



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Materiales Poliméricos

**“ESTUDIO DE MATERIALES COMPUESTOS LIVIANOS TIPO
SÁNDWICH CON NÚCLEO DE CONCRETO ESPUMADO PARA
APLICACIONES ESTRUCTURALES”**

Tesis que presenta:

JOAQUÍN FRANCISCO CASTILLO LARA

En opción al título de

**MAESTRO EN CIENCIAS
(MATERIALES POLIMÉRICOS)**

Mérida, Yucatán, Diciembre de 2019

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS MATERIALES POLIMÉRICOS



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de JOAQUÍN FRANCISCO CASTILLO LARA titulado ESTUDIO DE MATERIALES COMPUESTOS LIVIANOS TIPO SÁNDWICH CON NÚCLEO DE CONCRETO ESPUMADO PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES fue realizado en la UNIDAD DE MATERIALES, LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS Y NANOMATERIALES, EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA Y LABORATORIO TALLER del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. Emmanuel Alejandro Flores Johnson, y la co-dirección del Dr. Alex Valadez González pertenecientes al Programa de Posgrado en Materiales Poliméricos de este Centro.

Esta tesis tiene orientación al desarrollo socioeconómico de la región ya que contribuye al desarrollo de nuevos materiales para el sector de la construcción.

Atentamente

Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 25 de noviembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada número 634363.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo a través del proyecto No. 6718 de la Convocatoria de Proyectos de Desarrollo Científico Para Atender Problemas Nacionales 2017.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. por darme la oportunidad de estudiar la maestría en materiales poliméricos y por permitirme el uso de las instalaciones y equipos.

Al director de tesis, el Dr. Emmanuel A. Flores Johnson por permitirme formar parte de su investigación, por el apoyo y enseñanzas.

Al co-director de tesis, el Dr. Alex Valadez González por las aportaciones y recomendaciones a este proyecto de investigación.

Al M.C. Francisco Koh y al equipo de trabajo por todo el apoyo brindado, porque gracias a ellos pude realizar todas las pruebas y todos los experimentos.

Al Dr. Gonzalo Carrillo Baeza y al Dr. Adrián Hernández Pérez por sus observaciones y comentarios para mejorar el trabajo.

Al Dr. Pedro Herrera Franco por sus consejos y aportes en el trabajo experimental.

Agradezco a mi familia por todo el apoyo que me han brindado siempre.

A mis compañeros del posgrado.

ÍNDICE

LISTADO DE TABLAS.....	vi
LISTADO DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS	3
OBJETIVOS	3
Objetivo General	3
Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES	5
1.1 Concreto espumado	5
1.1.1 Factores que afectan el comportamiento mecánico del concreto espumado.....	9
1.1.2 Fibras sintéticas como refuerzo en matriz de concreto.....	9
1.1.3 Fibras naturales como refuerzo en una matriz de concreto	11
1.1.3.1 Tratamiento superficial de las fibras naturales	14
1.2 Materiales compuestos tipo sándwich.....	15
1.3 Análisis por el método de los elementos finitos (FEM)	19
1.3.1 Análisis de FEM en Abaqus	20
1.3.2 Análisis en Abaqus/Standard	20
1.3.3 Análisis en Abaqus/Explicit	21
1.3.4 Comportamiento y modelado por FEM de materiales con estructura celular....	21
JUSTIFICACIÓN.....	24
CAPÍTULO 2 : MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1 Preparación y caracterización mecánica del concreto espumado	25
2.1.1 Materiales	25
2.1.2 Tratamiento superficial para las fibras de henequén	26
2.1.3 Diseño y preparación del concreto espumado	28
2.1.4 Caracterización mecánica a compresión.....	31
2.1.5 Caracterización mecánica a tensión.....	32
2.1.6 Preparación de las probetas para la prueba de Pullout.....	33

2.1.7 Prueba de Pullout	35
2.2 Caracterización microscópica del concreto espumado	36
2.2.1 Preparación de especímenes.....	36
2.2.2 Microscopía electrónica de barrido.....	36
2.3 Elaboración y caracterización mecánica a flexión de los compuestos tipo sándwich	37
2.3.1 Proceso de elaboración de los materiales compuestos tipo sándwich	39
2.3.2 Determinación de las propiedades mecánicas a flexión	40
2.3.3 Determinación de las propiedades mecánicas a tensión de la lámina Ternium TR-101	41
2.4 Simulación numérica usando FEM	42
CAPÍTULO 3 : RESULTADOS.....	45
3.1 Caracterización mecánica del concreto espumado	45
3.1.1 Prueba de compresión del concreto espumado reforzado con fibra de polipropileno	46
3.1.2 Prueba de compresión del concreto espumado reforzado con fibra de henequén	50
3.1.3 Prueba de tensión del concreto espumado reforzado con fibra de polipropileno	55
3.1.4 Prueba de tensión del concreto espumado reforzado con fibra de henequén ..	60
3.2 Caracterización microscópica y distribución de diámetros de celda en el concreto espumado	64
3.3 Prueba de Pullout	70
3.4.1 Prueba de Pullout de concreto espumado-fibra de henequén	70
3.4.2 Prueba de Pullout de concreto espumado-fibra de polipropileno.....	73
3.4 Caracterización mecánica a tensión de lámina de acero Ternium TR-101.....	75
3.5 Prueba de flexión a 4 puntos de los materiales compuestos tipo sándwich con núcleo de concreto espumado	77
3.6 Simulación numérica de la prueba de flexión a 4 puntos de los materiales compuestos tipo sándwich	82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS	90

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1. Aplicaciones del concreto espumado	8
Tabla 1.2 Propiedades de varios tipos de fibras.....	11
Tabla 1.3 Composición química de las fibras de henequén y sisal.....	13
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de fibras naturales	13
Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno [24].	26
Tabla 2.2. Mezclas diseñadas para la evaluación y análisis.....	28
Tabla 2.3. Diseño de los paneles tipo sándwich.....	38
Tabla 3.1. Cantidad de materiales para 23 litros de concreto espumado.	45
Tabla 3.2. Resultados de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno.	46
Tabla 3.3. Resultados de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén.....	51
Tabla 3.4. Resultados de las pruebas de tensión de las mezclas con refuerzo de polipropileno.	55
Tabla 3.5. Resultados de las pruebas de tensión de las mezclas con refuerzo de henequén.	60
Tabla 3.6 Diámetros promedios de las mezclas.....	67
Tabla 3.7. Resultados de las pruebas de Pullout de la fibra de henequén sin y con tratamiento.....	72
Tabla 3.8. Resultados de las pruebas de Pullout de la fibra de polipropileno.	74
Tabla 3.9. Resultados obtenidos de la prueba de tensión de la lámina de acero.	75
Tabla 3.10. Resultados de la prueba de flexión a 4 puntos de los paneles tipo sándwich.....	78

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Ejemplo de la estructura del concreto espumado, en donde los poros son las celdas y el espacio entre cada celda es el mortero de cemento [9].....	5
Figura 1.2 Fibra comercial de polipropileno Fibercon [24].	11
Figura 1.3. Ejemplo de fibras de henequén [28].	12
Figura 1.4. Esfuerzos a los que está sometido un panel sándwich cuando se le aplica una carga a flexión [40].	16
Figura 1.5. Pruebas a compresión de paneles con caras de acero y núcleo de concreto espumado y de paneles perfilados sin caras de acero (únicamente concreto espumado) [45].	18
Figura 1.6. Efecto de la incorporación de fibra de alcohol de polivinilo al núcleo del compuesto tipo sándwich: a) Compuesto con núcleo de concreto sin refuerzo, b) Compuesto con núcleo reforzado con fibras [4].	18
Figura 1.7. Comportamiento a compresión de materiales con estructura celular: a) Curva esfuerzo-deformación para materiales que tienen celdas con característica de endurecimiento por deformación, b) Curva esfuerzo-deformación para materiales que tienen tipo de celda con ablandamiento por deformación, c) Curva esfuerzo-deformación para materiales con comportamiento perfectamente plástico [50].	22
Figura 2.1. Proceso para cortar la fibra: a) Limpieza y amarre de la fibra para facilitar el corte, b) Cortado de fibra, c) Recolección de la fibra cortada.	26
Figura 2.2. Tratamiento alcalino: a) Proceso de remojar las fibras en la solución, b) Agitación de las fibras, c) Colocación de las fibras tratadas en las charolas, d) Secado en horno a 60°C.	27
Figura 2.3. Preparación del mortero.	29
Figura 2.4. Proceso de mezclado del mortero con la espuma.	30
Figura 2.5. Elaboración de especímenes para pruebas mecánicas.	31
Figura 2.6. Configuración de la prueba de compresión uniaxial.	32

Figura 2.7. Configuración para la prueba de tensión.....	32
Figura 2.8. Proceso para la elaboración de las probetas para la prueba de Pullout: a) Corte del molde de PVC, b) Marcas para definir el diámetro, c) Definición del centro del molde de PVC, d) Sellado de la muestra con una cinta de montaje.	34
Figura 2.9. Configuración de la prueba de Pullout.	36
Figura 2.10. Detalles geométricos del material compuesto tipo sándwich: a) Sección transversal; b) Vista inferior del material compuesto, la cual sirvió como guía para la colocación de los tornillos sujetadores.....	38
Figura 2.11. Proceso de elaboración de los materiales compuestos tipo sándwich: a) Colocación de los tornillos para delimitar el espesor del panel, b) Colocación de las láminas en el molde, c) Elaboración y vertido del concreto espumado.....	39
Figura 2.12. Ejemplo de la colocación de los paneles tipo sándwich en el marco de carga.	40
Figura 2.13. Configuración de la prueba de flexión.....	41
Figura 2.14. Dimensiones en mm de las muestras empleadas.....	42
Figura 2.15. Configuración de la prueba de tensión de la lámina de acero.	42
Figura 2.16. Malla del modelo del compuesto tipo sándwich en Abaqus.....	43
Figura 2.17. Ejemplo de la configuración del comportamiento “Crushable Foam” en el módulo “Property” del programa Abaqus.	44
Figura 3.1. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno: a) Mezcla de control (Sin refuerzo de fibra), b) CP1 (Refuerzo de 0.5%), c) CP2 (Refuerzo de 1%), d) CP3 (Refuerzo de 1.5%)......	48
Figura 3.2. Diferencias en el comportamiento a compresión entre el concreto espumado sin refuerzo y con refuerzo de fibra: a) Mezcla de control a una deformación del 15%, b) Mezcla CP2 a una deformación del 30%.	49
Figura 3.3. Comparación de la resistencia a la compresión de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno.....	50

Figura 3.4. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin tratamiento: a) Mezcla de control, b) CH1 (Refuerzo de 0.5%), c) CH2 (Refuerzo de 1%), d) CH3 (Refuerzo de 1.5%).	52
Figura 3.5. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén con tratamiento (Henequén trat.): a) Mezcla de control, b) CHQ1 (Refuerzo de 0.5%), c) CHQ2 (Refuerzo de 1%), d) CHQ3 (Refuerzo de 1.5%).	53
Figura 3.6. Comparación de la resistencia a la compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin y con tratamiento.	54
Figura 3.7. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de tensión de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno: a) Mezcla de control (Sin refuerzo de fibra), b) CP1 (Refuerzo de 0.5%), c) CP2 (Refuerzo de 1%), d) CP3 (Refuerzo de 1.5%).	57
Figura 3.8. Comportamiento a tensión del concreto espumado: a) Mezcla de control (sin fibra), b) Mezcla con fibra de polipropileno CP2.	58
Figura 3.9. Resistencia a la tensión de las diferentes mezclas con refuerzo de polipropileno.	59
Figura 3.10. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de tensión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin tratamiento: a) Mezcla de control, b) CH1 (Refuerzo de 0.5%), c) CH2 (Refuerzo de 1%), d) CH3 (Refuerzo de 1.5%).	61
Figura 3.11. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de tensión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén con tratamiento (Henequén trat.): a) Mezcla de control, b) CHQ1 (Refuerzo de 0.5%), c) CHQ2 (Refuerzo de 1%), d) CHQ3 (Refuerzo de 1.5%).	62
Figura 3.12. Comparación de la resistencia a la compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin y con tratamiento.	63
Figura 3.13. Micrografías de las mezclas realizadas tomadas con el SEM: a) Control, b) CP1, c) CP2, d) CP3.	65
Figura 3.14. Micrografías de las mezclas realizadas tomadas con el SEM: a) CH1, b) CH2, c) CH3, d) CHQ1, e) CHQ2, f) CHQ3.	66

