumen de agregado vegetales es su resistencia mecánica.

En conclusión, con pequeñas dosis de ligante, tenemos un material con poca resistencia mecánica. Este material se comporta como una muestra de partículas sueltas con puentes de aglutinante que las conectan con un buen desempeño de aislación térmica. El comportamiento del material se asemeja progresivamente al de los materiales con grandes dosis de aglutinante. El comportamiento mecánico está guiado por la matriz del ligante. Para grandes dosis de aglutinante, el material es comparable a una matriz aglutinante continua en la que las partículas vegetales están enterradas. Las prestaciones mecánicas aumentan y tienden a las del aglutinante puro [5].

Con respecto a los otros parámetros en estudio se pueden tener conclusiones escuetas respecto al comportamiento. Se tiene por ejemplo que la incorporación del aditivo, si bien se observó anteriormente en la fabricación de especímenes de pasta de cemento que puede tener efectos favorables sobre las propiedades resistentes, en el caso de los morteros vegetales, debido a la extrema fluidez que se puede generar, favorece la migración de compuestos alcalinos dentro de las partículas teniendo resultados adversos para la resistencia mecánica debido a los escasos de ligante que conecte los agregados. Además, para relaciones de agua/cemento elevadas, se tiene que el agregado al absorber parte de la mezcla permite que este decante por lo que no habría una buena distribución del agregado vegetal en la matriz de pasta de cemento alterando los resultados obtenidos.

## **Etapas 5 – Estudios complementarios: Análisis energético potencial**

La construcción de viviendas que incluye materiales a base de fibras lignocelulósicas posee características positivas en cuanto a las condiciones térmicas. La razón particular a este hecho es la elevada porosidad de este tipo de fibras que da lugar a excelentes propiedades aislantes. Las propiedades térmicas reducen la amplitud de las variaciones de la temperatura del aire ambiente, mejorando al mismo tiempo el confort térmico al disminuir el calor superficial del material. Por lo tanto, el uso de estos materiales es un excelente medio para regular pasivamente la temperatura interior y, por lo tanto, disminuir las necesidades energéticas del edificio [5].

En cuanto a la aplicación de la matriz desarrollada en esta investigación se puede observar de acuerdo con el gráfico de la figura 92, que su conductividad térmica se redujo en un 64.2857% si se compara con un mortero convencional de acuerdo con los valores que se reportan en la literatura [72].

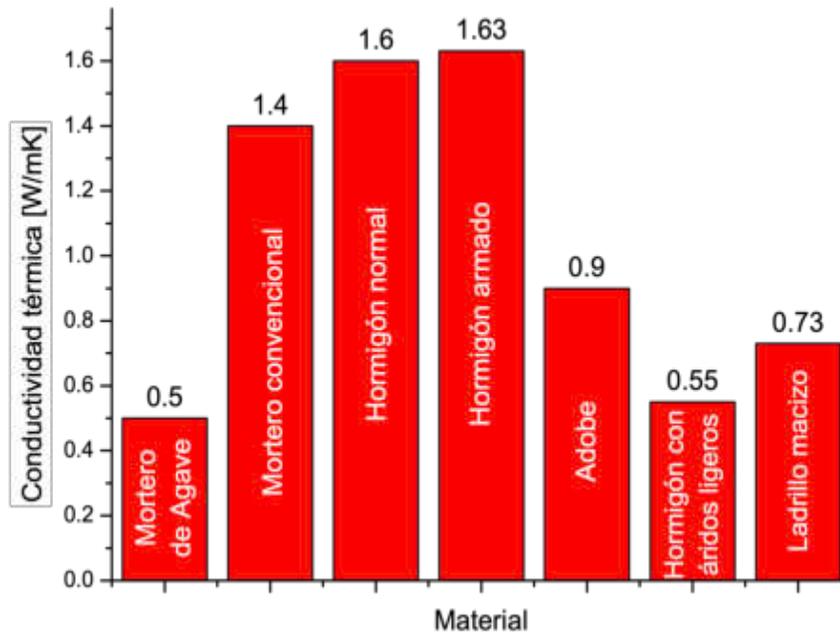


Figura 92 - Gráfica comparativa de la conductividad térmica del mortero vegetal con otros materiales convencionales de construcción [72].

Como se observa en el gráfico de la figura 92, incluso si se considera un valor poco favorable de conductividad térmica del compuesto desarrollado (un valor de 0.50 considerando una relación de AV/PC de 0.36) se puede ver que su capacidad aislante está incluso por debajo de los valores reportados para hormigones con agregados ligeros con densidad de  $1400\text{kg/m}^3$ , por lo que su aplicación en construcción permitiría obtener un buen rendimiento energético térmico de los recintos en que se emplee.

El gráfico de la figura 93, muestra los valores de transmitancia térmica obtenidos con el mortero de Agave salmiana y un mortero convencional en función de los valores de conductividad térmica respectivos y a medida que se aumenta el espesor del muro.

