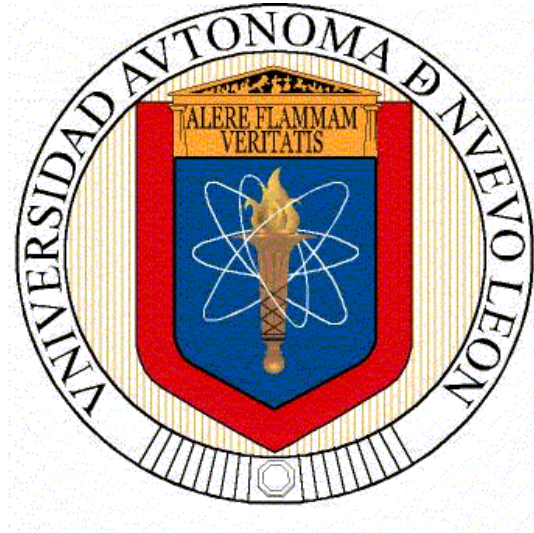


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**PROPIEDADES HIGROTÉRMICAS, MECÁNICAS Y DURABILIDAD  
EN MATRICES CEMENTANTES CON VIRUTA DE ORIGEN  
NATURAL PARA PRODUCIR MAMPOSTERÍA**

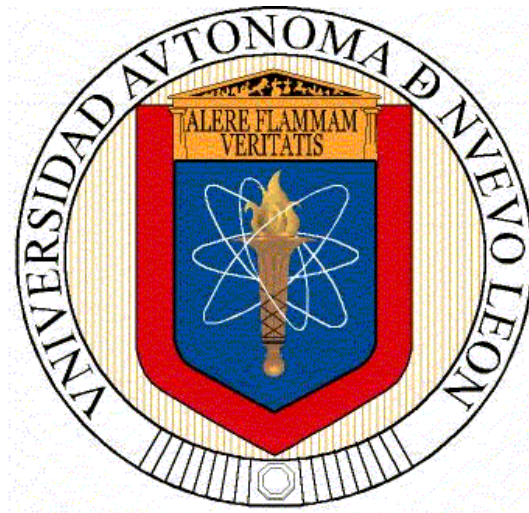
**PRESENTA**

**ING. VÍCTOR ARMANDO GALVÁN MENDOZA**

**PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**MAYO, 2016**

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



**TESIS**

**PROPIEDADES HIGROTÉRMICAS, MECÁNICAS Y DURABILIDAD  
EN MATRICES CEMENTANTES CON VIRUTA DE ORIGEN  
NATURAL PARA PRODUCIR MAMPOSTERÍA**

Presenta

**Ing. Víctor Armando Galván Mendoza**

Para la obtención del grado de **Maestría en Ciencias con  
Orientación en Materiales de Construcción**

Asesor de Tesis

**Dr. César Antonio Juárez Alvarado**

Co-asesores

**Dra. Camille Magniont / Prof. Gilles Escadeillas**

**Mayo, 2016**

## Contenido

CAPÍTULO I .....	13
1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1 ANÁLISIS DE LOS FUNDAMENTOS .....	13
1.1.1 Clasificación de las virutas naturales .....	15
1.1.2 Tipos de virutas naturales .....	16
1.1.3 Efecto del tamaño de viruta y sus compuestos extraíbles.....	17
1.1.4 Propiedades físicas de las virutas naturales .....	18
1.1.5 Compuestos a base cemento con adiciones de virutas .....	18
1.1.6 Propiedades físico-mecánicas de los compuestos con adiciones de virutas .....	18
1.2 COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO Y DURABILIDAD.....	19
1.2.1 Uso de virutas de origen natural para disminuir la conductividad térmica .....	19
1.2.2 Clasificación de compuestos por medio del ensayo de regulación de humedad (Moisture Buffer Value).....	20
1.2.3 Durabilidad de los compuestos con adiciones de viruta.....	21
1.3 ANTECEDENTES.....	21
1.3.1 Influencia de las virutas en la conductividad térmica de los compuestos.....	21
1.3.2 Propiedades físico-mecánicas de compuestos con adiciones de virutas de origen natural .....	25
1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	29
1.5 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
1.6 OBJETIVOS.....	31
1.6.1 Objetivo general .....	31
1.6.2 Objetivos particulares.....	31
1.7 METAS .....	31
1.8 HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	32
CAPÍTULO II .....	34
2. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN .....	34
2.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	34
2.1.1 Cemento.....	34

2.1.2	Ceniza volante .....	35
2.1.3	Metacaolín.....	36
2.1.4	Agregado fino .....	36
2.1.5	Virutas de origen natural .....	37
2.2	FABRICACIÓN Y ENSAYE DE ESPECÍMENES PRELIMINARES SIN ADICIÓN DE VIRUTAS .....	38
2.2.1	Selección del consumo de cemento Portland .....	38
2.2.2	Mezclado, colado y curado de especímenes preliminares .....	39
2.2.3	Resistencia a compresión en cubos.....	39
2.2.4	Resistencia a compresión y densidad aparente en cilindros .....	40
2.3	FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES CON VIRUTAS .....	40
2.3.1	Selección del consumo de virutas de origen natural .....	40
2.3.2	Proporcionamiento de las mezclas.....	41
2.3.3	Mezclado, colado y curado.....	44
2.3.4	Fabricación de especímenes .....	45
2.4	ENSAYES Y PRUEBAS EN ESPECÍMENES CON VIRUTA.....	45
2.4.1	Ensayes de resistencia a la compresión .....	45
2.4.2	Ensayes de densidad aparente .....	46
2.4.3	Ensayes de conductividad térmica .....	46
2.4.4	Ensayes de Regulación de humedad al vapor de agua (MBV) .....	48
2.4.5	Ensayes de permeabilidad al vapor de agua .....	49
2.4.6	Ensayes de ciclos de humedecimiento y secado en bloques de mampostería .....	51
CAPÍTULO III .....		54
3.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	54
3.1	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	54
3.1.1	Cemento.....	54
3.1.2	Ceniza volante .....	55
3.1.3	Metacaolín.....	56
3.1.4	Agregado fino .....	56
3.1.5	Virutas de origen natural .....	57
3.2	RESULTADOS PRELIMINARES EN ESPECÍMENES SIN ADICIÓN DE VIRUTAS .....	64

3.2.1	Selección del consumo de cemento.....	64
3.2.2	Mezclado, colado y curado de especímenes .....	65
3.2.3	Resistencia a compresión en cubos.....	66
3.2.4	Resistencia a compresión y densidad aparente en cilindros .....	67
3.3	FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES CON VIRUTAS .....	70
3.3.1	Selección del consumo de virutas de origen natural .....	70
3.3.2	Proporcionamiento de las mezclas.....	70
3.3.3	Mezclado, colado y curado.....	71
3.3.4	Fabricación de especímenes .....	72
3.4	ENSAYOS Y PRUEBAS EN ESPECÍMENES CON VIRUTAS.....	73
3.4.1	Ensayos de resistencia a compresión .....	73
3.4.2	Ensayos de densidad aparente .....	80
3.4.3	Conductividad térmica .....	84
3.4.4	Regulación de humedad al vapor de agua (MBV).....	88
3.4.5	Permeabilidad al vapor de agua.....	104
3.4.6	Ciclos de envejecimiento en mampostería a 28 días .....	129
CAPÍTULO IV.....		133
4. CONCLUSIONES.....		133
CAPÍTULO V.....		136
5. RECOMENDACIONES .....		136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		137

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de transferencia de calor.....	14
Figura 2. a) Virutas de madera secas, b) virutas de madera saturadas.....	15
Figura 3. Histograma de comparación de la conductividad térmica de acuerdo al contenido de cementante (Agoua et al., 2013). ....	22
Figura 4. Conductividad térmica de concretos de cáñamo vs la densidad seca de los concretos lanzados en muros y pisos (Collet & Pretot, 2014). ....	24
Figura 5. Variación de la conductividad térmica en función de la densidad (Elfordy et al., 2008). ....	24
Figura 6. Resistencia a compresión en cilindros vs el remplazo de virutas (Mohammed et al., 2014). ....	26
Figura 7. Contenido de aire vs el porcentaje de remplazo de virutas (Mohammed et al., 2014). ....	26
Figura 8. Masa unitaria vs porcentaje de virutas (Mohammed et al., 2014). ....	27
Figura 9. Imágenes de: a) virutas de madera de pino, y b) virutas de cáñamo. ....	37
Figura 10. Equipo de medición Lamda Meter-500. Localización de las partes del equipo (Lambda-MeBtechnik GmbH Dresden, 2008). ....	47
Figura 11. Esquema de la copa húmeda. 1) Espécimen, 2) Anillos de plástico, 3) Solución salina, 4) Copa de montaje, 5) Sellador perimetral y 6) Recubrimiento de aluminio. X1) Diámetro Exterior de la copa y X2) diámetro interior de la copa. ....	50
Figura 12. Distribución de tamaño de partícula del CPO 40 Tipo III. A la derecha se muestra la tabla del tamaño de partícula promedio. ....	55
Figura 13. Distribución de tamaño de partícula de la ceniza volante clase F. También se muestra el tamaño de partícula promedio. ....	55
Figura 14. Conductividad térmica de las virutas a 23° C. ....	60
Figura 15. a) Conductividad térmica de las virutas a 40° C y b) Conductividad térmica a 10° C. ....	61
Figura 16. Micrográficas de viruta de madera de pino, a) longitudinal y b) transversal. ....	62

Figura 17. Micrografías de viruta de madera de pino en zona de porosidad, a) longitudinal y b) transversal. ....	62
Figura 18. Porosidad de la viruta de madera de pino, a) longitudinal y b) transversal. ....	63
Figura 19. Micrografías de la viruta de cáñamo en zona transversal. ....	63
Figura 20. Micrografía longitudinal de la viruta de cáñamo, a) longitudinal y b) transversal. ....	64
Figura 21. Distribución de micro poros en corte transversal de la viruta de cáñamo, a) 50 $\mu\text{m}$ y b) 10 $\mu\text{m}$ . ....	64
Figura 22. Desarrollo de la resistencia a compresión en especímenes preliminares. ....	66
Figura 23. Desarrollo de la resistencia a compresión a 28 días en distintas relaciones a/c. ....	68
Figura 24. Densidades aparentes para diferentes relaciones a/c. ....	69
Figura 25. Bloque de mampostería a punto de ser retirado de la máquina bloquera. ....	72
Figura 26. Especímenes de mampostería después de la fabricación durante su fraguado inicial. ....	73
Figura 27. Especímenes de mampostería para ensayo a compresión. ....	73
Figura 28. Cilindros de 100x200 mm cabeceados con azufre. ....	74
Figura 29. Resistencia a compresión en cilindros. ....	75
Figura 30. Efecto del filler en la evolución de la resistencia a compresión en cilindros. ....	75
Figura 31. Resistencia a compresión en especímenes de mampostería a 28 días. ....	76
Figura 32. Evolución de la resistencia a compresión en especímenes de mampostería. ....	78
Figura 33. Resistencia a compresión de especímenes 150x150x150 mm. ....	79
Figura 34. Reducción de la resistencia a compresión en cubos de 150x150x150 mm. ....	79
Figura 35. Densidad aparente en cilindros. ....	80

Figura 36. Densidad aparente de los especímenes de mampostería. ....	81
Figura 37. Densidad aparente de especímenes con virutas de pino para la prueba de conductividad térmica. ....	82
Figura 38. Densidades de especímenes con virutas de cáñamo para la prueba de conductividad térmica. ....	83
Figura 39. Resultados de conductividad térmica de los especímenes con virutas de pino. ....	86
Figura 40. Resultados de conductividad térmica en especímenes con virutas de cáñamo. ....	88
Figura 41. Representación gráfica de clases de MBV (Department of Civil: thecnical University of Denmark Engineering, 2005). ....	89
Figura 42. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie C1. ....	90
Figura 43. MBV de absorción y desorción de humedad de la serie C1. ....	90
Figura 44. Ciclos de absorción-desorción de humedad en serie M4. ....	91
Figura 45. MBV de absorción-desorción de humedad en serie M4. ....	92
Figura 46. Ciclos de absorción-desorción de humedad en serie M5. ....	92
Figura 47. MBV de absorción-desorción de humedad en serie M5. ....	93
Figura 48. Ciclos de absorción-desorción de humedad en serie M6. ....	94
Figura 49. MBV de absorción-desorción de humedad en serie M6. ....	94
Figura 50. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie M7. ....	95
Figura 51. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie M7. ....	96
Figura 52. Resultados de MBV para los especímenes con virutas de pino. ....	96
Figura 53. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie NC1. ....	97
Figura 54. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NC1. ....	98
Figura 55. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie NC2. ....	98
Figura 56. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NC2. ....	99
Figura 57. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie NM4. ....	100



Figura 58. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NM4.	101
Figura 59. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie NM6.	101
Figura 60. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NM6.	102
Figura 61. Ciclos de absorción-desorción de humedad del espécimen NM7.	103
Figura 62. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NM7.	103
Figura 63. Resultados de MBV para los especímenes con virutas de cáñamo.	104
Figura 64. Pérdida de peso con respecto al tiempo en serie C1.	107
Figura 65. Flujo de vapor con respecto al tiempo de la serie C1.	107
Figura 66. Ecuación de la recta en serie C1 para cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.	108
Figura 67. Pérdida de peso con respecto al tiempo en serie C2.	109
Figura 68. Flujo de vapor con respecto al tiempo en serie C2.	109
Figura 69. Ecuación de la recta en serie C2 para cálculo del factor de resistencia a vapor de agua.	109
Figura 70. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie M3.	110
Figura 71. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie M3.	111
Figura 72. Ecuación de la recta en serie M3 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.	111
Figura 73. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie M4.	112
Figura 74. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie M4.	113
Figura 75. Ecuación de la recta en serie M4 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.	113
Figura 76. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie M5.	114
Figura 77. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie M5.	115
Figura 78. Ecuación de la recta en serie M5 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.	115
Figura 79. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie M6.	116

Figura 80. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie M6.....	117
Figura 81. Ecuación de la recta en serie M5 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua. ....	117
Figura 82. Resultados de factor de resistencia al vapor de agua en especímenes con virutas.....	118
Figura 83. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NC1. ....	119
Figura 84. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NC1....	119
Figura 85. Ecuación de la recta en serie NC1 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua. ....	119
Figura 86. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NC2. ....	120
Figura 87. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NC2....	121
Figura 88. Ecuación de la recta en serie NC2 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua. ....	121
Figura 89. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NM4.....	122
Figura 90. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NM4. ..	123
Figura 91. Ecuación de la recta en serie NM4 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua. ....	123
Figura 92. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NM6.....	124
Figura 93. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NM6. ..	125
Figura 94. Ecuación de la recta en serie NM6 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua. ....	125
Figura 95. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NM7.....	126
Figura 96. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NM7. ..	127
Figura 97. Ecuación de la recta en serie NM7 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua. ....	127
Figura 98. Resultados del factor de resistencia al vapor de agua en especímenes con virutas de cáñamo.....	128
Figura 99. Especímenes de mampostería en el ciclo de humedecimiento. ....	129
Figura 100. Especímenes de mampostería en el ciclo de secado.....	130
Figura 101. Resultados de la resistencia a compresión en especímenes de durabilidad. ....	130

Figura 102. Evolución de la resistencia a compresión según el contenido de virutas. ....	131
--	-----

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Densidad y conductividad térmica con diferentes dosificaciones de cemento Portland (Uysal & Demirbog, 2004).....	25
Tabla 2. Proporcionamiento de materiales en pruebas preliminares. ....	39
Tabla 3. Proporcionamiento de mezclas en cilindros.....	40
Tabla 4. Identificación de mezclas. ....	42
Tabla 5. Proporcionamiento C1 y NC1 en kg/m <sup>3</sup> .....	42
Tabla 6. Proporcionamiento C2 y NC2 en kg/m <sup>3</sup> . ....	42
Tabla 7. Proporcionamiento M3 en kg/m <sup>3</sup> .....	43
Tabla 8. Proporcionamiento M4 y NM4 en kg/m <sup>3</sup> .....	43
Tabla 9. Proporcionamiento M5 en kg/m <sup>3</sup> .....	43
Tabla 10. Proporcionamiento M6 y NM6 en kg/m <sup>3</sup> .....	44
Tabla 11. Proporcionamiento M7 y NM7 en kg/m <sup>3</sup> .....	44
Tabla 12. Resultados de la caracterización de los materiales. ....	56
Tabla 13. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie C1. ..	108
Tabla 14. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie C2. ..	110
Tabla 15. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie M3...	112
Tabla 16. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie M4...	114
Tabla 17. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie M5...	116
Tabla 18. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie M6...	118
Tabla 19. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie NC1.	120
Tabla 20. Cálculo del factor de resistencia a vapor de agua para serie NC2.	122
Tabla 21. Cálculo del factor de resistencia a vapor de agua para serie NM4.	124
Tabla 21. Cálculo del factor de resistencia a vapor de agua para serie NM6.	126
Tabla 23. Cálculo del factor de resistencia a vapor de agua para serie NM7.	128

# **CAPÍTULO I**

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANÁLISIS DE LOS FUNDAMENTOS

Los morteros a base cemento Portland con adiciones de virutas de origen natural son compuestos innovadores que tienen baja conductividad térmica y menor densidad, principalmente debido a las propiedades de las virutas de origen natural, estos morteros permiten construir muros habitacionales con una resistencia térmica mejorada y una mejor habilidad de regulación de humedad (Madurwar, Ralegaonkar, & Mandavgane, 2013).

El diseño de las mezclas de estos compuestos ha permitido observar sus propiedades como aislantes térmicos y reguladores de humedad, pensando en la comodidad del ser humano (K.S. Al-Jabri, A.W. Hago, A.S. Al-Nuaimi, 2005).

Para el presente estudio se considera que la conductividad térmica es el fenómeno por el cual el calor es transportado de una región de alta a baja temperatura de un compuesto o una sustancia, por lo que, la propiedad que caracteriza la habilidad de un material para transferir calor se denomina conductividad térmica (William D. Callister, Jr., 2010). Hay tres maneras de conducir el calor las cuales son: conducción, convección y radiación (Holman, 1999). Por lo que un material cerámico como lo es el concreto hidráulico o compuestos a base de cementantes hidráulicos, debido a su estructura tienen baja conductividad térmica en comparación con materiales más conductivos como los metales pero mayor conductividad en comparación de los materiales aislantes térmicos (IVE, 2011).

Así para este estudio, un material poroso embebido en la matriz cementante puede tener una importante influencia en la conductividad térmica y si el poro aumenta su volumen, podría resultar en la reducción de dicha conductividad, ya que la transferencia de calor a través de los poros es comúnmente lenta e ineficiente.

Los materiales aislantes de construcción son materiales fibrosos con mucha porosidad; por lo que esto conlleva a una gran cantidad de aire atrapado o inmóvil, donde su conductividad térmica es extremadamente baja, aproximadamente 20 mW/mK (William D. Callister, Jr., 2010).

En la figura 1, se observan los tipos de transferencia de calor conocidos en los que intervienen el tipo de material y método de transferencia.



Figura 1. Tipos de transferencia de calor.

Otro aspecto que se tratará en este estudio es la higroscopia, que es la capacidad de un material de absorber humedad del medio circundante, en ella se estudia la humedad, sus causas y variaciones (Rosa M. Rodríguez, 2004). En la higroscopia influyen la humedad relativa y la temperatura del medio en el que se encuentra un material, por lo que, llegará a un punto de equilibrio al saturarse. En la figura 2, se observan virutas de madera de pino en estado seco y estado saturado superficialmente seco.

Se ha observado que independientemente de los agregados que se utilicen, es posible disminuir su conductividad térmica y mejorar su higroscopia con la adición de estas virutas. Es importante el tipo de material que se utiliza como agregados, pero aun cuando estos presentan una conductividad térmica alta; como en el caso de las calizas y arenas de río, intervienen en el compuesto la relación agua/cemento (a/c) y las adiciones de otros materiales para la disminución de la conductividad térmica (Collet & Pretot, 2014).



Figura 2. a) Virutas de madera secas, b) virutas de madera saturadas.

La utilización de las virutas de origen natural ha mejorado las propiedades higrotérmicas de estos compuestos y es por esa razón que son una propuesta para la producción de mampostería que, como sabemos, la mampostería es uno de los métodos que se utilizan para la fabricación de muros de casa-habitación (Sousa, 2014).

En la actualidad hay pocos reportes en la literatura que hablan del estudio de estos compuestos, los que existen se han realizado en el continente europeo y en Norteamérica. Muchos de ellos, están enfocados en la disminución de la densidad aparente de los especímenes, otros en la disminución de la conductividad térmica que aportan a los compuestos, otros se enfocan en las propiedades higroscópicas de estos mismos, otros en el impacto en la disminución de la resistencia mecánica y otros en las reacciones químicas que conlleva la adición de estos materiales (Diquélou, 2015).

#### 1.1.1 Clasificación de las virutas naturales

Las virutas son residuos provenientes del corte, rasgadas o cepillados con ayuda de herramientas utilizadas en los trabajos de madera, metales o plásticos, por lo que, para este proyecto el término “viruta de origen natural” estará enfocado a las virutas que resultan de residuos de corte de la madera y a los residuos que se obtienen del corte del tallo del cáñamo.



El crecimiento de la población ha provocado el aumento de la urbanización y han subido los estándares de vida debido a las innovaciones tecnológicas que han contribuido al aumento en cantidad y variedad de diferentes tipos de residuos generados por la industria (Madurwar et al., 2013), por lo que la utilización de nuevas técnicas de fabricación de compuestos a base de residuos, permite satisfacer las necesidades de construcción del ser humano.

#### 1.1.2 Tipos de virutas naturales

Las virutas tienen la particularidad de que su tamaño de hojuela es mucho mayor que el del aserrín y que todas salen con una curvatura al salir de la superficie de la zona de corte. El aserrín puede ser identificado como polvo con tamaños de grano muy pequeños.

Actualmente en la industria existen proveedores de virutas de madera o cáñamo para limpieza de líquidos derramados, por lo que, su propiedad altamente absorbente es una de las cualidades que se aprovecha, vendiéndola como un subproducto.

Los tipos de viruta dependen de la necesidad del consumidor, por lo tanto, el proveedor puede mostrar una variedad de cortes, los cuales se pueden clasificar de la siguiente manera (Heiko Thoemen, Mark Irle, 2010):

- Viruta continua: Se forma con materiales dúctiles, tienen buen acabado superficial liso.
- Viruta de borde acumulado: Al aumentar de tamaño esta viruta tiende a romperse, normalmente este tipo de viruta se obtiene al cortar con mayor velocidad.
- Viruta escalonada o segmentada: Son semicontinuas con zonas de alta o baja deformación por corte. Estas virutas tienen un aspecto de dientes de sierra.
- Virutas discontinuas: Por lo regular provienen de materiales frágiles por lo que no pueden mantenerse por las grandes deformaciones que se

obtienen en el corte. Suelen generarse al aumentar y bajar la velocidad de corte.

- Viruta en forma de rizos: Se produce en materiales blandos con altas velocidades de corte. Mientras mayor sea a profundidad de corte el radio de curvatura baja.

### 1.1.3 Efecto del tamaño de viruta y sus compuestos extraíbles

Uno de los factores que intervienen en los compuestos con adiciones de viruta de origen natural es que, el calor de hidratación se ve disminuido por la adición de los agregados de origen natural (vegetales), ya que, los compuestos extraíbles de los agregados de origen natural tienen azúcares (entre otras cosas) que, al mezclarse con agua no permiten la reacción con los granos de cemento; evitando la reacción exotérmica generada por el contacto de estos materiales hidráulicos (Carrión et al., 2001).

Por lo que, la adición de las virutas genera una disminución del calor de hidratación donde influye la cantidad total de virutas en remplazo parcial o total de los agregados que se añaden al diseño de mezclas.

Los compuestos extraíbles de dichas virutas de origen natural generan cambios significativos tales como: la reducción del calor de hidratación y por consecuencia el aumento en los tiempos de fraguado en los compuestos a base de cementantes hidráulicos, esto debido a que sus compuestos al estar en la mezcla, se combinan con el agua de reacción haciendo más prolongado el tiempo de fraguado ya que intervienen en la formación de las fases del cemento hidratado (CSH). Esto porque es menor la cantidad de CSH y Portlandita; los cuales promueven el fraguado y el endurecimiento del concreto a las pocas horas (Diquélou, 2015).

El aumento de los tiempos de fraguado y la disminución del calor de hidratación se pueden deber al bajo pH que presentan estos agregados orgánicos (Levy & Levy, 2008).

#### 1.1.4 Propiedades físicas de las virutas naturales

Las propiedades físicas de las virutas son factores importantes para su utilización y que dependiendo de que material vegetal sea su fuente influirá en dichas cualidades; no obstante, al provenir de materia orgánica estas propiedades no tienen valores definidos.

Las propiedades a estudiar en esta investigación son: su densidad aparente, su alta absorción de agua líquida; a su porosidad, el tamaño de hojuela y su conductividad térmica.

#### 1.1.5 Compuestos a base cemento con adiciones de virutas

En la actualidad, existen en la industria paneles o tableros prefabricados con adiciones de virutas de madera denominados conglomerados o tableros de fibras. Por lo regular se utilizan maderas blandas para su fácil producción.

Varios investigadores tales como (Bederina et al., 2012) y (Collet & Pretot, 2014) se han enfocado en los materiales compuestos con adiciones de virutas de origen natural, buscando aprovechar las propiedades de estos materiales. Muchos de ellos están enfocados a los compuestos a base cemento Portland, mejorando así, sus propiedades físicas pero afectando en el desarrollo de la propiedades mecánicas.

#### 1.1.6 Propiedades físico-mecánicas de los compuestos con adiciones de virutas

Con respecto a los compuestos a base cemento Portland, estas propiedades mecánicas se ven afectadas por dichas adiciones. Por una parte, podemos decir que la resistencia a compresión se ve disminuida a medida que se agrega este material (Sellami, Merzoud, & Amziane, 2013). Por otro lado, se sabe que la densidad aparente y la conductividad de estos compuestos se ve mejorada significativamente.

Muchos investigadores tales como (Nozahic & Amziane, 2012) y (Arnaud & Gourlay, 2012) estudian el comportamiento de estas virutas para poder hacer diseños reproducibles y obtener materiales compuestos que se puedan utilizar en la industria, con la confiabilidad de que son materiales de gran durabilidad.

El estudio de este tipo de materiales compuestos ha permitido que los investigadores busquen la oportunidad de darle un sentido de desarrollo sostenible para los materiales de construcción; donde el uso de materiales residuales pueden ayudar a la producción de materiales para la industria de la construcción reutilizando y promoviendo nuevos procesos constructivos que además de dar un impacto positivo en la comodidad del ser humano son alternativas de construcción para el crecimiento poblacional (Raut, Ralegaonkar, & Mandavgane, 2011).

## 1.2 COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO Y DURABILIDAD

### 1.2.1 Uso de virutas de origen natural para disminuir la conductividad térmica

La experiencia ha demostrado que cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura. Decimos que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura (Holman, 1999). En la siguiente ecuación (ecuación 1.1) se expresa la fórmula de transferencia de calor donde está insertada la constante de proporcionalidad  $-k$ :

$$q = -KA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

$q$ = Es la rapidez de transferencia de calor

$\frac{\partial T}{\partial x}$  = Es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor

$k$ = Es la conductividad térmica del material

$A$ = Es el área que interviene en la transferencia de calor

El signo menos se inserta para que se satisfaga el segundo principio de la termodinámica, es decir, el calor deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura (Holman, 1999).

Las virutas de origen natural tienen la particularidad de ser materiales de baja conductividad térmica, densidades aparentes menores a las del agua, gran porosidad y alta absorción de agua líquida. Todos estos factores o características influyen en la conductividad térmica del material.

Las unidades de conductividad térmica están en  $W/mK$  (vatio/metro-kelvin) y mientras menor sea el valor medido en los especímenes menor será la transferencia de calor entre una cara del prisma y su contracara. La conductividad térmica es proporcional a la temperatura, por lo que, se pueden obtener diferentes valores de conductividad térmica según la temperatura a la que se da inicio la prueba.

### 1.2.2 Clasificación de compuestos por medio del ensayo de regulación de humedad (Moisture Buffer Value)

De interés para estudiar en este proyecto de investigación fue la prueba de Regulación de Humedad (MBV). Este ensaye se basa en la medición de la higroscopia de los especímenes sometidos ciclos de humedades relativas de 75% a 33%; por 8 y 16 horas respectivamente, de acuerdo a las especificaciones de la prueba (Department of Civil: thecnical University of Denmark Engineering, 2005). Así, podemos conocer si el compuesto es apto para regular la humedad del medio ambiente (absorción y desorción) al que está expuesto.

Es importante conocer la propiedad de regular la humedad en los materiales, para clasificarlo de acuerdo a la tabla de referencia del trabajo de los laboratorios mencionados anteriormente. Así, podemos darnos una idea del comportamiento que tendrán en la aplicación que corresponda, por lo que, un material de

condiciones excelentes para regular la humedad, podrá absorber la humedad y liberarla rápidamente o en su defecto transferirla al otro lado de la contracara del espécimen.

### 1.2.3 Durabilidad de los compuestos con adiciones de viruta

La durabilidad de estos compuestos es un tema muy importante dentro de esta investigación. Algunos autores como (Silva et al., 2010), han estudiado la cinética de degradación de fibras naturales, promoviendo la modificación de las pastas cementantes. Una de estas prácticas es la utilización de puzolanas tales como el metacaolín, ya que observaron que estas adiciones, generan una capa alrededor de las fibras naturales, evitando así, la deposición de los cristales de hidróxido de calcio, por la interacción entre el hidróxido de calcio y los silicatos de la puzolana.

En el mismo contexto, (Juárez Alvarado, 2002), ha estudiado la durabilidad de las fibras naturales, promoviendo los ensayos de envejecimiento. Este tipo de ensayo consistió en someter a los especímenes a ciclos de humedecimiento y secado, para después ser ensayados a tensión. Otros investigadores (Cervantes, 2014) han estudiado los diferentes tratamientos con ceras para proteger a las fibras de agentes alcalinos y demostraron que un buen recubrimiento es funcional y efectivo para la fabricación de compuesto a base de cementantes hidráulicos y agregados de origen natural.

## 1.3 ANTECEDENTES

### 1.3.1 Influencia de las virutas en la conductividad térmica de los compuestos

Las variaciones en los resultados de conductividad térmica dependen de varios factores como la temperatura y el contenido de agua (Agoua et al., 2013). El valor de la conductividad térmica es utilizado en el cálculo de la Resistencia térmica en los materiales de construcción donde el espesor de producto final es un factor importante.

Para medir el coeficiente de conductividad térmica se necesita mucho tiempo de experimentación y una regulación precisa de diferentes parámetros. De manera general, para estos métodos de medición, es necesario determinar el flujo o el campo térmico de las mediciones de temperatura en diferentes puntos del material, y así, poder definir un dominio de temperatura (Agoua et al., 2013).

En la figura 3, se muestra el comportamiento de un material compuesto de acuerdo a la cantidad de material cementante. Se demuestra según los autores (Agoua et al., 2013) que, a medida que el cementante se incrementa dentro de la dosificación de la mezcla, la conductividad térmica aumenta ligeramente. En ella influye la conductividad térmica del cementante, por lo tanto, si este cementante tiene una conductividad térmica mayor que el agregado (como es el caso con las virutas de origen vegetal), tendría valores significativos en la investigación.

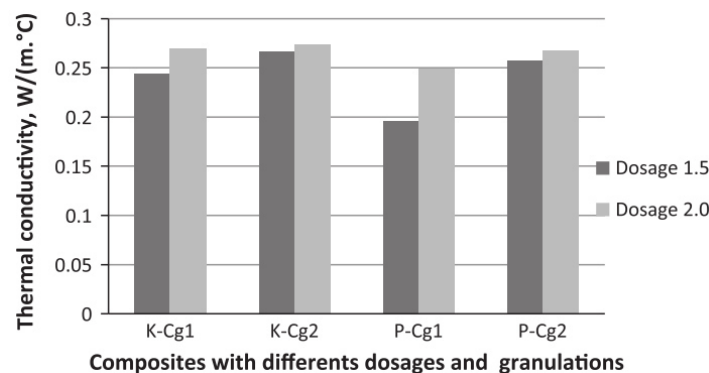


Figura 3. Histograma de comparación de la conductividad térmica de acuerdo al contenido de cementante (Agoua et al., 2013).

Se ha estudiado la influencia del tamaño de fragmento de viruta de origen natural en la conductividad térmica, donde, se mostró que en diferentes tamaños de fragmento de este material, la conductividad térmica tiene ligeras variaciones con el factor de humedad y densidad aparente constante (Guo et al., 2013). También, en esta investigación se demostró que, la humedad del material interviene en los resultados de conductividad térmica, donde a mayor contenido de humedad, aumenta ligeramente el coeficiente de conductividad térmica.

También (Bederina et al., 2007), demostraron que en dos matrices a base cemento Portland con dos agregados diferentes y con adiciones de estas virutas, la conductividad térmica disminuía a razón del aumento de la adición de estos materiales. Del mismo modo, se comprobó la disminución de la masa unitaria en dichos compuestos. Además, observaron que un tratamiento de las virutas sumergidas en pasta de cemento hidráulico no modificaba la conductividad térmica del compuesto, ya que, como se utilizaba el mismo cemento que en el mezclado de los materiales, donde no hay diferencia de coeficientes de conductividad térmica (Bederina et al., 2009).

(Taoukil et al., 2013) propusieron la medición de la conductividad térmica con diferentes contenidos de humedad, donde corroboraron que, a medida que el contenido de humedad aumentaba, la conductividad térmica también incrementaba en las diferentes series que formularon. Así bien, hicieron pruebas de resistencia a compresión y de masa unitaria. Otro de los factores que intervinieron en dicha investigación fue las pruebas que hicieron en virutas tratadas con aceite como recubrimiento, observando que, de acuerdo a la investigación de (Bederina et al., 2009), la absorción de las virutas disminuye, mejorando así, la disminución de los coeficientes de conductividad térmica.

Otros investigadores como (Aigbomian & Fan, 2013) se han enfocado en los coeficientes de conductividad de las virutas de madera comparándolas con compuestos hechos a base de cal y cáñamo. Pero en su caso, estudiaron el comportamiento de la viruta de madera con el cemento Portland y adiciones de cal. Concluyeron que, las virutas como agregado total mantenían coeficientes de conductividad similares y que aun añadiendo un residuo de papel este coeficiente disminuía muy poco. Ellos atribuyen que estas ligeras variaciones entre dichos coeficientes se deben a la cantidad de poros dentro del compuesto.

(Collet & Pretot, 2014) trabajaron con virutas de cáñamo denominado al compuesto como “hemp-concretes”. Ellos elaboraron especímenes a base de cal hidráulica y con distintas dosificaciones de virutas en sus diseños de mezclas. Observaron que el contenido de humedad tiene un bajo efecto en las variaciones



del coeficiente de conductividad donde influye en mayor medida la densidad del compuesto. En la figura 4, observamos la tendencia del coeficiente de conductividad contra la densidad seca de los especímenes.

Igualmente (Elfordy, et al., 2008) propusieron el estudio de las propiedades físicas de los compuestos a base de cal hidráulica con agregados de virutas de cáñamo. Observaron que mientras la densidad del compuesto fuese mayor los resultados de la conductividad térmica tenía variaciones entre los últimos especímenes (véase figura 5). Mencionan en el documento que si se requiere utilizar un compuesto con mayor resistencia es posible hacerlo sin preocuparse mucho por los valores de los coeficientes de conductividad.

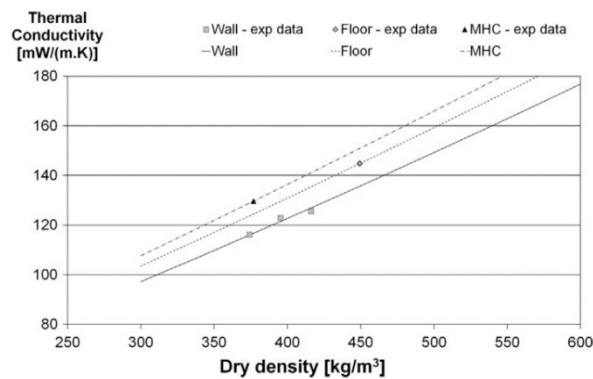


Figura 4. Conductividad térmica de concretos de cáñamo vs la densidad seca de los concretos lanzados en muros y pisos (Collet & Pretot, 2014).

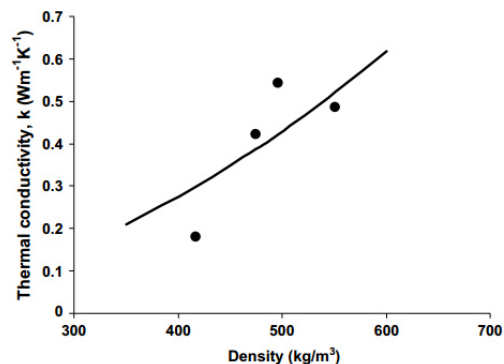


Figura 5. Variación de la conductividad térmica en función de la densidad (Elfordy et al., 2008).

(Uysal & Demirbog, 2004) estudiaron la conductividad térmica de diferentes materiales entre ellos el cemento Portland. Evaluaron a distintos consumos de cemento su conductividad térmica, resultando que a mayor cantidad de consumo de cemento en un compuesto la conductividad térmica aumenta. Esto lo podemos resumir en la tabla 1.