Figura 3.15. Histogramas de la distribución de diámetros de las mezclas realizadas: a) Control, b) CP1, c) CP2, d) CP3.	68
Figura 3.16. Histogramas de la distribución de diámetros de las mezclas realizadas: a) CH1, b) CH2, c) CH3, d) CHQ1, e) CHQ2, f) CHQ3.....	69
Figura 3.17. Curvas fuerza-desplazamiento de las pruebas de Pullout de la fibra de henequén a diferentes longitudes embebidas (Le): a) Le=5 mm Fibra de henequén sin tratamiento, b) Le=5 mm Fibra de henequén con tratamiento, c) Le=8 mm Fibra de henequén sin tratamiento, d) Le=8 mm Fibra de henequén con tratamiento, e) Le=10 mm Fibra de henequén sin tratamiento, f) Le=10 mm Fibra de henequén con tratamiento.	71
Figura 3.18. Curvas fuerza-desplazamiento de las pruebas de Pullout de fibra de polipropileno a diferentes longitudes embebidas (Le): a) Le=5 mm, b) Le=8 mm, c) Le=10 mm	74
Figura 3.19. Curva esfuerzo real-deformación real de la lámina de acero.....	76
Figura 3.20. Curvas fuerza-desplazamiento de los paneles tipo sándwich: a) PC (Con núcleo de concreto espumado sin refuerzo), b) PP (Con núcleo de concreto espumado con refuerzo de polipropileno, c) PH (Con núcleo de concreto espumado con refuerzo de henequén con tratamiento).	80
Figura 3.21. Modos de falla de los paneles tipo sándwich durante la prueba de flexión a 4 puntos: a) Desprendimiento cara/núcleo, b) Falla por cortante del núcleo y desprendimiento cara/núcleo, c) Falla por cortante por debajo del cargador, d) Falla por tensión del núcleo en la mitad del panel, e) Arrugamiento de la cara superior y desprendimiento, f) Deslizamiento de la caras del panel.....	81
Figura 3.22. Comparación de la carga resistida por los paneles: a) Carga a la falla, b) Carga máxima.	82
Figura 3.23. Zonas donde se aplicó la unión parcial con Tie Constraint: a) Caso 2, b) Caso 3.	83
Figura 3.24. Comportamiento a compresión del núcleo de los diferentes paneles: a) Comportamiento del núcleo del panel PC (sin fibras), b) Comportamiento a compresión del núcleo del panel PP (con refuerzo del 1% de polipropileno, c) Comportamiento a	

compresión del núcleo del panel PH (con refuerzo del 1% de henequén con tratamiento).
..... 84

Figura 3.25. Comparación de la simulación numérica con las pruebas experimentales: a) Paneles PC, b) Paneles PP, c) Paneles PH..... 85

Figura 3.26. Resultado de la prueba de flexión a 4 puntos del caso 3 (contorno de esfuerzos de von Mises): a) Modelo analizado, b) Resultados con la opción mirror. 86

RESUMEN

La mayoría de los materiales para infraestructura en México son de elementos que tienen una alta densidad, los cuales no son ideales en zonas donde existen desastres naturales, ya que, al colapsarse, pueden ocasionar daños y lesiones. Las estructuras tipo sándwich han sido ampliamente utilizadas para sustituir algunos de estos materiales tradicionales porque pueden cumplir con los requisitos de rigidez y resistencia con el mínimo de peso. Debido a esto, es de gran importancia estudiar este tipo de materiales para su empleo en la construcción. El concreto espumado es un material que se puede emplear como núcleo de materiales compuestos tipo sándwich, ya que es un material ligero y con un excelente rendimiento en cuanto a aislamiento térmico, aislamiento acústico, resistencia al fuego y, dependiendo la aplicación, se puede variar la densidad entre 400-1600 kg/m³. La inclusión de fibras al concreto puede ayudar a mejorar significativamente la resistencia a la compresión, la ductilidad, la resistencia a flexión y dureza del material.

En este trabajo se estudió el desempeño a compresión y a tensión del concreto espumado con una densidad de 700 kg/m³ y se analizó el refuerzo con fibras de henequén (*Agave fourcroydes*) con tratamiento alcalino y con fibras de polipropileno. El refuerzo con estos tipos de fibra cambia el modo de falla del concreto espumado, permitiendo que el material resista un porcentaje de la carga máxima a deformaciones crecientes. Para estudiar los materiales compuestos tipo sándwich con caras de lámina de acero, se seleccionaron las mezclas con fibras que tuvieron un mejor desempeño y se analizaron como núcleo de estos materiales sometiéndolos a una prueba de flexión a 4 puntos. El refuerzo con fibras al núcleo mejoró la carga máxima resistida por los compuestos. Se realizaron simulaciones usando el método de los elementos finitos para investigar la influencia de la unión cara/núcleo en la respuesta a flexión a 4 puntos de los compuestos tipo sándwich. Se encontró que la unión cara/núcleo tiene un papel muy importante en el rendimiento estructural de los materiales compuestos tipo sándwich.

ABSTRACT

Most of the materials used in construction in Mexico have a high density and are not adequate for areas where there are natural disasters, because, when they collapse, they can cause damage and injuries. Sandwich structures have been widely used to replace some of the traditional materials used in construction because they can meet the requirements of stiffness and strength with minimum weight. Because of this, it is of great importance to study these types of materials for their use in construction. Foamed concrete is a material that can be used as a core of sandwich composite panels, because it is a lightweight material with excellent thermal insulation, acoustic insulation and fire resistance and its density can be varied in the range of 400-1600 kg/m³. The inclusion of fibers in the foam concrete mix can significantly improve the compressive strength, ductility, flexural strength and hardness of the material.

In this investigation, the compression and tensile performance of foamed concrete with a density of 700 kg/m³ was studied. The reinforcement of the foam concrete using henequen fibers (*Agave fourcroydes*) with alkaline treatment and polypropylene fibers was studied. The fibers change the mode of failure of the foamed concrete, allowing the material to withstand a percentage of the maximum load at increasing strains. The mixtures of each type of fiber that exhibited the best performance were selected as the core of sandwich panels with steel sheet faces for 4-point bending testing. The fiber reinforcement increased the maximum loading capacity of the composites. Finite element simulations were performed to investigate the influence of the face/core bonding on the 4-point flexural response of sandwich panels. It was found that the face/core bonding has a very important role in the structural performance of the sandwich composites.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de los materiales para infraestructura en México son de tipo concreto reforzado con varillas de acero o de tipo mampostería derivados de materiales locales, como ladrillos y bloques de concreto. Estos materiales son pesados y no son ideales en zonas donde existen desastres naturales, ya que, al colapsarse, pueden ocasionar daños, lesiones y pérdidas de vidas. Las estructuras tipo sándwich han sido ampliamente utilizadas en la industria aeroespacial, marina, automotriz, y en menor grado en la industria de la construcción, ya que estas pueden cumplir con los requisitos de rigidez y resistencia con el mínimo de peso [1]. Debido a esto, es de gran importancia analizar su desempeño estructural para su uso en la industria de la construcción debido al gran potencial que estas estructuras tienen, al ser livianas y con buenas propiedades mecánicas.

Los materiales compuestos tipo sándwich están conformados por láminas frontales rígidas y resistentes que soportan las cargas de flexión y por un núcleo de baja densidad que separa las láminas y asegura la acción compuesta del material. El material con el cual está conformado el núcleo influye en la rigidez a la flexión de la sección compuesta proporcionando el espesor deseado al miembro de flexión y transfiriendo las cargas de corte entre las caras [1, 2]. Los materiales comúnmente empleados para las caras frontales son los metales o los materiales compuestos laminados, mientras que, para el núcleo, pueden ser estructuras tipo panal de materiales metálicos o no metálicos, espumas celulares o madera [3]. El concreto espumado es un material que se puede emplear como el núcleo de materiales compuestos tipo sándwich, ya que es un material ligero y con un excelente rendimiento en cuanto a aislamiento térmico, aislamiento acústico, resistencia al fuego y cuenta con un buen desempeño en la absorción de impactos [4]. El concreto espumado o concreto celular está conformado por una matriz de cemento con una estructura de poros homogénea creada mediante la introducción de aire en forma de pequeñas burbujas [5] (con un mínimo de 20% en volumen de aire), lo cual se realiza por medio de un generador de espuma. La espuma es agregada a la mezcla líquida de mortero. La inclusión de fibras naturales o poliméricas a la matriz del cemento en general ayuda a mejorar significativamente la resistencia a la compresión, la ductilidad, la resistencia a flexión y

dureza del material [6]. La principal ventaja del refuerzo de fibra se puede apreciar en el comportamiento del material después de que ha comenzado el agrietamiento, ya que las fibras unen las grietas de la matriz y transfieren las cargas [7].

Un entendimiento profundo del uso de materiales tipo sándwich con núcleo de concreto espumado fibroreforzado aún no se ha alcanzado, por lo que en este trabajo de investigación se pretende avanzar en esta área de conocimiento a partir del estudio del núcleo de concreto espumado reforzado con una fracción volumétrica con relación al volumen total de concreto de 0.5%, 1% y 1.5% de fibra de henequén (*Agave fourcroydes*) sin tratamiento, de fibra de henequén con tratamiento químico y de una fibra termoplástica comercial (Polipropileno). Subsecuentemente, se utilizaron las mezclas de cada tipo de fibra que mostraron un mejor desempeño mecánico, como núcleo de un material compuesto tipo sándwich conformado con caras de láminas de acero para evaluar su desempeño en flexión. El desarrollo del proyecto se realizó principalmente por medio de pruebas experimentales del concreto espumado y del compuesto tipo sándwich, con una componente de simulación computacional usando el método de elementos finitos para evaluar la influencia de la unión cara/núcleo en la respuesta a flexión a 4 puntos de los compuestos tipo sándwich.

HIPÓTESIS

La inclusión de fibras de henequén o de polipropileno en una matriz de concreto espumado puede ayudar a mejorar el desempeño mecánico del concreto espumado, y de esta forma usarse como núcleo para la elaboración de materiales compuestos tipo sándwich mecánicamente mejorados, con una mayor capacidad máxima de carga y resistencia a la flexión, optimizando la transferencia de esfuerzos en la estructura del compuesto y evitando o retardando la creación de grietas durante la vida útil del material. Estos materiales de alto desempeño podrían ser implementados en aplicaciones estructurales en la industria de la construcción, como muros o elementos de soporte sustituyendo a elementos más pesados.

OBJETIVOS

Objetivo General

Estudiar el desempeño mecánico del concreto espumado reforzado con fibras de henequén y con fibras de polipropileno para su posterior empleo como núcleo en un material compuesto tipo sándwich con caras de láminas de acero, el cual será analizado como elemento estructural.

Objetivos específicos

- Caracterización mecánica a compresión y a tensión del núcleo de concreto espumado con refuerzo de 0.5, 1 y 1.5% en volumen de fibra de henequén sin tratamiento y con tratamiento químico alcalino.
- Caracterización mecánica a compresión y a tensión del núcleo de concreto espumado con refuerzo de 0.5, 1 y 1.5% en volumen de fibra de polipropileno.

- Desarrollo de una metodología para la elaboración de los materiales compuestos tipo sándwich con el núcleo de concreto espumado sin fibras o con el núcleo reforzado con los volúmenes de fibra de polipropileno y de fibra de henequén tratada que mostraron un mejor desempeño mecánico.
- Determinación de las propiedades mecánicas a flexión de los materiales compuestos tipo sándwich.
- Modelar y analizar en un software de método de elementos finitos el comportamiento mecánico del material compuesto tipo sándwich mediante la simulación de las pruebas mecánicas de flexión a partir de los datos obtenidos experimentalmente, para determinar la influencia de la unión cara/núcleo en la respuesta mecánica de la estructura.

CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES

1.1 Concreto espumado

El concreto espumado, también conocido como concreto celular, es un material cementicio en el que los vacíos de aire quedan atrapados en el mortero por medio del empleo de un agente espumante (Figura 1.1). Con la correcta dosificación de la espuma, la densidad del concreto puede variar entre 400 kg/m^3 y 1600 kg/m^3 ; este material es clasificado como concreto liviano. El concreto espumado fue patentado en 1923, pero no fue hasta 1954 cuando se empezaron a realizar los primeros análisis sobre su comportamiento y rendimiento [8]. En la actualidad, se sabe que es un material que puede ser empleado en aplicaciones estructurales, de aislamiento y de relleno.

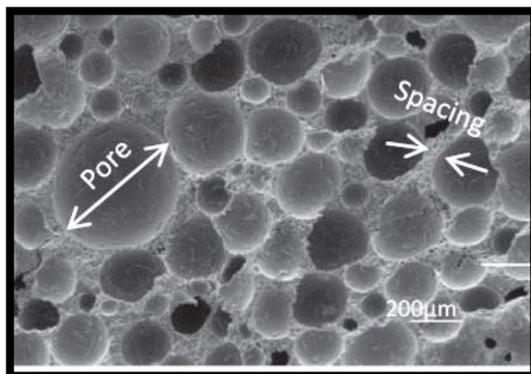


Figura 1.1 Ejemplo de la estructura del concreto espumado, en donde los poros son las celdas y el espacio entre cada celda es el mortero de cemento [9].

Según la literatura [10], el concreto espumado es una clasificación del concreto aireado, y este se puede clasificar de la siguiente forma:

a. Según el método de formación de poros:

Método de incorporación de aire (Concreto gas): Este se elabora a partir de productos químicos que forman gas cuando se mezclan con la cal o el mortero de cemento durante la etapa líquida o plástica. Esto conlleva a que aumente el volumen del concreto y cuando el gas se escapa deja una estructura porosa. Los productos químicos pueden ser el polvo de aluminio, peróxido de hidrógeno o carburo de calcio.