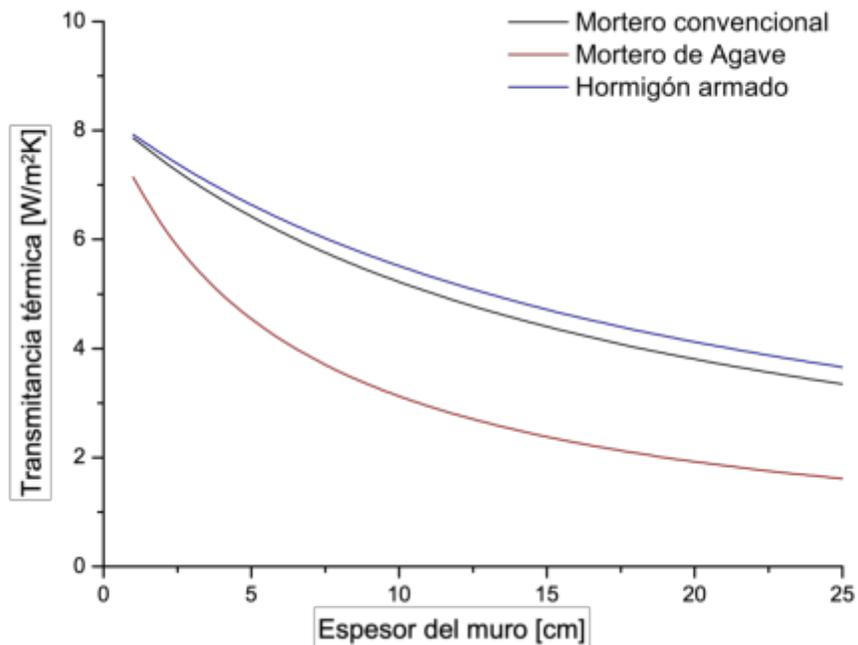


Figura 93 - Valores de transmitancia térmica para tres materiales de muro con espesores variables

Si se considera el material compuesto de manera maciza podemos ver que la transmitancia térmica obtenida por un elemento vertical para un metro cuadrado de superficie es considerablemente menor y conforme aumenta el espesor del elemento vertical, habrá una separación mayor de la brecha existente entre ambos materiales. Se tiene por ejemplo que, para un muro típico de 20 centímetros de espesor, la transmitancia obtenida con un mortero convencional es de  $3.8\text{W/m}^2\text{K}$ , mientras que con la utilización de un mortero a base de agregado vegetal de Agave este parámetro se reduciría en un 50% obteniendo un valor de  $1.92\text{W/m}^2\text{K}$ . Es importante la consideración de estos parámetros debido a que en muchas partes las normativas energéticas están dadas por la capacidad aislante de los elementos constituyentes de la envolvente térmica.

De acuerdo con información estadística una vivienda en ciudad de México posee una superficie promedio de  $270\text{m}^2$  los cuales se dividen en dos plantas cada una con una altura de 2.4 metros y si se considera un 30% de superficie vidriada se puede estimar que la vivienda posee en total  $156.17\text{m}^2$  de superficie de muros. En el estado de Nuevo León para un promedio de superficie de  $240\text{m}^2$  se calcula que la vivienda posee aproximadamente  $147.23\text{m}^2$  de muro. En función de estas estimaciones y de la temperatura media mensual se puede establecer un aproximado de la demanda energética de una vivienda con características promedios que utilice los materiales que se comparan mediante la

utilización del método de grados/días considerando una línea base de 22°C, valor típico estipulado en la literatura como temperatura de confort [137].

Estado de México	Nuevo León
$DC_{MA} = \frac{1.92 \text{ W/mK} \times 156.17\text{m}^2}{1000} \times 42688.8 \text{ GD}$	$DC_{MA} = \frac{1.92 \text{ W/mK} \times 147.23\text{m}^2}{1000} \times -22704 \text{ GD}$
$DC_{MC} = \frac{3.8 \text{ W/mK} \times 156.17\text{m}^2}{1000} \times 42688.8 \text{ GD}$	$DC_{MC} = \frac{3.8 \text{ W/mK} \times 147.23\text{m}^2}{1000} \times -22704 \text{ GD}$
$DC_{HA} = \frac{4.12 \text{ W/mK} \times 156.17\text{m}^2}{1000} \times 42688.8 \text{ GD}$	$DC_{HA} = \frac{4.12 \text{ W/mK} \times 147.23\text{m}^2}{1000} \times -22704 \text{ GD}$

Los resultados obtenidos del cálculo de demanda energética por muros de la vivienda se exponen en la tabla 32, de manera estandarizada por metro cuadrado de superficie de la vivienda establecida.

Tabla 32 - Resultados de demanda energética estandarizada para los casos de estudio

Estado	Mortero de Agave	Mortero convencional	Hormigón armado
Estado de México	47.4077 kWh/m <sup>2</sup> /año	93.8278 kWh/m <sup>2</sup> /año	101.7291 kWh/m <sup>2</sup> /año
Nuevo León	48.9322 kWh/m <sup>2</sup> /año	96.8449 kWh/m <sup>2</sup> /año	105.0003 kWh/m <sup>2</sup> /año

De acuerdo con los resultados, se tiene que la utilización del mortero de agave genera una reducción en la demanda energética producida por los muros de la vivienda equivalente a más del 50% de la demanda para viviendas construidas con concreto armado para los dos casos de estudio por lo que los resultados son óptimos y son la puerta de entrada para que este tipo de tecnologías sea considerado en la construcción futura de viviendas y extrapolada a otros estados de México. Además, de los ahorros energéticos potenciales que genera este tipo de materiales, es importante considerar también el confort ambiental en donde la oscilación térmica dentro de la vivienda se desprende de la curva de temperatura exterior generando mayor bienestar en los habitantes.

Debido al nivel de aislación los puentes térmicos geométricos permiten una temperatura mas elevada por lo que impide la aparición de otras patologías como la condensación intersticial, condensación superficial y la aparición de hongos.