Otro de los resultados obtenidos en dicha investigación (Uysal & Demirbog, 2004) fue que, la adición de piedra pómez en el compuesto disminuía la conductividad, pero no lo suficiente. Los valores del coeficiente de conductividad térmica, de remplazo al 100% de piedra pómez están alrededor de 770 mW/mK según los autores.

Tabla 1. Densidad y conductividad térmica con diferentes dosificaciones de cemento Portland (Uysal & Demirbog, 2004).

Cement dosage (kg/m <sup>3</sup> )	200	250	350	400	500
Density (kg/m <sup>3</sup> ) ( $\pm 0.02$ )	1970	1990	2020	2030	2040
Thermal conductivity (W/mK) ( $\pm 0.05$ )	1.163	1.203	1.223	1.272	1.461

### 1.3.2 Propiedades físico-mecánicas de compuestos con adiciones de virutas de origen natural

La baja densidad de la viruta de origen natural y una mayor sustitución en el compuesto, generan una disminución de la resistencia a compresión (véase figura 6) de los materiales compuestos. Se ha comprobado que las adiciones de estos materiales de origen natural disminuyen la resistencia a compresión a medida que se adiciona una mayor cantidad de este material (Mohammed et al., 2014). También, estudiaron que a mayor cantidad de virutas, el contenido de aire (véase figura 7) se incrementaba en el compuesto y que a su vez, el revenimiento incrementaba con éstas adiciones.

La disminución de la masa unitaria ( $\text{kg/m}^3$ ) de estos compuestos es otro de los parámetros en los que la adición de estas virutas se ve reflejado. Ya que nuevamente a la baja densidad aparente de este agregado se puede disminuir la densidad de un compuesto a base cemento Portland hasta 5% por cada 10% de remplazo de acuerdo a la figura 8 (Mohammed et al., 2014).

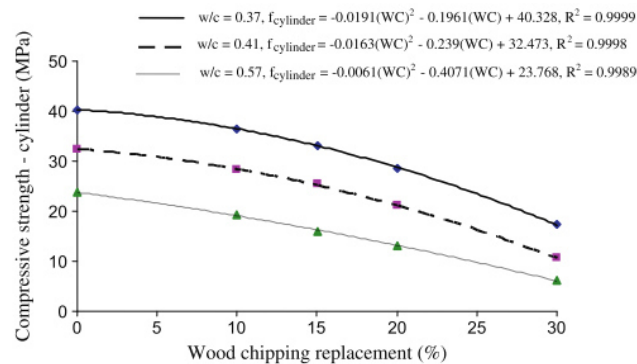


Figura 6. Resistencia a compresión en cilindros vs el remplazo de virutas (Mohammed et al., 2014).

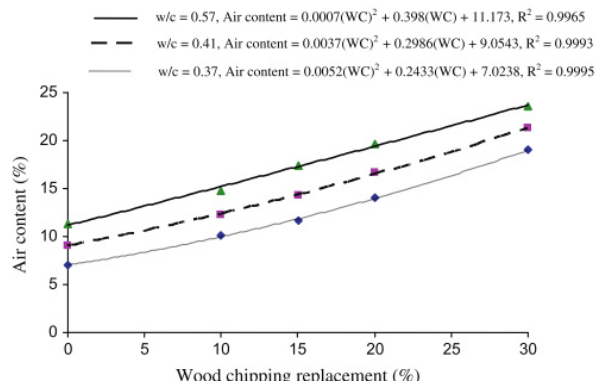


Figura 7. Contenido de aire vs el porcentaje de remplazo de virutas (Mohammed et al., 2014).

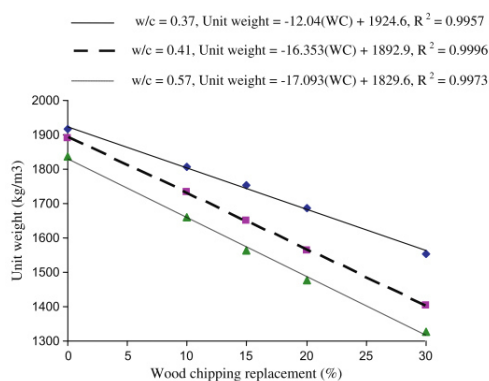


Figura 8. Masa unitaria vs porcentaje de virutas (Mohammed et al., 2014).

Los resultados de baja densidad aparente como los de la caracterización de este tipo de materiales compuestos se ha estudiado desde hace tiempo y muchas de estos trabajos de investigación se han hecho con ayuda de las recomendaciones del RILEM según lo publican en su trabajo (Coatanlem, et al., 2006), donde también, expusieron que las adiciones de virutas de origen natural bajan la resistencia a compresión del compuesto.

Como se observó en la figura 6, las adiciones de virutas de origen natural promueve la disminución de la resistencia a compresión de los especímenes. Esto se debe a que dicha adiciones incrementan la porosidad del compuesto, siendo esto el factor de mayor impacto en la reducción de la resistencia a compresión (Li, et al., 2006).

También, ellos evaluaron diferentes tamaños de virutas de origen natural en sus dosificaciones donde observaron que, a menor tamaño la resistencia a compresión era mayor que la de mayor tamaño; siendo el mismo porcentaje de adición. Además, la densidad aparente se ve afectada por el acomodo de los diferentes tamaños de las virutas, por lo que, el contenido de poros tendrán un impacto en la densidad de los especímenes (Li et al., 2006).

(Aigbomian et al., 2014) han trabajado en el estudio del desarrollo de la resistencia mecánica de virutas tratadas con diferentes métodos. Cabe destacar que encontraron que los tratamientos con agua caliente mejoran la resistencia a compresión. Además, hicieron tratamientos con hidróxido de calcio en

combinación de agua caliente por un tiempo determinado, esto con la finalidad de aumentar esta resistencia mecánica en los compuestos estudiados por ellos en su trabajo anterior.

(Sandin, et al., 2009) han trabajado con concretos a base cemento Portland y agregados de virutas de cáñamo. Ellos se han enfocado en las propiedades mecánicas de este tipo de compuestos. También han concluido que la optimización de la pasta cementante es fundamental en el desarrollo de sus propiedades físico-mecánicas.

Como se ha resumido en el anterior estudio bibliográfico, se ha estudiado en varios artículos científicos el efecto que ocasiona las adiciones de estas virutas de origen natural, pero otros autores (Arnaud et al., 2012) han investigado más a fondo sobre las cualidades de la combinación de cementantes hidráulicos con adiciones de virutas. En su trabajo hablan sobre la resistencia a compresión otorgada por diferentes tipos de cementantes hidráulicos, donde la hidratación es fundamental en el desarrollo de la resistencia mecánica.

Explican que curando los especímenes a 50% de humedad relativa, es más efectivo que hacerlo en condiciones tanto de bajos porcentajes de humedades como de altos porcentajes, ya que, el  $\text{CO}_2$  puede entrar en los poros y reaccionar con el hidróxido de calcio; presente en estas matrices cementantes, carbonatando al compuesto llevándolo a una densificación de la matriz cementante (Arnaud et al., 2012).

También, explican que el tamaño de las virutas es un factor que influye en la densidad aparente, en las propiedades mecánicas y en la porosidad de los especímenes. Esto debido a que virutas de un menor tamaño promueven que el compuesto contenga una menor cantidad de poros ya que la pasta tiene mayor facilidad de cubrir estos agregados (Arnaud et al., 2012).

Otra de las investigaciones en las que continuaron (Bederina et al., 2009) fue el efecto de las virutas tratadas con pasta a base cemento Portland, donde observaron que este tratamiento; aun cuando la adición de las virutas disminuía

la resistencia a compresión, daba como resultado una mayor resistencia a comparación de la serie no tratada con este recubrimiento.

#### 1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los morteros con los que se fabrican los bloques de mampostería en la región han dejado a un lado la oportunidad de proponer innovaciones constructivas ya que se usan sólo materiales típicos (agregados calizos, cemento, etc).

Los morteros a base cemento Portland y agregado calizo aun cuando tienen un diseño a base de huecos o multicámaras siguen teniendo valores de conductividad altos que no satisfacen la norma (NMX-C-460-ONNCCE-2009, 2009) que habla del Aislamiento térmico en la vivienda. Por otro lado, la norma (NMX-AA-164-SCFI-2013, 2013) recomienda un factor de resistencia térmica (R) de  $0.18 \text{ m}^2\text{K/W}$  para mampostería de concreto de 200 mm de espesor con tres huecos por lo que su conductividad térmica permisible es de  $1,120 \text{ mW/mK}$  aproximadamente. Para nuestro caso, ya que tenemos un espesor de 150 mm la conductividad térmica permisible es de  $840 \text{ mW/mK}$  (según las especificaciones de la norma antes mencionada). Podemos ver en el apéndice 5 de esta norma que, la densidad es un factor muy importante en la selección del material para cumplir con el factor R permisible en las viviendas de México.

Al igual, los morteros a base de cemento Portland y agregado pómez no cumplen con la norma (NMX-C-441-ONNCCE-2013, 2013) de mampostería no estructural pero su condición de utilizar un material de baja conductividad térmica como lo es la piedra volcánica pómez, se convierte en una buena opción, pero es debido a su alto costo que impide su comercialización. La conductividad térmica permisible de estos bloques es de aproximadamente  $391 \text{ mW/mK}$  según las especificaciones de la norma antes mencionada (NMX-AA-164-SCFI-2013, 2013) y en el reporte de laboratorio de otros autores (Rodríguez et al., 2008).

Por otro lado, la utilización de las virutas de origen natural provenientes de la madera o del cáñamo, prometen ser muy competitivas con respecto a la

conductividad térmica que ofrecen otros materiales porosos. Tienen propiedades higrotérmicas adecuadas aportando éstas al comportamiento de los materiales compuestos a base de cementantes hidráulicos y con adiciones de puzolanas artificiales.

En esta investigación, se evaluó el desempeño de dos tipos de virutas de origen natural dentro de matrices cementantes con agregados pétreos. Así, se demostró que sus propiedades pueden ser bien aprovechadas en la producción de nuevas alternativas para la fabricación de morteros para la elaboración de mampostería.

### 1.5 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La fabricación de compuestos con adiciones de virutas ha tomado un papel importante en países más avanzados. Entre ellos se encuentran los que son fabricados a base de cementantes hidráulicos.

Los puntos más importantes en la presente investigación son la utilización de virutas del corte de madera y de cáñamo, aprovechando sus propiedades higrotérmicas, baja densidad y alta absorción de humedad, para producir un material compuesto a base cemento portland. Dichas propiedades, funcionan adecuadamente en el compuesto que permite mejorar el confort del ser humano dentro de una casa-habitación.

Estas propiedades corresponden a tener una menor conductividad térmica dentro de una habitación, absorber el contenido de humedad del medio ambiente, al saturarse la habitación por liberación de humedad de los huéspedes y bajar al transferencia de calor desde el exterior al interior.

Varios de los aspectos necesarios de la investigación fueron: demostrar que es posible disminuir la conductividad térmica de estos compuestos, que puede absorber y desorber el vapor de agua, que la densidad aparente es menor y que es posible diseñarlos con una resistencia a compresión necesaria según las normas mexicanas. Estos son puntos clave en el estudio de este proyecto de investigación.

## 1.6 OBJETIVOS

### 1.6.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento térmico, higroscópico, mecánico y de durabilidad de matrices cementantes con puzolanas como filler y con la adición de virutas de origen natural, que permita proponer una mampostería con adecuadas propiedades higrotérmicas.

### 1.6.2 Objetivos particulares

- Evaluar la disminución de la conductividad térmica y la densidad aparente de los especímenes con la adición de virutas y un bajo consumo de cementante.
- Evaluar el desempeño de los especímenes en las pruebas de permeabilidad al vapor de agua y regulación de humedad.
- Evaluar el desarrollo de la resistencia a compresión en especímenes y en bloques de mampostería tomando en cuenta el porcentaje de virutas en los diseños de mezclas.
- Evaluar la durabilidad de los bloques de mampostería mediante pruebas de ciclos de humedecimiento y secado.

## 1.7 METAS

- Determinar un consumo de cemento portland de 150 kg/m<sup>3</sup> constante en todos los diseños de mezcla; para asegurar la resistencia a compresión mínima solicitada en la norma NMX C-441.
- Fabricar especímenes con adiciones de virutas de cáñamo y metacaolín para comparar los resultados entre dos formulaciones con adiciones de virutas de origen natural.



- Obtener valores de conductividad térmica menores a 840 mW/mK en todos los especímenes; valor propuesto en la norma (NMX-AA-164-SCFI-2013, 2013) para morteros a base cemento portland con agregado calizo.
- Obtener valores de permeabilidad al vapor de agua y regulación de humedad (MBV).
- Desarrollar un compuesto que cumpla con las especificaciones mecánicas y térmicas del país; para morteros a base cemento portland destinados para mampostería no estructural.
- Desarrollar pruebas de durabilidad en especímenes de mampostería a condiciones ambientales normales.

## 1.8 HIPÓTESIS DE TRABAJO

La adición de viruta de origen natural dentro de la matriz cementante disminuirá la conductividad térmica y aumentará la regulación de humedad del material compuesto; mejorando significativamente sus propiedades higrotérmicas, y manteniendo una resistencia mecánica que cumpla con la normativa vigente.

# **CAPÍTULO II**

## CAPÍTULO II

### 2. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

#### 2.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

En la presente investigación se utilizaron diferentes materiales para la elaboración de los especímenes que se seleccionaron en base a las investigaciones encontradas en la literatura; tal es el caso de las virutas de origen natural como son las de madera de pino y las de cáñamo, mencionadas en el capítulo anterior.

A continuación, se establece la metodología experimental utilizada para la caracterización de los materiales y para la fabricación de los especímenes con adiciones de viruta de madera de pino (EVM), los cuales fueron: cemento portland, ceniza volante clase F como relleno al 20% del peso del cemento portland, arena caliza como agregado fino, agua y las virutas de madera de pino.

Así también, para la fabricación de los especímenes con adiciones de virutas de cáñamo (EVC), los cuales son: cemento portland, metacaolín adicionado como relleno al 20% del peso del cemento portland, arena de sílica de río como agregado fino, agua y las virutas de cáñamo.

##### 2.1.1 Cemento

El cemento hidráulico utilizado en los especímenes EVM fue un cemento portland tipo III que cumple con las especificaciones de la norma (ASTM C150/C150M-09, 2009). Se obtuvieron las densidades por medio de la norma (ASTM C188-09, 2009) y la composición de óxidos por medio de análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX).

El cemento hidráulico utilizado en los especímenes EVC fue tipo II que cumplen con las especificaciones de la Norma (UNE-EN 197-1, 2013), respectivamente, para la elaboración de los diferentes diseños de mezclas. Se obtuvieron las

densidades por medio de la norma (ASTM C188-09, 2009) y la composición de óxidos por medio de FRX.

### 2.1.2 Ceniza volante

Para los especímenes EVM se utilizó ceniza volante clase F que fue obtenida de la central termoeléctrica José López Portillo de la ciudad de Nava, Coahuila. Se le hizo análisis FRX para conocer su composición de óxidos, que es particular del lugar donde se extrae este residuo industrial.

También, se obtuvo la densidad de acuerdo a las especificaciones de la norma (ASTM C188-09, 2009).

Otra de las pruebas realizadas fue la de Distribución de Tamaño de Partícula (DTP) con ayuda de equipo Microtrac S3500 que es un analizador de tamaño de partícula trilaser o mejor dicho utiliza tecnología de dispersión laser. Como no es un método descrito en normativas se describe brevemente la metodología a continuación:

1. Se prepara una muestra de 10 gramos del material a realizar la prueba.
2. Se ejecuta el programa y en la barra de herramientas se selecciona "Measure" para poner en ceros y dar inicio a una prueba.
3. En el icono "Set Up" se escribe la información general de la muestra en el apartado de "options>>".
4. Después se selecciona la opción "Timing" y se programa la prueba según las recomendaciones del equipo. En la siguiente opción "Identifiers" se selecciona para acceder a la pantalla de datos de la muestra (consúltese el manual del equipo par más información).
5. Se llena el sistema de muestreo con un fluido conocido en el ícono "FILL" y enseguida se selecciona el ícono "FLOW".
6. A continuación, se selecciona el ícono "S/Z" para abrir la ventana del menú principal que después de unos segundos se cerrará automáticamente.

7. Se selecciona el ícono “LD” y aparecerá una ventana donde dará indicaciones para adicionar la muestra. Se coloca la muestra dentro del receptáculo del equipo hasta que el recuadro este en READY.
8. Se ejecuta el análisis en el ícono “RUN” y se espera para recibir la información solicitada al equipo. A continuación, dar clic en “imprimir”.
9. Se hace limpieza del equipo por medio de la activación de un flujo y de ultrasonido.

#### 2.1.3 Metacaolín

Para el caso de los especímenes EVC. las pruebas de caracterización del metacaolín fueron la densidad por medio de la norma (ASTM C188-09, 2009) y la composición de óxidos por medio del análisis de FRX.

#### 2.1.4 Agregado fino

##### *Arena caliza*

En los especímenes EVM, el agregado fino fue arena caliza de la región (Monterrey, NL) que pasa la malla #4 (4.75 mm), de acuerdo a las especificaciones de la norma (ASTM C33/C33M-08, 2008).

Se obtuvo la densidad y la absorción de agua del agregado fino de acuerdo a las especificaciones de la norma (ASTM C128-07a, 2007).

##### *Arena de río*

Para el caso de los especímenes EVC, el agregado fino utilizado fue arena de río (proveniente de Toulouse, Francia). Esta arena contaba con ficha técnica que indica su clasificación como 0/4 R, código 22 SMP, código A, según la norma NF P 18-545 artículo 10 (ANFOR Certification, 2016). Por lo que, con los datos especificados en la ficha técnica se obtuvieron los valores de densidad y absorción y el tamaño de grano que pasa la malla #4 (4.75 mm).

### 2.1.5 Virutas de origen natural

Se utilizaron dos tipos de virutas de origen natural (véase figura 9). Este tipo de agregado ligero se añadió en sustitución de agregado fino en las formulaciones correspondientes para evaluar sus propiedades higrotérmicas y físicas posteriormente. Estas virutas fueron obtenidas de subproductos del corte de madera y cáñamo industrial respectivamente.



Figura 9. Imágenes de: a) virutas de madera de pino, y b) virutas de cáñamo.

En ambos casos se les realizaron pruebas de contenido de humedad, absorción de agua, densidad aparente y observación de la microestructura por medio de Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

#### 2.1.5.1 Propiedades físicas

Este material fue caracterizado de acuerdo a las especificaciones de la norma (ASTM C1761/C1761M-12, 2012) y las recomendaciones del (RILEM, 2013) para la caracterización de virutas de cáñamo y derivados. Entre ellas se incluyen las de absorción de agua, contenido de humedad, densidad aparente y coeficiente de conductividad térmica aparente.

#### 2.1.5.2 Morfología microscópica

Se realizaron análisis por medio del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) en base a las recomendaciones del (RILEM, 2013) para este tipo de materiales. Las virutas de origen natural tienen la particularidad de tener una estructura interna porosa, por lo que, el análisis y comprobación de su estructura fue necesario considerarlo en el diseño de las mezclas.

## 2.2 FABRICACIÓN Y ENSAYE DE ESPECÍMENES PRELIMINARES SIN ADICIÓN DE VIRUTAS

### 2.2.1 Selección del consumo de cemento Portland

Se revisó la literatura relacionada a la fabricación de morteros de mampostería (Herrera González, 2009) y (Del Real Dávalos, 2013) en donde se estudiaron diferentes consumos de cementos: 700, 500 y 300 kg/m<sup>3</sup>. En estos trabajos se observó que se requiere de un bajo consumo de cemento para mampostería no estructural de acuerdo a la norma (NMX-C-441-ONNCCE-2013, 2013). Por lo que la selección se enfocó a la obtención de una resistencia a compresión mayor a 35 kg/cm<sup>2</sup> por espécimen de mampostería como producto final, por lo que, altos consumos de cemento no fueron requeridos. Por lo tanto, los consumos de cemento de prueba seleccionados para nuestro estudio fueron de 100 kg/m<sup>3</sup> y 150 kg/m<sup>3</sup>.

En base a un consumo de cemento constante por metro cúbico, se formularon distintas relaciones de agua/cemento (a/c) tales como: 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.4, con la finalidad de obtener el espécimen de control; denominado posteriormente C1.

Los diseños se formularon de acuerdo al método de volúmenes absolutos (Portland Cement Association, 2004) y (Erdem, Khayat, & Yahia, 2010) que se basan en un diseño de concreto remplazando el agregado grueso por agregado fino, por lo que, la relación a/c fue la variable para la selección de la mezcla de control C1.

### 2.2.2 Mezclado, colado y curado de especímenes preliminares

El proporcionamiento de mezclas utilizado en los cubos de 50x50x50 mm, se describe en la tabla 2. Para el mezclado, se utilizó la mezcladora Hobart con capacidad de 1.50 L y se siguió el procedimiento de mezclado de acuerdo a la norma ASTM C109, destinada para la mezcla de morteros y pastas. Se colaron las mezclas en moldes de tres cubos de 50x50x50 mm y se fabricaron por triplicado.

Tabla 2. Proporcionamiento de materiales en pruebas preliminares.

<b>Materiales</b>	<b>C1</b>
	<b>Materiales secos ( kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Agua</b>	90.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00
<b>CV</b>	0.00
<b>MK</b>	0.00
<b>Agregado fino</b>	2162.19
<b>Virutas</b>	0.00
<b>Aire Atrapado 3.0%</b>	30.00
<b>SUMA</b>	2402.19

También, para la elaboración de mayor cantidad de mortero se utilizó una mezcladora Tipo Hobart pero con capacidad de 6 L, siguiendo el mismo procedimiento de la norma ASTM C109. El tiempo de mezclado fue por 4 minutos.

Se curaron estos especímenes colocándolos después de las primeras 24 horas (h) del curado inicial, en agua por medio de inmersión para el curado final hasta cumplir la edad de 28 días y a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ \text{C}$ , en base a la norma (ASTM C31/C31M-09, 2009).

### 2.2.3 Resistencia a compresión en cubos

En estos primeros diseños de mezclas se formularon distintas relaciones de a/c sin las adiciones de las virutas de origen natural, con la finalidad de seleccionar



la de mejor resistencia a compresión para un consumo de cemento bajo en especímenes de control.

La resistencia a compresión se llevó a cabo en la prensa universal Instron 600DX de acuerdo a las especificaciones de ensayo de la norma ASTM C109.

#### 2.2.4 Resistencia a compresión y densidad aparente en cilindros

Se fabricaron 6 especímenes cilíndricos por cada relación dando un total de 30 especímenes los cuales fueron ensayados mecánicamente a compresión y se obtuvo la densidad aparente de acuerdo a la norma ASTM C31. Para la fabricación de los cilindros se utilizó el proporcionamiento de referencia de los cubos con la relación a/c de 0.60. En la tabla 3, se observa el proporcionamiento de mezclas utilizado para la fabricación de los cilindros en cinco relaciones a/c diferentes.

Tabla 3. Proporcionamiento de mezclas en cilindros.

<b>Materiales</b>	<b>Relación agua/cemento</b>				
	<b>0.60</b>	<b>0.80</b>	<b>1.00</b>	<b>1.20</b>	<b>1.40</b>
<b>Agua</b>	90.00	120.00	150.00	180.00	210.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
<b>Agregado fino</b>	2162.19	2084.19	2006.19	2162.19	1850.19
<b>Aire Atrapado 3.0%</b>	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
<b>Peso volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2402.19	2354.19	2306.19	2492.19	2210.19

### 2.3 FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES CON VIRUTAS

#### 2.3.1 Selección del consumo de virutas de origen natural

Se propusieron consumos de 2%, 4% y 10% en sustitución por volumen de agregado, de acuerdo al método de volúmenes absolutos antes mencionado. Se evaluó el comportamiento de estas virutas de acuerdo a la literatura (Collet & Pretot, 2014).

Normalmente se ha propuesto en otros estudios (Arnaud & Gourlay, 2012) el uso de virutas como agregado total de compuestos a base de cementantes

hidráulicos pero las resistencias mecánicas mencionadas son muy bajas con respecto a la resistencia promedio deseada en este proyecto, por lo que, se propuso adicionar a los morteros cantidades menores, con la finalidad de cumplir con la resistencia a compresión deseada para mampostería no estructural de acuerdo a la normativa vigente.

### 2.3.2 Proporcionamiento de las mezclas

El proporcionamiento de mezclas se elaboró en base a la mezcla de control C1, obtenida en los ensayos preliminares. Se formularon y se denominaron de acuerdo a lo expuesto en la tabla 4, donde el mortero de referencia C1 fungió como espécimen de partida para el diseño de los especímenes listados en la misma. En la tabla 4, se observan a la izquierda los especímenes EVM y a la derecha los especímenes EVC.

En los proporcionamientos identificados en la tabla 4, se puede observar el uso de la ceniza volante para los especímenes EVM y el metacaolín en los especímenes EVC. Esto se propuso en base a los estudios realizados por investigadores (Silva et al., 2010) donde mencionan que los compuestos con adiciones naturales tienen mayor durabilidad en matrices cementantes con puzolanas que reaccionen con los productos de hidratación secundarios de la hidratación del cemento Portland. Así mismo, estos productos formaran compuestos de Silicatos de Calcio Hidratado (SCH) participando en el desarrollo de la resistencia a compresión de los compuestos y evitando la deposición de cristales de hidróxido de calcio en las virutas naturales.

Estas formulaciones se obtuvieron en base a los cubos de referencia mencionados en el apartado 2.3.1. Los proporcionamientos se especifican de la tabla 5 a la tabla 11 que fueron diseñadas de acuerdo al método de volúmenes absolutos.

Tabla 4. Identificación de mezclas.

Espécimen EVM	Formulación	Espécimen EVC	Formulación
<b>C1</b>	Espécimen de control 1: CPO 40 + arena	<b>NC1</b>	Espécimen de control 1: CPO 32.5R + arena
<b>C2</b>	Espécimen de control 2: CPO 40 + 20% CV + arena	<b>NC2</b>	Espécimen de control 2: CPO 32.5R + 20% MK + arena
<b>M3</b>	CPO 40 + 2% VM + arena		
<b>M4</b>	CPO 40 + 4% VM + arena	<b>NM4</b>	CPO 32.5R + 4% VC + arena
<b>M5</b>	CPO 40 + 20% CV + 2% VM + arena		
<b>M6</b>	CPO 40 + 20% CV + 4% VM + arena	<b>NM6</b>	CPO 32.5R + 20% MK + 4% VC + arena
<b>M7</b>	CPO 40 + 20% CV + 10% VM + arena	<b>NM7</b>	CPO 32.5R + 20% MK + 10% VC + arena

Tabla 5. Proporcionamiento C1 y NC1 en kg/m<sup>3</sup>

Materiales	C1	NC1
<b>Agua</b>	150.00	150.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00	150.00
<b>CV</b>	0.00	0.00
<b>MK</b>	0.00	0.00
<b>Agregado fino</b>	1928.19	1972.69
<b>Virutas</b>	0.00	0.00
<b>Aire Atrapado 6.0%</b>	60.00	60.00
<b>SUMA</b>	2228.19	2272.69

Tabla 6. Proporcionamiento C2 y NC2 en kg/m<sup>3</sup>.

Materiales	C2	NC2
<b>Agua</b>	150.00	150.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00	150.00
<b>CV</b>	30.00	0.00
<b>MK</b>	0.00	30.00
<b>Agregado fino</b>	1892.74	1941.40
<b>Virutas</b>	0.00	0.00
<b>Aire Atrapado 6.0%</b>	60.00	60.00
<b>SUMA</b>	2222.74	2271.40

Tabla 7. Proporcionamiento M3 en kg/m<sup>3</sup>.

<b>Materiales</b>	<b>M 3</b>
<b>Agua</b>	150.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00
<b>CV</b>	0.00
<b>MK</b>	0.00
<b>Agregado fino</b>	1876.19
<b>Virutas</b>	7.50
<b>Aire Atrapado 6.0%</b>	60.00
<b>SUMA</b>	2183.69

Tabla 8. Proporcionamiento M4 y NM4 en kg/m<sup>3</sup>.

<b>Materiales</b>	<b>M 4</b>	<b>NM 4</b>
<b>Agua</b>	150.00	150.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00	150.00
<b>CV</b>	0.00	0.00
<b>MK</b>	0.00	0.00
<b>Agregado fino</b>	1824.19	1866.29
<b>Virutas</b>	15.00	9.48
<b>Aire Atrapado 6.0%</b>	60.00	60.00
<b>SUMA</b>	2139.19	2175.77

Tabla 9. Proporcionamiento M5 en kg/m<sup>3</sup>.

<b>Materiales</b>	<b>M 5</b>
<b>Agua</b>	150.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00
<b>CV</b>	30.00
<b>MK</b>	0.00
<b>Agregado fino</b>	1840.74
<b>Virutas</b>	7.50
<b>Aire Atrapado 6.0%</b>	60.00
<b>SUMA</b>	2178.24

Tabla 10. Proporcionamiento M6 y NM6 en kg/m<sup>3</sup>.

<b>Materiales</b>	<b>M 6</b>	<b>NM 6</b>
<b>Agua</b>	150.00	150.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00	150.00
<b>CV</b>	30.00	0.00
<b>MK</b>	0.00	30.00
<b>Agregado fino</b>	1788.74	1835.00
<b>Virutas</b>	15.00	9.48
<b>Aire Atrapado 6.0%</b>	60.00	60.00
<b>SUMA</b>	2133.74	2174.48

Tabla 11. Proporcionamiento M7 y NM7 en kg/m<sup>3</sup>.

<b>Materiales</b>	<b>M 7</b>	<b>NM 7</b>
<b>Agua</b>	150.00	150.00
<b>Cemento Portland</b>	150.00	150.00
<b>CV</b>	30.00	0.00
<b>MK</b>	0.00	30.00
<b>Agregado fino</b>	1632.74	1675.40
<b>Virutas</b>	37.50	23.70
<b>Aire Atrapado 6.0%</b>	60.00	60.00
<b>SUMA</b>	2000.24	2029.10

Se utilizó la prueba (ASTM C231/C231M-09b, 2010) para obtener el contenido de aire. También, se evaluó el revenimiento por medio de la norma (ASTM C143/C143M-10, 2010).

### 2.3.3 Mezclado, colado y curado

El mezclado para los morteros se realizó en una mezcladora con capacidad de 25 L. Esta mezcladora tiene un tambor horizontal de 600 mm de diámetro y 1000 mm de largo. También tiene un agitador rotatorio de doble hoja. Igualmente fueron mezcladas por un tiempo de 4 minutos y en base a las recomendaciones de la norma ASTM C192.

Las virutas naturales se mezclaron durante 1 min con el agregado fino y una tercera parte del agua total de mezcla para la absorción de estos agregados. Después, se añadió el cemento portland y el filler para completar el compuesto y se continuó mezclando hasta obtener una masa homogénea.

Estos morteros finales fueron colados de acuerdo a la normativa ASTM C192 en los especímenes cilíndricos y prismáticos destinados para los ensayos finales detallados en el siguiente punto.

Todos los especímenes se colocaron después de 24 horas de curado inicial en la sala de curado y madurez a una temperatura de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$  a una humedad relativa superior al 95% en base a las recomendaciones de la norma ASTM C511-09, para ser ensayados a las edades correspondientes. El método de mezclado se realizó en base a la norma (C192/C192M-07, 2007).

#### 2.3.4 Fabricación de especímenes

Se fabricaron 6 especímenes cilíndricos de 100x200 mm (diámetro y altura); por cada formulación dando un total de 36 cilindros en base a las especificaciones de la norma ASTM C192, y 8 especímenes prismáticos de 150x200x400 mm (ancho, alto y largo) con tres huecos; de igual manera para cada formulación siendo un total de 56 bloques, estos últimos fueron las unidades de mampostería en base a las especificaciones de la norma NMX C404.

### 2.4 ENSAYES Y PRUEBAS EN ESPECÍMENES CON VIRUTA

#### 2.4.1 Ensayes de resistencia a la compresión

Los especímenes cilíndricos fueron ensayados de acuerdo a la norma (ASTM C39/C39M-09a, 2009), mientras que los especímenes prismáticos denominados como unidades de mampostería fueron ensayados de acuerdo a las normas (NMX-C-036-ONNCCE-2013, 2013) y (NMX-C-404-ONNCCE-2012, 2012).

#### 2.4.2 Ensayes de densidad aparente

La densidad aparente se obtuvo en los especímenes cilíndricos y prismáticos de los ensayos de la obtención de la resistencia a compresión y conductividad térmica. Este se realizó colocando a los especímenes dentro de un horno a una temperatura de  $105^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$  con la finalidad de obtener un peso constante, Después se midieron sus lados de acuerdo a cada espécimen para obtener su volumen y poder calcular por medio de la división del peso del espécimen entre su volumen, la densidad aparente.

#### 2.4.3 Ensayes de conductividad térmica

Se fabricaron 3 especímenes prismáticos para cada formulación de 50x150x150 mm (alto, ancho y largo) de acuerdo a las especificaciones del equipo Lambda Meter-500, destinado para la prueba del método de la placa caliente de acuerdo a las recomendaciones del RILEM en el reporte Round Robin Test for Hemp Shiv Characterization (RILEM, 2013)

Los ensayos de conductividad se realizaron de acuerdo a las especificaciones del equipo de medición y normas especificadas en el manual (Lambda-MeBtechnik GmbH Dresden, 2008). En el cual se especifican el método de ensayo, el tipo de espécimen a utilizar (que cumpla con el espesor mínimo de 10 mm y no mayor de 150 mm con largo y ancho de 150 mm, según la calibración del equipo); para nuestro caso utilizamos especímenes con las dimensiones mencionadas. También, se especifican en este manual las opciones de temperatura al inicio del ensayo, la diferencia de temperaturas entre placas de acuerdo al método utilizado, las condiciones del espécimen antes y después de la prueba, y la interpretación de resultados.

El tiempo de ésta prueba en el equipo, tarda varias horas en completarse ya que es un equipo de medición en régimen permanente o mejor dicho, hasta que el flujo de calor sea constante. Un esquema del equipo de medición de conductividad térmica se describe en la figura 10.

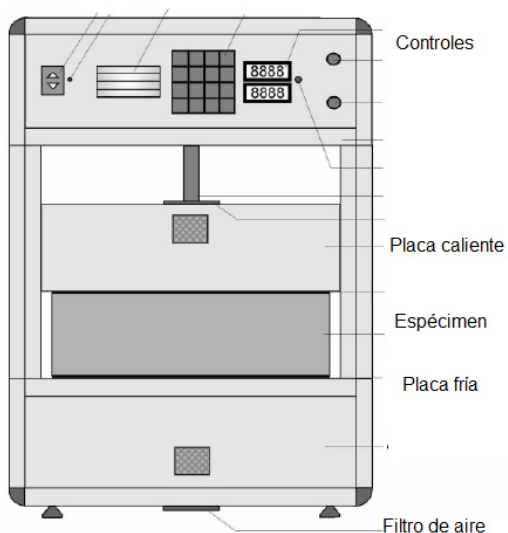


Figura 10. Equipo de medición Lambda Meter-500. Localización de las partes del equipo (Lambda-MeBtechnik GmbH Dresden, 2008).

El método de ensaye se describe a continuación:

1. Se coloca el espécimen en un horno a una temperatura de  $100^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$  hasta tener un peso constante. Según la altura del espécimen esto puede durar aproximadamente 24 horas (h).
2. Se acondiciona el espécimen de modo que sea posible manipularlo para pesarlo en una báscula que pueda registrar el peso del espécimen. Hay que proteger la báscula del espécimen caliente, por lo que, se recomienda colocar una pieza de madera u otro material aislante para protegerla.
3. Se registra el peso y dimensiones del espécimen para posteriormente llenar el cuadro de datos que muestra el programa del equipo de medición en una computadora de escritorio.
4. Se coloca el espécimen al centro del equipo de medición Lambda EP-500 y para proteger el perímetro de la perdida de calor se coloca un material aislante destinado para dicha prueba y especificado en el manual del equipo y la norma DIN (Instituto Alemán de Normalización) EN 12667.
5. Se baja la placa caliente de tipo guarda a una presión de  $50 \text{ N/m}^2$ .
6. Se ejecuta el programa del equipo de medición y se escribe la información correspondiente al espécimen.



7. Se da inicio al ensayo y se espera alrededor de 4 horas para la finalización de cada medición. Es posible programar hasta tres mediciones de diferentes condiciones.
8. Al finalizar el ensayo se toman los resultados de conductividad térmica y se registran dentro del programa.
9. Se coloca el espécimen en un lugar seguro.
10. Se hace limpieza del equipo para mediciones posteriores.

#### 2.4.4 Ensayes de Regulación de humedad al vapor de agua (MBV)

Se elaboraron 3 especímenes prismáticos para cada formulación de 50x150x150 mm (alto, ancho y largo) para cumplir con las especificaciones del ensayo destinado para dicha prueba.

Este ensaye se realizó en una cámara climática a una temperatura y humedad relativa programada por un tiempo definido. El ensaye se basa en el trabajo de investigación Moisture Buffering of Building Materials del Nordisk Innovations Center (Department of Civil: thecnical University of Denmark Engineering, 2005). En él se explican los resultados de diferentes laboratorios donde se han ejecutado estos ensayos y se especifica el método y la forma de interpretar dichos resultados.