Método de espumado (Concreto espumado): Este es el proceso de formación de poros más económico y controlable debido a que no hay reacciones químicas en la formación de la espuma. La introducción de los poros se logra a través de medios mecánicos ya sea mediante el pre-espumado o el método de mezclado de espuma (agente espumante mezclado directamente con el mortero). El proceso de formación del concreto espumado se presenta en la Sección 2.1 y es el método empleado para esta investigación.

b. Basado en el tipo de aglutinante:

Este se clasifica según el tipo de aglutinante utilizado ya sea cemento o cal. También se han hecho intentos para utilizar materiales puzolánicos como cenizas de combustible pulverizadas o residuos de pizarra como reemplazo parcial del aglutinante o arena.

c. Método de curado:

Este se puede curar en autoclave o no. La resistencia a la compresión, la contracción por secado y las propiedades de absorción, dependen directamente del método y la duración del curado. El aumento de la resistencia es más lento para los productos curados en húmedo y dependiendo de los materiales empleados en la fabricación del concreto y de la forma de preparación, existen métodos de curados en húmedo más eficientes. Las variables de importancia para el curado en autoclave son la edad y el estado de la mezcla al inicio del ciclo de curado y las tasas de cambio de temperatura y presión.

En general, el concreto espumado es elaborado a partir de cemento Portland, agua, agregado fino y espuma. La producción de una mezcla estable de concreto espumado

depende de varios factores, como el método de preparación y adición de espuma para la distribución uniforme de las celdas de aire, el grosor y calidad del agregado fino, los diferentes tipos de agentes espumantes empleados, los cuales pueden estar elaborados a partir de jabones de resina, detergente, resinas adhesivas, saponinas, y proteínas hidrolizadas como la queratina [10].

El concreto espumado se puede clasificar, según su forma de preparación, en el método de pre-espumado o en el método de mezclado de espuma (mixed foaming method). El método de pre-espumado consiste en la elaboración por separado de la mezcla líquida de concreto (mortero) y de la espuma estable preformada para su posterior mezcla; en este proceso de mezcla, el mortero de cemento se acumula alrededor de las burbujas de espuma y, cuando la espuma se comienza a degenerar, el mortero ya tiene la fuerza suficiente para mantener su forma alrededor de las celdas. El método de mezclado de espuma consiste en la combinación directa del agente espumante y todos los elementos para la formación del concreto; durante el proceso y el mezclado se va formando la estructura celular del concreto. Es importante destacar que, para la preparación del concreto espumado, se recomienda utilizar la técnica de la pre-espuma, puesto que se requieren menores cantidades de agente espumante, se tiene una mejor relación entre la cantidad de agente espumante utilizado y el contenido de aire en la mezcla, y se puede obtener tamaños de celda más pequeños [8].

El concreto espumado tiene muchas aplicaciones, es un material muy versátil porque se adapta a una gran variedad de formas, sistemas estructurales y diseños, lo cual es atribuido principalmente a su característica de autocompactación. El concreto espumado es muy utilizado en varios países como India, China e Indonesia para fabricar bloques ligeros [11]. De igual forma, es muy utilizado en regiones que sufren escasez de viviendas o están sujetas a condiciones climáticas adversas, huracanes y sismos. Las propiedades superiores de aislamiento térmico y la naturaleza liviana lo convirtieron en un material adecuado para reducir el efecto adverso de los terremotos y para ayudar a disminuir el efecto negativo de los cambios de temperatura en países de Asia del Sur [12].

Otra aplicación es su utilización como base de carreteras en zonas de terreno blando para hacer que estas sean menos pesadas. De igual forma, el concreto espumado se ha

empleado como sistema de aislamiento para techos de viviendas [11]. En la Tabla 1.1 se presentan las aplicaciones más comunes del concreto espumado según el rango de densidades. La tabla se tomó de la investigación de Othuman Mydin [13].

Tabla 1.1. Aplicaciones del concreto espumado

Densidad (kg/m³)	Aplicaciones
300-600	Aislamiento contra el calor y sonido en techos y pisos. Relleno de espacios intermedios entre filas de ladrillos en paredes subterráneas. Aislamiento en bloques huecos.
600-900	Producción de bloques y paneles prefabricados para muros divisorios. Losas para techos falsos. Aislamiento térmico y capas de aislamiento acústico en edificios residenciales de varios niveles.
900-1200	Bloques y paneles de concreto para cubiertas exteriores de edificios. Ornamentación arquitectónica. Sistema de losas de concreto.
1200-1600	Paneles prefabricados de cualquier dimensión para uso comercial e industrial, adornos de jardín, concreto estructural.

En México, el concreto espumado se ha utilizado principalmente en trabajos como [14]:

- Relleno de tuberías.
- Aislante térmico de tuberías o en muros de protección para sistemas de refrigeración.
- Relleno de losas y cubiertas.
- Rellenos de cavidades y grietas.
- En forma de bloques y losas para construir viviendas.

1.1.1 Factores que afectan el comportamiento mecánico del concreto espumado

En la investigación de Ramamurthy et al. [8], se reportan los diferentes factores que afectan el comportamiento mecánico de las espumas de concreto. En particular, se reporta como se afecta la resistencia a la compresión, a la flexión, durabilidad, módulo de elasticidad, efectos de contracción, etc. Entre los factores mencionados anteriormente, se encuentra la densidad, que al disminuir tiene un efecto exponencial decreciente en la resistencia a la compresión. También existen otros parámetros que pueden afectar la resistencia como las relaciones arena-cemento y agua-cemento, el régimen de curado, el tipo y distribución del tamaño de partícula de la arena y el tipo de agente espumante utilizado.

Para el concreto espumado con densidades entre 500 y 1000 kg/m³, la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el diámetro de la celda de aire. Los diámetros de las celdas se hacen más pequeños a medida que aumenta la densidad, y debido a esto, la cantidad de espuma agregada a la mezcla controla la resistencia a la compresión. Para densidades mayores a 1000 kg/m³, es la composición y las proporciones del mortero lo que determina la resistencia a la compresión, debido a que, al haber menos cantidad de espuma, las celdas de aire se encuentran más separadas como para influir en la resistencia a la compresión [15].

1.1.2 Fibras sintéticas como refuerzo en matriz de concreto

El concreto es un material débil a la tensión, que frecuentemente se agrieta en el estado plástico y durante la contracción por secado. Se sabe que la resistencia a la tensión del concreto es mucho más baja que su resistencia a la compresión, por lo tanto, la propagación de las grietas puede desarrollarse más rápidamente [16]. Para contrarrestar las grietas debido a los factores mencionados previamente y ante la acción de cargas, se ha utilizado la estrategia de mezclar el concreto con fibras distribuidas aleatoriamente. En el estado fresco, las fibras refuerzan contra la formación de grietas plásticas ocasionadas por la contracción. En el concreto endurecido, las fibras evitan que las microgrietas se conviertan en macrogrietas, además, las fibras pueden mantener juntas las macrogrietas existentes,

reforzando así al concreto contra la desintegración [17]. Actualmente, los tipos de fibras más comunes para reforzar el concreto en construcciones son las fibras de polipropileno y de metal. De igual forma, estas fibras han sido ampliamente utilizadas en la literatura [18, 19], y en general, su uso puede mejorar el rendimiento a compresión, flexión, tensión e impacto [17, 20], sin embargo, el uso de fibras puede repercutir en disminuir la trabajabilidad del concreto con lo cual se hace necesario incrementar la cantidad de agua en la mezcla [21].

Para el concreto espumado, la inclusión de fibras con orientación aleatoria mejora la transferencia de cargas, la ductilidad, la resistencia a la compresión, la dureza y la resistencia a la flexión. En varios estudios se han analizado las ventajas de agregar fibras sintéticas con cierta fracción de volumen a la matriz del concreto espumado [4, 22, 23]. En la investigación de Arisoy y Wu [23] se reporta que la ductilidad y la resistencia máxima a flexión es mucho mejor para concretos reforzados con fibra. Ellos además hacen la predicción teórica de que las propiedades mecánicas pueden mejorar al agregarle un porcentaje de fibra de 0.75% en volumen con relación al concreto. En otro estudio se muestra que la inclusión de fibras de alcohol de polivinilo de 8 mm de largo con una fracción de 3.3% de volumen al concreto espumado con una densidad de 1000 kg/m^3 , ocasiona un aumento en la resistencia a la compresión del 84.7% y un aumento del 558% en la resistencia a tensión cambiando el modo de falla frágil del concreto sin refuerzo [4]. Las fibras de metal también se han usado como refuerzo del concreto espumado, sin embargo, en la investigación de Mugahed et al. [12] recomiendan no emplearlas debido a su gran densidad.

Se ha reportado que el uso de fibras de polipropileno como refuerzo ayuda a mejorar el desempeño del concreto espumado a flexión y a compresión aumentando la resistencia e incrementando los valores del módulo elástico de 2 a 4 veces [8]. Este comportamiento se puede ver con más detalle en la investigación de Jones y McCarty [6], en donde reportan que al agregar una fracción de volumen de 0.5% de fibras de polipropileno al concreto espumado, la resistencia a la compresión aumenta en un 52%, y la resistencia a la flexión en un 56% en comparación con el concreto sin refuerzo. Entre las ventajas de utilizar las fibras de polipropileno (Figura 1.2) destacan que es un producto comercial, fácil de

conseguir en la península de Yucatán y cuenta con buenas propiedades mecánicas cuando se le compara con otros tipos de fibras (ver Tabla 1.2).



Figura 1.2 Fibra comercial de polipropileno Fibercon [24].

Tabla 1.2 Propiedades de varios tipos de fibras.

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Deformación a la rotura (%)	Referencia
Polipropileno	0.91	550-700	3.5-6.8	21	[21]
Metal	7.86	400-1200	200	3-5	[21]
Nylon	1.14	890	5.17	-	[17]
Asbesto	2.55	210-2000	159	2-3	[21]
Poliéster	1.4	400-600	8.4-16	3-11	[21]

1.1.3 Fibras naturales como refuerzo en una matriz de concreto

El interés en los materiales compuestos reforzados con fibras naturales está creciendo rápidamente debido al alto rendimiento en las propiedades mecánicas, ventajas de procesamiento, baja densidad y bajo costo [25]. Además, las fibras naturales son

biodegradables, renovables y promueven la sustentabilidad. El refuerzo con fibras naturales en elementos de concreto se empezó a desarrollar en la década de 1940, cuando se empezaron a evaluar otros refuerzos como sustitutos para el asbesto.

Las fibras naturales tienen el potencial de reemplazar a las sintéticas en determinadas aplicaciones. Las fibras de henequén son unas de las más utilizadas en México en el ámbito comercial (Figura 1.3). Estas se producen principalmente en Yucatán y son empleadas en hilos, cuerdas, cordeles, artículos hechos a mano, y durante las últimas 3 décadas, se ha implementado su uso y la de otras fibras naturales como las de sisal o de coco en materiales compuestos [26]. Sin embargo, su uso en una matriz de concreto espumado aún se encuentra limitado. Es importante mencionar que en la literatura se ha empleado más el uso de la fibra de sisal (*Agave sisalana*), esto es debido a que se produce en varias partes del mundo como en Brasil, África del Este, Haití, India e Indonesia [27], lo cual hace que sea una fibra más fácil de conseguir. La fibra de sisal es muy parecida a la fibra de henequén tanto en composición química (Tabla 1.3) como en propiedades mecánicas (Tabla 1.4). Las fibras de sisal y de henequén se obtienen de las hojas de dos especies diferentes muy relacionadas entre sí, las cuales pertenecen al género *Agave*. Debido a la semejanza entre las fibras de sisal y de henequén, se analizaron algunas investigaciones desarrolladas con fibras de sisal como refuerzo.



Figura 1.3. Ejemplo de fibras de henequén [28].

Tabla 1.3 Composición química de las fibras de henequén y sisal.

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Otros componentes como agua, proteínas, componentes inorgánicos, etc.	Referencia
Henequén	60	28	8	4	[29]
Sisal	60.5	25.7	12.1	1.7	[30]

La estructura y las propiedades de las fibras de sisal han sido analizadas por varios investigadores, en donde, con base en la investigación de Toledo et al. [25] concluyen que un buen porcentaje de fibras adicionadas a una matriz polimérica varía de entre 3-8% en volumen, con lo cual se puede mejorar eficientemente las propiedades mecánicas del material compuesto. En una matriz de concreto, las fibras largas de sisal son más efectivas en aumentar la resistencia a la tensión y a la flexión y cuentan con una mejor absorción de energía en comparación con fibras cortas [31]. Sin embargo, es más fácil elaborar compuestos a base de fibra corta distribuida aleatoriamente. En la Tabla 1.4 se muestran las propiedades mecánicas de las fibras de henequén y de algunas fibras naturales.