Si bien los resultados permiten el cálculo estimativo de la demanda energética y los ahorros que se pueden obtener por la utilización de esta fibra natural en la fabricación del mortero vegetal, para tener antecedentes mas certeros al respecto es importante considerar a futuro proyectos de escalamiento en

donde la matriz desarrollada sea utilizada en prototipos que optimicen aun mas los resultados obtenidos y permitan datos reales para obtener conclusiones absolutas. También, es importante el estudio del comportamiento energético de la vivienda mas detallado mediante la utilización de software ya que si bien el método grado/día es ampliamente utilizado, solo se limita a la transferencia de calor por variación de la temperatura existente entre interior y exterior.

## **CAPÍTULO 7 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## Conclusiones generales

Los resultados de caracterización muestran que el material cementante empleado es apto para su utilización en la investigación. Además, los resultados muestran la naturaleza de los componentes que lo constituyen lo cual permite comprender su comportamiento para predecir propiedades del compuesto desarrollado.

Los resultados de la caracterización física, química y mecánica de la pasta de cemento en estado endurecido muestran como es el comportamiento del material cementante en función de las variables que se estudiaron. Lo que se concluye es que conforme aumenta el contenido de agua en la preparación de la pasta de cemento la resistencia mecánica decrece debido a una menor densificación de material, lo cual a su vez es favorable para las propiedades físicas de peso volumétrico y conductividad térmica debido a una mayor porosidad y por ende un mayor contenido de aire en la red de poros interconectados. También se observa de manera concluyente que el tipo de curado empleado tiene efectos importantes sobre los resultados debido a que la inmersión en agua saturada con cal genera un ambiente propicio para la generación de productos de hidratación los cuales tienen efectos sobre las propiedades mecánicas de material. Otro aspecto importante es el efecto que tiene la inclusión de un aditivo superfluidificante que en cantidades controladas favorece la dispersión de las partículas de cemento cuando entra en contacto con el agua favoreciendo la formación de gel C-S-H. Sin embargo, en cantidades excesivas puede resultar contraproducente por una fluidez exagerada que permitiría la decantación de los sólidos.

La caracterización del agregado vegetal permite conocer su composición elemental lo cual da indicios para investigaciones futuras de como sería su comportamiento frente a la exposición de matrices alcalinas. Las pruebas físicas aportaron los antecedentes para concluir que conforme las características de la naturaleza del agregado que se esta empleando no es recomendable el descarte ni de la cáscara ni de la médula de la penca de Agave salmiana. Esto debido a que la cáscara tiene un mejor comportamiento frente a la absorción de agua y la médula tiene un buen comportamiento frente a las propiedades de aislación térmica que puede transmitir al compuesto desarrollado.

Los valores de conductividad térmica de las partículas de agregado vegetal de Agave salmiana del orden de los 0.07W/mK permiten concluir que su utilización como refuerzo en una matriz para el desarrollo de

un compuesto, es óptima para obtener un material con propiedades térmicas mejoradas que aporte parámetros de eficiencia energética si se utiliza en construcción. Además, se confirma lo mencionado en la literatura científica que estipula una relación directa entre la conductividad térmica y la densidad aparente de las materias primas de origen vegetal.

La evaluación de los tratamientos permitió establecer las propiedades del agregado vegetal en donde se observan cambios morfológicos importantes respecto a la muestra de referencia sin tratamiento. Además, se determinó una disminución importante en la capacidad de absorción de agua de los agregados lo cual es beneficioso para propiciar una adecuada hidratación del cemento Portland. Los resultados de la evaluación del agregado vegetal incorporados en la matriz cementante son categóricos en señalar que el tratamiento de hornificación es el más adecuado para la fabricación de morteros vegetales utilizando partículas de penca de *Agave salmiana*, lo cual es atribuible directamente al lavado que se produce con la repetición de ciclos de humectación y secado hidrolizando y extrayendo compuestos hidrosolubles que interfieren en la reacción del cemento Portland y que reduce de manera significativa la resistencia de los compuestos que utilizan los otros tratamientos en estudio [2].

Un aspecto importante que se pudo reportar es la caracterización del tratamiento de congelamiento sobre las fibras que permiten reducir los parámetros de conductividad térmica y densidad aparente de la fibra. Si bien este tratamiento no obtuvo resultados óptimos en combinación con una matriz cementante, queda abierta la posibilidad de su estudio más detallado en investigaciones futuras para mejorar estos parámetros en materiales aislantes a base de fibras naturales vegetales.

La metodología experimental Taguchi permite estudiar el comportamiento de la conductividad térmica, el peso volumétrico y la resistencia mecánica conforme se modifican las variables de relación agua/cemento, el contenido volumétrico del agregado vegetal y la incorporación de un aditivo superfluidificante. Los resultados obtenidos muestran que el parámetro principal que determina las propiedades aislantes del compuesto resultante es la relación volumétrica entre el agregado vegetal y la pasta de cemento, en donde a un mayor contenido de fibra en la matriz, mejorarán las propiedades de aislación térmica y densidad, pero decrecen las propiedades de resistencia mecánica. Si bien con la matriz desarrollada se dan indicios del comportamiento del mortero vegetal, es importante indagar utilizando más niveles en cada una de las variables estudiadas, así como incorporar otras que de acuerdo con la literatura intervienen en los resultados de materiales lignocelulósicos.

El estudio energético realizado sobre la aplicación potencial de la matriz desarrollada en la presente investigación permite obtener resultados que comprueban que la utilización de tecnologías enfocadas en la sustentabilidad y eficiencia energética de las viviendas permiten ahorros energéticos asociados a la climatización. Además, la incorporación de fibras naturales vegetales permite una disminución en los impactos ambientales de los proyectos de edificación debido al ahorro potencial energético de energía ocupacional y una reducción de la energía contenida en la fabricación y disposición del material. Esto deberá comprobarse mediante investigaciones futuras que desarrollen un análisis de ciclo de vida sobre los materiales a base de materias primas lignocelulósicas.