El método se resume a continuación:

1. Se prepara el espécimen de 50x150x150 mm, tomando las dimensiones del mismo.
2. Se coloca en un lugar al que se pueda acondicionar a una temperatura de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$  y a una humedad relativa de 50%, hasta tener un peso constante.
3. Después de tener una masa constante se le coloca un papel adhesivo de aluminio por las 5 caras del prisma para dejar expuesta solo la cara superior en nuestro caso la cara superior fue la de área de 150x150 mm.
4. Inmediatamente se toma el peso inicial del ensayo y se coloca dentro de una cámara climática a una temperatura de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$  y a una humedad

relativa (HR) controlada de: 8 h a 75% de HR y 16 h a 33% de HR. Estos son los ciclos a los que estará sometido el espécimen.

5. Se toma el peso del espécimen cada 2 h durante el ciclo de las 8 h a la humedad relativa de 75% y justo al terminar el ciclo se toma el peso del espécimen antes de que pase al ciclo de humedad relativa al 33%. Después de dos horas se toma el peso del espécimen que se tendrá que pesar nuevamente dos horas antes de que el ciclo (con duración de 16 horas) termine y cambie al ciclo húmedo (75% HR).
6. Se da por finalizado el ensaye hasta que se registre una diferencia de masa menor al 0.5% entre los últimos 3 ciclos (24 h por ambos ciclos).
7. Se hace limpieza del equipo utilizado para mediciones posteriores.

#### 2.4.5 Ensayes de permeabilidad al vapor de agua

Se fabricaron 2 especímenes cilíndricos de 100x200 mm (diámetro y altura), que después, fueron cortadas 3 rodajas en presentaciones de 100x25 mm (diámetro y altura) para ser colocados en las copas metálicas para la prueba correspondiente.

También, se fabricaron 2 especímenes de 110x220 mm (diámetro y altura), que igualmente, fueron cortadas 3 rodajas en presentaciones de 110x25 mm (diámetro y altura) para igualmente ser colocados en las copas metálicas para dicha prueba.

Estos ensayos se ejecutaron de acuerdo a las especificaciones de la norma europea (NF EN ISO 12572:2001-10, 2009). En ella se explican los dos métodos por lo que se puede realizar un ensayo los cuales son: el método de la copa húmeda y el método de la copa seca. En ambos métodos se puede conocer la permeabilidad de los especímenes puestos a prueba. En la figura 11 se presenta un esquema del método.

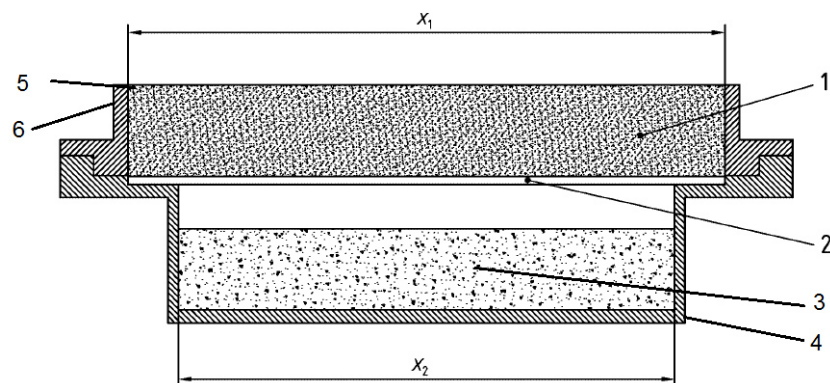


Figura 11. Esquema de la copa húmeda. 1) Especímen, 2) Anillos de plástico, 3) Solución salina, 4) Copa de montaje, 5) Sellador perimetral y 6) Recubrimiento de aluminio. X1) Diámetro Exterior de la copa y X2) diámetro interior de la copa.

A continuación se hace un breve resumen del método de la copa húmeda el cual fue empleado en la ejecución de este ensayo:

1. Se acondicionan los especímenes a una temperatura de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$  y a una HR de 50% hasta tener una masa constante.
2. Se toman las dimensiones de los especímenes a ensayar.
3. Se prepara la solución salina a utilizar según la norma antes mencionada (NF EN ISO 12572:2001-10, 2009).
4. Se preparan las copas a utilizar y todos los accesorios necesarios para el montaje.
5. Se coloca en un recipiente de plástico con dimensiones conocidas la solución salina; se mide la altura a la que queda el menisco de la solución salina desde el interior de la copa.
6. Se coloca el espécimen a una altura de 2 a 3 cm por encima de la solución salina. Pueden utilizarse anillos de plástico para controlar la separación entre el espécimen y la solución salina.
7. Se sella el perímetro del espécimen con una mezcla de 60% parafina y 40% cera. Esto con la finalidad de sellar herméticamente la salida de la humedad de la solución salina del interior de la copa.
8. Se coloca una cinta adhesiva de aluminio o cualquier otro material apto para sellar la orilla entre el espécimen y la copa de aluminio.

9. Se toma la masa inicial del montaje o armado para comenzar la prueba.
10. Se coloca el montaje dentro de una cámara climática a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  y a una HR de 50%.
11. Se toma el valor de la masa cada 24 h en cada espécimen y se coloca dentro de la cámara climática nuevamente.
12. Se da por concluido el ensayo hasta que se tenga un flujo de vapor constante en cada espécimen montado.
13. Se limpia el equipo utilizado para mediciones posteriores.

#### 2.4.6 Ensayes de ciclos de humedecimiento y secado en bloques de mampostería

Estos ensayos se ejecutaron tratando de someter a los especímenes a simulaciones de ambientes natural en forma crítica como lo menciona en su trabajo de investigación (Juárez Alvarado, 2002). Este proceso llevado a cabo en tal investigación, consistió en someter a los especímenes a ciclos de humedecimiento y secado durante 48 h a temperatura de  $23^\circ \pm 2^\circ \text{C}$  en cada ciclo. Otros procedimientos de durabilidad están enfocados en la norma ASTM C-88, donde someten a los especímenes a ciclos de humedecimiento y secado por 5 h y 42 h en soluciones salinas. En los apartados del ACI 201 se muestran también, el sometimiento a ciclos de durabilidad de ataque por sulfatos, entre otros ensayos de durabilidad.

En nuestro caso, se sometieron los especímenes a 15 ciclos de durabilidad pero a un ambiente natural (como se mencionó anteriormente), donde interfirieron la humedad relativa y la temperatura. Para el ciclo de humedecimiento, se colocaron los 56 bloques de dimensiones 150x200x400 mm en el cuarto de curado y madurez, donde por medio de aspersión la humedad relativa del cuarto de curado superior al 95% y la temperatura de  $23^\circ \pm 2^\circ \text{C}$  según la norma (ASTM C511-09, 2009).

Para la sección de secado, se colocaron los especímenes a temperatura de laboratorio de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$  y a una HR de  $40\% \pm 5\%$ . Los tiempos en cada ciclo fueron de 24 h.

Para esta prueba se sometieron 8 especímenes de las formulaciones C1, C2, M3, M4, M5, M6 y M7, que al cumplir 15 ciclos de envejecimiento se ensayaron a compresión axial en la prensa universal Tinius Olsen con las especificaciones de las normas (NMX-C-036-ONNCCE-2013, 2013) y (NMX-C-404-ONNCCE-2012, 2012).

# **CAPÍTULO III**

## CAPÍTULO III

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Los resultados de la caracterización de los materiales utilizados en la investigación se presentarán en este apartado. Como fue mencionado anteriormente, se caracterizaron los materiales para la fabricación de los especímenes de prueba.

En la tabla 12, se resumen los resultados de tal caracterización donde, podemos observar la composición química de los cementos y las puzolanas, además de las densidades de los materiales; primordiales para la formulación de los diseños de mezclas.

##### 3.1.1 Cemento

La densidad obtenida en el cemento portland ordinario CPO40, utilizado en los especímenes EVM fue de  $3,100 \text{ kg/m}^3$  y de acuerdo a la metodología especificado en la norma de apartado 2.1.1. En la tabla 12, se observa la composición química que mostró de la prueba de FRX en las composiciones principales de los óxidos de calcio ( $\text{CaO}$ ), sílice ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). En la figura 12, se muestra la distribución de tamaño de partícula (DTP) del CPO40. El tamaño promedio es de 15.22 micras; tamaño característico de los cementos hidráulicos para ser reactivos.

La densidad obtenida en el cemento portland 32.5R destinado para la fabricación de los especímenes EVC fue de  $3,000 \text{ kg/m}^3$ . Igualmente, en la tabla 10, se observa la composición química de éste cemento hidráulico donde el contenido de calcio se encuentra al 59%.

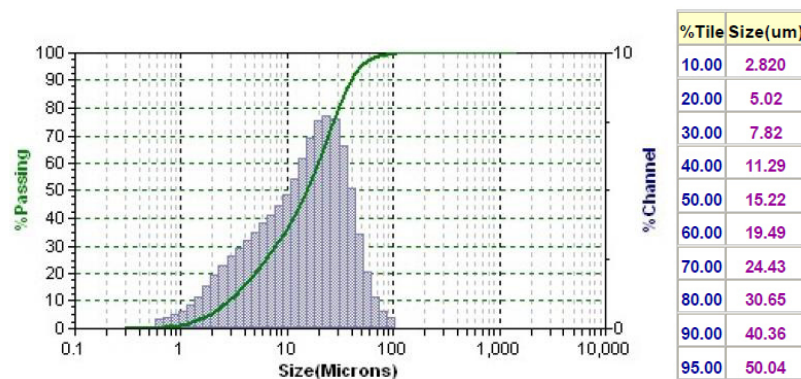


Figura 12. Distribución de tamaño de partícula del CPO 40 Tipo III. A la derecha se muestra la tabla del tamaño de partícula promedio.

### 3.1.2 Ceniza volante

En la tabla 12, se muestran los resultados de la densidad obtenida para la ceniza volante, ésta fue de 2,200 kg/m<sup>3</sup> de acuerdo a la metodología mostrada en el apartado 2.1.2. La composición de óxidos fue de superior al 70% en la sumatoria de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, demostrando que cumple con la clasificación de puzolana artificial. También, se encontró que el contenido de calcio fue de 2.66% siendo este muy bajo, por lo que se clasifica como un puzolana clase F. A continuación, en la figura 13 se resumen los resultados de DTP de este material.

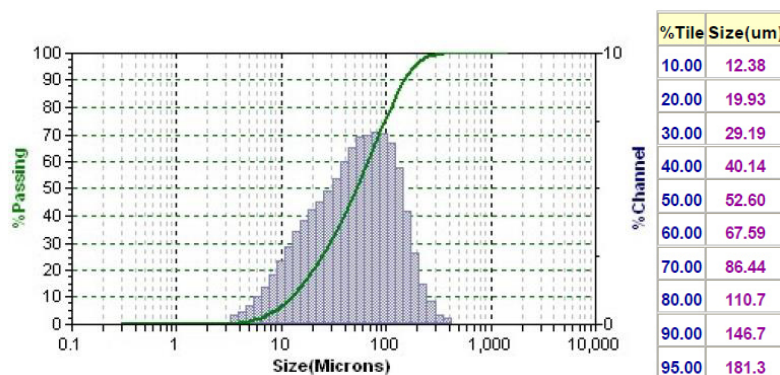


Figura 13. Distribución de tamaño de partícula de la ceniza volante clase F. También se muestra el tamaño de partícula promedio.



### 3.1.3 Metacaolín

En la tabla 12, se resumen los resultados de la composición de óxidos del metacaolín de acuerdo a las especificaciones mostradas en el apartado 2.1.3. En esta tabla observamos que, la sumatoria de la composición de óxidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es del 97.76% superior al 90% mostrado en la literatura donde se menciona que este tipo de puzolanas son muy reactivas en matrices cementantes hidráulicas. Se encontró un contenido de calcio muy bajo con un valor de 1.63% y una pérdida por ignición del 2.63%.

### 3.1.4 Agregado fino

#### *Arena caliza*

Los resultados requeridos para la fabricación de las mezclas fueron la densidad y el porcentaje de absorción. En la densidad se obtuvieron valores de  $2,600 \text{ kg/m}^3$  y la absorción del agregado fino fue de 1.60%.

#### *Arena de río*

Para el caso de la arena sílica de río la caracterización del material fue seleccionada para la ejecución de las mezclas. Estas fueron de igual manera la densidad y la absorción, donde los valores de densidad fueron de  $2,660 \text{ kg/m}^3$  y una absorción de 1.54%.

Tabla 12. Resultados de la caracterización de los materiales.

Composición química-propiedad/material	CPO 40	CP 32.5	CV	MK	Arena Caliza	Arena Sílica	Viruta de pino	Viruta de cáñamo
CaO (%)	68.1	59.9	2.66	1.63				
SiO <sub>2</sub> (%)	14.99	15.2	59.95	65.9				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.26	3.82	25.98	25.1				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.15	2.12	4.92	4.26				
Densidad seca ( $\text{kg/m}^3$ ) [sss]	3,100	3,000	2,200	2,500	2,600	2,660	375 (1,050)	237 (1,020)
LOI (%)		14.00		2.63				
Absorción (%)	-	-	-	-	1.60	1.54	180	330

### 3.1.5 Virutas de origen natural

#### 3.1.5.1 Propiedades físicas

##### *Absorción de agua*

En lo que respecta a la absorción de agua líquida de estos materiales, observamos que su alta porosidad evidentemente es parte fundamental en atrapar una gran cantidad de agua con respecto a su peso. Se confirmó en esta investigación la absorción de agua estudiada por otros autores (Heiko Thoemen, Mark Irle, 2010), donde explican que la porosidad influye mucho en las propiedades de absorción de agua tanto en estado líquido como en estado gaseoso; donde se involucra la humedad relativa del medio circundante.

En la literatura se han mostrado los valores medios de la absorción de agua en estado gaseoso, estos valores están alrededor del 10 al 12% a una humedad relativa entre 50 y 60% (CORMA, 2003). Por lo que nuestros resultados también tienen valores similares a los reflejados en trabajos realizados. Las virutas de madera y cáñamo han mostrado valores de 10 a 12% encontrándose en las mismas circunstancias de temperatura a 23° C y humedad relativa de 55% en promedio.

Para obtener la absorción de agua fue necesario repetir las pruebas de absorción en los dos tipos de virutas por lo menos nueve veces. Este método de obtención de absorción es relativamente sencillo en otros materiales para la fabricación de concreto pero para materiales ligeros como las virutas de origen natural fue un trabajo que requirió mayor dedicación y paciencia. Las virutas son altamente absorbentes pero para dejarlas en estado saturado superficialmente seco (sss) fue necesario optimizar el método de absorción haciendo distintas mediciones, además con diferentes pesos de muestras. Al final, se pudo lograr obtener valores más cercanos entre sí. Es necesario mencionar que las condiciones del medio ambiente dentro del laboratorio fueron primordiales para la ejecución de la prueba.

Como se mencionó anteriormente, en la tabla 12, se muestran los valores de absorción de las virutas. La viruta de madera de pino mostró una media de 180%

de absorción con respecto a su peso y la viruta de cáñamo demostró ser 1.8 veces más absorbente que la de madera de pino con valores medios de 330%. Estos resultados fueron muy importantes para la formulación de los diseños de mezclas y para el cálculo de la densidad aparente de las virutas.

### *Densidad aparente*

Para la elaboración de los especímenes de prueba fue necesario conocer la densidad de las virutas, siendo otro factor muy importante la absorción de las mismas. Como se ve en la tabla 12, estas densidades aparentes secas fueron: 375 kg/m<sup>3</sup> para la viruta de pino y 237 kg/m<sup>3</sup> para las virutas de cáñamo. Para el cálculo de la densidad se utilizó la siguiente fórmula la cual no pudo ser utilizada en el cálculo de la densidad aparente de la viruta de cáñamo:

$$D_s = \frac{M_s}{M_{sss} + M_{pic} - M_{m+p}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$D_s$  = Densidad aparente del agregado ligero, (kg/m<sup>3</sup>).

$M_s$  = Masa del material seca al horno (kg).

$M_{sss}$  = Masa del material en estado saturado superficialmente seco (kg)

$M_{pic}$  = Masa del picnómetro con agua (kg).

$M_{m+p}$  = Masa del picnómetro con agua y viruta (kg).

Estas densidades aparentes en las virutas de cáñamo eran demasiado altas con resultados superiores a las densidades o peso volumétrico del concreto y fuera de los rangos en los que se encuentran las densidades de las maderas más pesadas según ciertas publicaciones (John A. Youngquist, 1999) y (Heiko Thoemen, Mark Irle, 2010).

Por lo que, después de varios resultados poco congruentes, se optó por realizar las densidades de acuerdo al comportamiento que tenían al encontrarse en

estado: (sss). Se utilizó el método de densidad aparente utilizado en la obtención de densidades por el principio de Arquímedes. Ya que, las virutas experimentaban un fenómeno de mayor adsorción después de estar en estado sss y se sumergían desplazando un volumen más evidente en probetas graduadas como el matraz de Le Chatelier. Después de varios ensayos, con ayuda de este método se obtuvo una densidad aparente de las virutas antes mencionadas en la tabla 12.

El RILEM (RILEM, 2013), tienen un método para la obtención de las densidades aparentes en virutas de origen natural en donde también mencionan los resultados de la densidad de estos materiales en diferentes laboratorios. Estos resultados se tomaron llenando un volumen conocido con las virutas y registrando el peso de las mismas, por lo que la cantidad de vacíos en las muestras es considerablemente alta. Por otro lado, las densidades obtenidas por medio del principio de Arquímedes con ayuda del matraz de Le Chatelier dieron el doble de la densidad registrada (véase tabla 10) por los laboratorios de investigación de dicho grupo (valores de 100 a 110 kg/m<sup>3</sup>).

Por lo tanto, se seleccionó la densidad aparente obtenida por el método de volumen desplazado ya que mostró valores de menor cantidad de vacíos que el otro método.

La densidad aparente influye en las cualidades del material, ya que, un material de baja densidad mostrará una menor conductividad térmica para el diseño de compuestos térmicos (Heiko Thoemen, Mark Irle, 2010).

En nuestro caso, al tener un material de baja densidad aparente y con alta porosidad nos favorece en la combinación de estas propiedades con las de morteros a base de cemento portland para disminuir la conductividad térmica.

### Conductividad térmica

En la literatura se expresan valores de conductividad térmica para las virutas de madera como de cáñamo se encuentran entre 38 a 107 mW/mK en condiciones de 23° C y a una humedad relativa del 50%, como comparativa con la conductividad térmica reportada en otros materiales, podemos mencionar a la fibra de vidrio que tiene valores similares entre 35 a 55 mW/mK (IVE, 2011).

En la figura 19, se muestra la conductividad térmica de la viruta de cáñamo con un valor de 55 mW/mK a una temperatura de 23° C; recordemos que la conductividad aumenta con el incremento de temperatura. Este resultado concuerda con los arrojados por otras investigaciones.

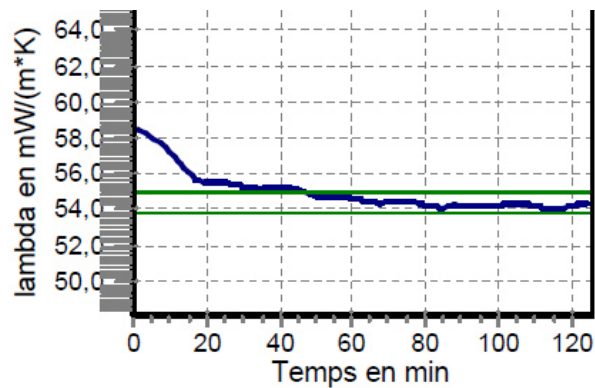
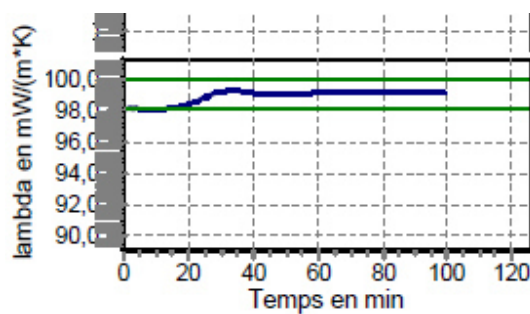
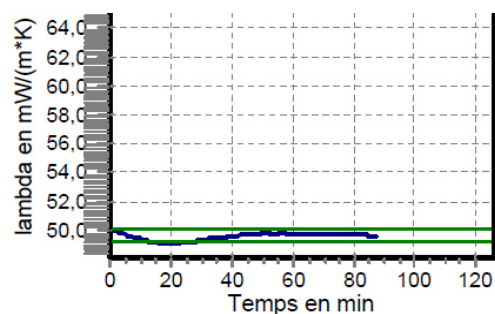


Figura 14. Conductividad térmica de las virutas a 23° C.

En la figura 20a, podemos observar otro valor de conductividad térmica de 99 mW/mK a una temperatura de 40° C y en la figura 20b se observa un valor de 49.9 mW/mK. Esto nos muestra que a mayor temperatura el coeficiente de conductividad aumentará y viceversa.



a)



b)

Figura 15. a) Conductividad térmica de las virutas a 40° C y b) Conductividad térmica a 10° C.

Los coeficientes de conductividad térmica de estas virutas las colocan dentro del rango de materiales aislantes térmicos según las especificaciones de la norma (NOM-018-ENER-1997, 1997) y la norma (NOM-020-ENER-2011, 2011). Además, los coeficientes también se encuentran dentro del rango del Código Técnico de la Edificación en España (IVE, 2011).

Los resultados nos permiten comprender el comportamiento de la transferencia de calor de un compuesto a base de cemento portland con adiciones de estas virutas, donde la combinación de las propiedades térmicas del mortero con las propiedades térmicas de las virutas puede llevar a la reducción del coeficiente de conductividad térmica del material compuesto.

#### 3.1.5.2 Morfología microscópica

Como se mencionó anteriormente, las virutas de origen natural tienen la particularidad de ser altamente porosas y por consiguiente altamente absorbentes. Por lo que, con ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) se confirmó tal porosidad.

En la figuras 16, 17 y 18, se observan micrografías de viruta de madera de pino, donde se estima una porosidad de 500 poros/mm<sup>2</sup>. La madera tiene 60% de celulosa (SEMARNAT, 2010), ya que, por ser un polímero natural tiene la particularidad de tener varios monómeros que hacen el conjunto de todas las cadenas poliméricas de glucosa.

La celulosa, denominada también sustancia estructural, es un polisacárido compuesto exclusivamente por estas moléculas de glucosa o bien  $\beta$ -glucosa, un homopolisacárido (compuesto por un solo tipo de monosacárido); es rígido, insoluble al agua y contiene hasta varios cientos de miles de unidades  $\beta$ -glucosa (SEMARNAT, 2010).

La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa (Heiko Thoemen, Mark Irle, 2010), en la que se establecen numerosos puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciendo que sea insoluble en agua y originando fibras compactas que constituyen la pared de las células vegetales (SEMARNAT, 2010) (véase figura 16, 17 y 18).

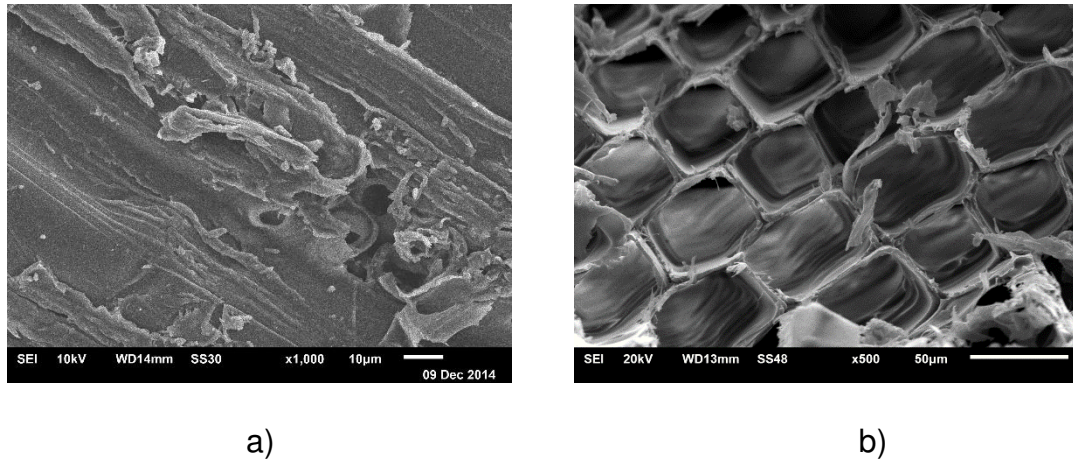


Figura 16. Micrografías de viruta de madera de pino, a) longitudinal y b) transversal.

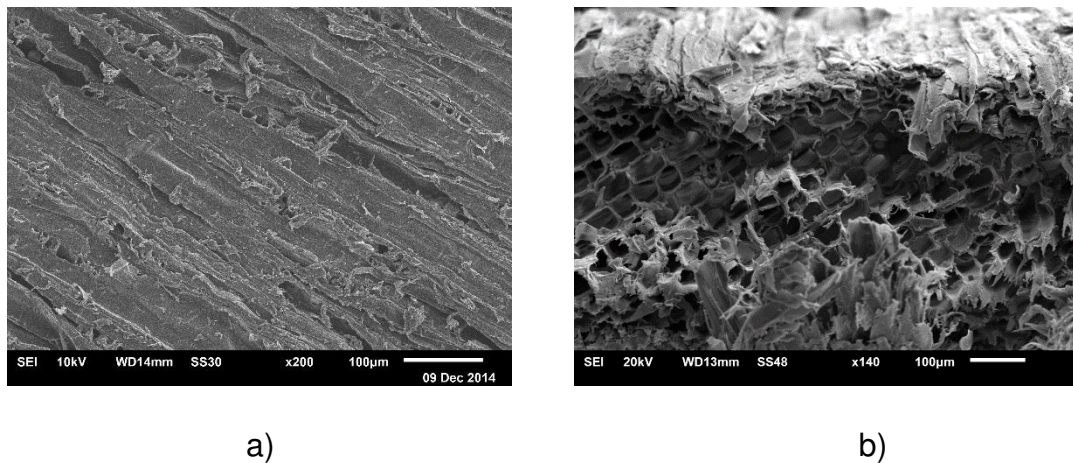
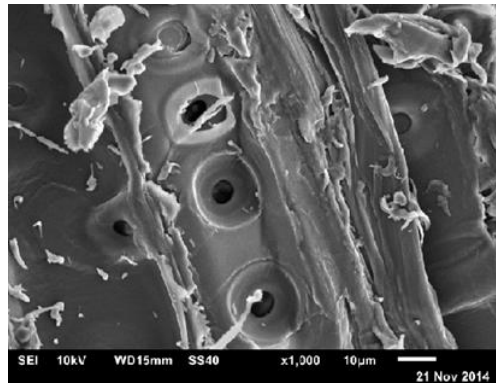
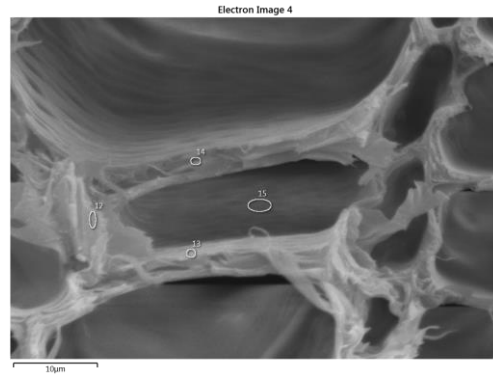


Figura 17. Micrografías de viruta de madera de pino en zona de porosidad, a) longitudinal y b) transversal.



a)



b)

Figura 18. Porosidad de la viruta de madera de pino, a) longitudinal y b) transversal.

Para el caso de las virutas de cáñamo, en la figura 19 se aprecia un corte transversal de dicha viruta, donde se alcanza a ver la alineación de las fibrillas que es común ver en los polímeros naturales.

En la figura 20, podemos observar el corte longitudinal y transversal de la viruta de cáñamo, en ella podemos ver la distribución de las celdas o microporos con dimensiones de entre 10 y 15 micras de ancho por 20 a 30 micras de largo en forma tubular. Corroboramos que es un material altamente poroso con una media de 12,700 poros/mm<sup>2</sup> en lado transversal aproximadamente, que con respecto a la porosidad de la viruta de pino es mayor por 25.4 veces, esto debido al tipo de especie y el tamaño de tallo (véase figuras 20 y 21).

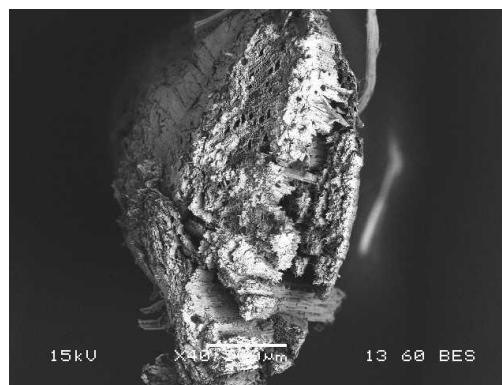
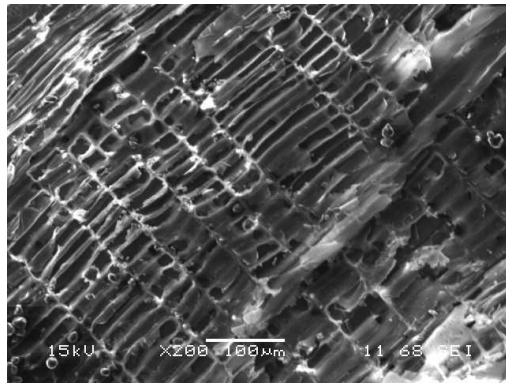
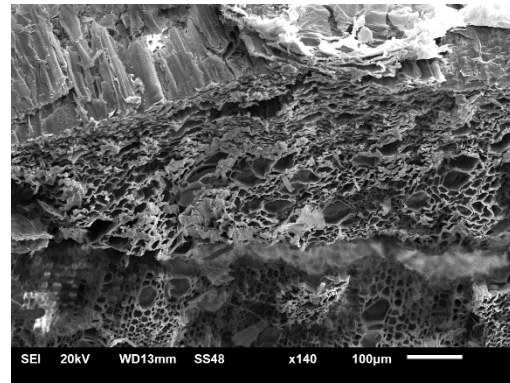


Figura 19. Micrografías de la viruta de cáñamo en zona transversal.



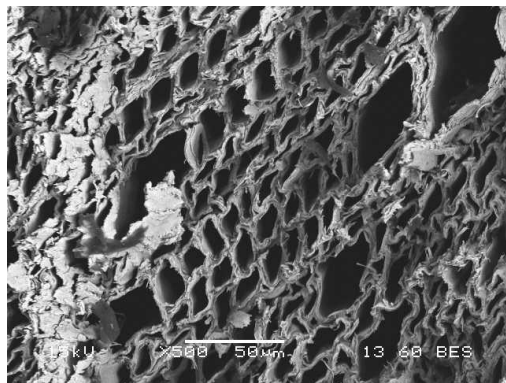


a)

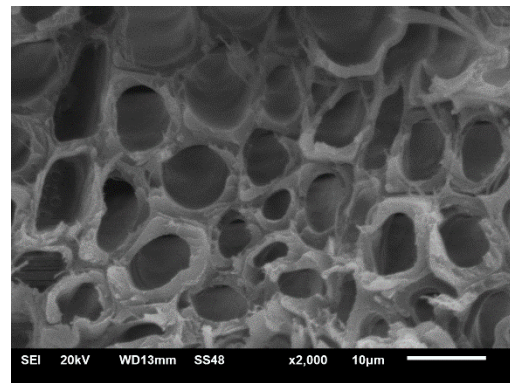


b)

Figura 20. Micrografía longitudinal de la viruta de cáñamo, a) longitudinal y b) transversal.



a)



b)

Figura 21. Distribución de micro poros en corte transversal de la viruta de cáñamo, a) 50  $\mu\text{m}$  y b) 10  $\mu\text{m}$ .

## 3.2 RESULTADOS PRELIMINARES EN ESPECÍMENES SIN ADICIÓN DE VIRUTAS

### 3.2.1 Selección del consumo de cemento

A continuación, se presentan los resultados de 18 cubos de 50x50x50 mm que se ensayaron a compresión de acuerdo a la norma ASTM C-109. Estos cubos se fabricaron con la finalidad de tener un parámetro de referencia. El objetivo consistió en seleccionar un consumo de cemento constante para poder cumplir

con una resistencia a compresión mayor a  $35 \text{ kg/cm}^2$  que posteriormente se utilizará para la fabricación de bloques de mampostería de  $150 \times 200 \times 400 \text{ mm}$  en la modalidad de tres huecos según lo establece la norma NMX C441.

El consumo de cemento portland se tomó en base a los consumos utilizados de una investigación realizada en ésta institución (Del Real Dávalos, 2013). En este proyecto se utilizó un consumo de cemento portland de  $167 \text{ kg/m}^3$  con una relación a/c de 0.60, donde se obtuvo una resistencia a compresión de  $60 \text{ kg/cm}^2$  para especímenes de control.

Por lo que, en este proyecto se optó por la fabricación de especímenes de control con la relación a/c de 1.00 y consumo de cemento de  $150 \text{ kg/m}^3$  que cumplieran con las especificaciones de la norma (NMX-C-441-ONNCCE-2013, 2013). Se utilizaron puzolanas que se adicionaron como filler para que el consumo de cemento fuese constante y así asegurar la resistencia a compresión.

### 3.2.2 Mezclado, colado y curado de especímenes

El mezclado se llevó a cabo en mezcladoras de capacidad de superior a los 20 litros y el revenimiento en todas las mezclas fue de 0 a 50 mm. En la etapa del colado se observó que la compactación fue complicada por la baja trabajabilidad de las mezclas debido al bajo revenimiento. Fue requerido el uso de una mesa de vibro-compactación para el colado de los especímenes, esto con la finalidad de igualar el método de vibro-compactación del equipo de fabricación de unidades de mampostería; que consistía en llenar el molde destinado y compactar el material por medio de un peso muerto y vibro-compactación.

El curado final se llevó a cabo en el cuarto de curado y maduración de especímenes donde las condiciones de una humedad relativa superior al 95% y una temperatura controlada de  $23^\circ \pm 2^\circ \text{ C}$  las cuales son las adecuadas para la madurez a 28 días de estos especímenes.

### 3.2.3 Resistencia a compresión en cubos

Durante esta etapa de la experimentación se utilizaron dos consumos de cemento: uno de 100 kg/m<sup>3</sup> y el otro de 150 kg/m<sup>3</sup>, donde después se continuó con la formulación de los diseños de mezclas con distintas relaciones de a/c. La relación a/c utilizada fue de 0.60 en estos especímenes.

En la figura 22, observamos el desarrollo de la resistencia a compresión de los dos consumos cementantes propuestos. En esta figura vemos que el desarrollo de la resistencia a compresión es mayor al incrementar el consumo de cemento a 150 kg/m<sup>3</sup>, ya que, a mayor cantidad de cemento y con una misma relación a/c, permite que la matriz cementante envuelva con mayor facilidad los agregados por el aumento en volumen de la pasta de cemento, en nuestro caso la arena caliza fungió como agregado total de los especímenes preliminares.

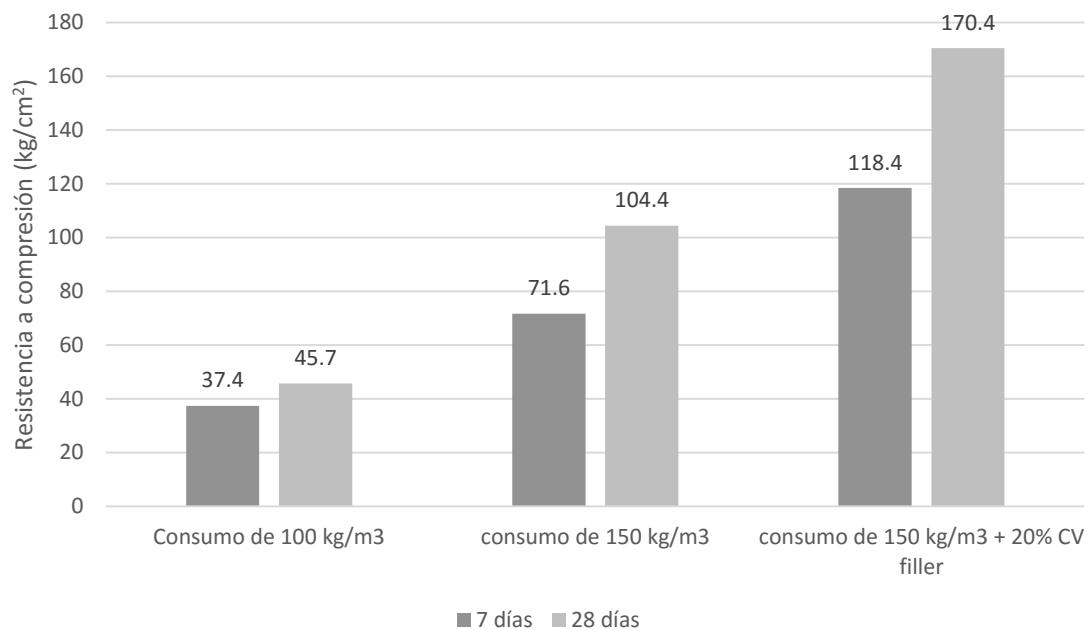


Figura 22. Desarrollo de la resistencia a compresión en especímenes preliminares.

Como se observó en la figura 22, el desarrollo de resistencia a compresión es notable a razón de que aumenta la cantidad de pasta de cemento dentro del compuesto. También, se puede observar que el comportamiento del compuesto

con la adición de las cenizas volantes como filler; adicionando 20% del total del cemento portland, fue favorable aumentando la resistencia a compresión en estos especímenes 63.21% más con respecto a la serie de 150 kg/m<sup>3</sup> de cemento a 28 días.