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de fibras naturales

Fibra	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Deformación a la rotura (%)	Referencia
Henequén	1.4	430-570	10-16	3.7-5.9	[32]
Sisal	1.4	450-700	7-13	4-9	[33]
Yute	1.46	400-600	10.3	1.8	[34]
Bagazo de caña de azúcar	1.2	20-290	19.7-27.1	1.1	[34]

1.1.3.1 Tratamiento superficial de las fibras naturales

A pesar de que las fibras de henequén presentan varias ventajas en cuanto a sus propiedades mecánicas, su uso en una matriz de concreto se ve limitado debido a la baja durabilidad de la fibra en el concreto. Esto es debido a la baja resistencia a la corrosión de la lignina y de la hemicelulosa que se encuentra presente en las lamelas y en las moléculas de celulosa en ambientes altamente alcalinos. Otro mecanismo adicional es la hidrólisis alcalina de las moléculas de celulosa, lo que ocasiona la degradación de las cadenas moleculares produciendo una reducción en el grado de polimerización; estos factores ocasionan que las fibras pierdan su capacidad de refuerzo durante la vida útil del concreto [35].

Una forma de aumentar la durabilidad y evitar que haya una reducción en las propiedades mecánicas de las fibras naturales, es modificar la superficie con tratamientos químicos o físicos para aumentar su estabilidad en una matriz de cemento. En la investigación de Claramunt et al. [36], ellos aplican un proceso a fibras vegetales llamado hornificación, el cual consiste en 4 ciclos de secado a 60°C y humedecimiento, este proceso mejora la durabilidad de las fibras, pero no previene la pérdida parcial de propiedades mecánicas. Wei y Meyer [37], con base en la literatura, mencionan varios procesos químicos y térmicos aplicados a las fibras de sisal. Ellos mencionan las mejoras y el resultado de estos procesos en las fibras. Además, en su investigación, ellos llevan a cabo un tratamiento térmico que consiste en calentar las fibras en un horno ventilado a 150°C durante 8 horas. Este proceso aumenta el porcentaje de cristalinidad de la celulosa, lo cual conlleva a mejoras en las propiedades mecánicas, a mejorar la durabilidad, y reducir la pérdida de propiedades mecánicas de las fibras en la matriz de concreto.

Otro factor importante es la adherencia interfacial entre la fibra y la matriz, la cual afecta las propiedades mecánicas del material compuesto. Los materiales compuestos de concreto reforzados con fibra natural fallan por la fractura y, principalmente, por el deslizamiento o extracción de la fibra [37, 38]. En la investigación de Valadez et al. [32], ellos prueban un tratamiento superficial alcalino para la fibra de henequén a base de hidróxido de sodio. Este tratamiento remueve parcialmente la hemicelulosa, la cera y la lignina presente en la superficie de la fibra y ocasiona algunos cambios en su morfología. El tratamiento alcalino

produce una fibra con una superficie más rugosa, lo cual, en una matriz de concreto espumado, puede ayudar a mejorar la resistencia interfacial entre la fibra y la matriz debido a que produce una mejor adherencia mecánica.

1.2 Materiales compuestos tipo sándwich

Los materiales compuestos o paneles tipo sándwich normalmente consisten en dos caras delgadas de un material con una alta resistencia y un núcleo más grueso, débil y liviano. El desempeño estructural de los compuestos tipo sándwich depende del trabajo en conjunto de los elementos con los cuales está conformado, la dimensión geométrica y la adhesión entre las caras. El espesor del núcleo contribuye a la rigidez, a la resistencia a la flexión y a la forma en la que se transfieren las cargas de corte entre las caras [31]. Para las estructuras tipo sándwich, la prueba de flexión a 4 puntos es muy importante porque a partir de ésta se puede investigar la influencia o características del tipo de fabricación y el rendimiento estructural del panel. Esta prueba también es común para analizar la calidad de fabricación, la calidad en la adhesión entre las caras o el uso correcto de sujetadores, los cuales pueden ser pernos o tornillos que conectan las dos caras del panel sándwich para que éstas se mantengan unidas al núcleo y provean una mejor adherencia. Cuando un panel sándwich se somete a flexión, la capa superior se carga en compresión, mientras que la capa inferior soporta cargas de tensión. El núcleo asegura la transferencia de esfuerzos entre las capas externas [31, 39]. Por lo tanto, es importante que el núcleo tenga una buena rigidez y resistencia a cortante, lo cual se determina a partir del tipo de material y el grosor. En la Figura 1.4 se presenta un ejemplo del efecto de aplicar una carga de flexión a un compuesto tipo sándwich.

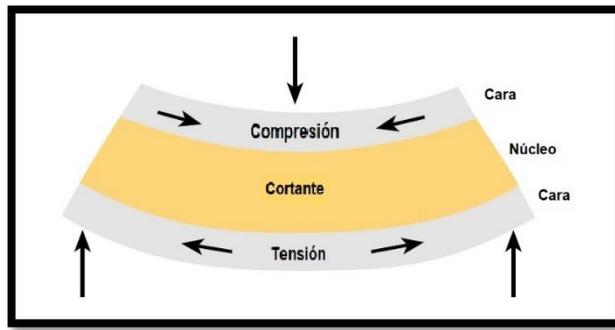


Figura 1.4. Esfuerzos a los que está sometido un panel sándwich cuando se le aplica una carga a flexión [40].

Actualmente, los paneles tipo sándwich son usados comúnmente en estructuras navales, aeroespaciales y cada vez son más usados en la industria de la construcción debido a las características mecánicas que presentan. En general, los paneles tipo sándwich ofrecen una buena relación resistencia-peso, eficiencia en fabricación, alta tolerancia al daño y resistencia al impacto [2] por lo que estas estructuras son preferidas sobre materiales convencionales en cada vez más aplicaciones. Los materiales comúnmente empleados para las caras frontales son los metales o los laminados compuestos, mientras que, para el núcleo, pueden ser estructuras tipo panel de materiales metálicos o no metálicos, espumas celulares o madera [3]. El núcleo de tipo panel es uno de los más populares y empleados en paneles sándwich, los cuales se han utilizado incluso como pisos para puentes [41]. Este tipo de núcleo en forma de panel consiste en corrugaciones de onda sinusoidal y componentes rectos intercalados entre las caras [42]. Otro núcleo muy utilizado son las espumas celulares, un ejemplo se puede encontrar en la investigación de Tuwair et al. [42], en donde investigan un material compuesto tipo sándwich con caras elaboradas con tejido de fibra de vidrio y núcleo de espuma de poliuretano de celda cerrada. Los resultados de su investigación experimental y numérica demostraron la viabilidad ingenieril y económica del diseño propuesto.

En general, se pueden lograr muchas formas alternativas de paneles tipo sándwich combinando diferentes materiales tanto para el núcleo como para las caras, los cuales se pueden diseñar con geometrías variantes, y como resultado se pueden obtener diseños

óptimos para aplicaciones específicas [43]. Frazao y colaboradores [31] desarrollaron un tipo de compuesto sándwich elaborado con núcleo de concreto ligero reforzado con fibras de polipropileno, y como caras exteriores, concreto reforzado con fibras de sisal; en donde evaluaron el uso de fibras cortas y fibras largas como refuerzo de las caras exteriores. Ellos llegaron a la conclusión de que las fibras largas son más efectivas en términos de proporcionar al panel una mayor capacidad de flexión que cuando se usan fibras cortas, sin embargo, es más eficiente la preparación de los compuestos a base de fibra corta de sisal. Richard y Sohail [44], recomiendan utilizar conectores entre las dos caras del compuesto tipo sándwich para mejorar la transferencias de esfuerzos cortantes y mejorar la acción compuesta de los materiales. De igual forma, desarrollaron un compuesto tipo sándwich denominado Acero-Concreto-Acero. Ellos propusieron el uso de un nuevo tipo de conector entre las caras denominado ganchos en J, y entre sus resultados destacan que el sistema puede resistir fuerzas de impacto y que los conectores son efectivos para mantener la integridad estructural de los componentes del panel sándwich a pesar de la presencia de grietas severas en el núcleo de concreto y la deformación permanente del compuesto.

El concreto espumado es un material que se puede emplear como núcleo de materiales compuestos tipo sándwich debido a la baja densidad con la que se puede fabricar y en general, cuenta con buenas características para ser utilizado en conjunto con láminas de acero para formar el compuesto. Othuman y Wang [45] investigaron el desempeño a compresión de compuestos sándwich con núcleo de concreto espumado con densidad de 700 kg/m^3 y láminas de acero. Una de las principales razones por las cuales decidieron investigar este material compuesto fue porque normalmente el concreto falla de una forma frágil, por lo que una buena forma de utilizarlo en una construcción donde resista mayores cargas, es en conjunto con el acero. A partir de esto, ellos llegaron a la conclusión que el uso en conjunto de estos materiales permite que el panel resista una alta proporción de su carga máxima a deformaciones crecientes. Además, analizaron que este material puede ser utilizado en construcciones pequeñas. En la Figura 1.5 se puede ver la diferencia en el comportamiento a compresión al agregar las caras de acero.

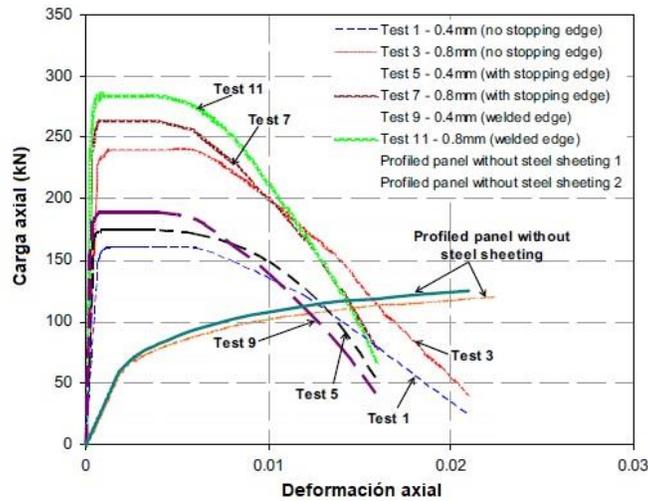


Figura 1.5. Pruebas a compresión de paneles con caras de acero y núcleo de concreto espumado y de paneles perfilados sin caras de acero (únicamente concreto espumado) [45].

En la investigación de Flores-Johnson y Li [4], ellos desarrollaron dos tipos de paneles sándwich con caras de láminas de acero y núcleo de concreto espumado, uno sin refuerzo de fibra y otro reforzado con fibras de alcohol de polivinilo, en donde reportaron que el refuerzo con fibra mejora la respuesta estructural de los paneles aumentando la capacidad máxima de carga en casi el doble antes de la falla del compuesto. Esto se puede ver a más detalle en la Figura 1.6.

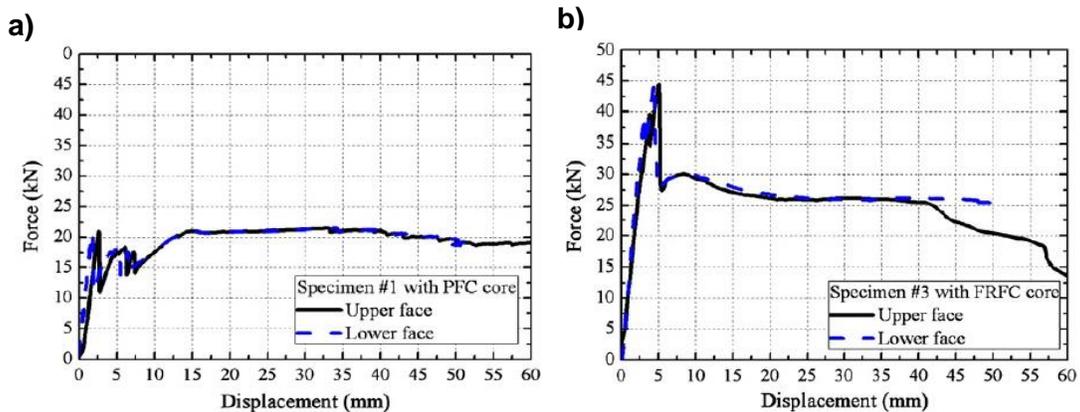


Figura 1.6. Efecto de la incorporación de fibra de alcohol de polivinilo al núcleo del compuesto tipo sándwich: a) Compuesto con núcleo de concreto sin refuerzo, b) Compuesto con núcleo reforzado con fibras [4].

1.3 Análisis por el método de los elementos finitos (FEM)

El método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) es un método numérico para resolver problemas de ingeniería y física tales como análisis estructurales, transferencia de calor, flujo de fluidos, potencial electromagnético, etc. Es un procedimiento matemático utilizado para calcular soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales. El objetivo de este procedimiento es transformar las ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones lineales [46, 47]. En la actualidad existen muchos programas comerciales con capacidad de análisis usando el método de los elementos finitos para diferentes disciplinas de ingeniería. Estos programas ayudan a resolver una variedad de problemas que van desde el análisis estático lineal hasta el análisis transitorio no lineal. Abaqus y ANSYS son ejemplos de códigos computacionales que emplean el análisis FEM, los cuales tienen capacidades especiales para analizar materiales compuestos y aceptan ecuaciones constitutivas y formulaciones de elementos personalizadas y programadas por el usuario.

El análisis por medio FEM se organiza comúnmente en tres bloques [48]:

Preprocesamiento: El modelo o material a analizar se construye definiendo la geometría y las propiedades. Se configuran las interacciones entre los materiales, las cargas y las condiciones de frontera. Posteriormente, la geometría se discretiza en elementos, que se definen en términos de nodos y conectividad de elementos. El tipo de elemento se elige para representar el tipo de problema a resolver. Con esta información, el procesador puede calcular la matriz de rigidez y el vector de fuerza.