Los materiales de construcción de origen biológico fabricados con agregados vegetales tienen un gran potencial en el mercado de los materiales de construcción de todo el mundo. Con los modernos diseños de edificios que exigen cada vez más sustentabilidad en la construcción y el mantenimiento, eficiencia en el funcionamiento y reducción de la huella de carbono, los materiales de construcción de base biológica pueden ayudar a satisfacer estas demandas. El material se puede cultivar de forma natural en abundancia en países con climas templados, ofrece un mejor aislamiento y absorbe el dióxido de carbono del medio ambiente. Sin embargo, los materiales de construcción de origen biológico suelen presentar una resistencia mecánica comparativamente baja, como se indica en diversos estudios científicos. Debido a esta baja resistencia mecánica, el material desarrollado en esta investigación no puede utilizarse habitualmente como material para formar los elementos portantes de un edificio, pero son muy adecuados para formar cerramientos que conforman la envolvente térmica.

Como es de esperar con un material nuevo en el contexto latinoamericano, se ha investigado poco sobre cómo utilizarlo de la mejor manera posible, sobre todo en lo que respecta a cómo aprovechar sus características naturales, bajas en carbono, así como su capacidad mecánica. Estas características naturales reducen la huella de carbono de un edificio y mejoran el aislamiento, tanto térmico como acústico. Estas características son el principal argumento para seguir investigando este material, y cómo puede utilizarse mejor en la industria de la construcción [5].

Como conclusión, la alta disponibilidad y el bajo coste de los residuos de origen vegetal no comerciales pueden constituir una buena oportunidad para una propuesta seria de materiales sostenibles para el aislamiento térmico en la construcción [23].

## Recomendaciones para investigaciones futuras

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación se establecen las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras:

- De acuerdo con investigaciones similares, es importante estudiar el efecto del tamaño de las partículas de agregado vegetal en su incorporación en matrices cementantes a modo de obtener mejores propiedades térmicas del compuesto resultante [85].
- Es importante estudiar el módulo de Young en este tipo de concretos considerando las propiedades intrínsecas del agregado vegetal de Agave para establecer deformaciones admisibles frente al sometimiento de sollicitaciones mecánicas [85].
- Se hace necesario estudiar el potencial efecto sobre el ACV del material en comparación con los morteros convencionales. Según estudios publicados, existe un impacto favorable sobre el efecto invernadero; ya que los concretos vegetales constituyen un interesante efecto absorbente de carbono durante una duración de al menos 100 años. Con el tiempo, el CO<sub>2</sub> almacenado con el concreto vegetal se devolverá a la atmósfera [5].
- Es importante el estudio de la durabilidad de los compuestos a base de fibras lignocelulósicas ya que, de acuerdo con lo reportado en la literatura, la degradación de la fibra por la exposición a un ambiente alcalino puede tener efectos beneficiosos o perjudiciales sobre las propiedades de interés que se quieren mejorar con la incorporación de fibras naturales. La degradación permite obtener una mayor cantidad de cavidades contenedoras de aire que favorecen los resultados de aislación térmica. Sin embargo, en caso de que la fibra se utilice como refuerzo mecánico, el deterioro de la fibra generaría pérdida de las propiedades mecánicas en el tiempo. Los principales retos para el futuro próximo son mejorar aún más la durabilidad y las prestaciones mecánicas de estos compuestos sin aumentar los costes de producción, al tiempo que se desarrollan tecnologías ecológicas [2].
- Es deseable la investigación futura sobre las posibles formas de mejorar la calidad de las fibras naturales, lo que conlleva cambios en las propiedades de los materiales y sus posibles aplicaciones futuras en varias industrias basadas en los compuestos que se pueden desarrollar con su inclusión lo que se consideraría una base sólida para impulsar el desarrollo sustentable en la producción de compuestos [52].

## **CAPÍTULO 8 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] V. Sabathier, C. Magniont, G. Escadeillas, and C. A. Juárez, “Flax and hemp fibre reinforced pozzolanic matrix: evaluation of impact of time and natural weathering,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 11, pp. 1403–1417, 2017.
- [2] M. Ardanuy, J. Claramunt, and R. D. Toledo Filho, “Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 115–128, 2015.
- [3] C. Magniont, G. Escadeillas, M. Coutand, and C. Oms-Multon, “Use of plant aggregates in building ecomaterials,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 16, no. SUPPL. 1, pp. 37–41, 2012.
- [4] N. K. Krishna, M. Prasanth, R. Gowtham, S. Karthic, and K. M. Mini, “Enhancement of properties of concrete using natural fibers,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 11, pp. 23816–23823, 2018.
- [5] S. Amziane and M. Sonebi, “Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate,” *RILEM Tech. Lett.*, vol. 1, p. 31, 2016.
- [6] A. F. Abd Rashid and S. Yusoff, “A review of life cycle assessment method for building industry,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 244–248, 2015.
- [7] H. Acevedo Agudelo, A. Vásquez Hernández, and D. A. Ramírez Cardona, “Sostenibilidad: actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia,” *Gestión y Ambient.*, vol. 15, no. 1, p. 14, 2012.
- [8] F. de A. Silva, B. Mobasher, and R. D. T. Filho, “Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 10, pp. 721–730, 2009.
- [9] D. Meadows, D. Meadows, J. Randers, and W. Behrens, *The Limits to Growth*. 1972.
- [10] SEMARNAT, “Emisión nacional de gases de efecto invernadero,” 2014. [Online]. Available: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/05\\_atmosfera/5\\_2\\_2.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/05_atmosfera/5_2_2.html).
- [11] Comisión europea, “Informe de situación sobre la acción por el clima, incluidos el informe sobre el funcionamiento del mercado europeo del carbono y el informe sobre la revisión de la Directiva 2009/31/CE, relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono,” *Parlamento europeo*, 2015. .
- [12] C. Becchio, S. P. Corgnati, A. Kindinis, and S. Pagliolico, “Improving environmental sustainability of concrete products: Investigation on MWC thermal and mechanical properties,” *Energy Build.*, vol. 41, no. 11, pp. 1127–1134, 2009.
- [13] R. Belakroum *et al.*, “Design and properties of a new sustainable construction material based on