Esta fue una de las razones por las que se optó en adicionar puzolanas como filler con la finalidad de aportar una mayor cantidad de pasta cementante sin sustituir material cementante. Así, después de seleccionar un consumo de cemento constante se continuó con el siguiente paso donde seleccionaremos una relación a/c única y de mejores resultados en la resistencia a compresión para la fabricación de los especímenes de prueba.

#### 3.2.4 Resistencia a compresión y densidad aparente en cilindros

Una vez definido el consumo de cemento se continuó con la selección de la mejor relación a/c para la poder asegurar que los resultados de resistencia a compresión fueran mayores y así poder estar por encima de la resistencia a compresión deseada para mampostería no estructural.

Estas relaciones a/c fueron 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 y 1.40, las cuales fueron propuestas para la selección de una relación a/c que mejorará el desarrollo de la resistencia a compresión a 28 días de acuerdo al contenido de pasta dentro de la mezcla.

En la figura 24, se muestran los resultados de los ensayos mecánicos a compresión en 30 cilindros de 100x200 mm; 6 para cada relación a/c. Como podemos observar en dicha figura, los resultados de resistencia mecánica son mayores con una relación a/c de 1.00 en especímenes de control donde solo se utilizó cemento y arena caliza.

También en la misma figura (véase figura 24), observamos que a medida que aumenta el contenido de pasta dentro del compuesto en relaciones a/c de 1.20 y 1.40, esta resistencia mecánica se ve afectada por lo que tiende a disminuir. Esto debido a que de acuerdo a la relación a/c de 1.00 el contenido de pasta efectivo

se lograba con esta relación y el exceso de agua dentro de la pasta se evaporó produciendo porosidad en la misma. Es conocido es fenómeno por el exceso de agua dentro de una mezcla que por un lado puede mejorar la trabajabilidad y el recubrimiento de los agregados de la mezcla pero por el otro lado el desarrollo de la resistencia mecánica no es favorable por la separación del SCH por las moléculas de agua.

También podemos observar que en las relaciones a/c de 0.60 y 0.80 se obtuvieron valores de resistencia a compresión menores con respecto a la relación a/c de 1.00. Esto puede atribuirse a que el contenido de pasta no fue suficiente para cubrir el total de los agregados ya que por ser agregados finos el área superficial aumentó en el diseño de mezclas y la pasta no fue suficiente para cubrir el total de los agregados. Además, se observó que la relación a/c de mayor resistencia a compresión fue de 1.00 con un valor de 114.7 kg/cm<sup>2</sup> por lo que ésta fue la seleccionada para continuar con la fabricación de los especímenes de prueba.

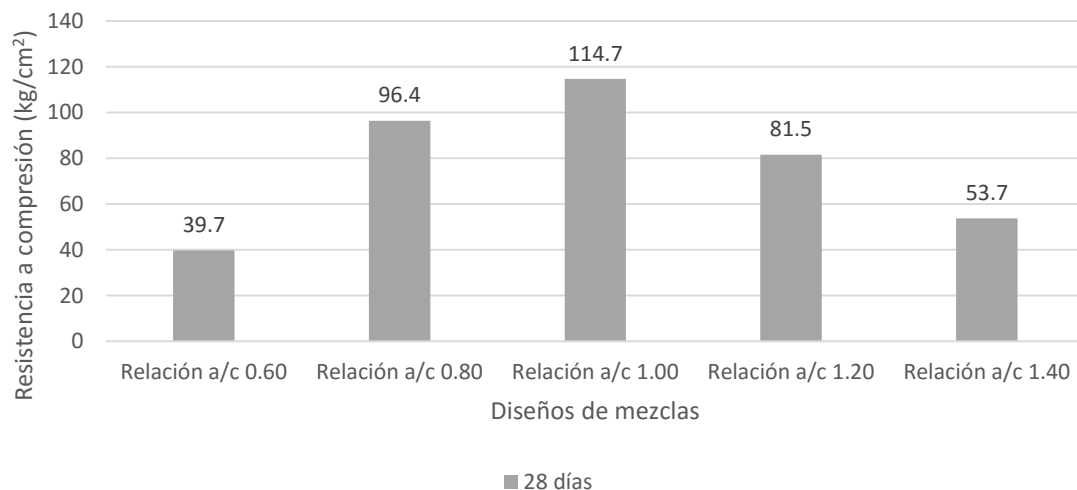


Figura 23. Desarrollo de la resistencia a compresión a 28 días en distintas relaciones a/c.

En la figura 24, observaremos las densidades aparentes promedio en estos especímenes. Vemos que el resultado de mayor densidad es el de la relación a/c de 1.00, esto concuerda con el resultado de resistencia mecánica y mostrando

que los especímenes de mayor densidad aparente también son los de mayor resistencia a compresión debido a que la densificación de los especímenes depende por los materiales utilizados en los proporcionamientos de mezclas.

Recordemos que el contenido de cemento en todas las relaciones a/c es el mismo por lo que el contenido de agua fue la variable que modificó los resultados de resistencia a compresión y por ende las densidades aparentes de las mismas. Por lo que, aun cuando la relación a/c de 1.20 es 0.44% menor que la relación a/c 1.00, y esta mucho mayor que la relación a/c de 0.80, vemos que la resistencia a compresión es mayor en la relación a/c de 0.80 porque el contenido de agua fue menor en éste diseño de mezclas produciendo una mejor adherencia mecánica con una menor cantidad de pasta comparándola con la relación a/c de 1.20.

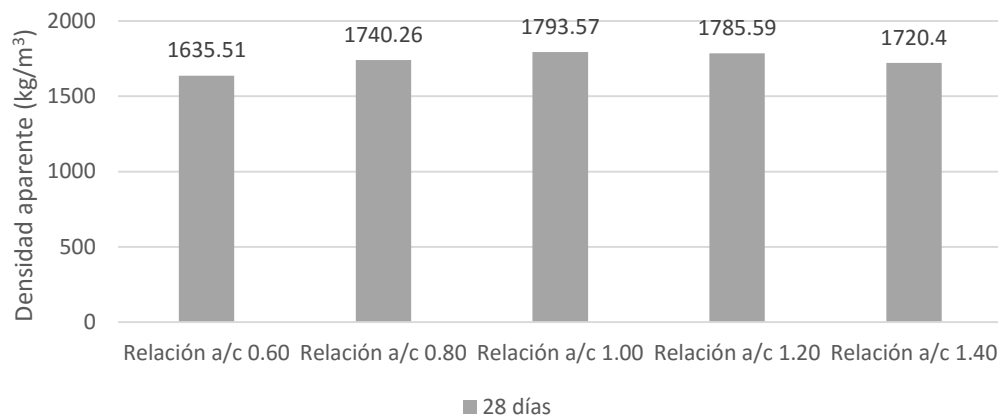


Figura 24. Densidades aparentes para diferentes relaciones a/c.

Por lo que, se seleccionó la relación a/c de 1.00 ya que fue la de mayor resistencia a compresión; siendo uno de los objetivos marcados en esta investigación y un consumo de cemento constante de 150 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3 FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES CON VIRUTAS

Para estudiar el desarrollo de resistencia a compresión de los morteros se fabricaron 36 especímenes cilíndricos de 100x200 mm y 56 especímenes prismáticos de 150x200x400 mm con tres huecos.

#### 3.3.1 Selección del consumo de virutas de origen natural

La selección de la cantidad de virutas que se determinó en el apartado 2.3.1 fue en de acuerdo a la literatura donde se menciona la pérdida de densidad aparente y por defecto una perdida proporcional del desarrollo de la resistencia a compresión en los distintos especímenes (véase el apartado 3.4.1).

#### 3.3.2 Proporcionamiento de las mezclas

En el diseño de mezclas se observó que el contenido de aire que es corregido al inicio de los ensayos preliminares puede ser modificado en mezclas posteriores, ya que al comienzo de la fabricación de las mezclas se observó una gran cantidad de vacíos en la apariencia de los especímenes cúbicos con relaciones a/c de 0.60 y al evaluarse la densidad aparente que mostraban estos especímenes se observó que sería necesario la corrección del diseño de mezclas del 3% al 6% del contenido de aire atrapado en estado fresco. Esta modificación se hizo en las mezclas con relación a/c de 1.00 que, como se observó anteriormente fue la que mostró mayor resistencia a compresión en los especímenes cilíndricos.

Como resultado clave del diseño de mezclas fue la relación a/c dentro de la mezcla con la adición de las puzolanas como filler, porque como fue explicado anteriormente, fue necesario mantener un consumo de pasta de cemento que permitiera obtener valores de resistencia a compresión superiores a 35 kg/cm<sup>2</sup>.

Si fuese tomado el filler como parte del consumo de pasta cementante se tendría una relación a/c de 0.83 con la adición del 20% de puzolanas en peso de la cantidad de cemento total; remplazada por volumen del contenido del agregado fino.

Por lo que, con una relación a/c de 0.83 fue posible lograr resultados de resistencia compresión superiores a los esperados en cuando a las formulaciones C1, C2, M3, M4, M5 y M6; para los especímenes con adiciones de virutas de pino, como para las formulaciones de los especímenes NC1, NC2, NM4 y NM6; para los especímenes con adiciones de virutas de cáñamo.

### 3.3.3 Mezclado, colado y curado

En la parte del mezclado se observó una muy baja trabajabilidad por lo que se optó por aumentar el tiempo de mezclado un minuto extra; como se explicó en el apartado 2.3.3, esto con la finalidad de la pasta total se mezclara de manera uniforme dentro de la mezcla de acuerdo a las experiencias observadas en la fabricación de los especímenes preliminares. Además, se observó que en las mezclas de prueba los materiales de la mezcla se quedaban en el fondo de la olla de mezcla, por lo que fue necesario cambiar de mezcladora y energía de mezclado, pasando de la velocidad 1 recomendada por la norma ASTM C109 a la velocidad 2 para el mezclado inicial de los agregados con el agua de absorción.

De igual forma como fue explicado en el apartado 3.2.2, el colado de los especímenes no mostraron otra dificultad que la baja trabajabilidad para compactar los especímenes.

Del mismo modo como fue expresado en el apartado 3.2.2, el curado de los especímenes con virutas no mostraron cambios significativos dentro del cuarto de curado y maduración.

Es posible que los especímenes al contener estos agregados altamente absorbente hayan sido un factor importante en los valores de la resistencia a compresión, como lo explican en la investigación (Arnaud & Gourlay, 2012) donde mencionan que el tipo de curado a diferentes humedades relativas. En ella mencionan que el curado de los especímenes a una menor humedad relativa (50%), muestra valores de resistencia a compresión mayores que en especímenes curados en condiciones estandarizadas (95%).



#### 3.3.4 Fabricación de especímenes

En la fabricación de especímenes fue necesario la repetición de las mezclas dos veces y en algunos casos como los especímenes de prueba hasta tres veces; con la finalidad de obtener valores de resistencia a compresión comparables entre si y reproducibles. Para el caso de los especímenes de mampostería la fabricación fue un trabajo más complicado, ya que la fabricación se ejecutó de modo manual y mecánico.

En la figura 25, podemos ver un bloque de mampostería después del colado, de la vibro-compresión y el desmoldado. Se observa el acabado obtenido después de la fabricación. Una vez colado se retiró el espécimen a un área segura donde continuo con el fraguado inicial. En la figura 26, podemos ver varios especímenes de mampostería a la edad de 24 a 48 h de fraguado inicial para posteriormente llevarlos al cuarto de curado donde permanecerán 28 días. En la figura 27, se muestran los especímenes de mampostería preparados para los ensayos mecánicos a compresión.



Figura 25. Bloque de mampostería a punto de ser retirado de la máquina bloquera.



Figura 26. Especímenes de mampostería después de la fabricación durante su fraguado inicial.



Figura 27. Especímenes de mampostería para ensayo a compresión.

### 3.4 ENSAYOS Y PRUEBAS EN ESPECÍMENES CON VIRUTAS

#### 3.4.1 Ensayos de resistencia a compresión

##### 3.4.1.1 Cilindros

Después de ser fabricados los cilindros de 100x200 mm se procedió al cabeceo y ensayo a mecánico a compresión de los mismos. En la figura 28, se observan 3 cilindros cabeceados con azufre.



Figura 28. Cilindros de 100x200 mm cabeceados con azufre.

En las figuras 29 y 30, podemos observar los resultados de la resistencia a compresión a 28 días en los cilindros. Se observa que aun cuando los especímenes de M5 y M6 contienen las cenizas volantes como filler no presentaron mayor desarrollo en la resistencia a compresión como se ve reflejado en los resultados de C2, donde la serie M5 (2% de virutas de pino y filler) mostró 42.13% menor resistencia a compresión con respecto a C2 y M6 (4% de virutas de pino y filler) mostró 58.33% menor resistencia a compresión con respecto a C2 (145.99 kg/cm<sup>2</sup>).

En la figura 30, podemos observar que en los especímenes que no contenían filler (C1, M3 y M4) la resistencia a compresión no tuvo el mismo efecto que en los especímenes con filler. Vemos que para la serie M3 la pérdida de resistencia fue de 21.51% y de M4 fue de 38.20% con respecto a C1 (142.53 kg/cm<sup>2</sup>). Por lo que se atribuye esta pérdida de resistencia a la variable del filler entre ambas series. Para la serie que contenía cenizas volantes como filler se esperaban resultados mayores en cuanto a la resistencia mecánica pero es sabido que estas puzolanas no reaccionan con los productos de hidratación secundarias de la hidratación del cemento a edades tempranas (28 días) por lo que se requiere esperar por lo menos 56 días para esperar que la reacción entre puzolanas y hidróxido de calcio se lleve a cabo.

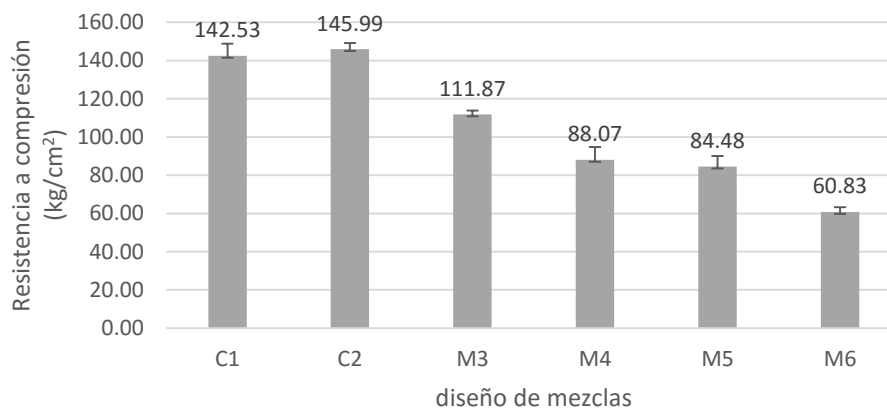


Figura 29. Resistencia a compresión en cilindros.

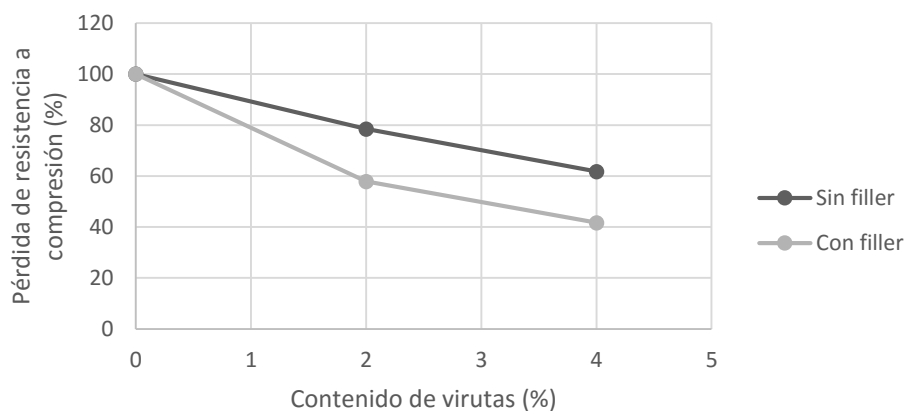


Figura 30. Efecto del filler en la evolución de la resistencia a compresión en cilindros.

#### 3.4.1.2 Mampostería

En la figura 31, vemos el desarrollo de la resistencia a compresión de los especímenes de mampostería. Se puede observar que, en los casos desde los especímenes de control hasta los especímenes de M6 cumplieron con el desarrollo de esta resistencia superior a los 35 kg/cm<sup>2</sup> a excepción de los especímenes de M7 donde se utilizó una cantidad de 10% en adición de virutas de madera. Aunque el resultado promedio de éste diseño de mezclas (M7) es de 29 kg/cm<sup>2</sup> y no cumplió con la resistencia objetivo, el resultado es favorable ya que, aun cuando ésta resistencia es inferior a la esperada en el diseño con éstas adiciones de virutas vemos que es factible la fabricación de mampostería no

estructural ya que la norma tiene una tolerancia de resistencia mínima por pieza de 28 kg/cm<sup>2</sup>, modificando posteriormente el consumo de material cementante para mayores resultados.

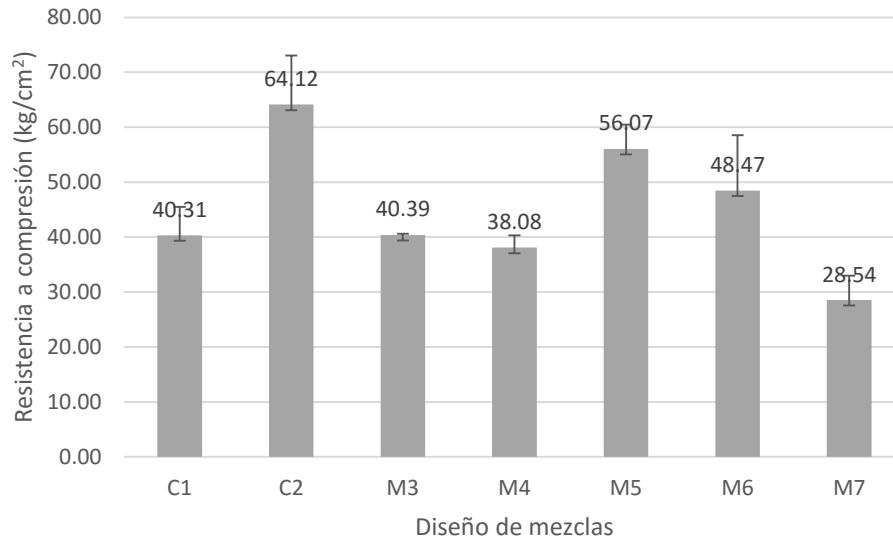


Figura 31. Resistencia a compresión en especímenes de mampostería a 28 días.

Por lo que, un consumo de 150 kg/m<sup>3</sup> no sería el adecuado para la fabricación de estos especímenes. Será necesario aumentar el consumo a 200 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente para poder adicionar virutas de origen natural en hasta un 10% en volumen.

También observamos que, la adición de ceniza volante fue positiva en el desarrollo de la resistencia a compresión de estos especímenes. Vemos que la mejora de resistencia a compresión entre los especímenes C1 (40.31 kg/cm<sup>2</sup>) fue de y C2 (64.12 kg/cm<sup>2</sup>) donde C2 aumentó 59.06% con respecto de C1. En los especímenes de la serie M3 (2% de virutas de pino sin filler) la resistencia a compresión no tuvo cambios significativos debido a una similitud en los resultados con respecto de C1 y en la serie M4 (4% de virutas de pino sin filler) la reducción de la resistencia mecánica fue del 5.53%, por lo que en las series

sin adición de filler, la pérdida de resistencia a compresión no tuvo gran impacto en estos especímenes que cumplieron con la resistencia objetivo.

En las series M5 (2% virutas de pino más filler) la resistencia a compresión disminuyó 12.55% con respecto a la serie de control C2, en la serie M6 (4% virutas de pino más filler) se obtuvieron resultados de reducción de la resistencia mecánica de 24.40% con respecto a la serie C2 y por último en la serie M7 (10% virutas de pino más filler) el resultado de la resistencia mecánica fue 55.48% menos que C2.

Esto puede deberse teóricamente a dos cosas: la primera que la ceniza volante no reaccionó como puzolana a la edad de 28 días y por otro lado, el efecto de la puzolana como filler sólo facilitó la distribución de la pasta de cemento en los agregados debido a que se observó que las series que contenían filler mostraron mayor resistencia a compresión que las series que no lo contenían.

En la figura 32, se observa la reducción de la resistencia a compresión en estos especímenes cuando se agregan las virutas naturales. Podemos ver las series C1, M3 y M4 que no contenían filler, no demuestran reducciones de mayor magnitud como las series C2, M5, M6 y M7 con filler. Observamos que la adición de la ceniza volante como filler provocó una disminución mayor en los resultados de la resistencia a compresión con respecto a las series que no contenían filler.

Aunque esto muestra que los especímenes con filler disminuyeron en mayor cantidad su resistencia a compresión, estos resultados son mayores que los especímenes de las series sin adición de filler debido a una mayor densificación de las mezclas.

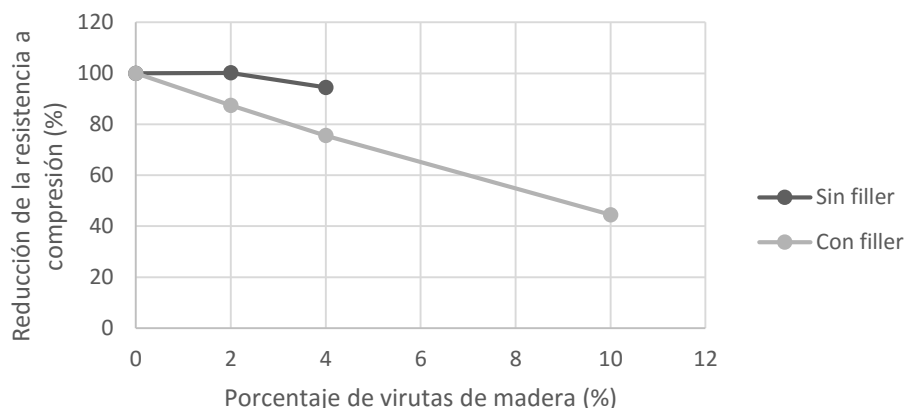


Figura 32. Evolución de la resistencia a compresión en especímenes de mampostería.

#### 3.4.1.3 Cubos

Se fabricaron especímenes con las formulaciones que se mostraron en la tabla 3 y los resultados se muestran en la figura 33. Se observa que entre los especímenes de control NC1 y NC2, la adición del metacaolín (MK) como filler causó un aumento en la resistencia a compresión del 24.68% más en la serie de control NC2 con respecto a la serie de control NC1.

En esta figura (véase figura 33), también observamos que la adición de virutas de cáñamo al 4%, disminuye el desarrollo de la resistencia a compresión en los diseños de mezclas sin adición de filler, debido a que en NM4 (4% viruta de cáñamo sin filler) redujo hasta un 25.88% con respecto a NC1 (32.61 kg/cm<sup>2</sup>) que es la serie de control para especímenes sin filler.

En la misma figura, observamos que los especímenes NM6 (4% virutas de cáñamo más filler) disminuyeron 5.75% con relación a NC2 y NM7 (10% virutas de cáñamo más filler) se redujo 25.82% en base a la serie de control de filler NC2 (40.66 kg/cm<sup>2</sup>).

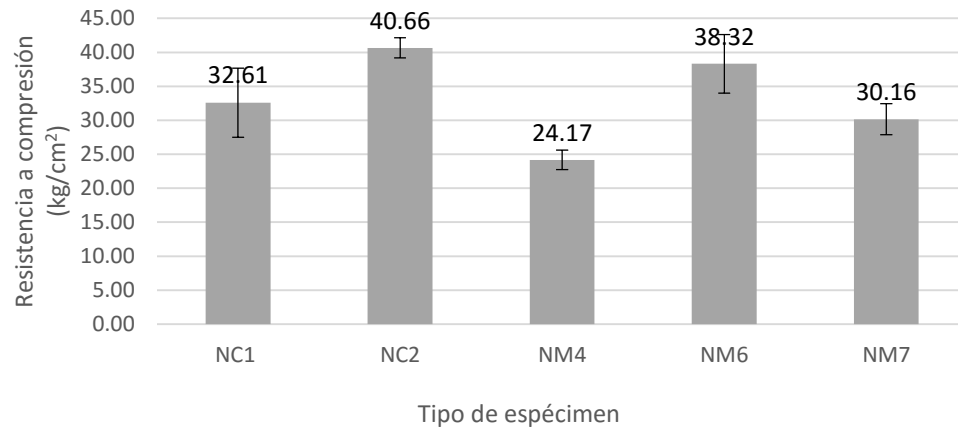


Figura 33. Resistencia a compresión de especímenes 150x150x150 mm.

En la figura 34, se presenta la reducción de la resistencia a compresión de este tipo de especímenes. Podemos observar que el efecto del filler tuvo mayores resultados en el desarrollo de la resistencia a compresión en comparación a las series de los especímenes sin adiciones de filler. Por lo que el filler dio mayores resultados en la resistencia a compresión y menor pérdida en base al porcentaje de virutas con respecto a la serie sin filler.

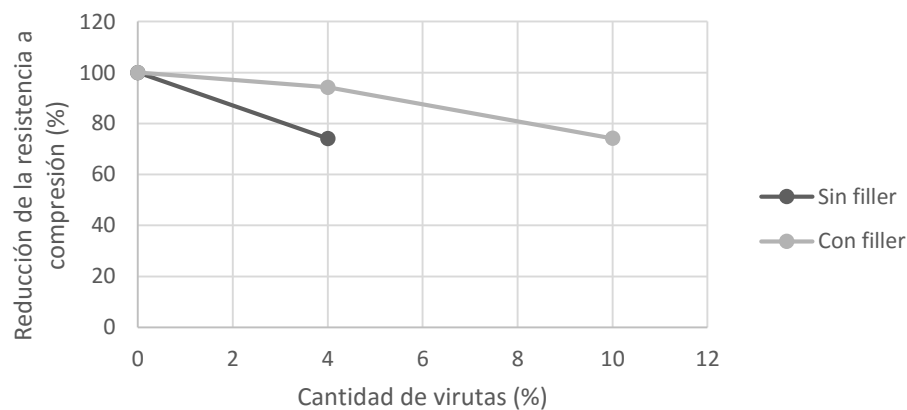


Figura 34. Reducción de la resistencia a compresión en cubos de 150x150x150 mm.



### 3.4.2 Ensayos de densidad aparente

#### 3.4.2.1 Cilindros

En la figura 35, se muestran los valores de la densidad aparente en los cilindros con viruta de pino. Se observa que los especímenes M7 disminuyeron su densidad hasta un 24% con respecto a la referencia C2 que contiene los mismos materiales de esta formulación. Vemos que las propiedades de las virutas de pino tienen un efecto significativo en la disminución de la densidad al contener hasta un 10% en sustitución por volumen. El volumen que ocupan las virutas de acuerdo con estas densidades es muy poco y por lo tanto la densidad de 1,718 kg/m<sup>3</sup> no es suficiente para competir contra las densidades de bloques ligeros (1,000 a 1,600 kg/m<sup>3</sup>) como lo especifica la norma (NMX-AA-164-SCFI-2013, 2013).

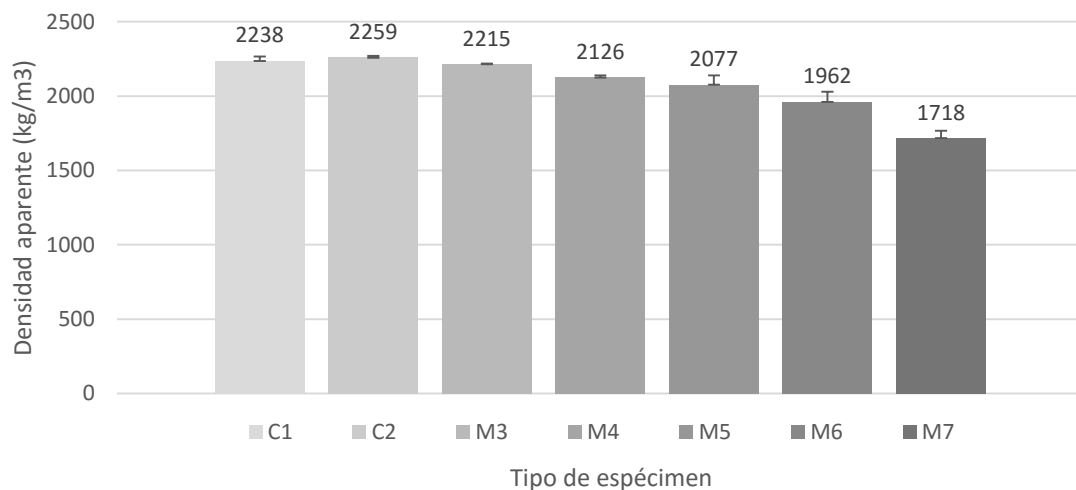


Figura 35. Densidad aparente en cilindros.

#### 3.4.2.2 Mampostería

Podemos observar en la figura 36, se observa que los especímenes M3 (2% virutas de pino sin filler) y M4 (4% virutas de pino sin filler) tienen valores de densidad similares con respecto a la serie de control C1 (2,100 kg/m<sup>3</sup>) por lo que la adición de las virutas no tuvo cambios significativos en la densidad aparente en estas series.

Por otro lado, los especímenes de la serie M5 (2% virutas de pino más filler) tuvo una ligera densificación del 2.66% más con respecto a la serie de control C2. De igual modo, la serie M6 (4% virutas de pino más filler) el filler causó un incremento en la densidad de los especímenes con valores del 6.72% aun cuando éste contenía virutas de pino. Por último, la serie de los especímenes M7 (10% virutas de pino más filler) disminuyó 14.49% con respecto a la serie de control C2.

En esta última serie se aprecia que la adición de las virutas produjo una reducción mayor en la densidad aparente en comparación de las otras series mencionadas anteriormente, por lo que el efecto de la disminución de dichas densidades solo tiene un mayor aporte en proporciones mayores.

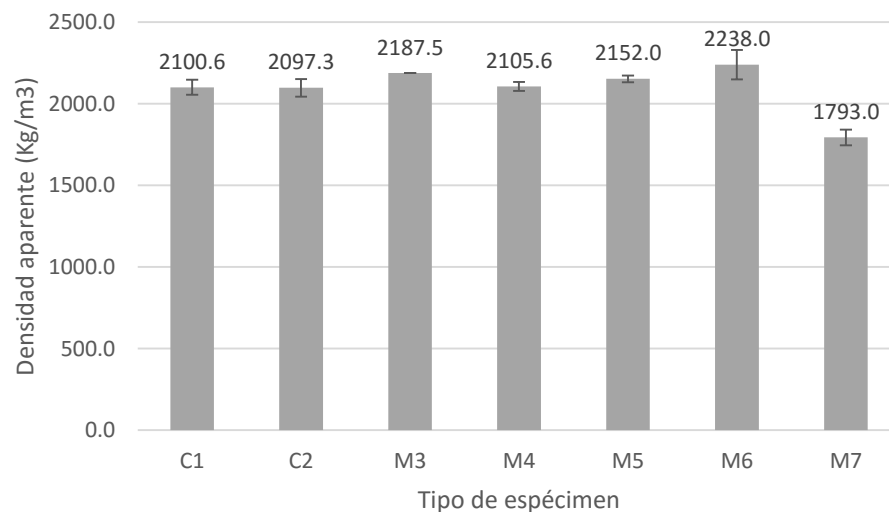


Figura 36. Densidad aparente de los especímenes de mampostería.

#### 3.4.2.3 Especímenes de conductividad térmica

##### *Especímenes con virutas de pino*

En la figura 37, se observan las densidades aparentes de los especímenes destinados para la prueba de conductividad que tienen las dimensiones de 50x150x150 mm. Podemos comprobar que la densidad es un factor muy importante, donde a menor densidad el valor de la conductividad térmica disminuye. La densidad de M7 bajo 18% con respecto de la referencia C1. Estos

resultados finales para los especímenes M7 son menores que los indicados en la norma (NMX-AA-164-SCFI-2013, 2013) para especímenes de mampostería con densidades de 1,700 kg/m<sup>3</sup>.

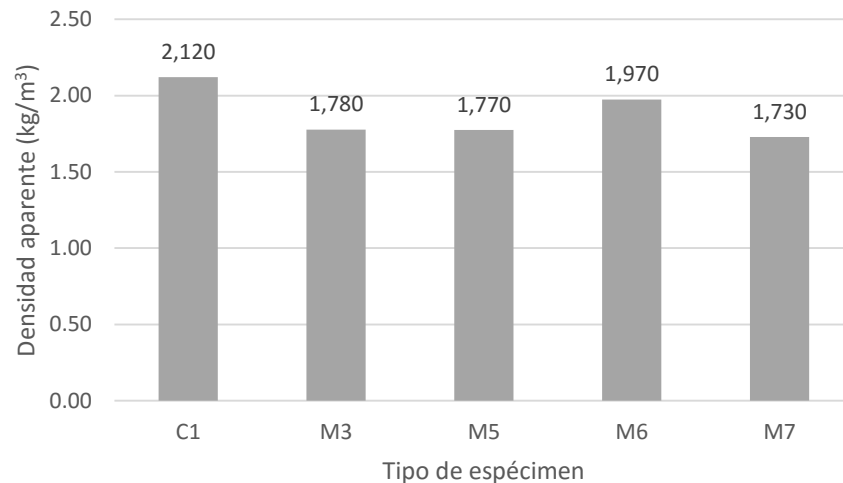


Figura 37. Densidad aparente de especímenes con virutas de pino para la prueba de conductividad térmica.

#### *Especímenes con virutas de cáñamo*

La densidad disminuyó de 1,900 kg/m<sup>3</sup> a 1,658 kg/m<sup>3</sup> para la serie de especímenes NM7 (10% viruta de cáñamo más filler); siendo este un 12.6% con respecto a la referencia NC1 (véase figura 38). Se observa que la densidad aparente en los especímenes NC2 (20% filler) es menor un 10.5% con respecto a NC1 (sin filler), en estos resultados pudo influir la densidad del filler y también la compactación de los especímenes. Esto debido a que en todos los especímenes se utilizó en mismo método de colado y compactación de los especímenes y al contener una cantidad de polvos más finos que el cemento pudo haber requerido una mayor cantidad de agua, disminuyendo la trabajabilidad y aumentando la consistencia de la mezcla. Por lo que, compactar y colar con la misma metodología pudo originar una mayor cantidad de aire atrapado en los especímenes.

En el caso de los especímenes de la serie NM4 (4% virutas de cáñamo sin filler) la densidad aparente se redujo 5.89% con respecto a la serie de control NC1 (1,900.48 kg/m<sup>3</sup>). La serie NM6 con respecto a NC2 tuvo ligeramente una mayor densidad del 2.53%, por lo que es posible que el agua de absorción de las virutas de cáñamo pudo haber densificado la matriz de cemento y por defecto producir una menor cantidad de aire atrapado o vacíos en el material compuesto. Para el caso de NM7 (10% de virutas de cáñamo más filler) la reducción de la resistencia a compresión por la adición de las virutas de cáñamo fue de 2.41% en base a la serie de control NC2.

Se observa que hasta con adiciones de 10% de virutas de cáñamo la densidad aparente no disminuye drásticamente porque como se observa en NM6, las densidades aparentes no se alejan entre sí por lo que las virutas de cáñamo no tuvieron gran efecto en la disminución de dichas densidades con éste porcentaje de adiciones. Es posible que se requiera una mayor cantidad de adición de éstas virutas para poder lograr una reducción de la densidad aparente de los materiales compuestos.

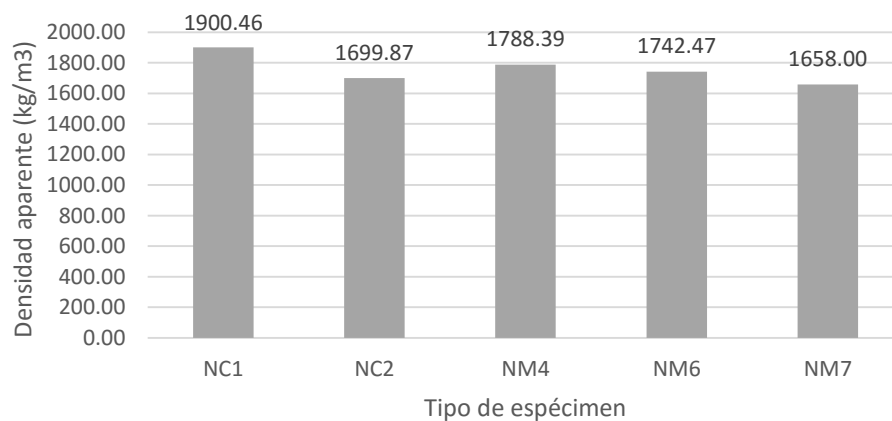


Figura 38. Densidades de especímenes con virutas de cáñamo para la prueba de conductividad térmica.

### 3.4.3 Conductividad térmica

#### *Especímenes de viruta de pino*

A continuación, se muestran los valores promedio de conductividad térmica (véase figura 39) de los especímenes mencionados en la tabla 3. Como se observa en la figura y de acuerdo a la programación seguida en el procedimiento antes mencionado, se obtuvo que, en los especímenes de referencia C1, se registró una conductividad térmica de 777 mW/mK a una temperatura de 10° C.