Procesamiento: En la fase de solución del análisis, la subrutina del solucionador incluida en el programa de FEM resuelve el conjunto de ecuaciones simultáneas que genera el método de elementos finitos. La solución primaria se obtiene resolviendo los valores de grados de libertad nodal como desplazamientos y rotaciones. Posteriormente, los resultados derivados, como esfuerzos y deformaciones, se calculan en los puntos de integración.

Posprocesamiento: Se obtienen los resultados de las relaciones de esfuerzo, deformación y falla. La solución se puede analizar utilizando herramientas gráficas.

1.3.1 Análisis de FEM en Abaqus

Abaqus es un programa de simulación de ingeniería, basado en el método de los elementos finitos, que puede resolver problemas que incluyen análisis lineales hasta simulaciones no lineales complejas. El software cuenta con varios modelos para simular adecuadamente el comportamiento de la mayoría de los materiales típicos de ingeniería como metales, polímeros, materiales compuestos, concreto reforzado, espumas con estructura celular, etc. En el análisis en Abaqus existen dos enfoques de solución para resolver problemas cuasi-estáticos y dinámicos, es decir, el enfoque implícito (que se usa en Abaqus/Standard) y el enfoque explícito (que se usa en Abaqus/Explicit), respectivamente. El primero es un enfoque iterativo para resolver el equilibrio del sistema, lo cual puede conllevar a tener problemas para lograr la convergencia en los análisis con un comportamiento de material altamente no lineal. El método explícito puede resolver ecuaciones directamente sin iteraciones, proporcionando un método eficiente con una solución aproximada para problemas altamente no lineales.

1.3.2 Análisis en Abaqus/Standard

Abaqus/Standard utiliza el método Newton-Raphson para obtener soluciones para problemas de FEM. En un análisis de FEM, la solución generalmente no se puede calcular resolviendo un solo sistema de ecuaciones, por lo que la solución se encuentra aplicando las cargas especificadas incrementalmente trabajando hacia la solución final. Por lo tanto, Abaqus/Standard divide la simulación en varios incrementos de carga y encuentra la configuración de equilibrio aproximada al final de cada incremento. Comúnmente, Abaqus/Standard requiere varias iteraciones para determinar una solución aceptable para un incremento de carga determinado. El procedimiento implícito tiene dos desventajas principales: la formulación de la matriz de rigidez, que se vuelve mal condicionada a medida que el material se agrieta y la necesidad de pequeños incrementos de tiempo para lograr la convergencia [49].

1.3.3 Análisis en Abaqus/Explicit

Este método se creó para analizar eventos y modelos dinámicos de alta velocidad con degradación rápida de materiales, los cuales suelen dar problemas de convergencia cuando se analizan con procedimientos implícitos. Abaqus/Explicit determina una solución a la ecuación de equilibrio dinámico sin iterar, avanzando explícitamente al estado cinemático desde el final del incremento anterior. Resolver un problema explícitamente no requiere la formación de la matriz de rigidez tangente, lo cual es una ventaja con respecto al método implícito. Para problemas lineales y no lineales, los métodos explícitos requieren un tamaño de incremento de tiempo pequeño que depende únicamente de la frecuencia natural más alta del modelo y es independiente del tipo y duración de la carga. Las simulaciones suelen requerir un gran número de incrementos, sin embargo, debido al hecho de que un conjunto global de ecuaciones no se resuelve en cada incremento, el costo por incremento de un método explícito es menor que el de un método implícito. Los pequeños incrementos característicos de un método explícito hacen que Abaqus/Explicit sea adecuado para efectuar un análisis no lineal [49].

1.3.4 Comportamiento y modelado por FEM de materiales con estructura celular

Un sólido celular es un conjunto de celdas de pared delgada con estructura regular o irregular. Su comportamiento a compresión está determinado por las propiedades de las celdas individuales y las interacciones colectivas entre las celdas vecinas [50]. En la curva de esfuerzo-deformación del comportamiento a compresión, se distinguen 3 partes: una región elástica lineal, una región plástica y una zona de densificación. Este tipo de propiedades pueden diferir dependiendo del material. En la Figura 1.7 se presentan los comportamientos comunes a compresión que pueden tener los materiales con estructura celular, en donde, la región plástica comienza a partir del esfuerzo a la cedencia σ_y , que representa el inicio de un nuevo mecanismo de deformación de la estructura celular y termina en una deformación crítica ε_{cd} , que representa el comienzo de la zona de densificación en donde todas las celdas comienzan a interactuar entre sí, el material se densifica y comienza a aumentar la carga resistida [51]. En la Figura 1.7a se representa un

comportamiento plástico estable y comúnmente existe un endurecimiento por deformación en esta zona. La Figura 1.7b representa un comportamiento plástico inestable en donde se observa un ablandamiento del material en la región plástica; este tipo de comportamiento corresponde al del concreto espumado. En la Figura 1.7c se muestra la deformación plástica macroscópica que tiene un material celular con comportamiento perfectamente plástico.

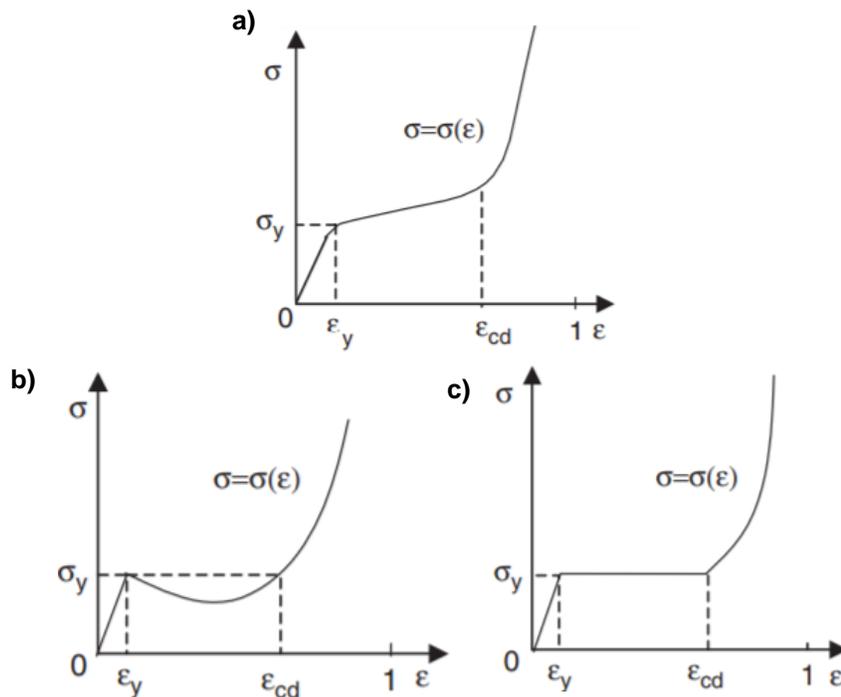


Figura 1.7. Comportamiento a compresión de materiales con estructura celular: a) Curva esfuerzo-deformación para materiales que tienen celdas con característica de endurecimiento por deformación, b) Curva esfuerzo-deformación para materiales que tienen tipo de celda con ablandamiento por deformación, c) Curva esfuerzo-deformación para materiales con comportamiento perfectamente plástico [50].

La respuesta plástica de los materiales celulares difiere significativamente de la de los materiales completamente densos debido al proceso de compactación [52]. Abaqus cuenta con un modelo plástico de material llamado “Crushable Foam”, el cual toma en consideración los efectos antes mencionados para modelar correctamente el

comportamiento de materiales con estructura celular. Es por esto que este modelo ha sido ampliamente utilizado en la literatura [52, 53, 54, 50, 55], empleándose de igual forma, en simulaciones de concreto espumado [4].

JUSTIFICACIÓN

Es importante analizar sistemas constructivos que permitan un buen desempeño estructural con el mínimo de peso. Esto se puede lograr con el empleo de materiales compuestos tipo sándwich. El concreto espumado es un material que se puede utilizar como núcleo de los compuestos tipo sándwich, debido a las características con las que cuenta, como la baja densidad, aislamiento térmico y buenas propiedades mecánicas.

El refuerzo con fibra puede llegar a mejorar el comportamiento a compresión, a tensión, aumentar la tenacidad y cambiar el modo de falla frágil del concreto por una falla más dúctil. Estas son características importantes para analizar del concreto espumado en un compuesto tipo sándwich con láminas de acero, ya que se ha demostrado en la literatura que una configuración de este tipo puede tener un buen rendimiento estructural, lo cual es importante en aplicaciones en zonas donde se presentan desastres naturales como sismos.

El interés en los materiales compuestos reforzados con fibras naturales está creciendo rápidamente debido al alto rendimiento en propiedades mecánicas, ventajas de procesamiento, baja densidad y bajo costo. Además, las fibras naturales son biodegradables, renovables y promueven la sustentabilidad. Las fibras de henequén son una excelente opción porque cuentan con buenas propiedades mecánicas.

En la actualidad, un entendimiento profundo del uso de materiales tipo sándwich con núcleo de concreto espumado de baja densidad reforzado con fibras de polipropileno o henequén aún no se ha alcanzado, por lo que en este trabajo de investigación se pretende avanzar en esta área de conocimiento.

CAPÍTULO 2 : MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Preparación y caracterización mecánica del concreto espumado

2.1.1 Materiales

Para la preparación de la mezcla del concreto espumado, se utilizaron los siguientes materiales:

- Cemento comercial tipo Portland CPC 30R, de la línea Maya extra de la marca CEMEX. Este cemento cumple las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE.
- Arena de la región del proveedor PREDECO. Este material se cribó para su uso en la fabricación del concreto espumado de la siguiente manera: 75% de la arena que pasa la malla #30 (600 μ m) y el 25% restante que pasa la malla #16 (1.16mm) y se retiene en la malla #30.
- Agua potable de la región.
- Agente espumante sintético de la marca EABASSOC.
- Fibras de polipropileno Marca Fibercon. Las propiedades de la fibra se muestran en la Tabla 2.1.
- Fibras de henequén de 19 mm.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno [24].

Densidad (kg/m ³)	Resistencia a tensión (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Diámetro aproximado (μm)	Longitud (mm)
900	557.21	3.79	34	19

2.1.2 Tratamiento superficial para las fibras de henequén

Antes de realizar el tratamiento a las fibras de henequén (o de utilizar las fibras sin tratamiento) para la elaboración del concreto espumado, estas se amarraron como se muestra en la Figura 2.1a, y se cortaron del largo deseado (19 mm) utilizando unas tijeras de tipo industrial (Figuras 2.1b y 2.1c).

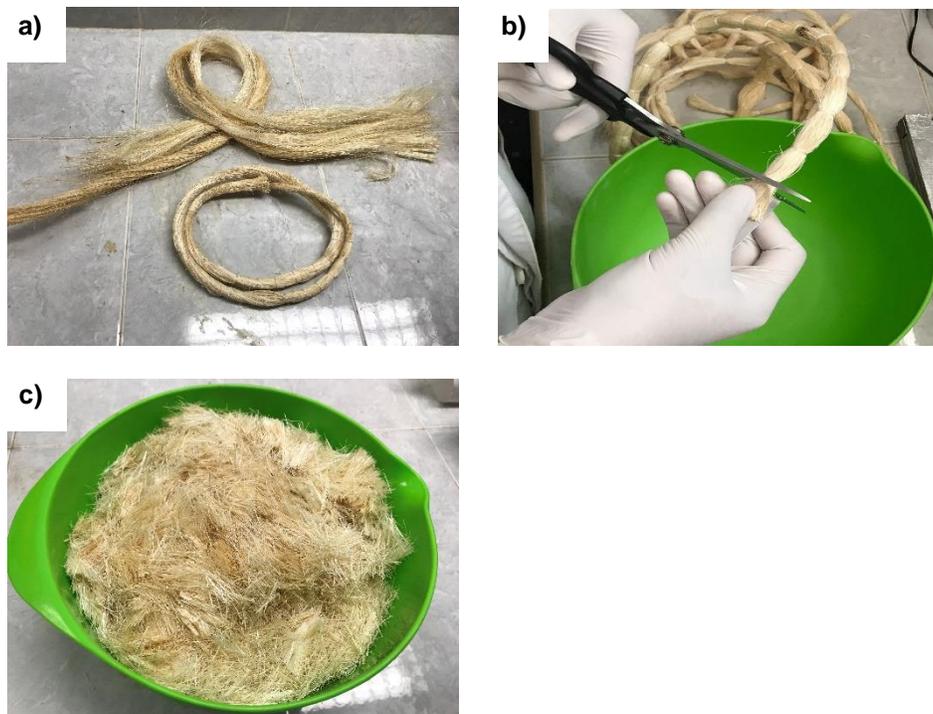


Figura 2.1. Proceso para cortar la fibra: a) Limpieza y amarre de la fibra para facilitar el corte, b) Cortado de fibra, c) Recolección de la fibra cortada.