- date palm fibers and lime,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 330–343, 2018.
- [14] E. Peris Mora, “Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 3, pp. 1329–1334, 2007.
- [15] A. P. Arena and C. De Rosa, “Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza - Argentina,” *Build. Environ.*, vol. 38, no. 2, pp. 359–368, 2003.
- [16] F. Mohammadkazemi, K. Doosthoseini, E. Ganjian, and M. Azin, “Manufacturing of bacterial nanocellulose reinforced fiber-cement composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 958–964, 2015.
- [17] A. Mohanty, M. Misra, L. Drzal, S. Selke, B. Harte, and G. Hinrichsen, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction*. 2005.
- [18] Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio Climático, *Cambio Climático*, vol. 32, no. 2. 2009.
- [19] Sociedad Mexicana de Física, “Energía en Edificaciones,” *Rev. Mex. Física*, vol. 59, no. 2, pp. 44–51, 2013.
- [20] A. Lazzaretto *et al.*, “The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. December 2016, pp. 912–932, 2016.
- [21] “La climatización en el consumo de energía (P1) / 2.” [Online]. Available: <https://www.especificarmag.com.mx/la-climatizaci-n-en-el-consumo-de-energ-a--p1----2.html>. [Accessed: 23-Oct-2019].
- [22] M. McNeil, S. Castellanos, D. Ponce De Leon Barido, and P. Sanchez Pérez, *Mexico space cooling electricity impacts and mitigation strategies*. 2018.
- [23] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, and A. Gherabli, “Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation,” *Energy Build.*, vol. 66, pp. 267–273, 2013.
- [24] J. F. R. Lara, “Activación de Sistemas Binarios y Ternarios Base cemento Portland con Residuos Agro-Industriales,” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015.
- [25] K. Cury R, Y. Aguas M, A. Martinez M, R. Olivero V, and L. Chams Ch, “Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento,” *Rev. Colomb. Cienc. Anim. - RECIA*, vol. 9, no. S, p. 122, 2017.

- [26] “La producción del Mezcal y los destilados de agave - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dvRJgpORh1g>. [Accessed: 04-Nov-2019].
- [27] K. Gómez-Cuevas, A. Delgado-Cruz, and D. Palmas-Castrejón, “Originalidad del tequila como símbolo de identidad mexicana. Percepción del turista-consumidor a partir de su exportación,” *Rev. RIVAR*, vol. 7, no. 21, pp. 59–80, 2020.
- [28] H. M. Núñez, L. F. Rodríguez, and M. Khanna, “Agave for tequila and biofuels: An economic assessment and potential opportunities,” *GCB Bioenergy*, vol. 3, no. 1, pp. 43–57, 2011.
- [29] Consejo regulador de Tequila, “Informacion estadistica de la produccion de tequila,” *CTR Web*, 2020. .
- [30] A. López-López, G. Davila-Vazquez, E. León-Becerril, E. Villegas-García, and J. Gallardo-Valdez, “Tequila vinasses: Generation and full scale treatment processes,” *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 9, no. 2, pp. 109–116, 2010.
- [31] J. Gallardo Valdez, “Industria del tequila y generación de residuos,” *Ciencia y desarrollo*, 2019. .
- [32] A. Saldaña Robles, R. J. Serwatowski Hlawinska, N. Saldaña Robles, C. Gutiérrez Vaca, J. M. Cabrera Sixto, and S. García Barrón, “Determinación de algunas propiedades físicas de Agave tequilana Weber para mecanizar la cosecha,” *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, vol. 3, no. 3, pp. 451–465, 2018.
- [33] SAGARPA, “Agave tequilero y mezcalero Mexicano,” 2017.
- [34] J. M. Paris, J. G. Roessler, C. C. Ferraro, H. D. Deford, and T. G. Townsend, “A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 121, pp. 1–18, 2016.
- [35] P.-C. Aïtcin, *Binders for durable and sustainable concrete*. Taylor & Francis, 2008.
- [36] C. R. Gagg, “Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 40, pp. 114–140, 2014.
- [37] American Society of Testing and Materials, “ASTM C150/ C150M-15 Standard specification for Portland cement,” *ASTM Int.*, vol. i, no. C, pp. 1–9, 2015.
- [38] Andrzej M.Brandt, “Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering,” *Compos. Struct.*, vol. 86, no. 1–3, pp. 3–9, 2008.
- [39] J. W. Bullard *et al.*, “Mechanisms of cement hydration,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp.

1208–1223, 2010.