Este valor fue el más alto con respecto a los otros especímenes, ya que, contenía sólo cemento portland y arena caliza. Según la bibliografía consultada estos valores son aceptables, ya que varios autores como M. Bederina et al., han medido la conductividad térmica, obteniendo valores en promedio de 1,100 mW/mK para este tipo de compuesto, pero de acuerdo a las especificaciones de la normativa mexicana (NMX-AA-164-SCFI-2013, 2013) estos valores se encuentran similares a los morteros con valores de 700 a 1,650 mW/mK. Se puede atribuir que interfiere el contenido de pasta de cemento utilizada en la fabricación de morteros como se explicó anteriormente, donde un alto contenido de pasta dentro de un material compuesto, modifica dicho coeficiente de conductividad térmica.

La conductividad térmica de los materiales por separado es mucho mayor que en conjunto, como lo menciona K. Kim et al., ellos analizaron por separado los materiales obteniendo valores de 1,500 a 2,660 mW/mK para el agregado de caliza y según el Código Técnico de la Edificación, menciona que la conductividad térmica de la arena sílica está entre 1,300 a 3,000 mW/mK.

Aun cuando los valores de la conductividad térmica de los materiales por separado son altos al ser combinados ésta disminuye en la fabricación de compuestos. Se observa en la figura 39, que la referencia tiene una conductividad térmica baja a comparación de los resultados expuestos en las investigaciones antes mencionadas (Bederina et al., 2007) pero dentro de un rango en el que el coeficiente de conductividad térmica de las pasta tiene un efecto mayor en estos materiales compuestos.

Para el caso de los especímenes de la serie M4 (4% virutas de cáñamo sin filler) el efecto de las virutas de pino redujo el coeficiente de conductividad térmica 42.11% con respecto a la serie de control C1. Por otro lado, los especímenes M5 (2% virutas de pino más filler) y M6 (4% de virutas de pino más filler) tuvieron coeficientes de conductividad de 33.25% y 17.26% menores que la referencia C1 (777 mW/mK) respectivamente. En ellos se observa que el efecto filler produjo un aumento en el contenido de pasta por lo que se densificó el material compuesto dejando una menor cantidad de vacíos.

Para los especímenes M7 (10% virutas de pino más filler) vemos que el porcentaje de virutas de pino disminuyó el coeficiente de conductividad térmica hasta un 31.50% en base a la serie de control C1, por lo que el efecto de la baja conductividad térmica de las virutas de pino fue notable pero no lo suficiente para encontrarse dentro de los materiales aislantes con conductividades térmicas entre 200 a 400 mW/mK y de baja densidad aparente con valores entre 600 a 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Estos resultados se atribuyen al aporte de baja densidad y por ende baja conductividad térmica de las virutas de pino. Por lo tanto, el compuesto no es completamente sólido en su interior, sino que, contiene una gran cantidad de poros que, al estar en contacto con la placa caliente del equipo de conductividad térmica, la transferencia de calor es más lenta y disminuye debido a la pérdida de calor por la interconexión interrumpida del compuesto. Por lo que la mala conducción del compuesto hace que el flujo de calor sea más lento.

Sabemos que la conductividad de la viruta de madera es de 50 mW/mK porque este valor fue medido en las virutas que se utilizaron en los especímenes fabricados en laboratorio y porque éste valor coincide con los valores calculados de otros autores y los publicados en la norma (NMX-AA-164-SCFI-2013, 2013).

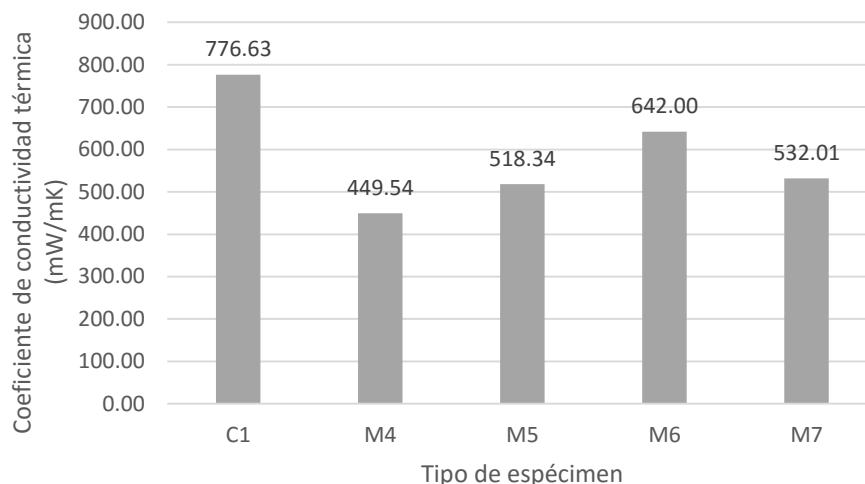


Figura 39. Resultados de conductividad térmica de los especímenes con virutas de pino.

#### *Especímenes de virutas de cáñamo*

En la figura 40, podemos observar que la conductividad térmica de los especímenes de control fue de 693 mW/mK, siendo este un valor cercano a la conductividad térmica de la referencia con virutas de pino, aunque M. Bederina et al., han reportado estudios de morteros con arena de río como agregado una conductividad térmica de 1,300 mW/mK, estos resultados se deben a que el consumo de cementante es más bajo de lo normal utilizado en concretos. La baja conductividad térmica se puede atribuir a la alta cantidad de vacíos dentro del compuesto y a la baja cantidad de pasta cementante dentro del mismo como lo expresan en su documento (Uysal & Demirbog, 2004). En referencia a la norma (NMX-AA-164-SCFI-2013, 2013) estos resultados son menores que los tabiques rojos cocidos comunes que muestran valores de 830 mW/mK y que el tabique ligero con recubrimiento impermeable de 698 mW/mK..

Sabemos que el contenido de pasta influye en la conductividad térmica de los morteros, como lo menciona H. Uysal et al., en sus estudios, donde evaluaron

que, por cada  $100 \text{ kg/m}^3$  añadidos al concreto aumentará en promedio 8.53% la conductividad térmica del compuesto.

De acuerdo a los resultados mostrados en la figura 40, podemos observar que la conductividad térmica de la serie NC2 (con filler) es menor 31.89% con respecto a la referencia NC1. Podemos ver que el filler adicionado a la serie NC2 redujo este valor de conductividad significativamente debido a que por ser un polvo muy fino al combinarse con la pasta de cemento pudo reducir la conductividad térmica de la pasta en conjunto por lo que el coeficiente de conductividad de éste filler es un factor muy importante en estos valores.

Para el caso de NM4 (4% virutas de cáñamo sin filler), se observa que la conductividad térmica bajo 18.90% con respecto a la serie de referencia NC1 (693 mW/mK), en donde el efecto de las propiedades de las virutas de cáñamo dio lugar a la disminución de estos valores.

Por otro lado, en la serie de especímenes NM6 (4% virutas de cáñamo más filler) y NM7 (10% virutas de cáñamo más filler) no tuvieron una disminución con respecto a la serie de referencia NC2 (con filler), donde NM6 aumentó 17.16% y NM7 4.66% con respecto a la referencia NC2 (494 mW/mK). Se observa que para este caso las adiciones de virutas de cáñamo no tuvieron un efecto de reducción de los coeficientes de conductividad en los materiales compuestos, por lo que es posible que con este porcentaje de virutas y diseño de mezclas, no se encuentre una disminución o aporte de las propiedades físicas de estos materiales compuestos. Aunque se puede observar que los valores obtenidos de conductividad térmica son relativamente bajos y se encuentran en los límites de los materiales ligeros y de baja conductividad térmica.



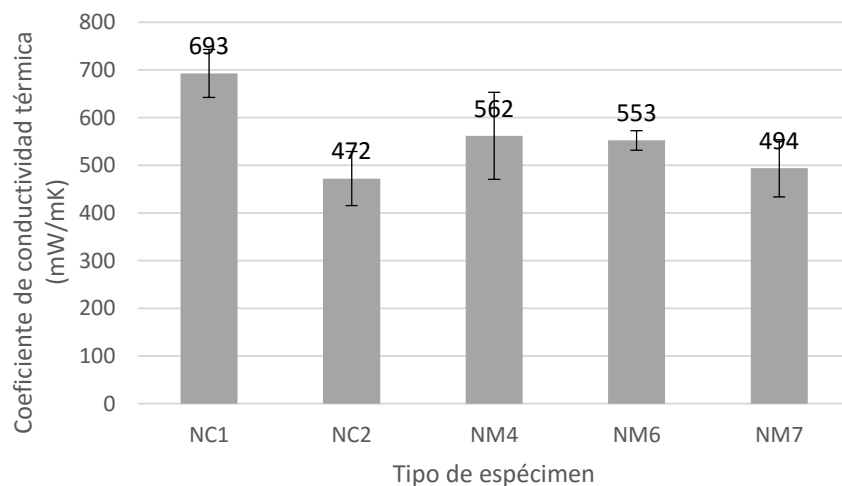


Figura 40. Resultados de conductividad térmica en especímenes con virutas de cáñamo.

#### 3.4.4 Regulación de humedad al vapor de agua (MBV)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones del MBV. Los cálculos se realizaron de acuerdo a las especificaciones del reporte Moisture Buffering of Building Materials (Department of Civil: thecnical University of Denmark Engineering, 2005).

La figura 41, muestra el rango en el que se debe encontrar el compuesto a evaluar para determinar su valor de regulación de humedad o higroscopia, donde para entrar en la clasificación el compuesto debe arrojar un resultado MBV mayor a  $0.2 \text{ g/m}^2\% \text{HR}$  a cada 8 horas; esta es la parte de absorción de humedad a una humedad relativa de 75%. Todos los especímenes cumplieron más de 20 ciclos, que en total son: más de 480 horas de ensayo.

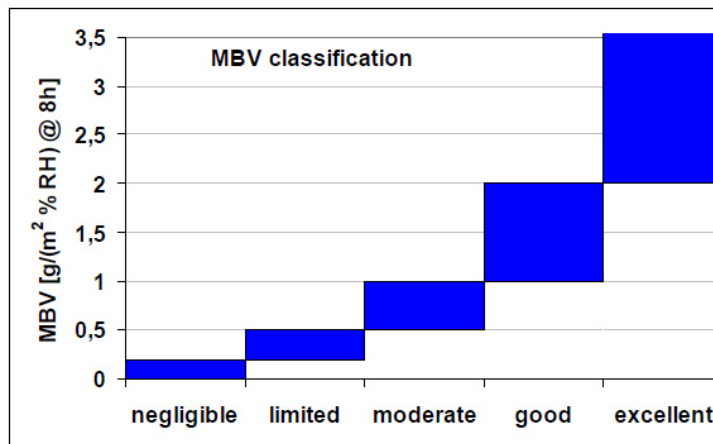


Figura 41. Representación gráfica de clases de MBV (Department of Civil: thechnical University of Denmark Engineering, 2005).

### *Especímenes de viruta de pino*

En la figura 42, la serie de control C1 (sin filler) mostró en los ciclos de absorción-desorción falta de acondicionamiento antes de la prueba, lo que involucró que el tiempo para su estabilización dentro de la cámara climática se extendiera. Aun así, se logró la estabilización de 0.1% de diferencia entre los últimos 3 ciclos, esto debido a que el material compuesto en esta serie tiene una matriz más cerrada a comparación de las otras series. Observamos que ésta matriz de cemento y arena caliza, tuvo una absorción del 0.005% en el último ciclo de la isoterma donde ya había alcanzado una estabilización de absorción y desorción de humedad.

En la figura 43, se comprueba la estabilización de las curvas de absorción y desorción de la serie de especímenes C1. El valor de MBV para C1 fue de 0.355 g/m²%HR, siendo esta la serie de referencia de los especímenes con viruta de pino y se encuentra en el límite higroscópico de los materiales de acuerdo a la figura 41 (entre 0.20 a 0.50 g/m²%HR). Se observa en el MBV que el material compuesto comienza a absorber una mayor cantidad de humedad al inicio de la prueba cuando se encontraba a una HR de 75% y cuando se encontraba a una HR de 33% la desorción de humedad fue menor con respecto a la absorción.

Durante el progreso de la medición se vio que la isoterma de absorción-desorción se fue estabilizando hasta obtener un valor de MBV de  $0.355 \text{ g/m}^2\% \text{HR}$ .

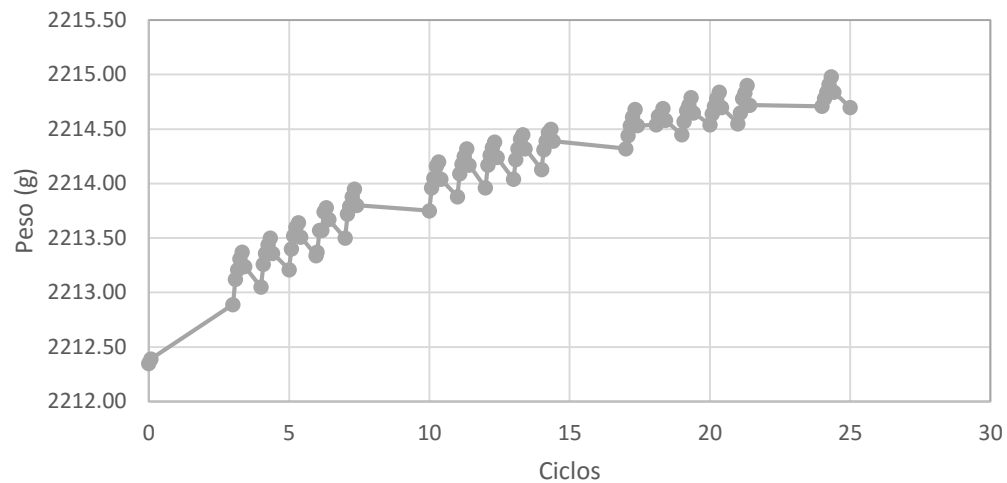


Figura 42. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie C1.

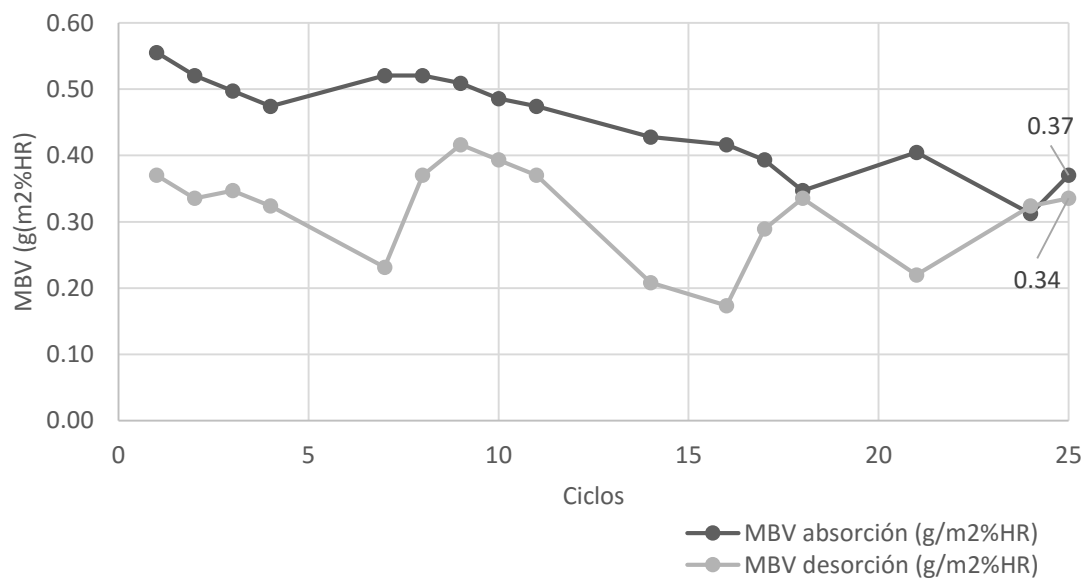


Figura 43. MBV de absorción y desorción de humedad de la serie C1.

En la figura 44, se muestran los ciclos de absorción y desorción de la serie M4 donde la estabilización de los ciclos comienza a tomar lugar a partir del ciclo 17. La absorción total al final de la estabilización fue de  $0.023\%$  que con respecto a la serie de control C1 ( $0.005\%$ ) aumentó  $360\%$  por lo que las virutas de pino

dentro del material compuesto produjeron que la absorción de la humedad incrementara además de que la ausencia del filler pudo provocar una mayor porosidad que participara en la formación de una matriz cementante de mayor porosidad y por defecto este resultado fuera posible.

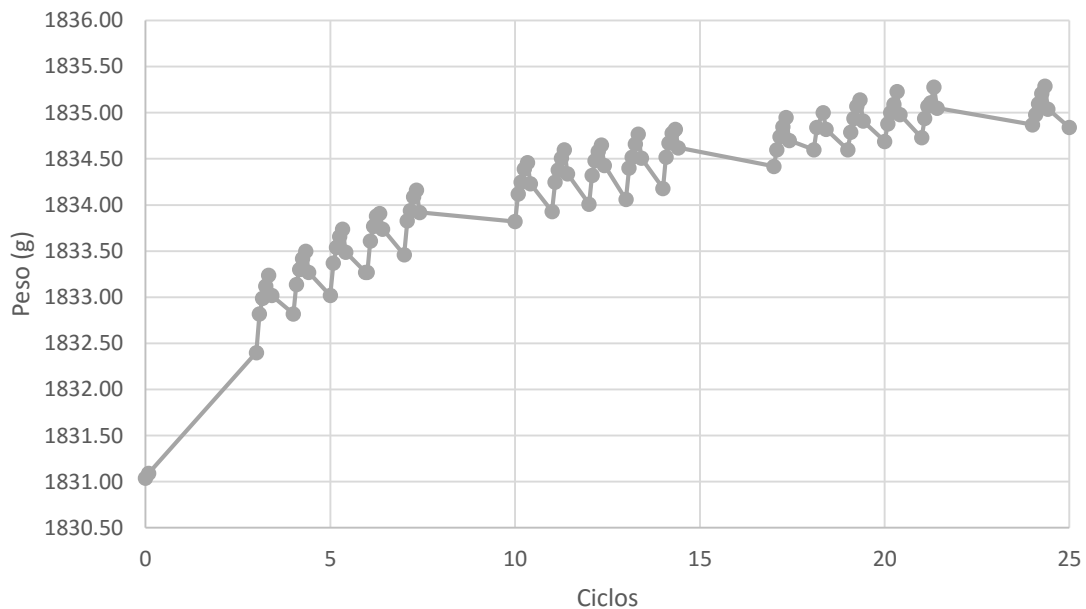


Figura 44. Ciclos de absorción-desorción de humedad en serie M4.

En la figura 45, se observan los resultados de MBV para los especímenes de la serie M4 donde el valor promedio de entre la absorción y desorción de humedad fue de  $0.52 \text{ g/m}^2\% \text{HR}$  que con respecto a la serie de control C1 ( $0.355 \text{ g/m}^2\% \text{HR}$ ) tuvo un incremento de 46.48% en los resultados de la higroscopia. De acuerdo a la figura 41, éste valor se encuentra dentro de los materiales de higroscopia moderada.

En la figura 46, se muestra la estabilización de la isoterma de la serie de especímenes M5 (2% virutas de pino más filler) donde la absorción en el último ciclo registrado fue de 0.029% que con respecto a la serie C1 tuvo un incremento del 500% que puede ser atribuible a la permeabilidad del material compuesto donde participan las propiedades de las virutas de pino y el contenido de pasta de cemento.

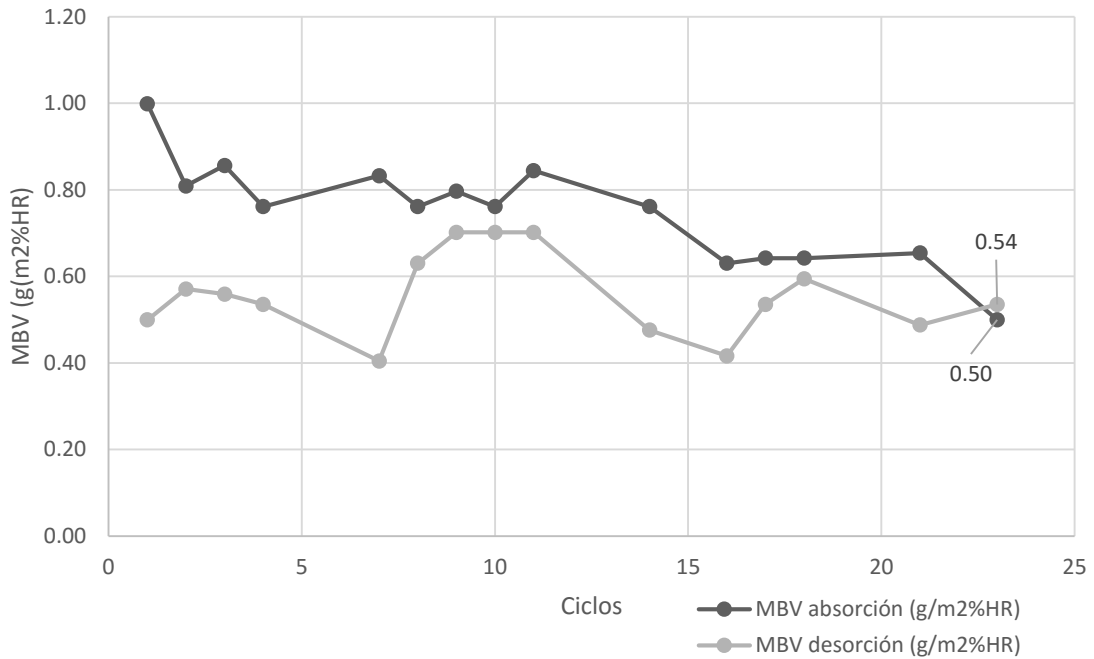


Figura 45. MBV de absorción-desorción de humedad en serie M4.

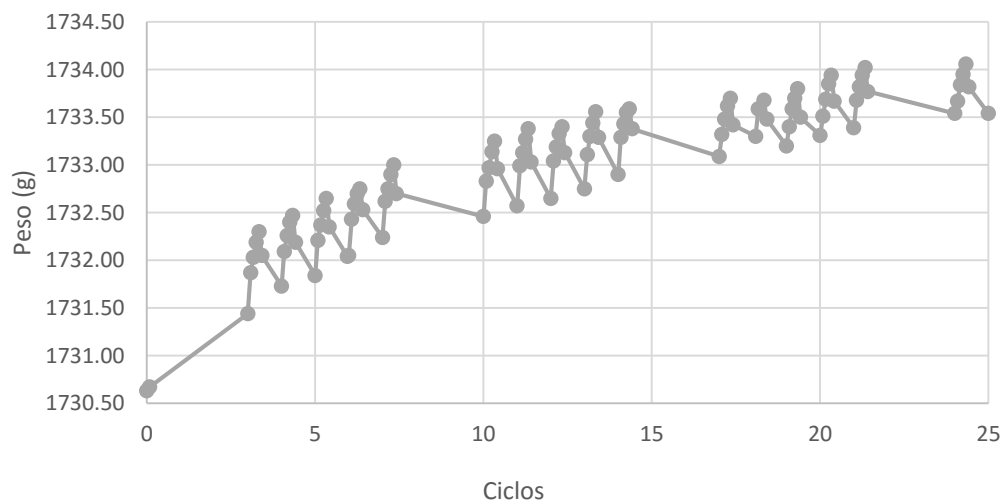


Figura 46. Ciclos de absorción-desorción de humedad en serie M5.

En la figura 47, se muestran los resultados del MBV para la serie M5 en donde se obtuvo un valor promedio de  $0.62 \text{ g/m}^2\%\text{HR}$  que en base a la serie de control C1 este valor causó un incremento en la higroscopia de los materiales compuestos de ésta serie en un 74.65% debido a una mejor absorción, ubicándolo dentro de los materiales de higroscopia moderada.

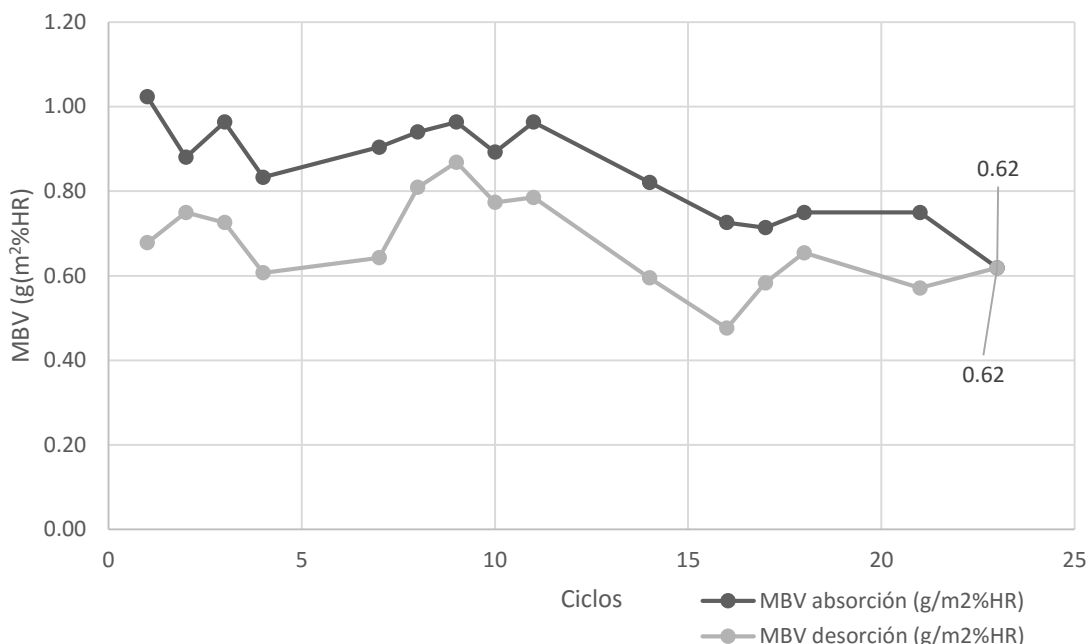


Figura 47. MBV de absorción-desorción de humedad en serie M5.

En la figura 48, se muestra la isoterma de absorción-desorción de humedad de la serie M6 en donde podemos ver que la absorción de humedad en el último ciclo estabilizado fue de 0.019% más con respecto a la serie C1 (0.005%) por lo que éste aumento fue del 300%. Estos resultados fueron menores, en cuanto a la absorción, con respecto a la serie M5 (0.029%) por lo que se esperaba que ésta serie obtuviera resultados similares o superiores con respecto a M5.

Estos valores pudieron ser causados por alguna modificación en la compactación del material compuesto ya que se observa que esta serie no permite el paso de la humedad en mayor cantidad con respecto a la serie M5 (2% virutas de pino más filler) que son las series que contenían filler en su formulación. Por lo que, no se ve reflejado el efecto de la absorción de las virutas de pino al 4% dentro de estos compuestos con la misma cantidad de filler. Es posible que el agua de absorción de las virutas pudiera desorber en el mezclado causando un incremento en la pasta de cemento y una mayor compactación del material.

En la figura 49, se observan los resultados de MBV en los 24 ciclos de la isoterma antes mencionada en la figura 48. El resultado de tal MBV fue de 0.455 g/m²%HR,

que lo coloca dentro de los materiales de higroscopia limitada y que en base a la serie C1 (0.355 g/m<sup>2</sup>%HR), éste tuvo un incremento del 28.17%.

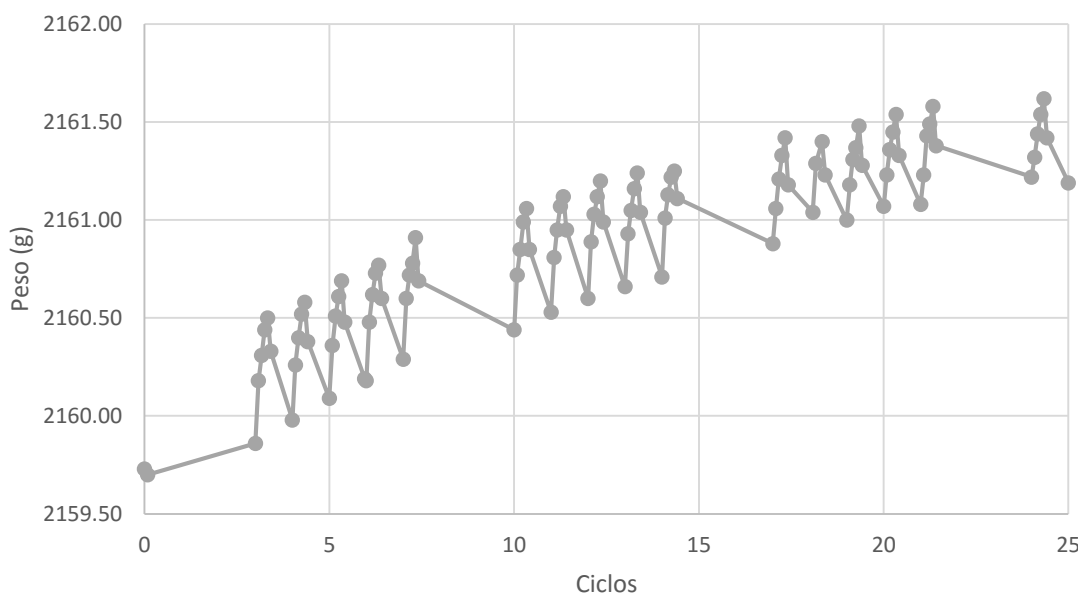


Figura 48. Ciclos de absorción-desorción de humedad en serie M6.

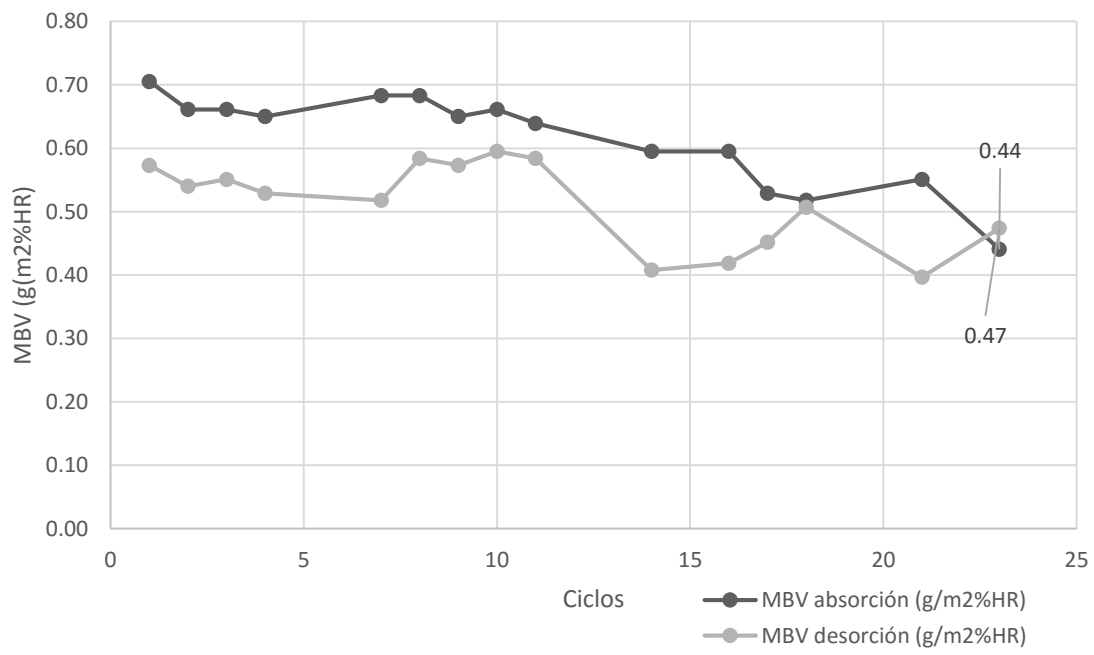


Figura 49. MBV de absorción-desorción de humedad en serie M6.

En la figura 50, se observa la estabilización del espécimen M7 en los ciclos de absorción-desorción donde desde el comienzo de la prueba la serie mostró una absorción mayor de humedad con respecto a la serie de control C1. Se observa que la absorción total entre el último ciclo de la isoterma fue de 0.035% que en comparación a la serie C1 (0.005%) es 600% más de absorción de humedad.

Aun cuando muestre una absorción de humedad del 600% mayor en base a la serie C1, este valor no se separa proporcionalmente a los porcentajes obtenidos en M5 (500%) por lo que es posible que se requiera una mayor adición que 10% de virutas de pino para poder lograr que los materiales compuestos aumenten su rango higroscópico y colocarlos, de acuerdo a la figura 41, en materiales de buena higroscopia.

En la figura 51, se observan las mediciones de MBV para la serie M7 en donde que su valor de MBV fue de 0.64 g/m<sup>2</sup>%HR, que de acuerdo a la figura 41, tiene una regulación moderada (entre 0.50 a 1.00 g/m<sup>2</sup>%HR). Con respecto a la serie C1 estos especímenes tienen 68.42% mayor higroscopia debido a las propiedades higroscópicas de las virutas que participan en conjunto dentro del material compuesto. En resumen los resultados para los especímenes con virutas de pino se encuentran en la figura 52.

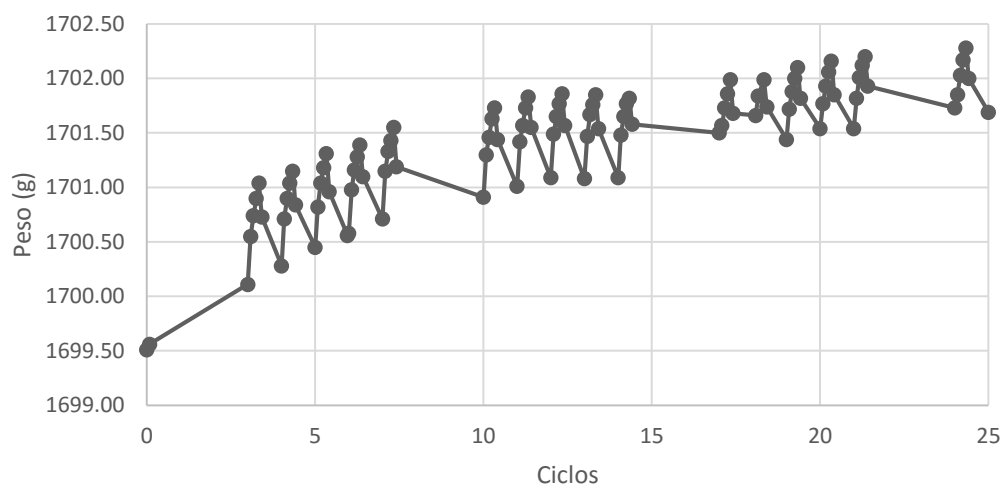


Figura 50. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie M7.



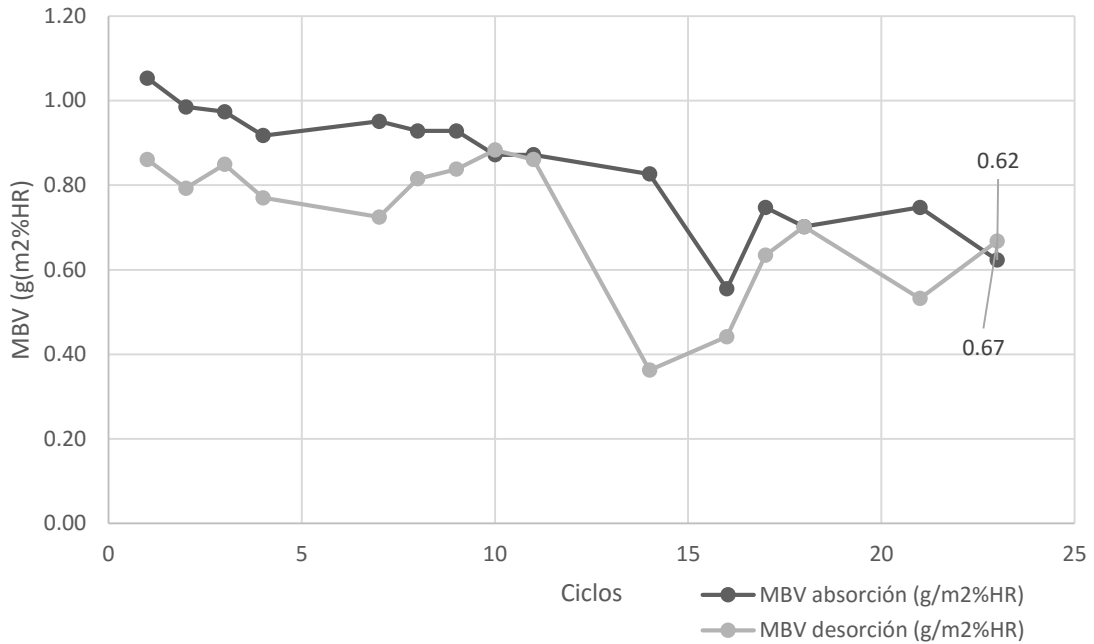


Figura 51. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie M7.