Tratamiento alcalino

Este método consistió en tratar las fibras con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 2% por una hora a temperatura ambiente. Para realizar este procedimiento se prepararon 8 litros de solución por cada 200 gramos de fibra a tratar. Se tomó en cuenta la pureza del hidróxido de sodio y se obtuvo que, para lograr la concentración de la solución al 2%, es necesario 20.41 gramos de hidróxido de sodio por cada litro de solución. Posteriormente, se remojaron las fibras en la solución (Figura 2.2a) y se agitaron con un agitador mecánico a 550 rpm por una hora (Figura 2.2b). Posteriormente, se lavaron las fibras con agua destilada hasta eliminar todo el hidróxido de sodio. Para lograr esto fue necesario lavar las fibras un total de 10 veces. Por último, las fibras se colocaron y se extendieron en charolas (Figura 2.2c) y se metieron en un horno a 60°C por 24 horas para su secado [32] (Figura 2.2d).

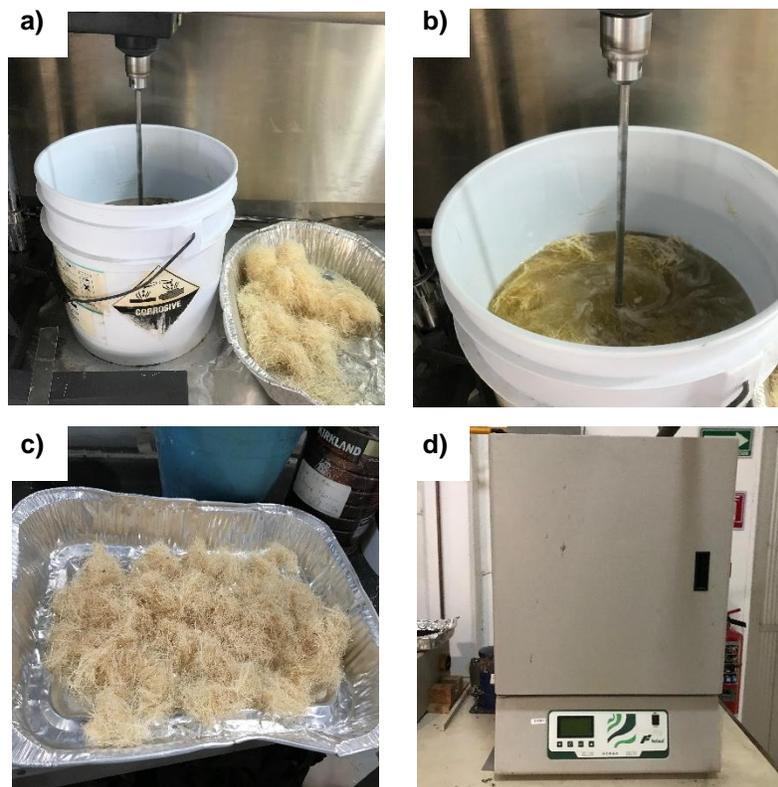


Figura 2.2. Tratamiento alcalino: a) Proceso de remojar las fibras en la solución, b) Agitación de las fibras, c) Colocación de las fibras tratadas en las charolas, d) Secado en horno a 60°C.

2.1.3 Diseño y preparación del concreto espumado

Para el diseño de la mezcla se empleó el método desarrollado por Md Azree Othuman Mydin [45, 56] que corresponde al método de elaboración conocido como pre-espumado. En este método se considera que la densidad fresca del concreto espumado es aproximadamente 100 kg/m^3 mayor a la densidad seca y que la masa de la espuma es el 6% de la masa total de la mezcla. En este método es necesario calcular la cantidad en litros de mezcla que se requiere y aumentar 5 litros de desperdicio. En esta investigación se empleó una relación agua/cemento de 0.5, una relación arena/cemento de 0.7 y una densidad objetivo seca de 700 kg/m^3 . Estos valores se mantuvieron fijos, siendo la cantidad de fibra de polipropileno o de henequén agregada al concreto espumado la variable de estudio. En la Tabla 2.2 se muestran todas las mezclas diseñadas para este estudio y el porcentaje de fibra (fracción volumétrica con relación al volumen total de concreto) agregado a la mezcla.

Tabla 2.2. Mezclas diseñadas para la evaluación y análisis.

Mezcla	Tipo de fibra	Cantidad de fibra (%)
(Control)	-	-
CP1	Polipropileno	0.5
CP2	Polipropileno	1
CP3	Polipropileno	1.5
CH1	Henequén	0.5
CH2	Henequén	1
CH3	Henequén	1.5
CHQ1	Henequén con tratamiento químico	0.5
CHQ2	Henequén con tratamiento químico	1
CHQ3	Henequén con tratamiento químico	1.5

En general, la preparación del concreto espumado se divide en 3 etapas:

1) Preparación de la mezcla líquida (mortero).

Como primer paso se introduce la cantidad de cemento y de arena requeridos para la mezcla a la maquina revolvedora, se revuelven los materiales aproximadamente 2 minutos. Posteriormente, se agrega la cantidad de agua y se deja revolver el mortero por 3 minutos cuidando que no queden grumos en la mezcla (Figura 2.3). Como último paso, se mide la densidad del mortero; según las relaciones de cemento, arena y agua usadas en este estudio, la densidad del mortero debe ser $1800 \pm 10 \text{ kg/m}^3$.



Figura 2.3. Preparación del mortero.

2) Preparación de la espuma.

La espuma se elabora por medio del empleo de un generador de espuma “Junior foam generator” de la marca Propump Engineering LTD. A este generador se le conecta una manguera proveniente de la solución espumante; esta solución se prepara a partir de la dosificación de 97% agua y 3% de agente espumante EABASSOC. Posteriormente, se conecta al equipo de aire comprimido (compresor) a una presión de $100 \pm 5 \text{ psi}$, lo cual genera una espuma con densidad de $50 \pm 2.5 \text{ kg/m}^3$; esta es la densidad objetivo para que la espuma tenga una estructura estable.

3) Mezclado del mortero con la espuma.

La espuma se agrega a la mezcla de mortero hasta alcanzar la densidad objetivo de 800-810 kg/m³; el proceso se puede ver en la Figura 2.4. El tiempo de mezclado es de aproximadamente 2 minutos o hasta que se obtenga una mezcla homogénea.



Figura 2.4. Proceso de mezclado del mortero con la espuma.

Las mezclas de concreto espumado diseñadas con fibras de polipropileno y fibras de henequén se realizaron de la misma forma mencionada anteriormente, en donde, el porcentaje de fibra que se agrega es con respecto al volumen de la mezcla que se necesita elaborar. La fibra requerida se agrega después de la etapa 3.

Para la elaboración de los especímenes necesarios para cada prueba, la mezcla de concreto espumado se vertió en los moldes (usando un total de 3 capas para poder llenar por completo los moldes), sacudiéndolos ligeramente después de verter cada capa. Esto se debe hacer con cuidado para evitar que haya algún daño en la estructura celular del concreto. En total, de cada colada se obtuvieron 6 especímenes para pruebas de compresión uniaxial y 6 especímenes para la prueba de tensión (Figura 2.5). El régimen de curado que se empleó es el especificado en el método de prueba ASTM C495, el cual consiste en desmoldar los especímenes en 24 ± 2 horas y después almacenarlos en una condición húmeda hasta 3 días antes de las pruebas. La condición húmeda consistió en

almacenar los especímenes en bolsas de plástico cerradas, cuidando que no se pierda un exceso de humedad. Por último, 3 días antes de las pruebas los especímenes se secaron al aire a temperatura ambiente.



Figura 2.5. Elaboración de especímenes para pruebas mecánicas.

2.1.4 Caracterización mecánica a compresión

El comportamiento mecánico a compresión de cada mezcla se evaluó a la edad de 28 días, probando un total de 6 especímenes cúbicos con dimensiones de 100 x 100 x 100 mm. La prueba se ejecutó de acuerdo con el método BS-EN 12390 utilizando una máquina de pruebas universales marca Shimadzu AG-1 a una velocidad de desplazamiento de 2.4 mm/min, utilizando una celda de carga de 100 kN. La configuración de la prueba se presenta en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Configuración de la prueba de compresión uniaxial.

2.1.5 Caracterización mecánica a tensión

Las pruebas de tensión se realizaron usando el método de prueba ASTM C307, utilizando muestras con forma de hueso con una longitud de 76 mm y una sección transversal aproximada de 25.4 x 25.4 mm. La velocidad con la cual se configuró la prueba fue de 1 mm/min utilizando una celda de carga de 20 kN (Figura 2.7).



Figura 2.7. Configuración para la prueba de tensión.

2.1.6 Preparación de las probetas para la prueba de Pullout

Las pruebas de Pullout se realizaron para conocer la resistencia interfacial y para entender la influencia de la longitud embebida en el comportamiento de extracción de la fibra de la matriz de concreto espumado. Se usaron fibras de henequén sin tratamiento, fibras de henequén con tratamiento químico y fibras de polipropileno. En total se probaron longitudes embebidas de 5 mm, 8 mm y 10 mm. El proceso de preparación del concreto espumado se realizó como se explica en la sección 2.1.1.3 aplicando el mismo método de curado. Para la preparación de los especímenes para la prueba de Pullout se adaptó una metodología consultada en la literatura [57, 58].

La preparación de los especímenes consistió en cortar varios moldes de PVC de la longitud embebida de 5 mm, 8 mm y 10 mm (Figura 2.8a). Posteriormente, se marcaron 4 puntos en la base del molde de PVC para definir el diámetro (Figura 2.8b). Seguido a esto, una cinta "masking" se pegó en la parte inferior del molde y utilizando una regla se definió el centro del molde con la ayuda de las marcas hechas previamente (Figura 2.8c). Este mismo procedimiento se realizó con la parte superior del molde, pero utilizando una cinta de montaje. Seguido a esto, y con la ayuda de una aguja, se traspasó la fibra a través de las marcas del centro. Después de la colocación de la fibra, la matriz se depositó dentro del molde. Con la ayuda de la cinta de montaje de la parte superior se selló la muestra (Figura 2.8d) y con esto se garantizó la posición recta y centrada de la fibra a lo largo del cuerpo de la probeta.

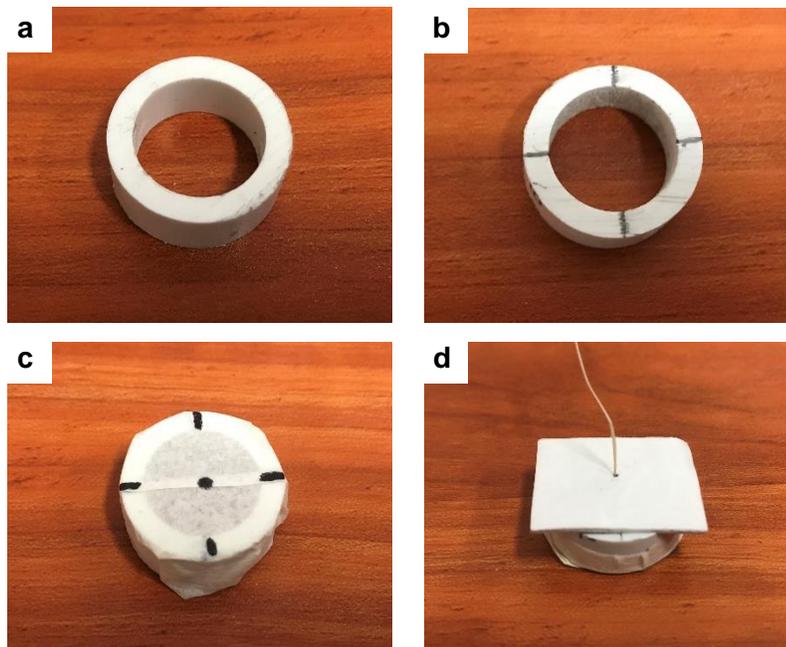


Figura 2.8. Proceso para la elaboración de las probetas para la prueba de Pullout: a) Corte del molde de PVC, b) Marcas para definir el diámetro, c) Definición del centro del molde de PVC, d) Sellado de la muestra con una cinta de montaje.

Medición del diámetro de las fibras y obtención de la resistencia a cortante interfacial

Para la obtención de los diámetros promedio de las fibras, se tomaron micrografías usando un microscopio Leica modelo DMLM con un aumento de 10x para las fibras de henequén (sin y con tratamiento) y con un aumento de 20x para las fibras de polipropileno. Posteriormente, de cada micrografía tomada se midió el diámetro con el empleo de un programa de procesamiento de imagen digital. De cada fibra analizada se tomaron 3 micrografías correspondientes a la sección central y a las partes laterales. Las micrografías fueron tomadas a 20 fibras individuales por cada tipo de fibra (henequén sin tratamiento, henequén con tratamiento y polipropileno), obteniendo un total de 60 mediciones por cada tipo de fibra con lo cual se obtuvo el diámetro promedio.

La resistencia a cortante interfacial (τ_i), correspondiente a la fuerza necesaria para que ocurra el desprendimiento fibra-matriz, se obtuvo a partir de la ecuación 2.1:

$$\tau_i = \frac{P_i}{\pi \cdot d_f \cdot Le} \quad (2.1)$$

En donde τ_i es la resistencia a cortante interfacial, P_i es la fuerza necesaria para el desprendimiento fibra-matriz, d_f es el diámetro promedio de cada fibra y Le es la longitud embebida.