- [40] K. L. Scrivener and A. Nonat, “Hydration of cementitious materials, present and future,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 651–665, 2011.
- [41] K. L. Scrivener, “Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: Understanding and quantification,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 8, pp. 935–945, 2004.
- [42] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Panarese, and J. Tanesi, *Diseño y control de mezclas de concreto*. 2004.
- [43] G. Guevara Fallas, C. Hidalgo Madrigal, M. Pizarro García, I. Rodríguez Valenciano, L. D. Rojas Vega, and G. Segura Guzmán, “Efecto de la variación agua/cemento en el concreto,” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 25, no. 2, p. 80, 2012.
- [44] T. Piqué and A. Vasquez, “Uso De Espectroscopía Infrarroja Con Transformada De Fourier (Ftir) En El Estudio De La Hidratación Del cemento,” *Concreto y Cem. Investig. y Desarro.*, vol. 3, no. 2, pp. 62–71, 2012.
- [45] S. Saval, “Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado , Presente y Futuro,” *BioTecnología*, vol. 16, no. 2, pp. 14–46, 2012.
- [46] R. Mythili, P. Venkatachalam, P. Subramanian, and D. Uma, “Characterization of bioresidues for biooil production through pyrolysis,” *Bioresour. Technol.*, vol. 138, pp. 71–78, 2013.
- [47] C. Juarez, “Concreto base cemento Portland reforzados con fibras naturales (agave lechuguilla), como materiales para construccion en mexico,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2002.
- [48] M. . Sanjay, P. Madhu, M. Jawaid, P. SenthamaraiKannan, S. Senthil, and S. Pradeep, “Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 566–581, 2017.
- [49] A. Arevalo-Gallegos, Z. Ahmad, M. Asgher, R. Parra-Saldivar, and H. M. N. Iqbal, “Lignocellulose: A sustainable material to produce value-added products with a zero waste approach—A review,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 99, pp. 308–318, 2017.
- [50] J. J. Locane, “Fundamentos: Material lignocelulosico,” in *Miradas locales en tiempos globales*, 2019, pp. 23–96.
- [51] C. M. Clemons, “Natural Fibers,” in *Functional Fillers for plastics*, 2010, pp. 213–223.
- [52] M. . Sanjay, J. Parameswaranpillai, M. Jawaid, A. Khan, C. I. Pruncu, and S. Siengchin, “A

comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 207, no. November 2018, pp. 108–121, 2018.

- [53] G. Vidal and S. Hormazabal, *Las fibras naturales y sus aplicaciones*. 2016.
- [54] A. Castillo *et al.*, “Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulosicos,” *Rev. Iberoam. Polim.*, vol. 13, no. 4, pp. 140–150, 2012.
- [55] S. Amziane, F. Collet, S. Report, and R. T. Committee, *Bio-aggregates Based Building Materials*, vol. 23. 2017.
- [56] Y. Piñeros-Castro, *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica: algunas experiencias de investigación en Colombia*. 2014.
- [57] R. E. Ely and L. A. Moore, “The Composition of Holocellulose Prepared from Various Forages and the Corresponding Feces,” *J. Dairy Sci.*, vol. 39, no. 12, pp. 1706–1711, 1956.
- [58] S. Kestur G., T. H. S. Flores-Sahagun, L. P. Dos Santos, J. Dos Santos, I. Mazzaro, and A. Mikowski, “Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 45, pp. 153–161, 2013.
- [59] L. Segal, J. J. Creely, A. E. Martin, and C. M. Conrad, “An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer,” *Text. Res. J.*, vol. 29, no. 10, pp. 786–794, 1959.
- [60] H. V. Scheller and P. Ulvskov, “Hemicelluloses,” in *Annual Review of Plant Biology*, vol. 61, no. 1, 2010, pp. 263–289.
- [61] V. Agopyan, H. Savastano, V. M. John, and M. A. Cincotto, “Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 527–536, 2005.
- [62] V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, K. Saïdi, and H. De Baynast, “Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 2, pp. 231–241, 2012.
- [63] J. E. Carmona, S. I. Mussatto, D. Castillo-Quiroz, T. K. Morales-Martínez, and L. J. Ríos-González, “Propiedades químicas, estructurales y funcionales de la lechuguilla (Agave lechuguilla Torr.),” *Rev. Mex. Ciencias For.*, vol. 8, no. 42, pp. 100–122, 2018.

- [64] D. Castillo Quiroz, J. Trinidad Sáenz Reyes, M. Narcia Velasco, and J. Antonio Vázquez Ramos, "Propiedades fisico-mecánicas de la fibra de Agave lechuguilla Torr. de cinco procedencias bajo plantaciones," *Rev. Mex. ciencias For.*, vol. 4, no. 10, pp. 78–91, 2013.
- [65] S. M. Velásquez Restrepo, G. J. Pelaéz Arroyave, and D. H. Giraldo Vásquez, "Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica : una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos Use of vegetable fibers in polymer matrix composites : a review," *SENA Cent. Nac. Asist. Técnica a la Ind.*, pp. 77–86, 2016.
- [66] P. Atkins, T. Overton, J. Rourke, M. Weller, and F. Armstrong, "Shriver and Atkins' Inorganic Chemistry," p. 864, 2009.
- [67] H. Gutierrez and R. De la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*, Segunda., vol. 46, no. 5. 2008.
- [68] M. J. Cimbala, "Taguchi Orthogonal Arrays," *Instrumentation, Meas. Stat.*, no. September, pp. 4–6, 2014.
- [69] E. Yacuzzi, F. Martin, H. M. Quiñones, and M. J. Popovsky, "El diseño experimental y los métodos de Taguchi: Conceptos y aplicaciones en la industria farmacéutica," *Econstor*, 2004.
- [70] M. E. Raffino, "Calor," 2021. [Online]. Available: <https://concepto.de/calor/>.
- [71] A. Martín Domingo, *Apuntes de transferencia del calor*. 2018.
- [72] NCh853, *Acondicionamiento térmico - Envoltorio térmico de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas*. 2007.
- [73] E. Reynoso Herrera, "Análisis térmico," *Facultad de Química, UNAM*, 2020. .
- [74] J. Rodríguez, "Técnicas de difracción y termogravimetría para la determinación estructural de materiales," *Innovación y Exp. Educ.*, no. N° 39, p. 10, 2011.
- [75] I. Barroso, "Termogravimetría. Fundamentos y Aplicaciones.," no. April, 2020.
- [76] "Espectroscopia Infrarroja - Caracterización de Materiales Cristalinos." .
- [77] Khan Academy, "Introducción a espectroscopia infrarroja." .
- [78] J. J. Ramachandran, V.S.; Beaudoin, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. 2001.
- [79] M. Cervera Ruiz and E. Blanco Díaz, *Resistencia de materiales*, vol. 19, no. 2. 2015.
- [80] E. P. Popov, "Mecánica de Sólidos," *Prentice Hall. Inc.*, vol. 2. p. 888, 1999.
- [81] Ibertest, "Ensayo de compresión," 2021. .