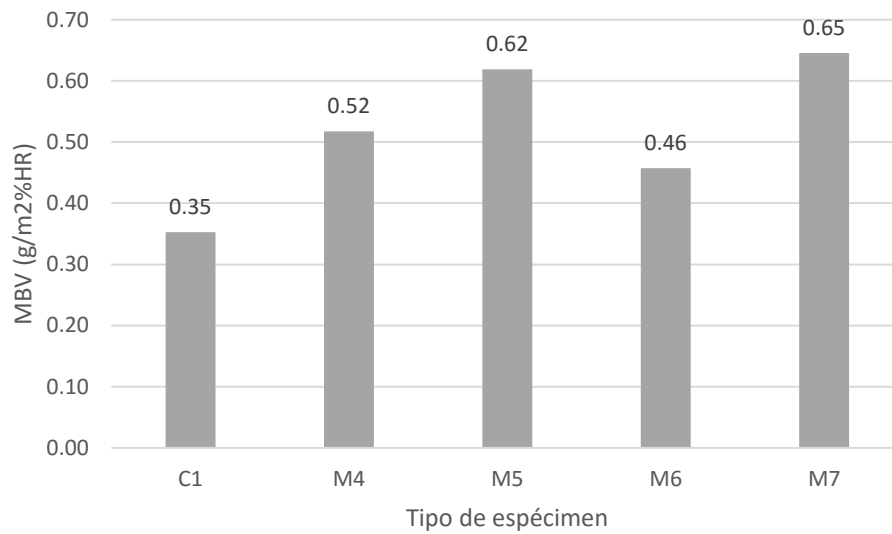


Figura 52. Resultados de MBV para los especímenes con virutas de pino.

#### *Especímenes con viruta de cáñamo*

La referencia de estos especímenes es NC1 (sin filler), donde en la figura 52, podemos observar que aun cuando el espécimen necesitaba mayor tiempo de

acondicionamiento, después del décimo ciclo, éste se estabilizó con una diferencia entre ciclos menor al 0.1%; el documento de trabajo especifica una diferencia entre ciclos de 0.5%.

En la figura 53, se observa la isoterma de absorción-desorción para ésta serie, en donde el porcentaje de absorción de humedad en el último ciclo fue de 0.036%, siendo éste nuestro valor de referencia para las siguientes series.

En la figura 54, también observamos que el valor MBV registrado fue de 0.795 g/m<sup>2</sup>%HR, encontrándose dentro de los materiales de higroscopia moderada, de acuerdo a la figura 41. En ésta figura podemos ver el comportamiento de las curvas de absorción y desorción en donde al inicio del ensayo hay una alta absorción de humedad y una baja desorción debido a que los especímenes de la serie requerían una mayor cantidad de humedad para estabilizar por lo que al final se observa un balance en la isoterma.

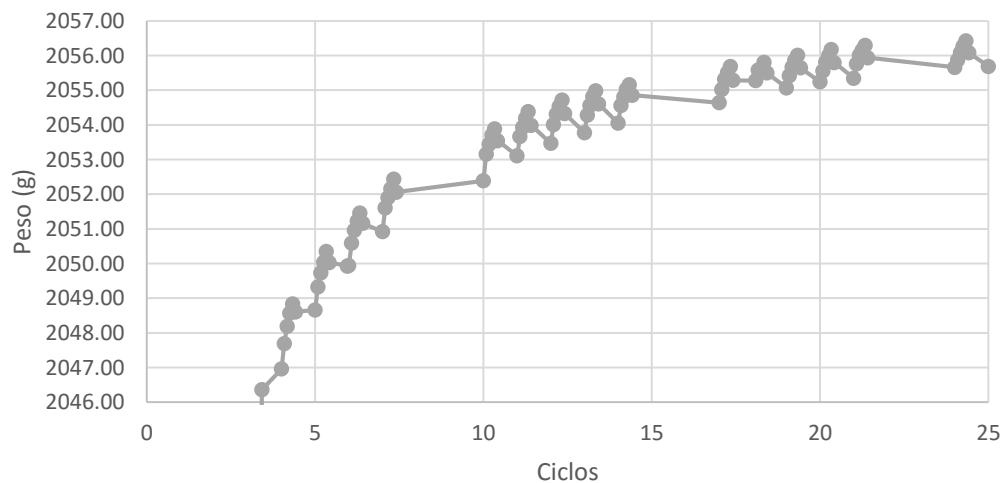


Figura 53. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie NC1.

En la figura 55, se observa la isoterma de absorción-desorción para la serie NC2 en donde se muestra en el último ciclo un valor de 0.02% de absorción de humedad en éstas condiciones de prueba y con respecto a la serie de control NC1 (0.036%) disminuyó 44.44%, por lo que ésta serie con filler mostró una

menor capacidad de atrapar humedad del medio que NC1 mostrando ser de menor capacidad higroscópicas.

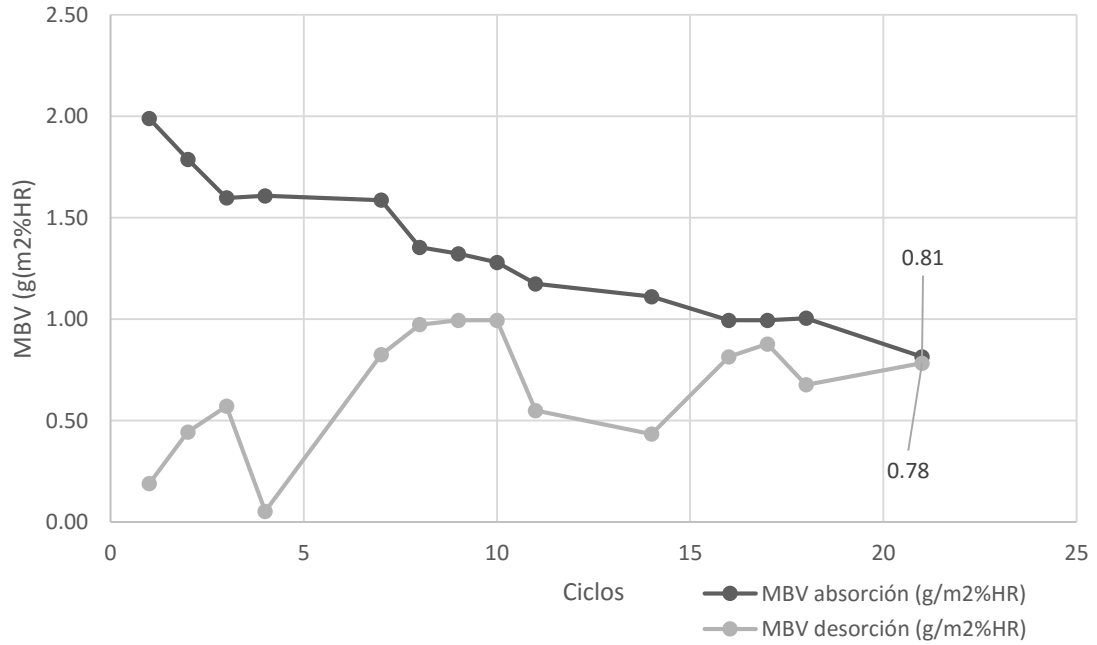


Figura 54. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NC1.

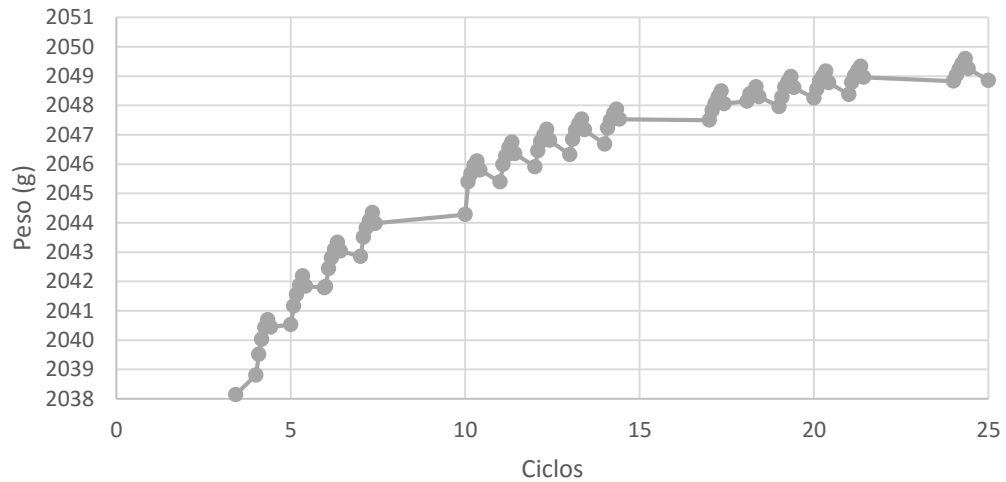


Figura 55. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie NC2.

En el caso de la figura 56, podemos observar que los resultados de MBV para la serie NC2 (con filler) fueron en promedio de 0.79 g/m²%HR, que en base a la

serie NC1 sin filler ( $0.795 \text{ g/m}^2\%\text{HR}$ ) resultó ser similar por lo que tienen las mismas propiedades higroscópicas ambos materiales compuestos. Aun cuando observamos que no tuvieron el mismo comportamiento en la absorción de humedad entre ciclos de absorción-desorción. Se observa de igual manera, que las series NC1 y NC2 tuvieron el mismo comportamiento en la evolución de la prueba de higroscopia, debido a que ambas series presentan una alta absorción de humedad del medio hasta alcanzar la estabilización higroscópica.

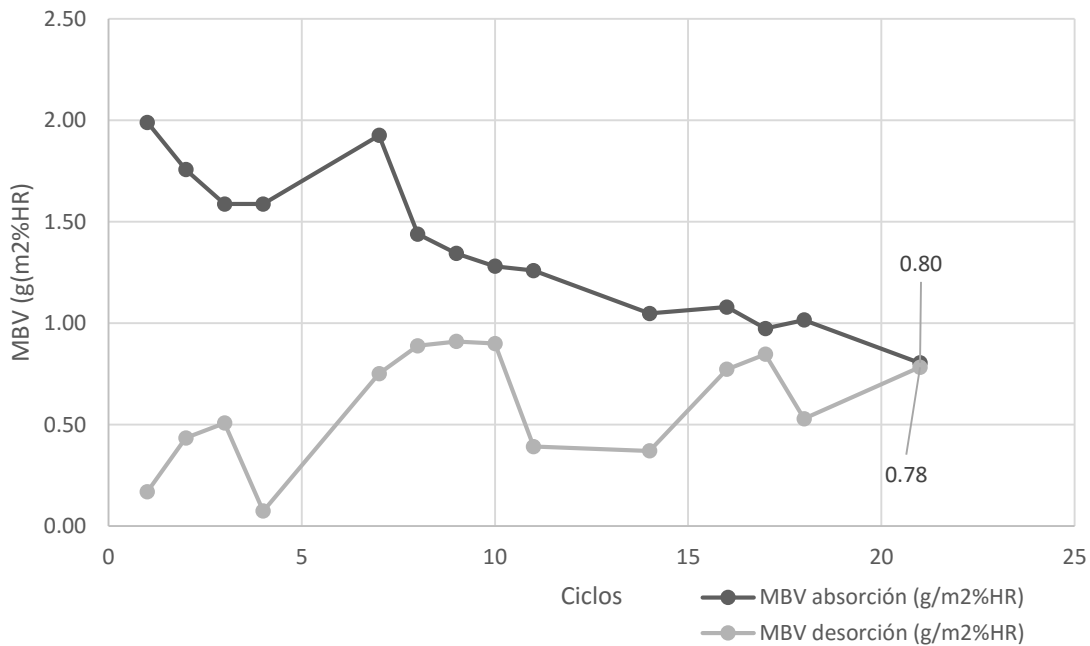


Figura 56. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NC2.

Por otro parte, en la figura 57 vemos los resultados de la serie NM4 (4% virutas de cáñamo) en donde se muestra una absorción final de 0.022% que con respecto a la serie de control NC1 (0.036%) éste valor ésta 37.93% por debajo, por lo que se esperaba que las virutas dentro del material compuesto causarían un efecto mayor en estos especímenes en base a las propiedades de absorción de humedad del medio.

Continuando con la serie de especímenes NM4, observamos en la figura 58, que los resultados de MBV para ésta serie fueron de  $0.64 \text{ g/m}^2\%\text{HR}$  y con base a la serie de referencia NC1 ( $0.795 \text{ g/m}^2\%\text{HR}$ ) éste valor disminuyó 19.49%, por lo

que aun cuando se encuentre dentro del rango de los materiales de higroscopia moderada, el comportamiento por parte de ésta serie no fue el esperado, debido a que la adición de las virutas de cáñamo tienen la propiedad de absorber una mayor cantidad de humedad que los materiales utilizados en las series de control.

Es posible que la matriz cementante no haya cerrado completamente, dejando una gran cantidad de micro porosidades que no interfieren en el flujo de humedad en los ciclos de absorción-desorción en nuestros morteros. Otra de las características de los materiales a base de cemento portland es que su estabilización en los ciclos de las isoterma es mayor por el hecho de ser compuestos de baja absorción y permeabilidad, por lo que respecta a los concretos.

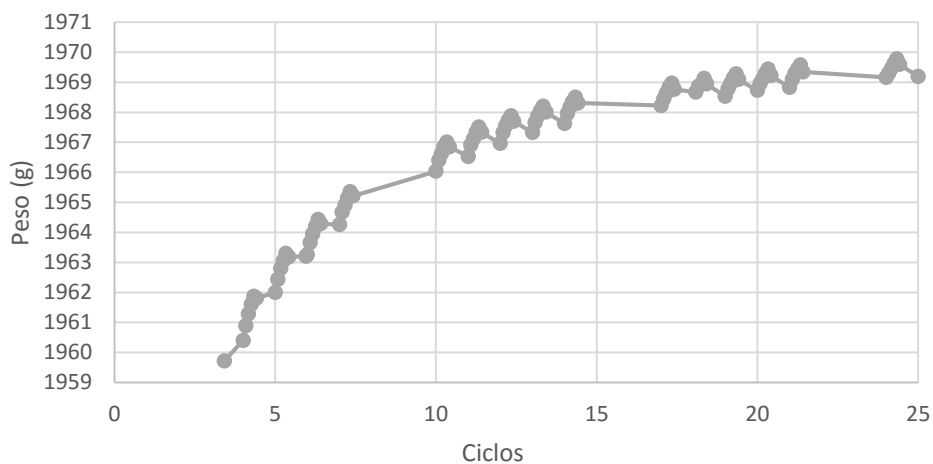


Figura 57. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie NM4.

En lo que respecta a la serie NM6 (4% virutas de cáñamo más filler), en la figura 59 se aprecia la isoterma de ésta serie, en donde del mismo modo, se midió la absorción en el último ciclo estabilizado, dando como resultado 0.043% y que del mismo modo, con respecto a la absorción de humedad de la serie de control NC2 (0.02%) éste valor fue 118.5% más alto, debido al efecto de las propiedades de las virutas de cáñamo, mejorando significativamente la absorción de humedad de estos materiales compuestos.

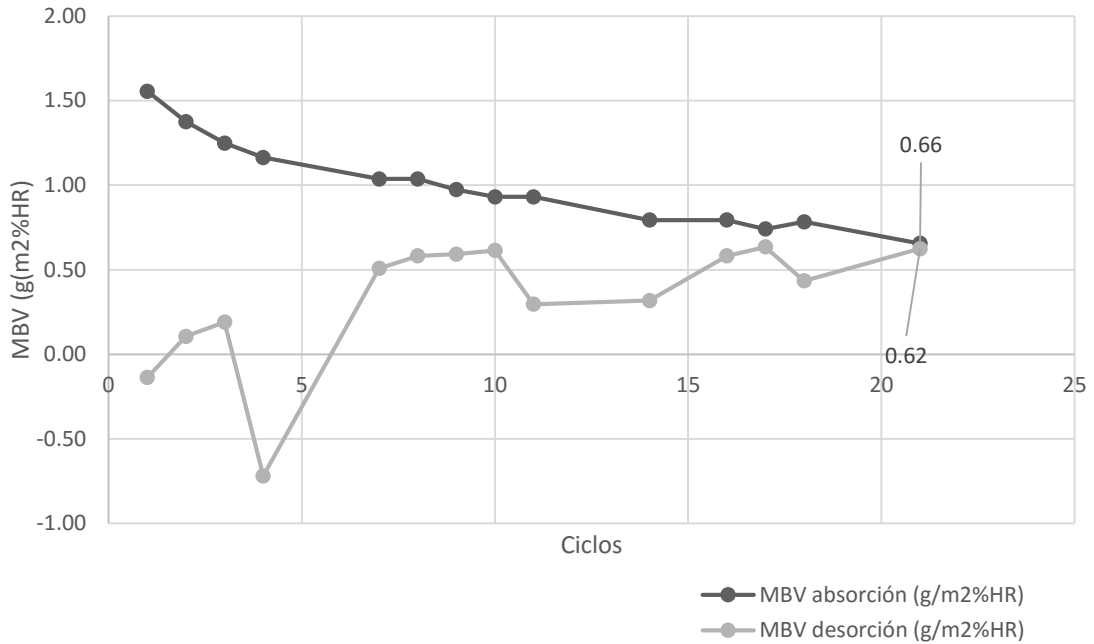


Figura 58. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NM4.

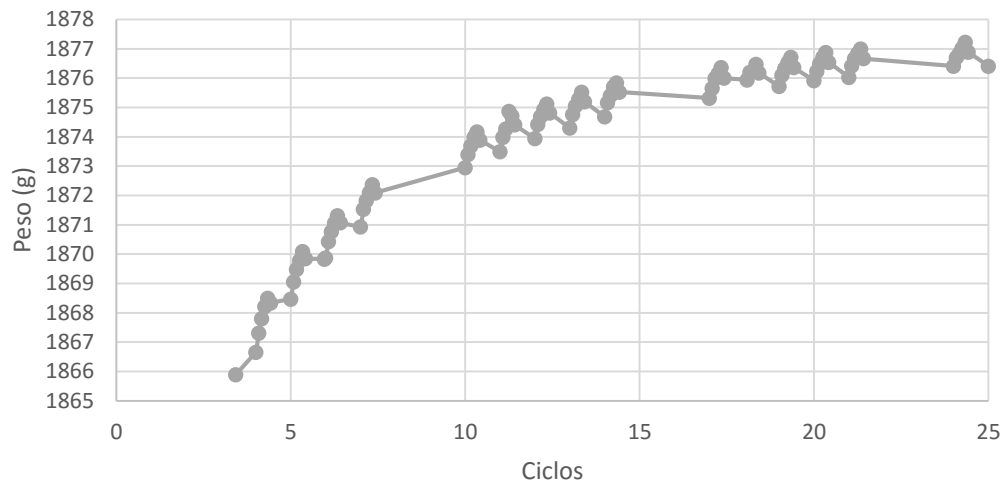


Figura 59. Ciclos de absorción-desorción de humedad de la serie NM6.

Continuando con la serie NM6, en la figura 60 se observa los resultados de MBV para dicha serie, en donde el valor de MBV fue de  $0.87 \text{ g/m}^2\%\text{HR}$ . En base a la serie de control NC2 ( $0.79 \text{ g/m}^2\%\text{HR}$ ) para los especímenes con virutas de cáñamo, éste valor se encontró 10.12% mayor que la referencia, por lo que en estos especímenes la regulación se encuentra en el rango de higroscopia moderada y el efecto de la adición de las virutas de cáñamo fue ligeramente alto,

debido a que se esperaba un comportamiento de mayor absorción de humedad del medio.

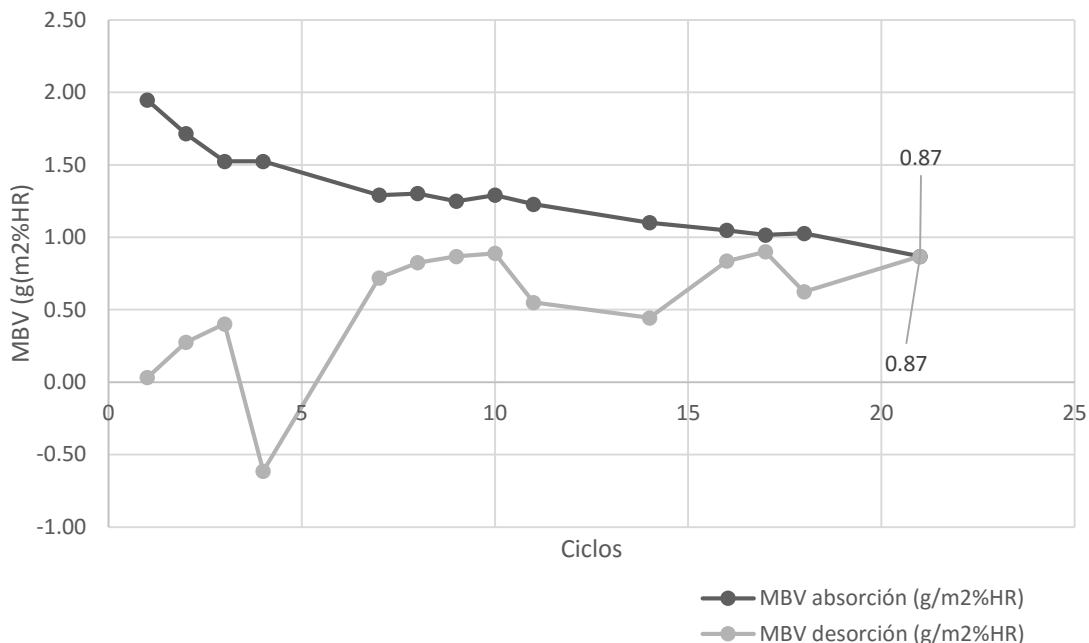


Figura 60. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NM6. Pasando a los especímenes de la serie NM7, en la figura 61 se muestra la estabilización de la isoterma con una diferencia menor al 0.04% entre los últimos ciclos, que resultó ser 100% mayor en base a la serie de control NC2 (0.02%).

Además, el valor de MBV para ésta serie fue de 0.94 g/(m²%HR) (véase figura 62), encontrándose dentro del rango de higroscopia moderada (véase figura 41) y con respecto a la serie de control NC2 (0.79 g/m²%HR) el resultado de MBV aumentó 19%. En base a estos resultados se observa que la adición de las virutas de cáñamo, modifican las propiedades de los especímenes de la serie NM7, mejorando significativamente las propiedades higroscópicas permitiendo que la humedad se quede atrapada en la micro porosidad de estos materiales y aportando en sí de manera particular sus propiedades a estos materiales compuestos.

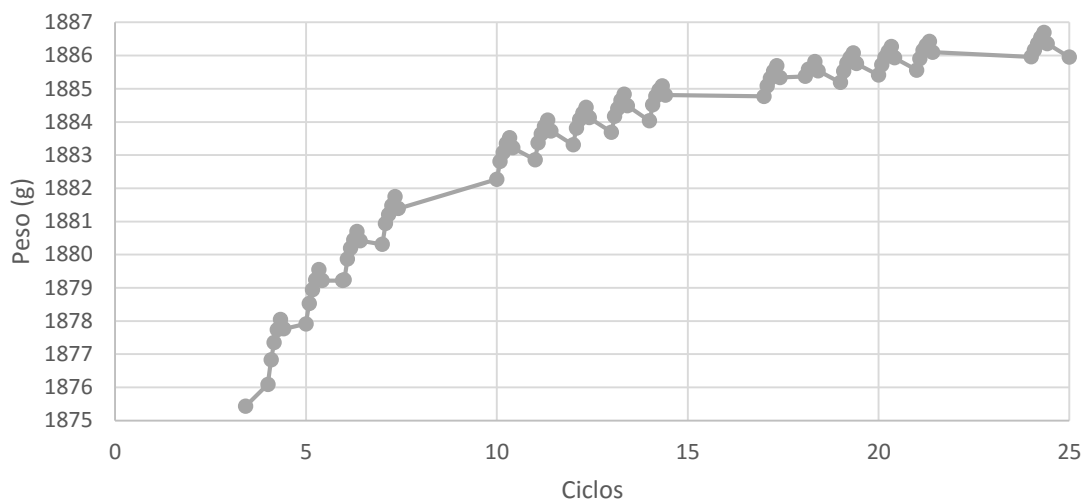


Figura 61. Ciclos de absorción-desorción de humedad del espécimen NM7.

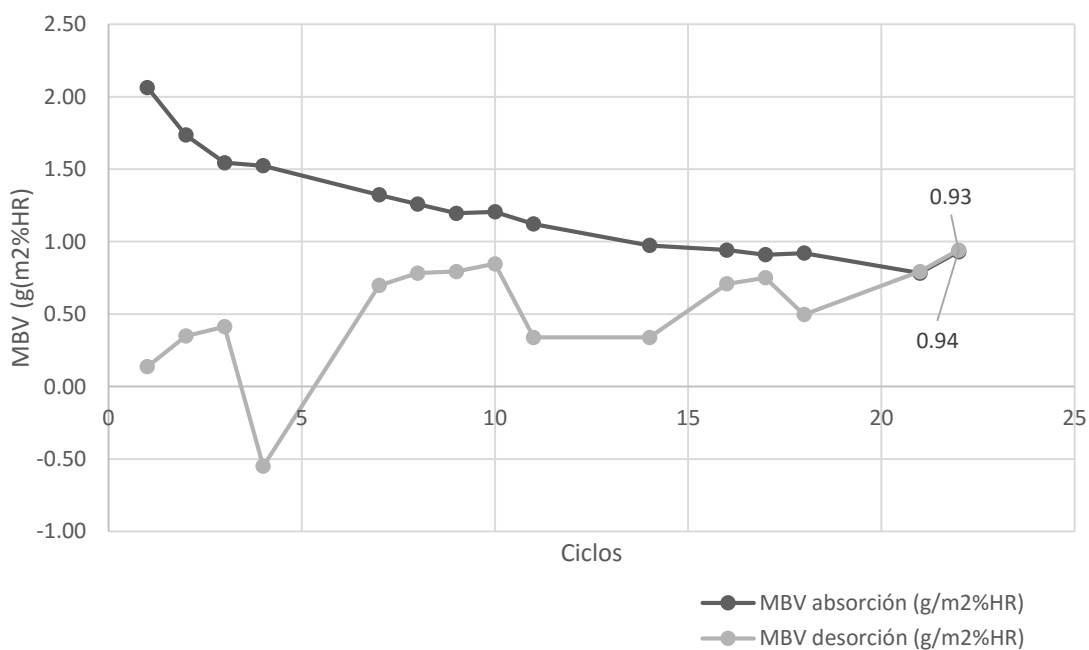


Figura 62. MBV práctico de absorción y desorción de humedad de la serie NM7.

Para los especímenes de viruta de cáñamo (véase figura 63), observamos que para los especímenes de control NC1 y NC2 la propiedad higroscópica fue la misma aun cuando la variable entre ellos fue la adición del filler, por lo que se piensa que la matriz cementante en ésta prueba no muestra una variación entre matrices.



Por último, se observó que la adición de virutas de cáñamo aumento la regulación de humedad de los materiales compuestos como se muestra en la serie NM7, donde la adición de 10% de estos materiales modifican los resultados de higroscopia. En lo que respecta al rango de los materiales compuestos, se observa en la misma figura (véase figura 63), que estos materiales pueden encontrarse en el rango de buena higroscopia con adiciones de más del 10% de virutas de cáñamo.

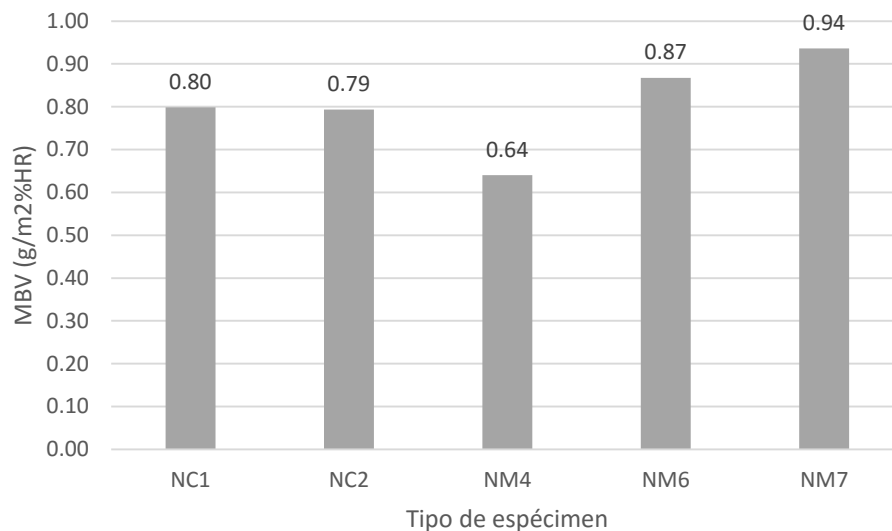


Figura 63. Resultados de MBV para los especímenes con virutas de cáñamo.

#### 3.4.5 Permeabilidad al vapor de agua

Como se mencionó anteriormente, al ser ensamblado el espécimen en la “copa húmeda” se tomó el primer peso para dar por iniciado el ensayo, por lo que, cada 24 horas se prosiguió con la toma de pesos de cada espécimen.

La obtención de los resultados de la permeabilidad al vapor de agua se calculó de acuerdo a las recomendaciones de la normativa (NF EN ISO 12572:2001-10, 2009). Se tomaron los pesos de cada uno de los especímenes para después graficar y calcular la ecuación de la recta de la pérdida de peso con respecto al tiempo.

Después se continuó con el cálculo del flujo de vapor de agua, esto con ayuda de la ecuación 3, que se expresa a continuación:

$$G = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

G= Flujo de vapor en (kg/s),

$m_2 - m_1$ = masa final y masa inicial en (kg) y

$t_2 - t_1$ = tiempo final menos tiempo inicial en (s).

Más adelante se mostrarán las figuras en base al flujo de vapor que después de un periodo constante podemos dar por finalizada la prueba.

Después, se calculó la densidad del flujo de vapor de agua, como se muestra en la ecuación 4:

$$g = \frac{G}{A} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

g= Densidad de flujo de vapor de agua en (kg/m<sup>2</sup>s),

A= Área del espécimen donde pasa el vapor de agua en (m<sup>2</sup>).

Ésta ecuación, nos sirvió para calcular la permeabilidad al vapor de agua mostrado en la ecuación 5:

$$\pi = g \frac{e}{\Delta P_v} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$\pi$ = Permeabilidad al vapor de agua en (kg/m.s.Pa),

e= Espesor del espécimen en (m) y,

$\Delta P_v$ = Diferencia de presión de vapor de agua entre el interior y el exterior de la copa en (Pa).

Después, se calculó la ecuación de la recta, con la finalidad de obtener un valor representativo de la pérdida de peso y para finalizar con el cálculo del Factor de Resistencia al Vapor de Agua.

Este factor de resistencia al vapor de agua, se calculó de acuerdo a la ecuación 6:

$$\mu = \frac{\pi_a}{\pi} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

$\mu$ = Factor de resistencia al vapor de agua en (-)

$\pi_a$ = Permeabilidad del aire al vapor de agua de acuerdo a la presión parcial de vapor de agua (Kg/m.s.Pa)

$\pi$ = Permeabilidad del espécimen al vapor de agua de acuerdo a la presión parcial de vapor de agua en (Kg/m.s.Pa).

El factor de resistencia al vapor de agua es el último valor que obtenemos de todos los cálculos.

#### *Especímenes con virutas de pino*

A continuación se muestran en las siguientes gráficas las pérdidas de peso, flujo de vapor, ecuación de la recta en base a la pérdida de peso en régimen estable y el cálculo del factor de resistencia al vapor en los especímenes con virutas de pino.

En la figura 64, se muestra el comportamiento de la pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie de control C1, en donde el peso registrado por hora se muestra en la figura 65, por lo que tener al tener una pérdida de peso equilibrada se calculó el último flujo de vapor registrado para ésta serie, el cual fue de

$4.19 \times 10^{-9}$  Kg/s (véase tabla 13), que se tomó como referencia para las serie de especímenes de viruta de pino.

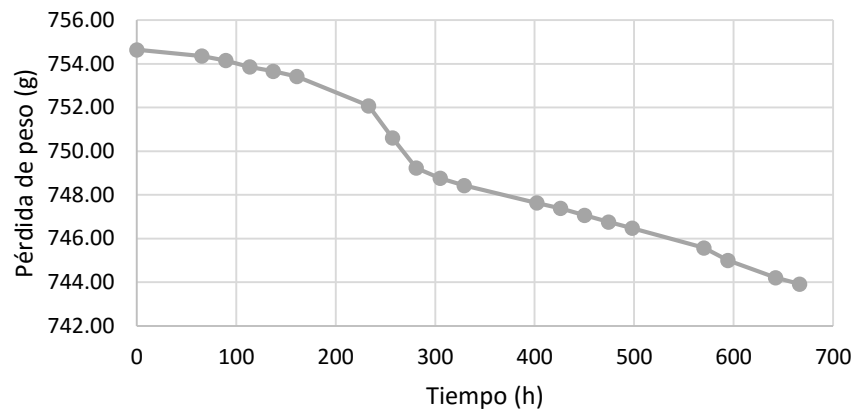


Figura 64. Pérdida de peso con respecto al tiempo en serie C1.

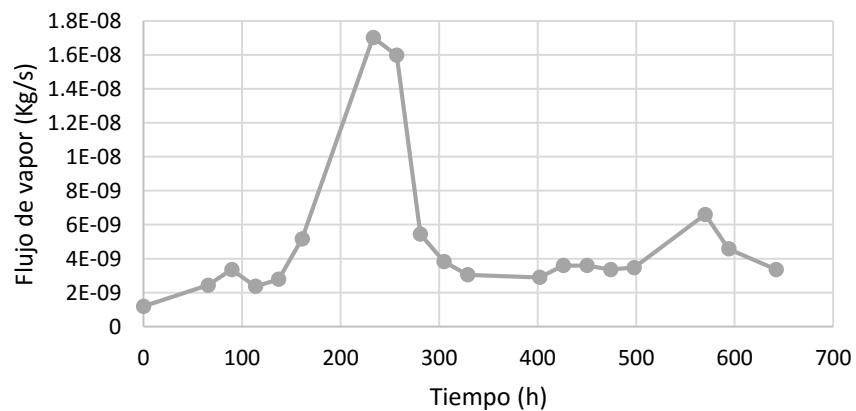


Figura 65. Flujo de vapor con respecto al tiempo de la serie C1.

En la figura 66, se muestra la pendiente de la recta en régimen estable para la serie C1, con un valor de  $-0.0151$  g/h (vapor con respecto al tiempo) y un coeficiente de correlación de 0.9929. En la tabla 13, se muestran los resultados obtenidos en base a la pendiente calculada con el propósito de calcular el factor de resistencia al vapor de ésta serie, el cual dio como resultado 12.47, que nos servirá como referencia para los siguientes diseños de mezclas.

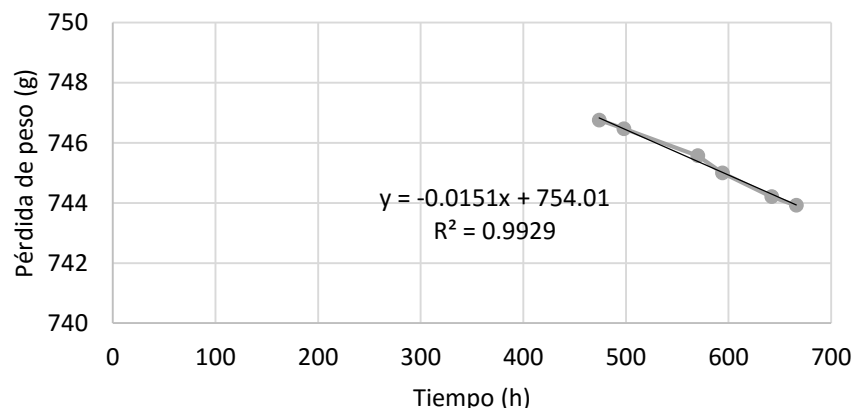


Figura 66. Ecuación de la recta en serie C1 para cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

Tabla 13. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie C1.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica Pv1-Pv2	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m2)	(kg/m2.s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa))	(Kg/m.s.Pa))	(-)
0.0151	4.19444E-09	0.0056745	7.39174E-07	1236.93	0.0266	1.59E-11	1.9818E-10	12.47

En la figura 67, se observa el comportamiento de la pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie C2, la cual se relaciona con la siguiente figura (véase figura 68), en donde se muestra el comportamiento del flujo de vapor con respecto al tiempo hasta obtener un flujo con un régimen estable.

En la figura 68, se muestra la ecuación de la recta la ésta serie, en donde la pendiente fue de -0.0052 g/h con un coeficiente de correlación de 0.9997, por lo que éste resultado se utilizó para el cálculo del flujo de vapor de  $1.44 \times 10^{-9}$  kg/s (véase tabla 14) que con respecto a la serie C1 ( $4.19 \times 10^{-9}$  kg/s) fue 65.63% menor, por lo que el flujo de vapor es más lento en esta serie.

Por último se calculó el factor de resistencia al vapor (véase tabla 14), el cual su resultado fue de 35.85. Este factor de resistencia al vapor fue 187.5% superior al obtenido en la serie C1 (12.47) debido a que de acuerdo a los resultados, este tipo de especímenes tienen una matriz con menor cantidad de poros, por lo que son más impermeables con respecto a la serie C1.

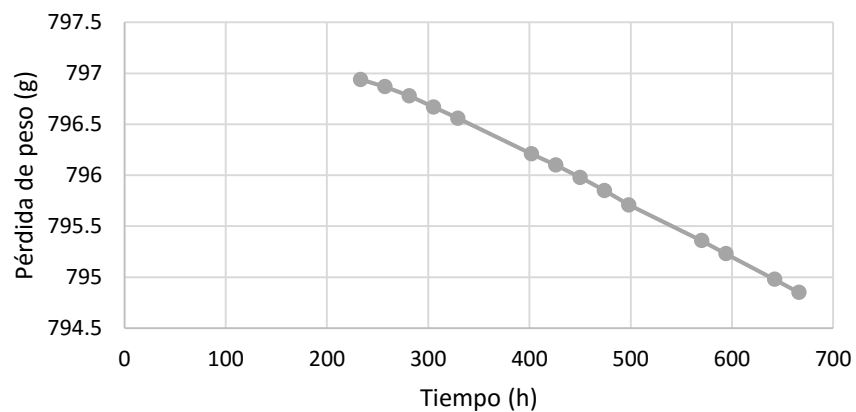


Figura 67. Pérdida de peso con respecto al tiempo en serie C2.