2.1.7 Prueba de Pullout

Las pruebas de Pullout se ejecutaron a los 28 días utilizando una máquina de pruebas universales marca Shimadzu AG-X con una celda de carga de 100 N. Las pruebas se desarrollaron a una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min. La configuración de la prueba se presenta en la Figura 2.9.

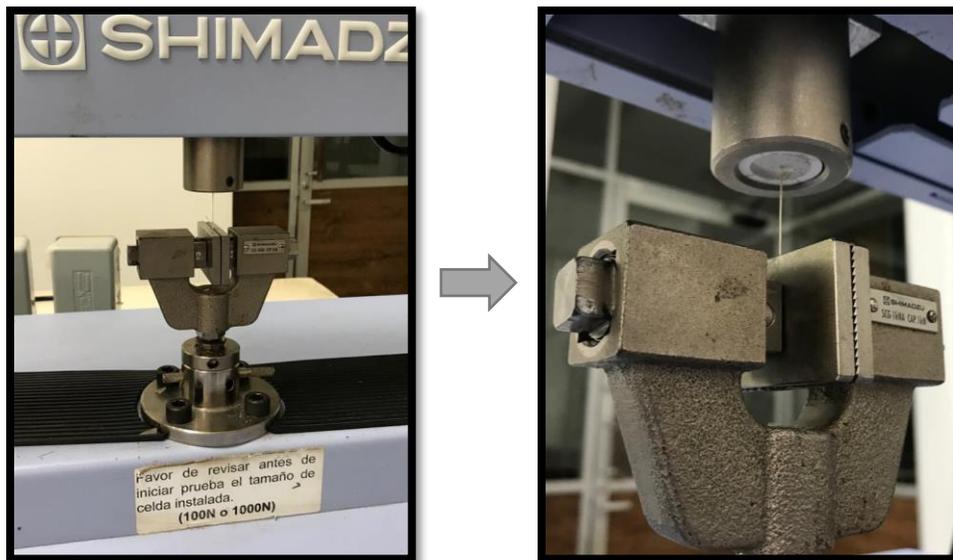


Figura 2.9. Configuración de la prueba de Pullout.

2.2 Caracterización microscópica del concreto espumado

2.2.1 Preparación de especímenes

Para la caracterización microscópica del concreto espumado, por cada colada realizada se preparó un espécimen con un tamaño aproximado de 8 mm x 8 mm x 5 mm usando una sierra de disco de diamante. Posteriormente, se lijó la superficie y se limpió con aire comprimido.

2.2.2 Microscopía electrónica de barrido

Para observar las muestras se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) de la marca Jeol modelo JSM-6360 LV, con el cual se tomaron micrografías con una resolución de 40X, lo cual corresponde a una escala de 500 μm . En total, se tomaron 4 micrografías de la superficie de cada muestra con la finalidad de observar la estructura celular y obtener un promedio del tamaño de celda.

2.3 Elaboración y caracterización mecánica a flexión de los compuestos tipo sándwich

Para el desarrollo experimental del material compuesto, el diseño de los paneles tipo sándwich se basó en la investigación de Flores-Johnson y Li [4] y en investigaciones previas [59, 60]. Los paneles tipo sándwich se fabricaron utilizando como caras, láminas de acero corrugado marca Ternium modelo TR-101 calibre 26 (0.4547 mm de espesor nominal). Los detalles geométricos de los paneles tipo sándwich se presentan en la Figura 2.10. Como núcleo del material compuesto, se analizaron 3 variables, las cuales corresponden al concreto espumado sin refuerzo, al concreto espumado con fibras de polipropileno y al concreto espumado con fibras de henequén con tratamiento químico. La cantidad de refuerzo de fibra de henequén y de polipropileno se seleccionó a partir de los resultados del análisis de la caracterización mecánica del núcleo. En la Tabla 2.3 se presenta las mezclas que se diseñaron para la elaboración de los materiales compuestos tipo sándwich.

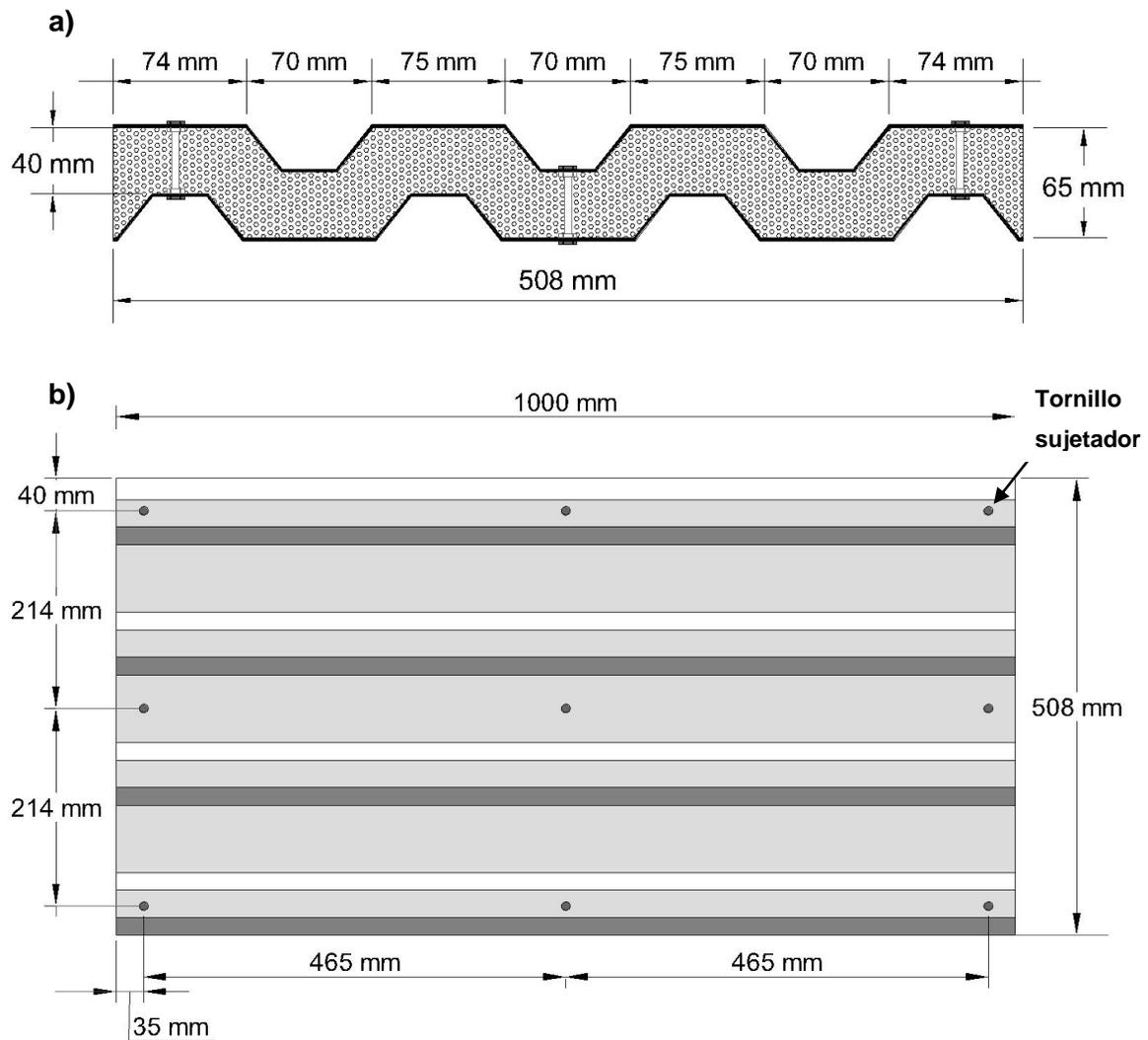


Figura 2.10. Detalles geométricos del material compuesto tipo sándwich: a) Sección transversal; b) Vista inferior del material compuesto, la cual sirvió como guía para la colocación de los tornillos sujetadores.

Tabla 2.3. Diseño de los paneles tipo sándwich

Mezcla	Cantidad de fibra (%)	Tipo de fibra	Densidad seca objetivo del núcleo (kg/m^3)
PC (Control)	-	-	700
PP	1	Polipropileno	700
PH	1	Henequén con tratamiento	700

2.3.1 Proceso de elaboración de los materiales compuestos tipo sándwich

Para la elaboración de los materiales compuestos tipo sándwich, primeramente, se cortaron las láminas de acero del ancho estipulado. Posteriormente, se procedió a colocar los tornillos sujetadores para mantener la distancia entre las dos láminas y poder obtener una buena unión cara-núcleo en el proceso de colado (Figura 2.11a). Los tornillos que se emplearon fueron de 5/16" de diámetro que se colocaron a la distancia que se especifica en la Figura 2.10. Seguido a esto, las láminas se colocaron en un molde de madera (Figura 2.11b) al cual previamente se le aplicó un líquido desmoldante para facilitar la extracción de los paneles. Por último, se elaboró el concreto espumado como se especifica en la sección 2.1.1.3 y se vertió en los moldes (Figura 2.11c). Los paneles se dejaron curando durante 28 días para que el núcleo de concreto espumado alcance su máxima resistencia. Se fabricaron un total de 3 paneles por cada mezcla diseñada.

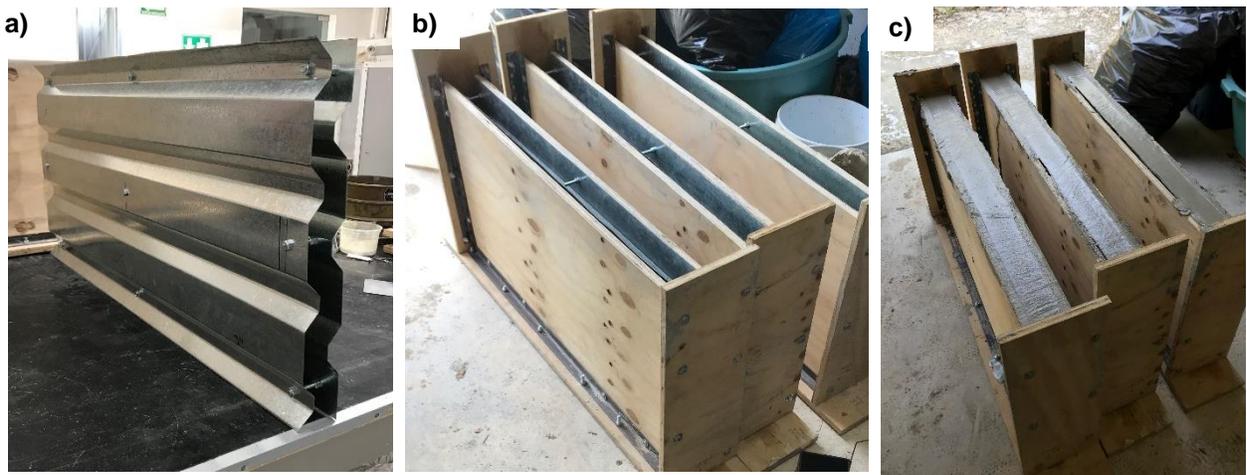


Figura 2.11. Proceso de elaboración de los materiales compuestos tipo sándwich: a) Colocación de los tornillos para delimitar el espesor del panel, b) Colocación de las láminas en el molde, c) Elaboración y vertido del concreto espumado.

2.3.2 Determinación de las propiedades mecánicas a flexión

Para la prueba de flexión a 4 puntos que se realizó en los materiales compuestos tipo sándwich, se utilizó una máquina universal de pruebas Shimadzu AG-1 con una celda de carga con capacidad máxima de 100 kN y un marco de carga diseñado para esta prueba específica. La distancia entre los cargadores fue de 300 mm y la distancia entre los soportes de 850 mm. En la Figura 2.12 se muestra cómo se colocaron los materiales compuestos y la distancia entre los soportes y cargadores. La carga se aplicó a una velocidad de desplazamiento constante de 0.5 mm/min hasta que la deflexión en la mitad del panel alcanzó los 15 mm. Posteriormente, se aumentó la velocidad a 3 mm/min hasta alcanzar una deflexión total de 60 mm. Para medir el desplazamiento central de los paneles, se utilizó un Transformador Diferencial de Variación Lineal (LVDT, por sus siglas en inglés). El método de prueba que se utilizó fue el de la norma ASTM C393. Con el diagrama fuerza-desplazamiento que se obtuvo, se realizó la evaluación y comparación de los diferentes materiales compuestos elaborados. En la Figura 2.13 se muestra la configuración de la prueba.