- [82] H. B. Chui, B. T. Miramira, P. L. Olivera, and J. H. Jacay, “De Fluorescencia De Rayos X,” 2009. .
- [83] L. A. Vaca Arciaga, “Evaluacion del grado de envejecimiento del concreto en el desempeño de tratamientos superficiales con nanoparticulas base silicio,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2013.
- [84] A. Flores Ledesma, F. Barcelo Santana, L. Bucio Gaindo, J. A. Arenas Alatorre, and J. L. Ruvalcaba Sil, “Análisis químico elemental y de fases por medio PIXE, DSC, TGA y DRX en MTA Angelus y un cemento Portland blanco,” *Rev. Odontol. Mex.*, vol. 20, no. 3, pp. 187–192, 2016.
- [85] C. Niyigena *et al.*, “Variability of the mechanical properties of hemp concrete,” *Mater. Today Commun.*, vol. 7, pp. 122–133, 2016.
- [86] M. Chabannes, V. Nozahic, and S. Amziane, “Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 6, pp. 1815–1829, 2015.
- [87] M. Ardanuy, J. Claramunt, J. A. García-Hortal, and M. Barra, “Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers,” *Cellulose*, vol. 18, no. 2, pp. 281–289, 2011.
- [88] M. Ali, A. Liu, H. Sou, and N. Chow, “Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 814–825, 2012.
- [89] M. R. Mansor and S. M. Sapuan, *Concurrent Conceptual Design and Materials Selection of Natural Fiber Composite Products*. 2018.
- [90] B. de B. Paulien, J. Knut-Hakan, S. Kenneth, and N. Christer, “Mechanical properties of lime – hemp concrete containing shives and fibres,” *Biosyst. Eng.*, vol. 103, pp. 474–479, 2009.
- [91] H. Savastano, P. G. Warden, and R. S. P. Coutts, “Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 5, pp. 379–384, 2000.
- [92] V. Anggraini, A. Asadi, B. B. K. Huat, and H. Nahazanan, “Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 59, pp. 372–381, 2015.
- [93] B. Seng, C. Magniont, and S. Lorente, “Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties,” *J. Build. Eng.*, vol. 24, no. July, pp. 0–1, 2019.
- [94] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, and L. Goudet, “Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (‘hempcrete’) manufactured by a projection process,” *Constr. Build.*

- Mater.*, vol. 22, no. 10, pp. 2116–2123, 2008.
- [95] C. Magniont, “Contribution à la formulation et à la caractérisation d’un écomatériau de construction à base d’agroressources,” Université de Toulouse, 2010.
- [96] C. M. Helepiciuc, M. Barbuta, and A. A. Serbanoiu, “Characterization of a lightweight concrete with sunflower aggregates,” *Procedia Manuf.*, vol. 22, pp. 154–159, 2018.
- [97] F. Tian, Y. Pan, and Z. Zhong, “A long-term mechanical degradation model of unidirectional natural fiber reinforced composites under hydrothermal ageing,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 142, pp. 156–162, 2017.
- [98] G. Fincheira and C. Ormazabal, “Estado del desarrollo de los materiales aislantes en base a fibras naturales,” Universidad de La Frontera, 2015.
- [99] A. Peschard *et al.*, “Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 26, no. 8, pp. 1439–1445, 2006.
- [100] J. S. Laskowski, Q. Liu, and C. T. O’Connor, “Current understanding of the mechanism of polysaccharide adsorption at the mineral/aqueous solution interface,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 84, no. 1–4, pp. 59–68, 2007.
- [101] A. Poursaee and C. M. Hansson, “Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 7, pp. 1127–1133, 2007.
- [102] M. A. Juárez, César; Rodríguez, Patricia; Rivera, Raymundo;Rechy de Von Roth, “Uso de fibras naturales de lechuguilla Como Refuerzo En Concreto,” *Ingenierías*, vol. VII, no. 22, pp. 7–19, 2004.
- [103] S. S. R. Ferreira, P. R. L. Lima, F. A. Silva, and R. D. Toledo Filho, “Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with Portland cement matrices,” *Rev. Mater.*, vol. 17, no. 2, pp. 1024–1034, 2012.
- [104] S. R. Ferreira, P. R. L. Lima, F. A. Silva, and R. D. Toledo Filho, “Effect of sisal fiber hornification on the fiber-matrix bonding characteristics and bending behavior of cement based composites,” *Key Eng. Mater.*, vol. 600, pp. 421–432, 2014.
- [105] D. O. J. dos Santos, C. M. A. Fontes, and P. R. L. Lima, “Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal,” *Rev. Mater.*, vol. 22, no. 1, pp. 1694–1709, 2017.
- [106] D. P. Bentz, A. Durán-Herrera, and D. Galvez-Moreno, “Comparison of ASTM C311 strength