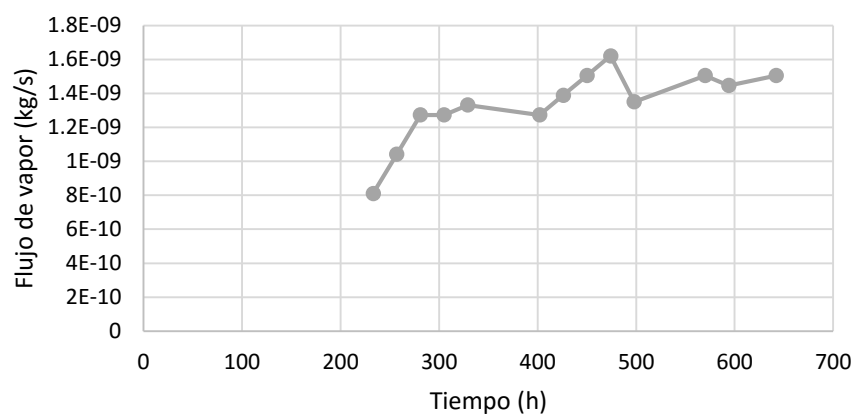


Figura 68. Flujo de vapor con respecto al tiempo en serie C2.

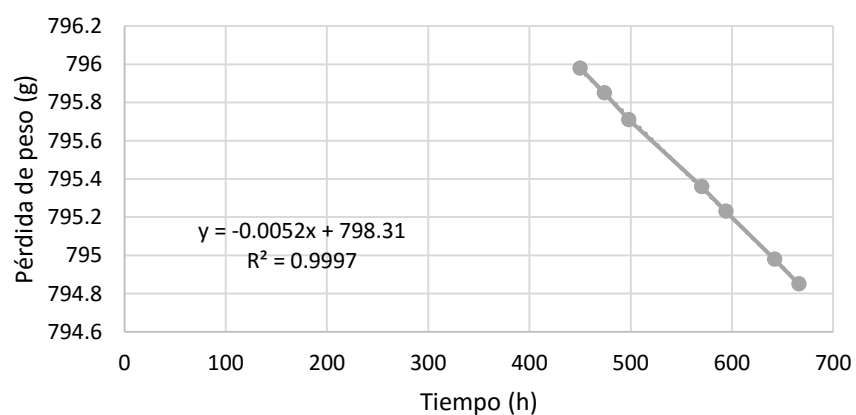


Figura 69. Ecuación de la recta en serie C2 para cálculo del factor de resistencia a vapor de agua.

Tabla 14. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie C2.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica Pv1-Pv2	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa))	(Kg/m.s.Pa))	(-)
0.0052	1.44444E-09	0.0058088	2.48665E-07	1236.93	0.0275	5.52843E-12	1.9818E-10	35.85

Continuando con la serie M3, en la figura 70 se muestra el comportamiento de la pérdida de peso con respecto al tiempo, en donde podemos ver una uniformidad en la reducción del peso. La figura 71, ésta relacionada con la figura anterior, ya que se muestra el comportamiento del flujo de vapor con respecto al tiempo en ésta prueba, que aun cuando los últimos seis resultados se encuentran ligeramente alejados de un régimen estable, con ayuda de la figura 72, podemos ver que en la ecuación de la recta tiene un coeficiente de correlación de 0.9994.

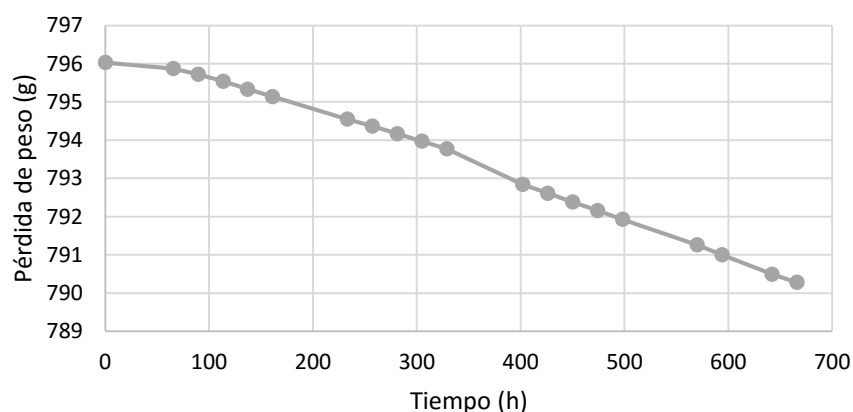


Figura 70. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie M3.

En la figura 72, observamos que la ecuación de la recta fue de -0.098 g/h, que posteriormente se utilizó para calcular el flujo de vapor en régimen estable que dio como resultado  $2.72 \times 10^{-9}$  kg/s (véase tabla 15), que con respecto a la serie de control C1 sin filler ( $4.19 \times 10^{-9}$  kg/s) éste resultado fue 35.08% menor a ésta serie, en donde no se observó el efecto de la adición de las virutas de pino en la permeabilidad al vapor, debido a que posiblemente el contenido de virutas fue mínimo y la cantidad de agua de absorción de éstas cerró la matriz de cemento,

reduciendo su porosidad y por defecto disminuir la permeabilidad del material compuesto.

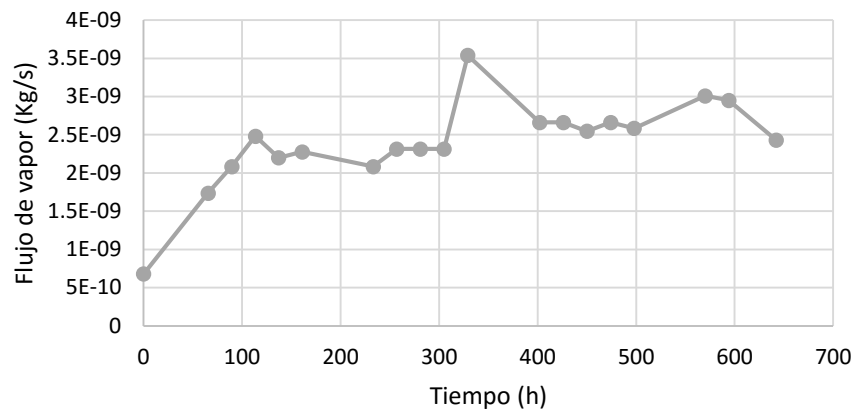


Figura 71. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie M3.

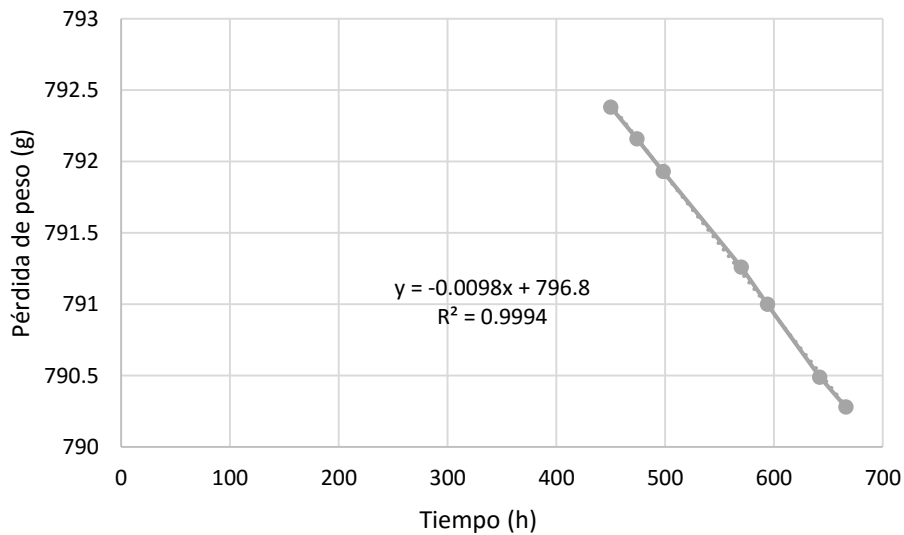


Figura 72. Ecuación de la recta en serie M3 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

En la tabla 15, se muestra el valor del factor de resistencia al vapor con un valor de 17.92 que en base a la serie C1 (12.47) aumentó 43.70%, que como se explicó anteriormente, ésta serie mostró mayor resistencia al vapor de agua debido a una matriz de cemento con menor cantidad de poros y la adición de las virutas de



pino no tuvieron un efecto relevante, posiblemente por una baja cantidad en adición (2%).

Tabla 15. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie M3.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica a $P_{v1}-P_{v2}$	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.0098	2.72222E-09	0.0056745	4.79729E-07	1236.93	0.0285	1.1053E-11	1.9818E-10	17.929331

En lo que respecta a la serie M4, podemos observar en las figuras 73 y 74, el comportamiento de la serie en la pérdida de peso con respecto al tiempo debido a la diferencia de presiones atmosféricas por efecto de la diferencia de humedades relativas entre el interior de la copa de prueba y la cámara climática.

La pérdida de peso parecía haber tenido una estabilidad al finalizar la prueba, pero de acuerdo al flujo de vapor (véase figura 74) hubo variaciones significativas por ciertos picos en los que éste no se encontraba equilibrado. Por lo que, se procedió a revisar la ecuación de la recta para calcular el flujo de vapor en régimen estable y evaluarlo con los resultados de la prueba.

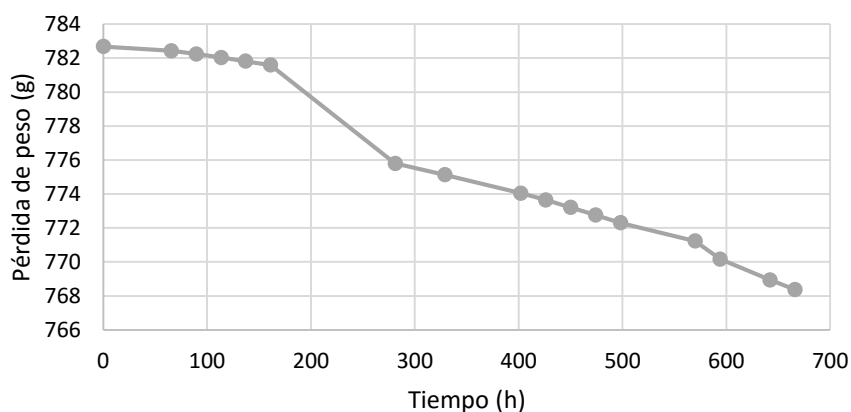


Figura 73. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie M4.

De acuerdo a la figura 75, se obtuvo la ecuación de la recta con un valor de - 0.0224 g/h, con el que se calculó el flujo de vapor estable dando como resultado

$6.22 \times 10^{-9}$  kg/s (véase tabla 16), en donde éste valor al compararlo con la figura 74, éste valor se encuentra dentro del rango de los últimos seis puntos a excepción del pico que se observa en dicha figura, en donde este pudo deberse a una pérdida de material adherido a la superficie de la copa.

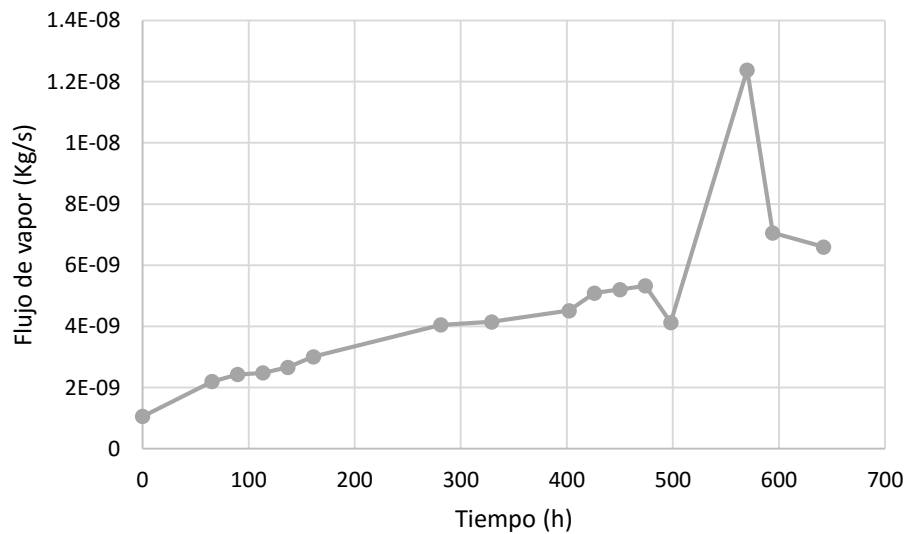


Figura 74. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie M4.

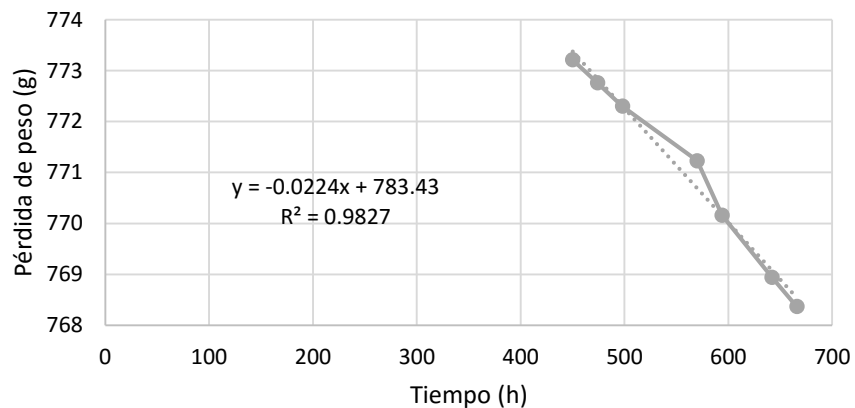


Figura 75. Ecuación de la recta en serie M4 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

En la tabla 16, se muestra el factor de resistencia al vapor con un valor de 8.12 y en base la serie de control C1 (12.47) éste valor fue 34.88% menor, por lo que la adición de las virutas en esta proporción mostró un reducción de la resistencia a

la difusión del vapor de agua a través de la serie M4. Por defecto, la permeabilidad fue mayor para éste tipo de especímenes.

Tabla 16. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie M4.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica a $P_{v1}-P_{v2}$	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.0224	6.22222E-09	0.0056745	1.09652E-06	1236.93	0.0275	2.43784E-11	1.9818E-10	8.1293218

A continuación, se presentan los resultados de los especímenes con virutas de madera de pino con filler. En la figura 76 y 77, se muestra el comportamiento con respecto al tiempo de la serie M5, en donde observamos que en la última medición se vio un comportamiento de mayor estabilidad en cuanto a la pérdida de peso y en el flujo de vapor.

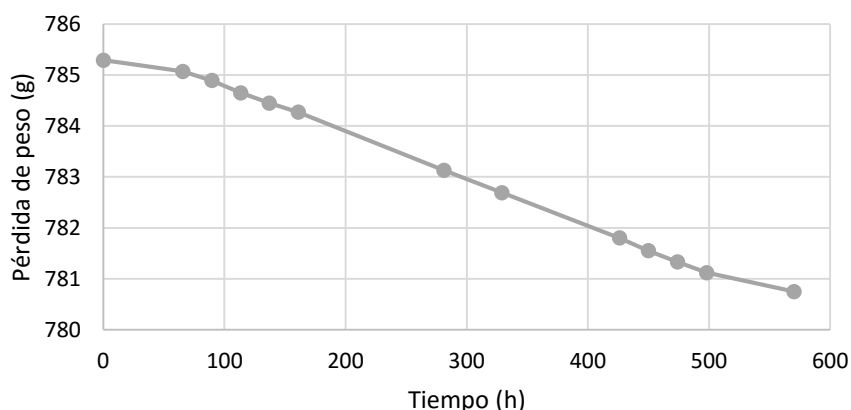


Figura 76. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie M5.

En la figura 78, se observa la ecuación de la recta que mostró una pendiente de  $-0.0072$  g/h, que posteriormente se utilizó para el cálculo del flujo de vapor el cual fue de  $2.00 \times 10^{-9}$  kg/s (véase tabla 17) y éste mismo con respecto a la serie de control C2 ( $1.44 \times 10^{-9}$  kg/s) disminuyó 28%, mostrando una permeabilidad mayor que permite el aumento en el flujo de vapor de esta serie, debido a que en ésta matriz cementante el contenido de virutas causó éste efecto de una mayor permeabilidad a la difusión del vapor de agua.

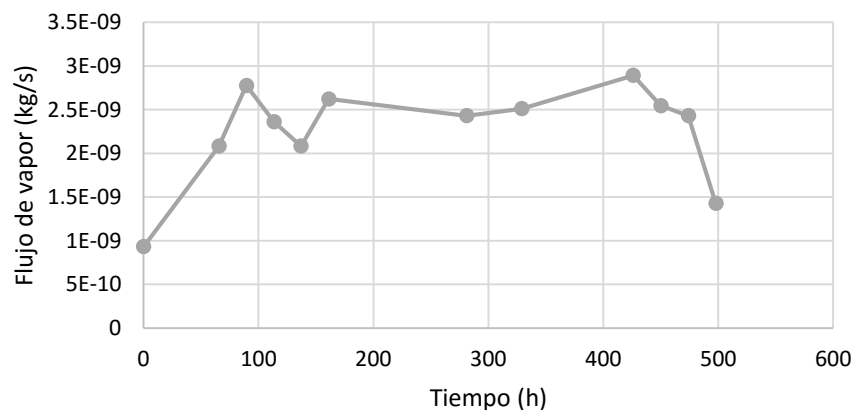


Figura 77. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie M5.

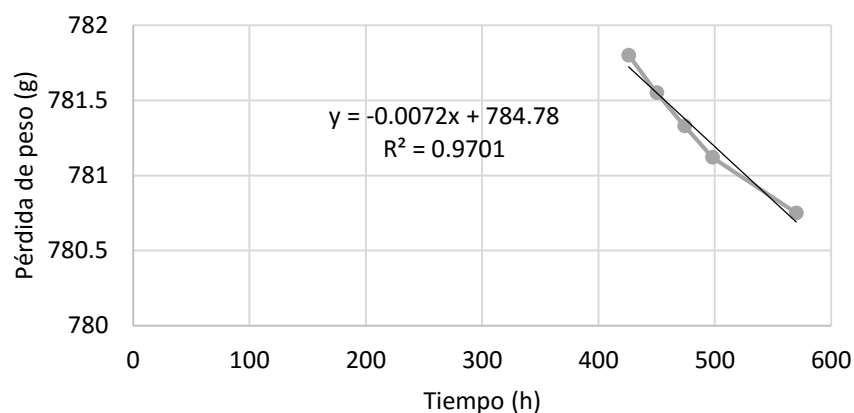


Figura 78. Ecuación de la recta en serie M5 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

En la tabla 17, se observan los resultados de las propiedades de estos materiales compuestos, en donde se muestra el factor de la resistencia a la difusión del vapor de agua con un valor de 26.75 y con respecto a la serie de control C2 (35.85) éste resultado fue 25.38% menor que la referencia, esto debido a que en ésta matriz cementante la adición de las virutas produjo un ligero aumento en la permeabilidad de éstos materiales compuestos, por lo que se pudo observar el efecto con adiciones al 2% de virutas de pino en el aumento de la permeabilidad para permitir el flujo de la difusión del vapor de agua.

Tabla 17. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie M5.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica $P_{v1}-P_{v2}$	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.0072	2E-09	0.0056745	3.5245E-07	1236.93	0.026	7.4085E-12	1.9818E-10	26.750

Por último para la serie M6, en las figuras 79 y 80, se observa el comportamiento de la pérdida de peso y flujo de la difusión de vapor con respecto al tiempo, en donde se vio que al inicio de las mediciones hubo una mayor pérdida de peso que se puede atribuir a que algún material pudo haber estado adherido a la superficie y por defecto mostrar una mayor reducción del peso, pero en la continuación de la prueba podemos ver una estabilidad en cuanto al flujo de vapor (véase figura 80).

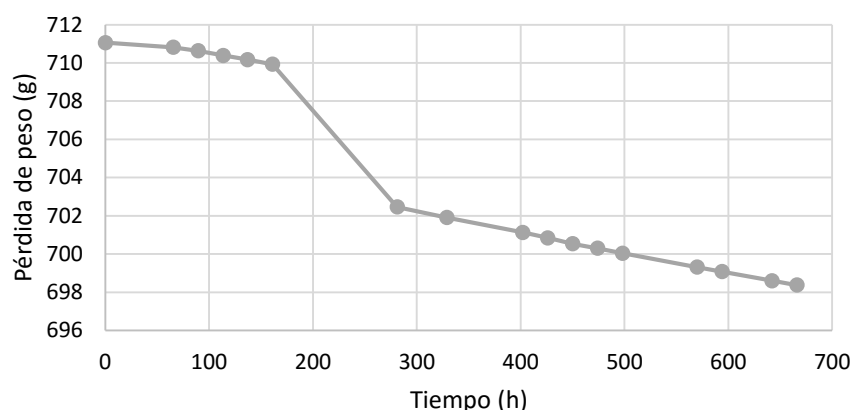


Figura 79. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie M6.

En la figura 81, se muestra la ecuación de la recta, la cual muestra un valor de - 0.01 g/h. Éste valor nos sirvió para calcular el flujo de la difusión de vapor en régimen estable el cual fue  $2.77 \times 10^{-9}$  kg/s (véase tabla 18), que fue 92.36% con respecto a la serie de control C2.

En la tabla 18, se muestra la permeabilidad y el factor de resistencia al vapor de agua, el cual fue 18.55, que fue 48.25% menor con respecto a la serie de control con filler C2 (35.85). Esto debido a que la adición del 4% de virutas de pino,

aumentó significativamente la permeabilidad de los materiales compuestos de esta serie, permitiendo una mayor difusión de vapor de agua a través de los especímenes, debido a una mayor cantidad de poros que provocaron el aumento de la permeabilidad y que a su vez redujeron la resistencia a la difusión del mismo.

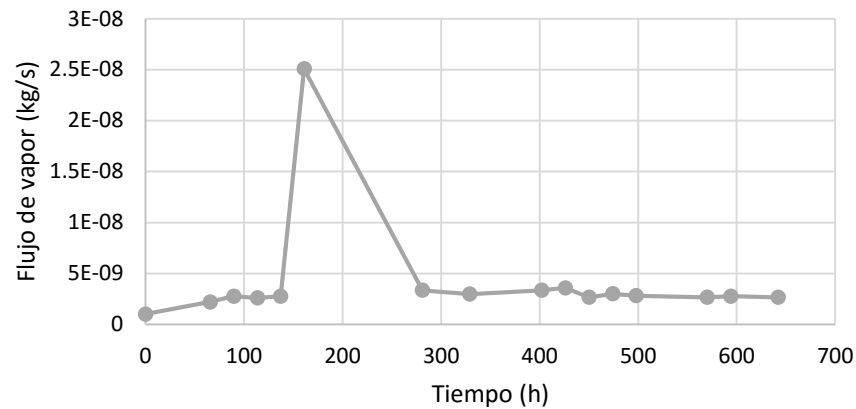


Figura 80. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie M6.

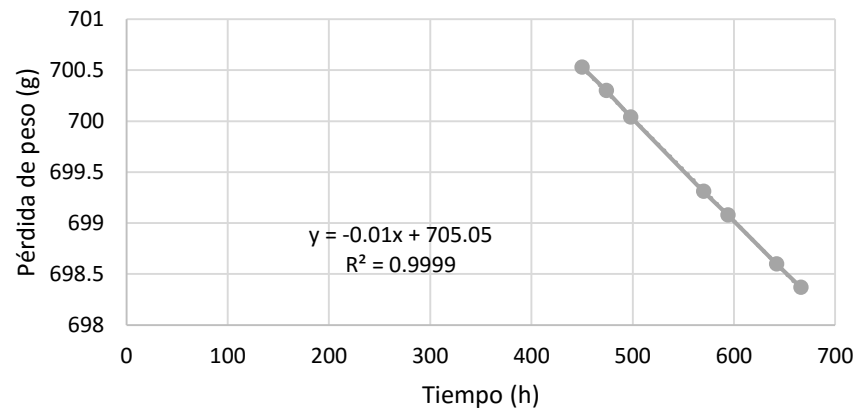


Figura 81. Ecuación de la recta en serie M5 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

En la figura 82, se muestra en resumen los valores del factor de resistencia a la difusión de vapor de agua en los especímenes con virutas de madera de pino, en donde se observa que los especímenes son adición de filler, tuvieron valores menores del factor de la resistencia con respecto a los especímenes con filler. Esto se puede atribuir a que el contenido de pasta dentro de las matrices

cementantes es un factor muy importante en el diseño de materiales compuestos con factores de resistencia menores.

Tabla 18. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie M6.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica a Pv1-Pv2	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.01	2.77778E-09	0.0056745	4.89519E-07	1236.93	0.027	1.06853E-11	1.9818E-10	18.55

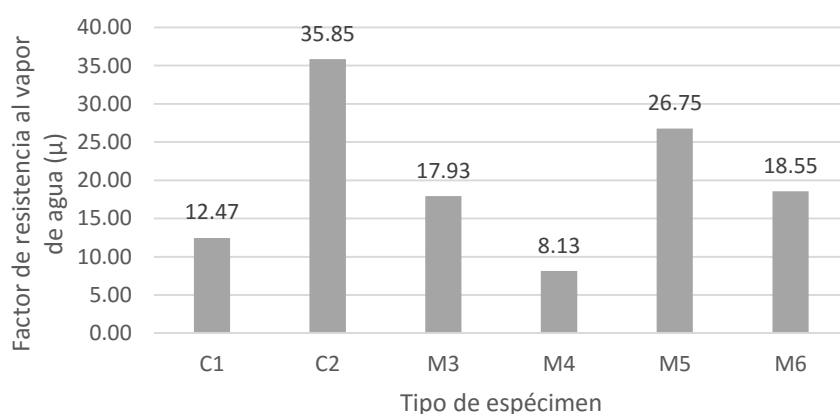


Figura 82. Resultados de factor de resistencia al vapor de agua en especímenes con virutas.

### *Especímenes de viruta de cáñamo*

A continuación, se presentan los resultados de los especímenes con virutas de cáñamo. En las figuras 83 y 84, del mismo modo observamos el comportamiento que mostraron los especímenes de la serie de control NC1, en donde se muestra una pérdida de peso uniforme y un flujo de vapor estable, por lo que se procedió al cálculo de una pendiente por medio de la ecuación de la recta.

En la figura 85, observamos la ecuación de la recta de los resultados de la pérdida de peso con respecto al tiempo, en la cual se calculó la pendiente obteniendo un valor de -0.0268 g/h, con un coeficiente de correlación de 0.9996.

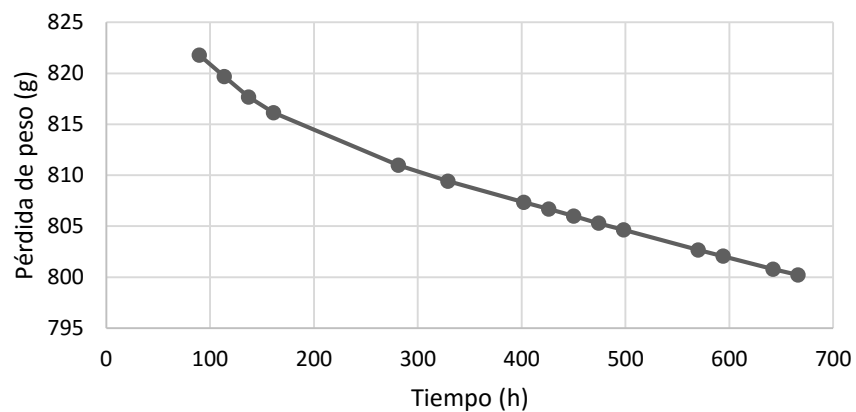


Figura 83. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NC1.

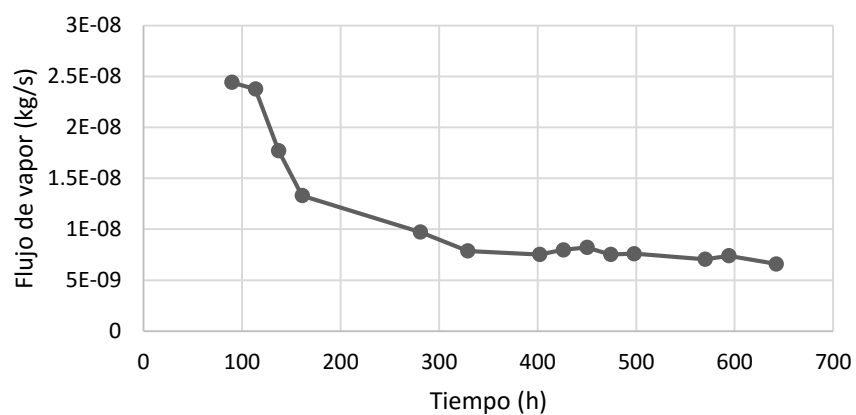


Figura 84. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NC1.

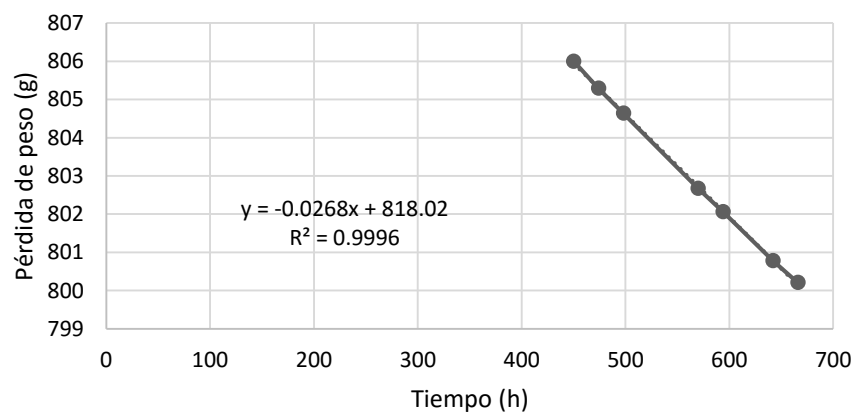


Figura 85. Ecuación de la recta en serie NC1 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.



En la tabla 19, se observa el resultado de la pendiente del flujo de vapor de agua en régimen estable, con un valor de  $7.44 \times 10^{-9}$  kg/s, que se tomó como valor de referencia para ésta serie de control. También, observamos el factor de resistencia a la difusión de vapor con un valor de referencia de 8.38, el cual utilizaremos para comparar las siguientes series.

Tabla 19. Cálculo del factor de resistencia al vapor de agua para serie NC1.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica Pv1-Pv2	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m2)	(kg/m2.s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.0268	7.44444E-09	0.00636173	1.17019E-06	1236.93	0.025	2.36512E-11	1.9818E-10	8.3792933

En las figuras 86 y 87, se muestra el comportamiento de la serie de control NC2 en la pérdida de peso y flujo de vapor con respecto al tiempo de prueba, en donde se observó una pérdida de peso estable y una difusión del flujo de vapor con valores que variaron ligeramente entre mediciones. Por lo que se continuó con el cálculo de la pendiente por medio de la ecuación de la recta de la pérdida de peso en las últimas seis mediciones.

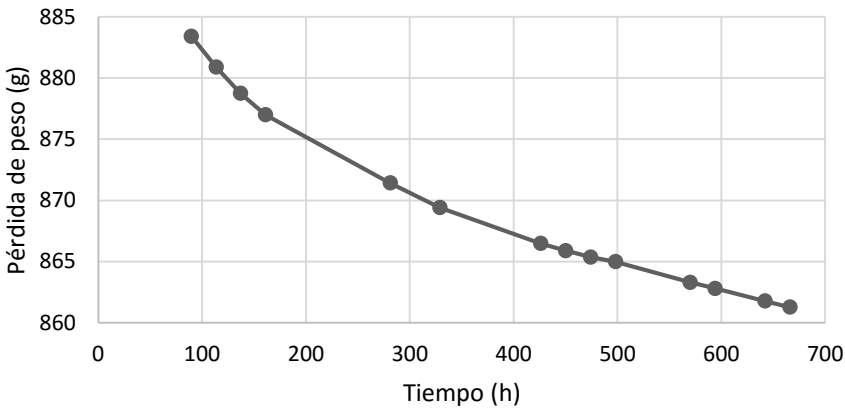


Figura 86. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NC2.

En la figura 88, se muestra la ecuación de la recta calculada para la obtención de la pendiente de la difusión de vapor, la cual tuvo un valor de -0.0216 g/h, que posteriormente se utilizó para convertirlo a  $5.72 \times 10^{-9}$  kg/s (véase tabla 20), que

con respecto a la serie de control NC1 ( $7.44 \times 10^{-9}$  kg/s) se encontró 23.11% menor que ésta serie de referencia sin contenido de filler. Por lo que el contenido cementante en los diseños de mezclas modificó levemente la difusión de vapor, debido a la reducción de la permeabilidad del material por una menor conexión entre poros.

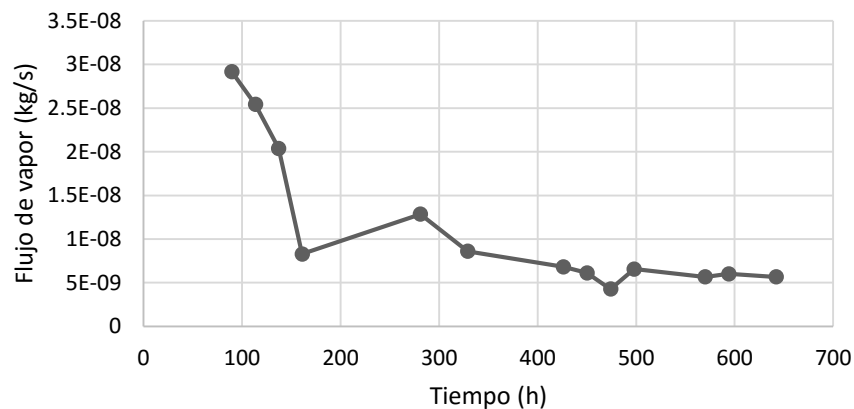


Figura 87. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NC2.

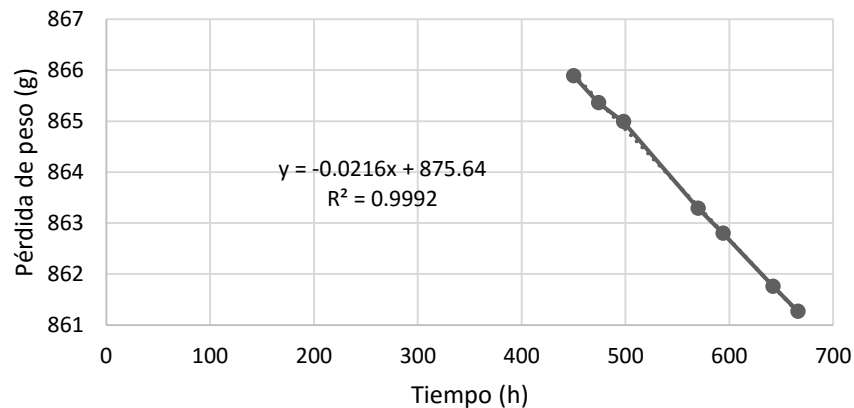


Figura 88. Ecuación de la recta en serie NC2 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

En la tabla 20, se muestra el factor de la resistencia al vapor de agua con un valor de 10.98, que del mismo modo, comparándolo con la serie de control NC1, éste se encontró 31.02% mayor que ésta serie, debido a que la matriz cementante obtuvo una menor permeabilidad y por consiguiente su factor de resistencia al

vapor de agua aumentó con respecto a NC1. Estos valores se usarán de referencia para los siguientes especímenes.

Tabla 20. Cálculo del factor de resistencia a vapor de agua para serie NC2.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica a Pv1-Pv2	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.0206	5.72222E-09	0.0067929	8.42382E-07	1236.93	0.0265	1.80472E-11	1.9818E-10	10.98

En la figura 89 y 90, se muestran el comportamiento para los especímenes NM4, en donde la pérdida de peso con respecto a tiempo y flujo de vapor estuvieron constantes y se mantuvieron en un régimen estabilizado, por lo que se continuó con el cálculo de la ecuación de la pendiente en los últimos seis puntos de la pérdida de peso.

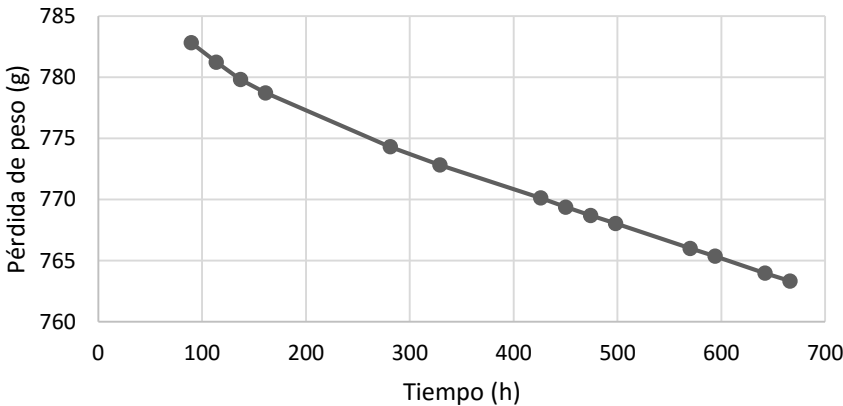


Figura 89. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NM4.