- activity index testing versus testing based on constant volumetric proportions,” *J. ASTM Int.*, vol. 9, no. 1, 2012.
- [107] D. Galvez Moreno, “Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la región de Monterrey, Nuevo León,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2015.
- [108] Quantachrome Instruments, “Density - Multipicnometer.” .
- [109] American Society for Testing and Materials, “ASTM C305-14 - Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency,” *ASTM Int.*, vol. 04, p. 3, 2009.
- [110] American Society of Testing and Materials, “ASTM C1437-01 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar,” *ASTM Int.*, pp. 7–8, 2001.
- [111] P. Turgut and H. Murat Algin, “Limestone dust and wood sawdust as brick material,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 9, pp. 3399–3403, 2007.
- [112] American Society of Testing and Materials, *ASTM C 138-92 Standard Test Method for Density ( Unit Weight ), Yield , and Air Content (Gravimetric)*, vol. 04, no. Reapproved. 2009, pp. 1–4.
- [113] A. Khaloo, M. H. Mobini, and P. Hosseini, “Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 188–201, 2016.
- [114] L. Y. Gómez-Zamorano and C. E. Castillo-Linton, “Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de partículas de nanosílice,” *Rev. ALCONPAT*, vol. 6, no. 2, pp. 101–115, 2016.
- [115] J. Zhang and G. W. Scherer, “Comparison of methods for arresting hydration of cement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 10, pp. 1024–1036, 2011.
- [116] C. Rojas, M. Cea, F. Rosas-Díaz, and J. . Cárdenas-R, “Physical , chemical and mechanical characterization of a prototype insulating material based on eucalyptus bark fiber,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 9, pp. 2441–2446, 2018.
- [117] S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, and 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. Constr.*, vol. 50, no. 3, pp. 1–11, 2017.

- [118] A. Alawar and K. A.-K. Ahmad M. Hamed, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement," *Compos. Part B Eng.*, vol. 40, no. 7, pp. 1–19, 2015.
- [119] Tappi Standards, *T 257 cm-02 - Sampling and preparing wood for analysis*. 2012.
- [120] Tappi Standards, *Tappi test methods - Chemical characterization of agro-industrial waste*. 2007, pp. 0–4.
- [121] Tappi Standards, *T 264 cm-97 - Preparation of wood for chemical analysis*. 2007, pp. 3–5.
- [122] Tappi Standards, *T 211 om-02 Ash in wood , pulp , paper and paperboard : combustion at 525 ° C*, vol. T 211. 2007, pp. 1–7.
- [123] Tappi Standards, *T 204 cm-97 - Solvent extractives of wood and pulp*. 2007.
- [124] Tappi Standards, *T 222 om-02 - Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. 2011, pp. 1–7.
- [125] L. Wise, M. Murphy, and A. D' Addieco, "Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses," *Pap. Trade*, vol. 122, no. 2, pp. 35–43, 1946.
- [126] R. Rowell, "The chemistry of solid wood," in *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, vol. 19, no. 1, 2004, pp. 17–18.
- [127] V. Cérézo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique," L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [128] J. Vidal, "Desarrollo de materiales aislantes basados en fibras naturales residuales," Universidad de La Frontera, 2016.
- [129] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, and F. Bouras, "Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 192, pp. 348–356, 2018.
- [130] Lamudi, "¿Cuánto mide en promedio una vivienda en México?," 2019. [Online]. Available: <https://www.lamudi.com.mx/journal/cuanto-mide-en-promedio-una-vivienda-en-mexico/>.
- [131] Servicio Meteorológico Nacional, "Temperatura Media Promedio por Entidad Federativa y Nacional 2020," 2020. [Online]. Available: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Pronóstico climático/Temperatura y Lluvia/TMED/2020.pdf>.

- [132] M. L. Nehdi, A. R. Suleiman, and A. M. Soliman, "Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack," *Cem. Concr. Res.*, vol. 64, pp. 42–53, 2014.
- [133] D. F. Ferraz, "Aditivos reductores de agua para concreto premezclado.," *Inst. Mex. del Cem. y del Concreto A.C.*, pp. 22–23, 2016.
- [134] A. Ochoa Hurtado, "EVALUACIÓN DE PARAFINA COMERCIAL COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA," 2016.
- [135] M. Harilal *et al.*, "High performance green concrete (HPGC) with improved strength and chloride ion penetration resistance by synergistic action of fly ash, nanoparticles and corrosion inhibitor," *Constr. Build. Mater.*, vol. 198, pp. 299–312, 2019.
- [136] L. P. Traversa, F. H. Iloro, and D. . Benito, "Determinación mediante ensayos térmicos del CO<sub>2</sub> absorbido por morteros de cemento," *Cienc. y Technol. los Mater.*, no. 3, 2013.
- [137] J. P. Cárdenas and F. Fuentes, "Energía contenida y ocupacional en tres viviendas mediante un Análisis de ciclo de vida simplificado," *VI Encuentro Nac. e IV Encuentro Latino-americano sobre Edif. e Comunidades Sustentáveis*, vol. II, no. 1, pp. 3–9, 2011.