En la figura 90, se observa la ecuación de la recta en la cual se calculó la pendiente que obtuvo un valor de -0.0281 g/h, para la obtención del flujo de vapor y el factor de la resistencia al vapor de agua. El flujo de vapor fue de  $7.81 \times 10^{-9}$  kg/s para ésta serie, que se encontró 4.97% mayor que la referencia NC1 ( $7.44 \times 10^{-9}$  kg/s). Por lo que la adición del 2% virutas de cáñamo tuvo un ligero incremento en la permeabilidad de ésta serie, produciendo una microestructura más porosa con respecto a la serie de control NC1.

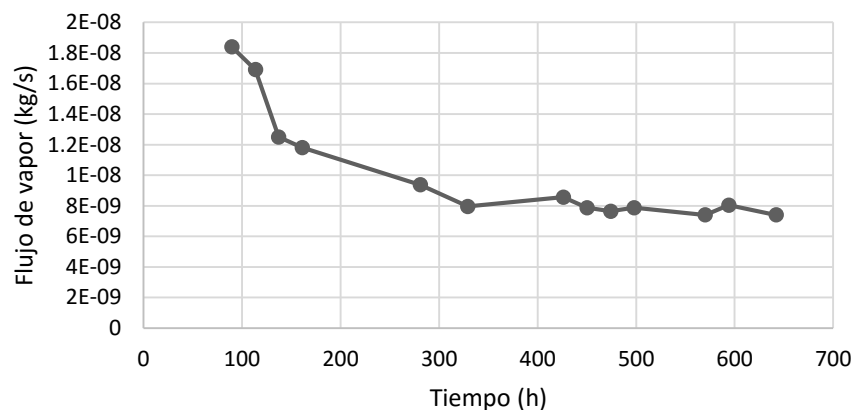


Figura 90. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NM4.

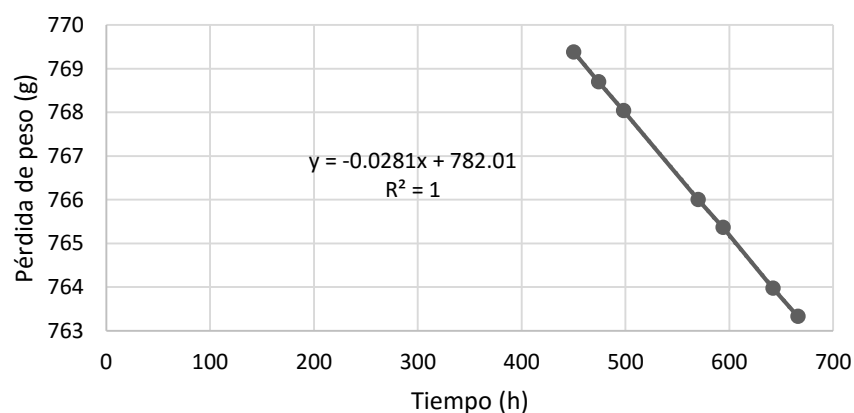


Figura 91. Ecuación de la recta en serie NM4 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

En lo que respecta al factor de resistencia al vapor de agua, en la tabla 21 se observa el valor de dicho factor, el cual fue de 7.10, que en la misma comparativa con NC1 (8.38), éste valor disminuyó 15.27% con respecto a la referencia NC1.

Por lo que éste tipo de diseños de mezclas, permite que los materiales liberen una mayor cantidad de humedad al medio que los rodea, debido a que la microestructura de las virutas de cáñamo provocan que el flujo del vapor de agua aumente pasando a través del material por medio de los tubos capilares, lo que provoca una mayor transferencia de humedad.

Tabla 21. Cálculo del factor de resistencia a vapor de agua para serie NM4.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica a $P_{v1}-P_{v2}$	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.0281	7.80556E-09	0.0062211	1.25468E-06	1236.93	0.0275	2.78947E-11	1.9818E-10	7.10

En las figuras 92 y 93, se muestra el comportamiento de la serie NM6 en la pérdida de peso con respecto al tiempo y la estabilización flujo de vapor del mismo modo, con respecto al tiempo. En ésta serie se observa que el flujo de vapor se estabiliza en menor tiempo que la serie NM4 que contiene 4% de virutas de cáñamo, por lo que se continuó con el cálculo de la ecuación de la recta con la finalidad de evaluar sus propiedades con respecto a la serie de control NC2.

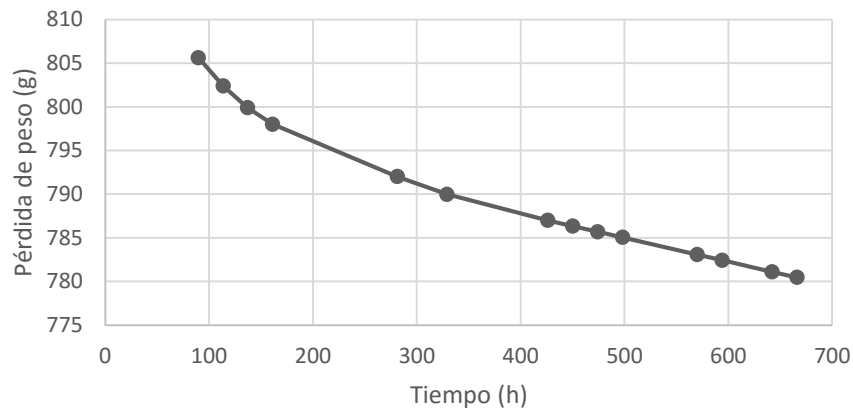


Figura 92. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NM6.

En la figura 94, se muestran los resultados de la pendiente de la ecuación de la recta en las últimas seis mediciones, la cual fue de -0.0273 g/h con un coeficiente de correlación de 1, con el valor de la pendiente en un régimen estabilizado se procedió al cálculo del flujo de vapor y el factor de resistencia al vapor de agua.

En la tabla 21, se muestra el valor final para el flujo de vapor de agua para la serie NM6, el cual fue  $7.58 \times 10^{-9}$  kg/s, que en comparación con la serie de referencia NC2 ( $5.72 \times 10^{-9}$  kg/s) éste valor aumentó 32.52% con respecto a ésta referencia.

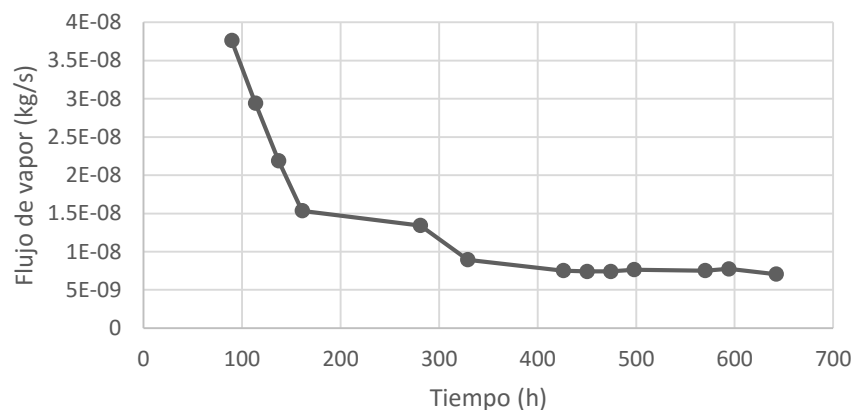


Figura 93. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NM6.

En la tabla 21, también se observa el factor de resistencia al vapor de agua con un valor de 8.26, que de igual manera, comparándolo con la serie de control NC2 (10.98) éste valor disminuyó 24.77% con respecto a ésta referencia, por lo que la adición de virutas de cáñamo causaron un aumento en la permeabilidad del material, debido a que la porosidad de éstas virutas permite que la difusión del vapor sea mayor, considerablemente, en base a la serie NC2.

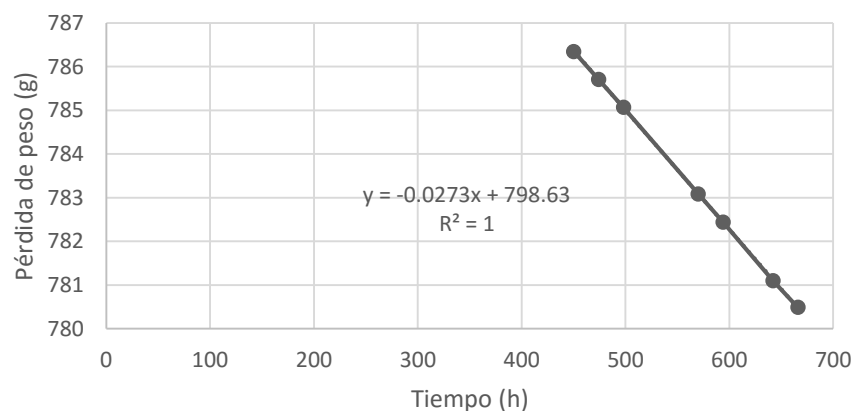


Figura 94. Ecuación de la recta en serie NM6 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

Tabla 22. Cálculo del factor de resistencia a vapor de agua para serie NM6.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica Pv1-Pv2	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.0273	7.58333E-09	0.0066476	1.14076E-06	1236.93	0.026	2.39785E-11	1.9818E-10	8.26

Por último, en las figuras 95 y 96, se muestran los resultados del comportamiento de la serie en los especímenes de la serie NM7 en las pruebas de pérdida de peso y el flujo de vapor con respecto al tiempo. Se observa que en este tipo de especímenes, el flujo de vapor de vapor se estabiliza después de la primera semana, por lo que en lo que respecta a los otros especímenes con virutas de cáñamo, requerían un mayor acondicionamiento con la finalidad de que los especímenes se estabilizaran en el menor tiempo posible. Por lo que después de obtener una estabilización en el flujo de vapor se continuó con el cálculo de la ecuación de la recta.

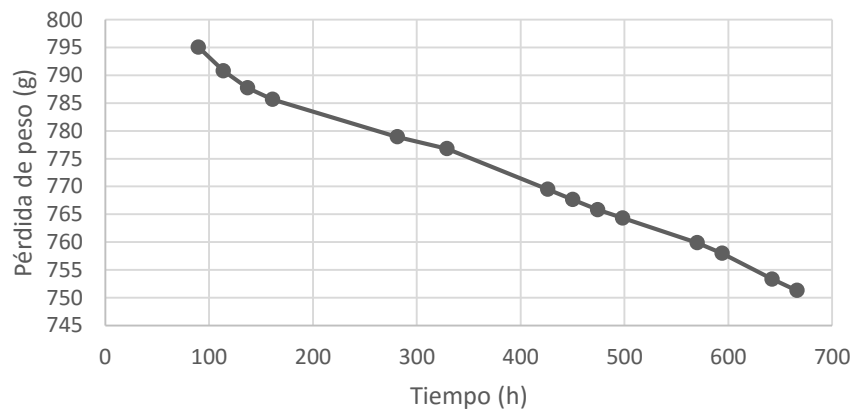


Figura 95. Pérdida de peso con respecto al tiempo de la serie NM7.

En la figura 97, se observa el cálculo de la pendiente en la ecuación de la recta de las últimas mediciones, en la cual la pendiente dio como resultado -0.0742 g/h con un coeficiente de correlación de 0.9917, que después se utilizó para la

conversión a flujo de vapor y con el cálculo del factor de resistencia a la difusión de vapor.

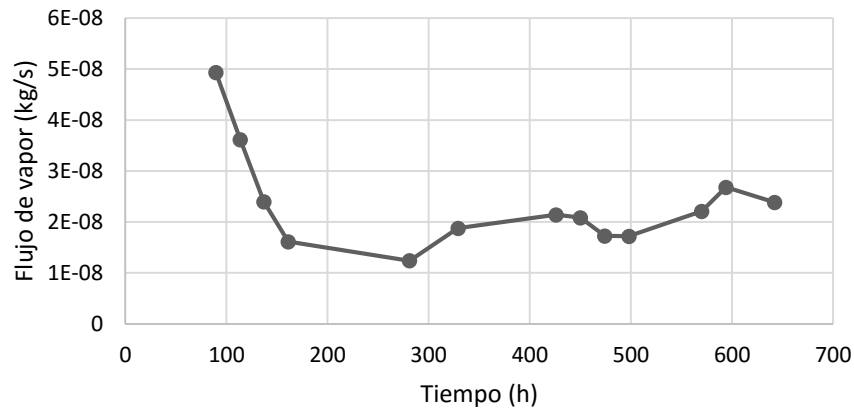


Figura 96. Flujo de vapor de agua con respecto al tiempo en la serie NM7.

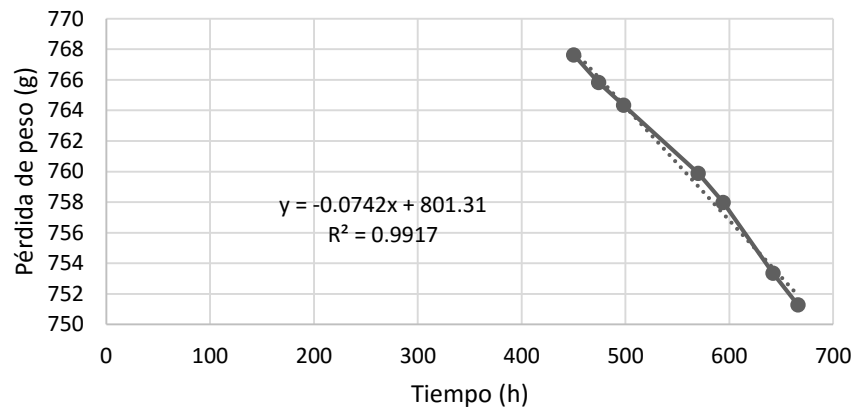


Figura 97. Ecuación de la recta en serie NM7 para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

En la tabla 23, se muestra el resultado de la pendiente del flujo de vapor con un valor de  $2.06 \times 10^{-9}$  kg/s y con referencia a la serie NC2 ( $5.72 \times 10^{-9}$  kg/s) éste valor fue 64% menor que ésta serie de control. En lo que respecta a la permeabilidad, ésta aumentó más del 260% con un valor de  $6.51 \times 10^{-11}$  kg/m·s·Pa en base a la referencia NC2 ( $1.80 \times 10^{-11}$  kg/m·s·Pa).

Con respecto al factor de resistencia al vapor de agua, en la tabla 23 observamos al final de la tabla que el valor fue de 3.04 y haciendo una comparativa con la



serie NC2 (10.98), éste factor se redujo más del 72%, por lo que la adición de las virutas de cáñamo promovió que la difusión de vapor de agua aumentará, por lo que las propiedades de éstos materiales permitieron que la presión de vapor en el interior de la copa se estabilizara en menor tiempo con respecto a la presión de vapor del medio al que se encontraba la prueba (50% de HR).

Tabla 23. Cálculo del factor de resistencia a vapor de agua para serie NM7.

Pendiente	Pendiente	Área	Densidad de flujo de vapor de agua	Presión atmosférica a Pv1-Pv2	Espesor del material	Permeabilidad del material	Permeabilidad del aire	Factor de resistencia al vapor de agua $\mu$
(g/h)	(kg/s)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> .s)	(Pa)	(m)	(Kg/m.s.Pa)	(Kg/m.s.Pa)	(-)
0.0742	2.06111E-08	0.0066476	3.10053E-06	1236.93	0.026	6.51725E-11	1.9818E-10	3.04

En la figura 98, se observan los resultados finales para éstos especímenes, donde el comportamiento de los especímenes sin filler (NC1 y NM4) mostraron valores de factor de resistencia al vapor menores con respecto a los especímenes con filler (NC2, NM6 y NM7), debido a que el contenido de pasta de cemento es un factor que aumenta o reduce éstos factor, por lo que la permeabilidad al vapor en cada tipo de espécimen influirá en los resultados finales.

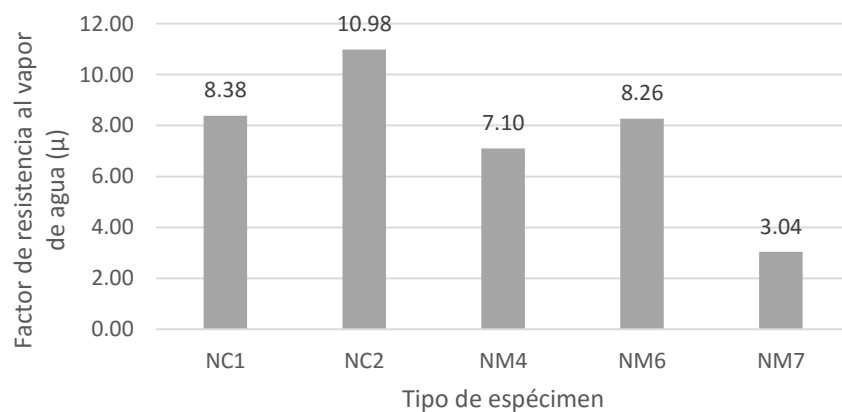


Figura 98. Resultados del factor de resistencia al vapor de agua en especímenes con virutas de cáñamo.

### 3.4.6 Ciclos de envejecimiento en mampostería a 28 días

En las pruebas de durabilidad o bien ciclos de envejecimiento, se sometieron a los especímenes de mampostería de las formulaciones de mezclas con virutas de pino a 15 ciclos de humedecimiento y secado promoviendo el desgaste del compuesto por erosión y contracciones. Estos ciclos consistieron en someter a los especímenes a isothermas de dos humedades relativas distintas.

En la figura 99, podemos observar los especímenes de mampostería colocados en el cuarto de curado, para cumplir 24 h a una humedad relativa de  $95 \pm 5\%$ . Por otro lado, podemos ver en la figura 90, a los especímenes en un área designada, que del mismo modo, cumplieron 24 h a una humedad relativa de  $40 \pm 5\%$ .



Figura 99. Especímenes de mampostería en el ciclo de humedecimiento.

En la figura 101, podemos ver los resultados de la resistencia a compresión en estos especímenes, donde los especímenes de referencia C1 (sin filler) obtuvieron  $49.84 \text{ kg/cm}^2$ . En la serie C2 (con filler) la resistencia a compresión fue de  $69.95 \text{ kg/cm}^2$  que con respecto a C1 éste valor incrementó 40%, por lo que el efecto del filler provocó el aumento de la resistencia a compresión.

Continuando con los especímenes sin filler y con virutas de pino, en la misma figura (véase figura 101), se observa la reducción de la resistencia a compresión en la serie de especímenes M3 y M4, donde se obtuvieron valores de  $46.99$  y  $35.08 \text{ kg/cm}^2$ , que con respecto a la serie de control C1, éstos resultados

disminuyeron 5.72% y 29.61%, respectivamente (véase figura 102). Por lo que la adición de las virutas tuvo un efecto de reducción en la resistencia debido a su baja densidad, por lo que el aumento de los materiales de baja densidad afecta directamente en el desarrollo de la resistencia a compresión, debido al aumento de vacíos en el materiales compuesto, impidiendo la transferencia de energía, provocando una falla por aplastamiento.



Figura 100. Especímenes de mampostería en el ciclo de secado.

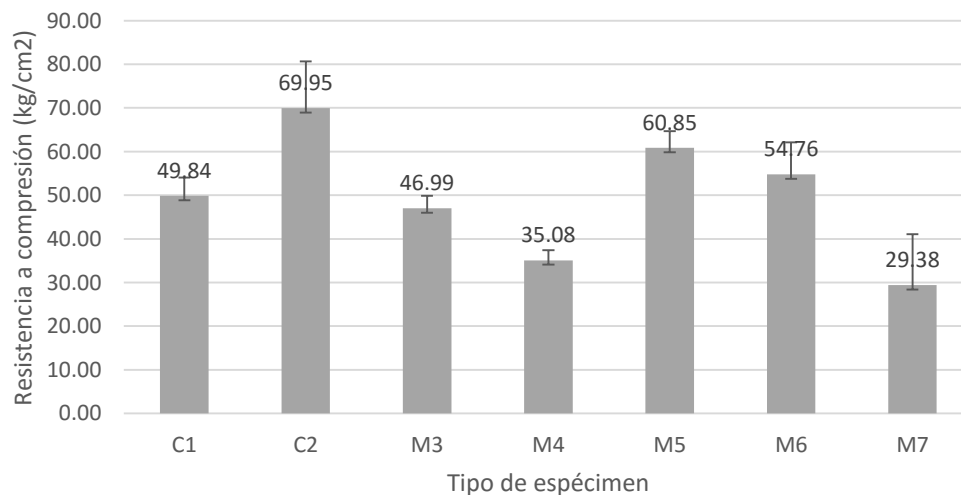


Figura 101. Resultados de la resistencia a compresión en especímenes de durabilidad.

Para el caso de los especímenes con filler, en la figura 101 observamos que los especímenes M5, M6 y M7, obtuvieron una reducción de la resistencia a

compresión a razón de la proporción del contenido de virutas, esto con respecto a la serie C2. La resistencias a compresión de estos especímenes fueron: 60.85, 54.76 y 29.38 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente, por lo que sus reducciones en dicha prueba mecánica fueron de 13%, 21.71% y 58% (véase figura 102). Aunque la adición de filler aumentó la resistencia en éste tipo de especímenes, la resistencia a compresión se vio afectada por la baja densidad aparente de estos materiales aislantes, por lo que a adición de estos materiales tienen un efecto significativo en base a la cantidad de virutas adicionadas, como podemos ver en los resultados de M7.

De acuerdo a la normativa NMX C 441, el tipo de espécimen M7 no cumple con la resistencia a compresión por lote (35.00 kg/cm<sup>2</sup>) y están en el límite permitido por pieza (28.00 kg/cm<sup>2</sup>), por lo que éste tipo de espécimen se puede modificar posteriormente, ya que el contenido de pasta dentro de estos materiales compuestos es el factor principal para el desarrollo de la resistencia a compresión.

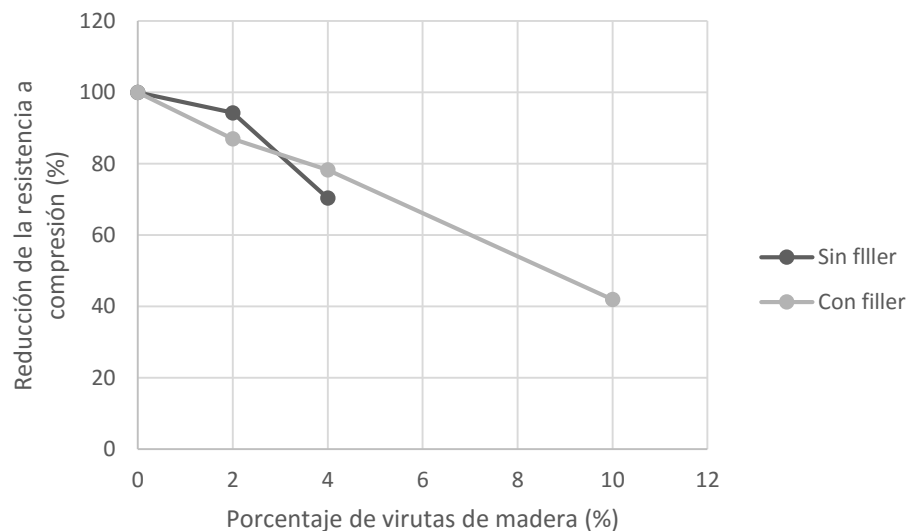


Figura 102. Evolución de la resistencia a compresión según el contenido de virutas.

# **CAPÍTULO IV**

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones están basadas en los resultados del presente proyecto de investigación y se enlistan a continuación:

1. La densidad aparente de los especímenes tuvo una reducción aceptable de 24% para cilindros y 15% para mampostería, para el caso de especímenes de virutas de pino y en los especímenes de virutas de cáñamo la reducción fue de 12.76%, debido a la incorporación de virutas de origen natural que fue una característica importante en el aumento de las propiedades higrotérmicas de los mismos.
2. Los coeficientes de conductividad térmica en los especímenes con virutas de origen natural, se aproximaron a los valores establecidos en la normativa vigente para materiales de baja conductividad, por lo que la adición de las virutas de pino y cáñamo, demostraron ser buenos materiales para la fabricación de compuestos con bajos coeficientes de conductividad térmica.
3. La higroscopia de los especímenes aumentó 86% en especímenes con virutas de pino y 19% en especímenes con virutas de cáñamo, con respecto a la adición de las virutas. Cabe destacar que aunque los diseños de mezclas son en proporción iguales, los materiales utilizados en cada tipo de espécimen tiene propiedades higroscópicas distintas, donde la adición de las virutas modificaron la absorción y la desorción de humedad.
4. El flujo de vapor y la permeabilidad aumentan significativamente hasta un 92% con respecto al control, esto propiciado por el contenido de virutas de origen natural, por lo que el incremento de virutas dentro de estos materiales compuestos, reducirán el factor de resistencia al vapor de agua significativamente.
5. La resistencia a compresión de los especímenes estudiados presentó valores menores al control, debido a la adición de las virutas de origen natural y para el caso de los especímenes con ceniza volante, éstos

tuvieron un comportamiento mecánico aceptable ya que no hubo reducción de la resistencia a la compresión, sino al contrario, la resistencia a compresión aumentó entre especímenes de control C1 y C2. En el caso de los especímenes de mampostería, la resistencia a compresión fue 59% mayor en los especímenes con filler.

6. Los especímenes que contenían metacaolín (NC2) presentaron un considerable aumento en el desarrollo de la resistencia a compresión de hasta 25% con respecto al control (NC1).
7. La prueba de envejecimiento por medio de ciclos de humedecimiento y secado a un medio ambiente natural para especímenes de mampostería, tuvo poco efecto en la resistencia a compresión.
8. Las virutas de origen natural tienen gran influencia en los resultados estudiados. Una cantidad considerable de virutas de hasta el 10% pueden afectar la resistencia a compresión de los especímenes, sin embargo, los resultados encontrados de higroscopia, conducción térmica y resistencia al vapor mostraron una reducción importante con respecto a los controles.
9. Los especímenes de mampostería requieren un mayor contenido de pasta para poder cumplir con la normativa mexicana en cuanto a la mampostería no estructural, por lo que los proporcionamientos utilizados deben ser modificados si se requiere utilizar mayores consumos de virutas.

# **CAPÍTULO V**



## CAPÍTULO V

### 5. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se expresan de acuerdo a los estudios realizados en este proyecto de investigación, y se presentan a continuación:

1. Definir consumo de cemento adecuado ya que es fundamental para el desarrollo de una máxima resistencia a compresión. El factor de resistencia mecánica es uno de los cuales influye en los resultados mecánicos y de conducción térmica.
2. Se recomienda utilizar los métodos copa seca y copa húmeda en la medición de la permeabilidad al vapor de agua. Lo anterior, para asegurar un resultado comparativo y evaluar el comportamiento de la permeabilidad al vapor de agua y utilizar especímenes de 50 mm para evitar el uso de anillos en el interior de la copa.
3. Es recomendable aumentar la diferencia de temperatura entre placas fría y caliente a 15° para asegurar una medición más precisa de los valores de conductividad térmica.
4. En las pruebas de durabilidad se recomienda utilizar ambientes más agresivos para estimar la durabilidad de estos compuestos con virutas de origen natural.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agoua, E. et al. (2013). Thermal conductivity of composites made of wastes of wood and expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 41, 557–562. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.016>
2. Aigbomian, E. P., & Fan, M. (2013). Development of Wood-Crete building materials from sawdust and waste paper. *Construction and Building Materials*, 40, 361–366.
3. Aigbomian, E. P., & Fan, M. (2014). Development of wood-crete from treated sawdust. *Construction and Building Materials*, 52, 353–360.
4. ANFOR Certification. (2016). *LISTE DES CARRIERES AYANT DES PRODUITS CERTIFIES*.
5. Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50–56. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
6. ASTM C128-07a. (2007). Standard Test Method for Density , Relative Density ( Specific Gravity ), and Absorption of Fine Aggregate. In *ASTM International* (pp. 1–7). <http://doi.org/10.1520/C0128-07A.1>
7. ASTM C143/C143M-10. (2010). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. In *American Society for Testing and Materials International* (pp. 1–4). <http://doi.org/10.1520/C0143>
8. ASTM C150/C150M-09. (2009). Standard Specification for Portland Cement. In *ASTM International* (Vol. i, pp. 1–10). <http://doi.org/10.1520/C0150>
9. ASTM C1761/C1761M-12. (2012). Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete. In *American Society for Testing and Materials International* (pp. 1–8). <http://doi.org/10.1520/C1761>
10. ASTM C188-09. (2009). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. In *ASTM International* (pp. 1–3). <http://doi.org/10.1520/C0188-09.2>
11. ASTM C231/C231M-09b. (2010). Standard Test Method for Air Content of

- Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. In *American Society for Testing and Materials International* (Vol. 04, pp. 1–10). <http://doi.org/10.1520/C0231>
12. ASTM C31/C31M-09. (2009). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. In *ASTM International* (pp. 1–6). <http://doi.org/10.1520/C0031>
  13. ASTM C33/C33M-08. (2008). Standard Specification for Concrete Aggregates. In *ASTM International* (Vol. i, pp. 1–11). <http://doi.org/10.1520/C0033>
  14. ASTM C39/C39M-09a. (2009). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In *American Society for Testing and Materials International* (pp. 1–7). <http://doi.org/10.1520/C0039>
  15. ASTM C511-09. (2009). Standard Specification for Mixing Rooms , Moist Cabinets , Moist Rooms , and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. In *American Society for Testing and Materials International* (pp. 1–3). <http://doi.org/10.1520/C0511-09.2>
  16. Bederina, M., Gotteicha, M., Belhadj, B., Dheily, R. M., Khenfer, M. M., & Queneudec, M. (2012). Drying shrinkage studies of wood sand concrete – Effect of different wood treatments. *Construction and Building Materials*, 36, 1066–1075. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.010>
  17. Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M. M., Bali, A., & Quéneudec, M. (2009). Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, 23, 1311–1315. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.029>
  18. Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer, M. M., Bali, A., & Que, M. (2007). Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes : Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, 21, 662–668. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.008>
  19. C192/C192M-07, A. (2007). Standard Practice for Making and Curing

- Concrete Test Specimens in the Laboratory. In *American Society for Testing and Materials International* (Vol. i, pp. 1–8). ASTM International. <http://doi.org/10.1520/C0192>
20. Carrión et al., J. M. P. (2001). Determinación de la Compatibilidad de Mezclas de Aserrín de Pinus Spp y cemento Portland para la potencial manufactura de Tableros cemento-madera., 693–700.
  21. Cervantes, M. del R. L. (2014). *Durabilidad de compuestos a base de matrices minerales reforzados con fibras naturales Ing . María del Rosario Leyva Cervantes.*
  22. Coatanlem, P., Jauberthie, R., & Rendell, F. (2006). Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, 20, 776–781. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.057>
  23. Collet, F., & Pretot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes : Variation with formulation , density and water content. *Construction and Building Materials*, 65, 612–619.
  24. CORMA. (2003). La madera. In Centro de Tranferencia Tecnológica (Ed.), *La Construcción de Viviendas en Madera-Manual* (pp. 1–46). Corporación Chilena de la Madera.
  25. Del Real Dávalos, J. A. (2013). *Influencia del Curado con CO2 en Mampostería Fabricada con Sistemas Cementantes Ternarios.* Universidad Autónoma de Nuevo León.
  26. Department of Civil: thecnical University of Denmark Engineering. (2005). *Moisture Buffering of Building Materials Department of Civil Engineering Technical University of Denmark.* BYG-DTU.
  27. Diquélou, et al. (2015). Cement & Concrete Composites Impact of hemp shiv on cement setting and hardening : Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement and Concrete Composites*, 55, 112–121.
  28. Elfordy, S., Lucas, F., & Tancret, F. et al. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“ hempcrete ”) manufactured by a projection process, 22, 2116–2123.

<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>

29. Erdem, K., Khayat, K. H., & Yahia, A. (2010). *Correlating Rheology of Self-Consolidating Concrete to Corresponding Concrete-Equivalent Mortar*.
30. Guo, W., Lim, C. J., Bi, X., Sokhansanj, S., & Melin, S. (2013). Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets. *Fuel*, 103, 347–355.
31. Heiko Thoemen, Mark Irle, M. S. (2010). *Wood-Based Panels An Introduction for Specialists*.
32. Herrera González, J. A. (2009). *Desarrollo de Sistemas Cementantes Ternarios para Producir Mampostería Vibro-Comprimida*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
33. Holman, J. P. (1999). *Transferencia de Calor*.
34. IVE. (2011). *Productos y Materiales- Propiedades de aislantes térmicos para rehabilitación energética*. Valencia.
35. John A. Youngquist. (1999). Wood-based Composites and Panel Products. In *Forest Products Laboratory. Wood Handbook-Wood as an engineering material* (pp. 1–32). Madison, WI.
36. Juárez Alvarado, C. A. (2002). *Concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (agave lechuguilla), como materiales para construcción en México*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
37. K.S. Al-Jabri, A.W. Hago, A.S. Al-Nuaimi, A. H. A.-S. (2005). Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. *Cement and Concrete Research*, 35, 1472–1479.  
<http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.018>
38. Lambda-MeBtechnik GmbH Dresden. (2008). *Système de mesure de conductivité thermique*.
39. Levy, D. B., & Levy, D. B. (2008). An Investigation of Meromixis in Cave Pools , Lechuguilla Cave , New Mexico. *International Journal of Speleology*, 37(July), 113–118.
40. Li, Z., Wang, X., & Wang, L. (2006). Properties of hemp fibre reinforced concrete composites, 37, 497–505.

<http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.032>

41. Madurwar, M. V, Ralegaonkar, R. V, & Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials : A review. *Construction and Building Materials*, 38, 872–878.
42. Mohammed, B. S., Abdullahi, M., & Hoong, C. K. (2014). Statistical models for concrete containing wood chipping as partial replacement to fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 55, 13–19.
43. NF EN ISO 12572:2001-10. (2009). Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. In *Norme Française- European Norme*, (pp. 1–33).
44. NMX-AA-164-SCFI-2013. (2013). EDIFICACIÓN SUSTENTABLE - CRITERIOS Y REQUERIMIENTOS AMBIENTALES MÍNIMOS. In *Normas Mexicanas* (pp. 1–158). Cd. de México,.
45. NMX-C-036-ONNCCE-2013. (2013). Industria de la construcción- Mampostería- Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines- Método de Ensayo. In *Normas Mexicanas- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C.* (pp. 1–10).
46. NMX-C-404-ONNCCE-2012. (2012). Industria de la construcción- Mampostería- Bloques, Tabiques o ladrillos y Tabicones para uso estructural- Especificaciones y Método de Ensayo. In *Normas Mexicanas* (pp. 1–17).
47. NMX-C-441-ONNCCE-2013. (2013). NMX-C-441-ONNCCE 2013. In *Catálogo de Normas Mexicanas* (pp. 1–9).
48. NMX-C-460-ONNCCE-2009. (2009). Industria de la Construcción- Aislamiento térmico-Valor R para las envolventes de vivienda por zona térmica para la República Mexicana-Especificaciones y verificación. In *Normas Mexicanas-Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C.* (pp. 1–46).
49. NOM-018-ENER-1997. (1997). Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba. In *Diario Oficial de la*

- Federación* (Vol. 120, pp. 5–8). Cd. de México,.
50. NOM-020-ENER-2011. (2011). Eficiencia Energética en edificaciones- Envolverte de Edificios para uso habitacional. In *Normas Oficiales Mexicanas* (pp. 1–43). Cd. de México,.
  51. Nozahic, V., & Amziane, S. (2012). Composites: Part A Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. *COMPOSITES PART A*, 43(11), 1837–1849. <http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.07.011>
  52. Portland Cement Association. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. ( y J. T. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, Ed.). PCA.
  53. Raut, S. P., Ralegaonkar, R. V, & Mandavgane, S. A. (2011). Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials*, 25, 4037–4042. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038>
  54. RILEM. (2013). *ROUND ROBIN TEST FOR HEMP SHIV CHARACTERISATION: COMMITTEE REPORT OF TC - 236 BIO-BASED BUILDING MATERIALS*.
  55. Rodríguez, G. (2008). *Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones*.
  56. Rosa M. Rodríguez, et al. (2004). *Meteorología y Climatología*. (F. E. para la C. y la Tecnología, Ed.) (Global Dis). Villena Artes Gráficas.
  57. Sandin, K., Nilsson, C., Brigitte, P., & Bruijn, D. (2009). Mechanical properties of lime – hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, 103, 474–479. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>
  58. Sellami, A., Merzoud, M., & Amziane, S. (2013). Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. *Construction and Building Materials*, 47, 1117–1124. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073>

59. SEMARNAT. (2010). *Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera*. (CONAFOR, Ed.) (2010th ed.). San Nicolás, Hidalgo.
60. Silva, F. D. A., Dias, R., Filho, T., Almeida, J. De, Filho, M., Moraes, E. De, & Fairbairn, R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber – cement composites. *Construction and Building Materials*, 24(5), 777–785. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>
61. Sousa, R. (2014). A new lightweight masonry block: Thermal and mechanical performance. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14, 160–169.
62. Taoukil, D., El, A., Sick, F., Mimet, A., Ezbakhe, H., & Ajzoul, T. (2013). Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood – concrete composite. *Construction and Building Materials*, 48, 104–115.
63. UNE-EN 197-1. (2013). Cemento. In *UNE Normas Europeas* (pp. 1–38).
64. Uysal, H., & Demirbog, R. (2004). The effects of different cement dosages , slumps , and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 845–848. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.018>
65. William D. Callister, Jr., D. G. R. (2010). *Materials Science and Engineering an Introduction*.