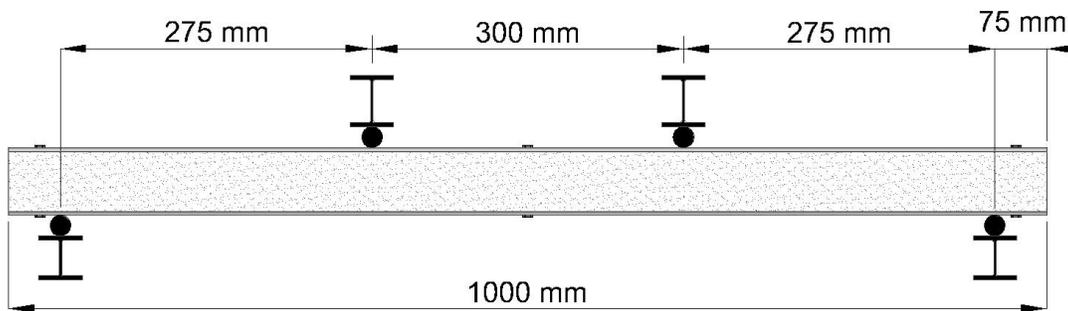


Figura 2.12. Ejemplo de la colocación de los paneles tipo sándwich en el marco de carga.

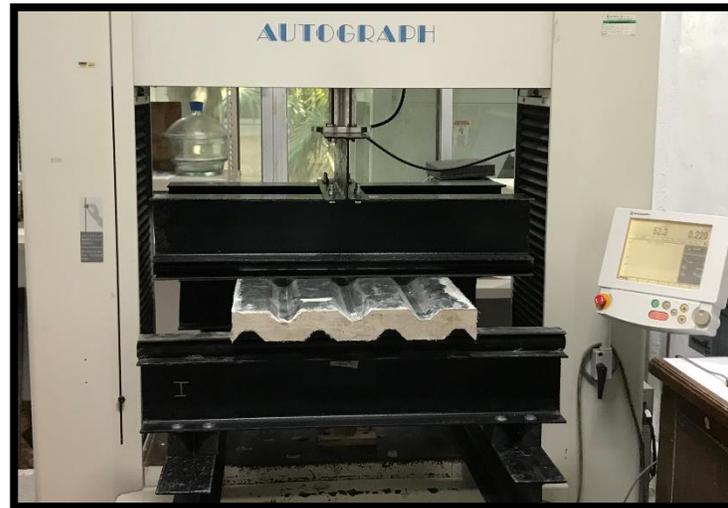


Figura 2.13. Configuración de la prueba de flexión

2.3.3 Determinación de las propiedades mecánicas a tensión de la lámina Ternium TR-101

La prueba de tensión se realizó de acuerdo con el método de prueba ASTM E8. El tipo de espécimen que se utilizó fue el *subsize* con una longitud calibrada de 25 mm. Las dimensiones de las muestras se presentan en la Figura 2.14. Las probetas se obtuvieron directamente de la lámina que se empleó para la elaboración de los paneles tipo sándwich. La velocidad a la cual se realizó la prueba fue de 0.5 mm/min utilizando una celda de carga de 20 kN. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 2.15. Esta prueba se realizó para obtener la curva esfuerzo-deformación del acero de la lámina, y así poder modelar de forma correcta el comportamiento del material compuesto tipo sándwich en el programa de simulación de FEM.

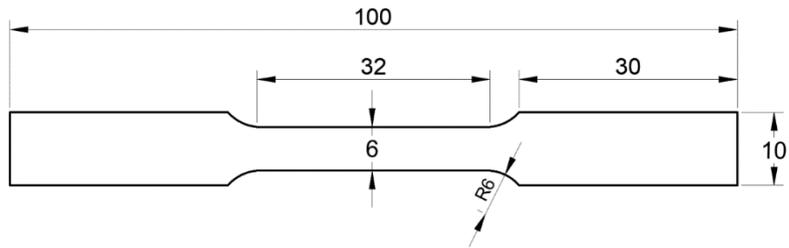


Figura 2.14. Dimensiones en mm de las muestras empleadas



Figura 2.15. Configuración de la prueba de tensión de la lámina de acero.

2.4 Simulación numérica usando FEM

La simulación numérica de los paneles tipo sándwich se desarrolló en Abaqus/Explicit, el cual se utilizó como herramienta para analizar el rendimiento estructural y entender el efecto de la unión cara-núcleo en el comportamiento de los paneles sándwich a partir de la respuesta de la prueba de flexión a 4 puntos. Para el modelado del material compuesto, el panel se consideró simétrico por lo que únicamente se construyó la mitad del modelo como un sólido tridimensional (Figura 2.16). La malla del núcleo, elemento de carga y soporte se

conformó por elementos de 8 nodos (C3D8R). Las láminas de las caras se modelaron con elementos de 4 nodos (S4R). La malla de todos los elementos se configuró con la formulación de integración reducida y con un tamaño global de 5 mm. Este tamaño se eligió a partir del estudio de la convergencia de la malla, el cual no mostró una variación significativa en la respuesta de carga al usar un tamaño de elemento más pequeño, pero si ocasiono un aumento significativo en el tiempo de simulación. El elemento de carga y el soporte se modelaron como cuerpos rígidos. Para realizar esto, se crearon las geometrías como cuerpos deformables, y después se utilizó la opción en Abaqus de “*Constraint*” con la cual se aplicó el tipo de característica de cuerpo rígido.

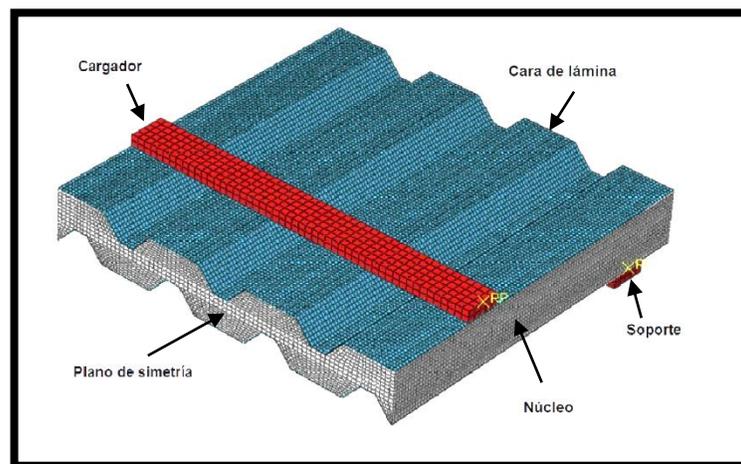


Figura 2.16. Malla del modelo del compuesto tipo sándwich en Abaqus

El comportamiento elástico del núcleo para cada caso se modeló utilizando el módulo elástico y el esfuerzo a cedencia que se obtuvieron de las pruebas de compresión uniaxial del concreto espumado sin fibras para los paneles denominados PC; del concreto espumado con refuerzo del 1% de fibra de polipropileno, para los paneles denominados PP y del concreto espumado con refuerzo del 1% de fibra de henequén con tratamiento alcalino, para los paneles denominados PH. La densidad en todos los casos se configuró para que sea de 700 kg/m^3 y el coeficiente de Poisson se configuró para que sea de 0.1. El comportamiento plástico se representó utilizando el modelo de material “Crushable foam”,

con el cual se modela el comportamiento mecánico de las estructuras celulares (espumas), con los parámetros de relación de esfuerzo a cedencia en compresión (compression yield stress ratio) $k=1$ y la relación de esfuerzo hidrostático a fluencia (hydrostatic yield stress ratio) $k_t=0.1$. Los valores de estos parámetros son los recomendados en el manual de Abaqus y en la literatura [61, 4]. En la sección de *strain hardening* se ingresaron algunos valores del comportamiento plástico de la gráfica de esfuerzo contra deformación que se obtuvo de las pruebas experimentales. Esto es importante para que el programa simule correctamente el comportamiento del concreto espumado. En la Figura 2.17 se presenta cómo se realizó la configuración del comportamiento “Crushable Foam” en Abaqus.

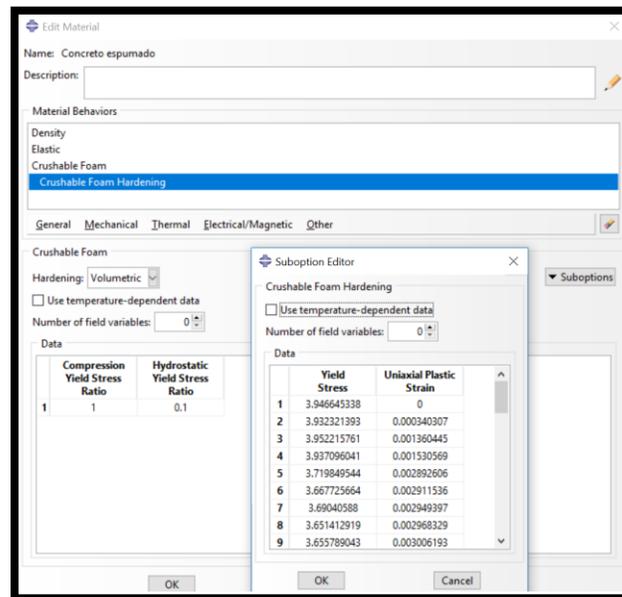


Figura 2.17. Ejemplo de la configuración del comportamiento “Crushable Foam” en el módulo “Property” del programa Abaqus.

El comportamiento del material de las láminas de acero se modeló como material isotrópico, en donde se especificaron todas las características del comportamiento elástico del material. A partir de las pruebas de tensión que se realizaron a la lámina se obtuvo el punto de cedencia del acero y el comportamiento plástico, el cual se ingresó en el programa para modelar correctamente el comportamiento del acero.

CAPÍTULO 3 : RESULTADOS

3.1 Caracterización mecánica del concreto espumado

La fabricación de los especímenes de concreto espumado para las pruebas de compresión y tensión se realizó como se explica en la Sección 2.1.1.3. En total, por cada mezcla realizada, se prepararon 23 litros de concreto espumado. Con esta cantidad de material se obtuvieron 6 especímenes para compresión (Prueba a 28 días) y 6 para tensión (Prueba a 28 días). El comportamiento mecánico a compresión de cada mezcla se evaluó de acuerdo con el método BS-EN 12390 con una velocidad de desplazamiento de 2.4 mm/min. Para el comportamiento a tensión se utilizó el método de prueba ASTM 307 a una velocidad de desplazamiento del cabezal de 1 mm/min. En la Tabla 3.1 se muestran las proporciones generales de los materiales utilizados para la elaboración del concreto espumado.

Tabla 3.1. Cantidad de materiales para 23 litros de concreto espumado.

Material	Cantidad
Cemento (kg)	7.86
Agua (l)	5.5
Arena (kg)	3.93
Agente espumante (l)	0.24
Agua para agente espumante (l)	7.76

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos de cada mezcla y al final se realiza una comparación de todos los resultados. Las secciones se encuentran divididas en las pruebas del material con refuerzo de fibra de polipropileno y en las pruebas del material con refuerzo de fibra de henequén sin y con tratamiento. En todas las secciones se realiza la comparación con la mezcla de control.

3.1.1 Prueba de compresión del concreto espumado reforzado con fibra de polipropileno

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de compresión de todas las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno. Se reporta la resistencia a compresión, la cual corresponde al punto de cedencia del material y corresponde al inicio de la región plástica de la curva esfuerzo-deformación. Se reporta el módulo elástico, la deformación a la cedencia y la densidad seca obtenida a los 28 días de curado. Se puede observar que, a mayor porcentaje de fibra, existe un incremento en la rigidez del material en comparación con la mezcla de control (mezcla sin refuerzo de fibra). De igual forma, hay un incremento en la resistencia a la compresión del 45% para la mezcla CP1, del 51% para la mezcla CP2 y del 44% para la mezcla CP3, con relación a la resistencia de la mezcla de control.

Tabla 3.2. Resultados de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno.

Mezcla	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Deformación a la cedencia (mm/mm)	Densidad (kg/m³)
Control	230 ± 9	1.42 ± 0.05	0.007 ± 0.001	706 ± 8
CP1 (0.5%)	254 ± 30	2.06 ± 0.09	0.008 ± 0.001	681 ± 13
CP2 (1%)	278 ± 19	2.14 ± 0.08	0.010 ± 0.002	732 ± 5
CP3 (1.5%)	275 ± 25	2.04 ± 0.04	0.010 ± 0.001	732 ± 1

En la Figura 3.1 se presentan las gráficas esfuerzo-deformación de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno. En todas las gráficas se muestra el comportamiento de tres muestras representativas de cada mezcla. En la gráfica esfuerzo-deformación de la mezcla de control (Figura 3.1a) se puede observar que a partir de que el concreto espumado llega

a la resistencia máxima, este falla de manera un tanto frágil, perdiendo resistencia gradualmente conforme aumenta la deformación. A deformaciones superiores al 10% los especímenes comienzan a perder su integridad y tienden a desmoronarse (Figura 3.2a), lo cual impide que el material resista grandes deformaciones. Este tipo de falla es característica del concreto espumado sin ningún tipo de refuerzo [4, 59, 62]. Se observa un comportamiento muy diferente para todas las mezclas con refuerzo de polipropileno (Figuras 3.1b-c) en donde a partir de la resistencia máxima, el material es capaz de resistir un porcentaje de esta resistencia a deformaciones crecientes. Esto es debido al refuerzo con fibra, ya que ayuda a que los especímenes mantengan su integridad (Figura 3.2b). De igual forma, se puede apreciar la zona de densificación característica de los materiales celulares, en donde la carga resistida por el material comienza a incrementarse [50, 63, 64]. La zona de densificación de todas las mezclas con refuerzo de polipropileno comienza con una deformación del 15-20%.

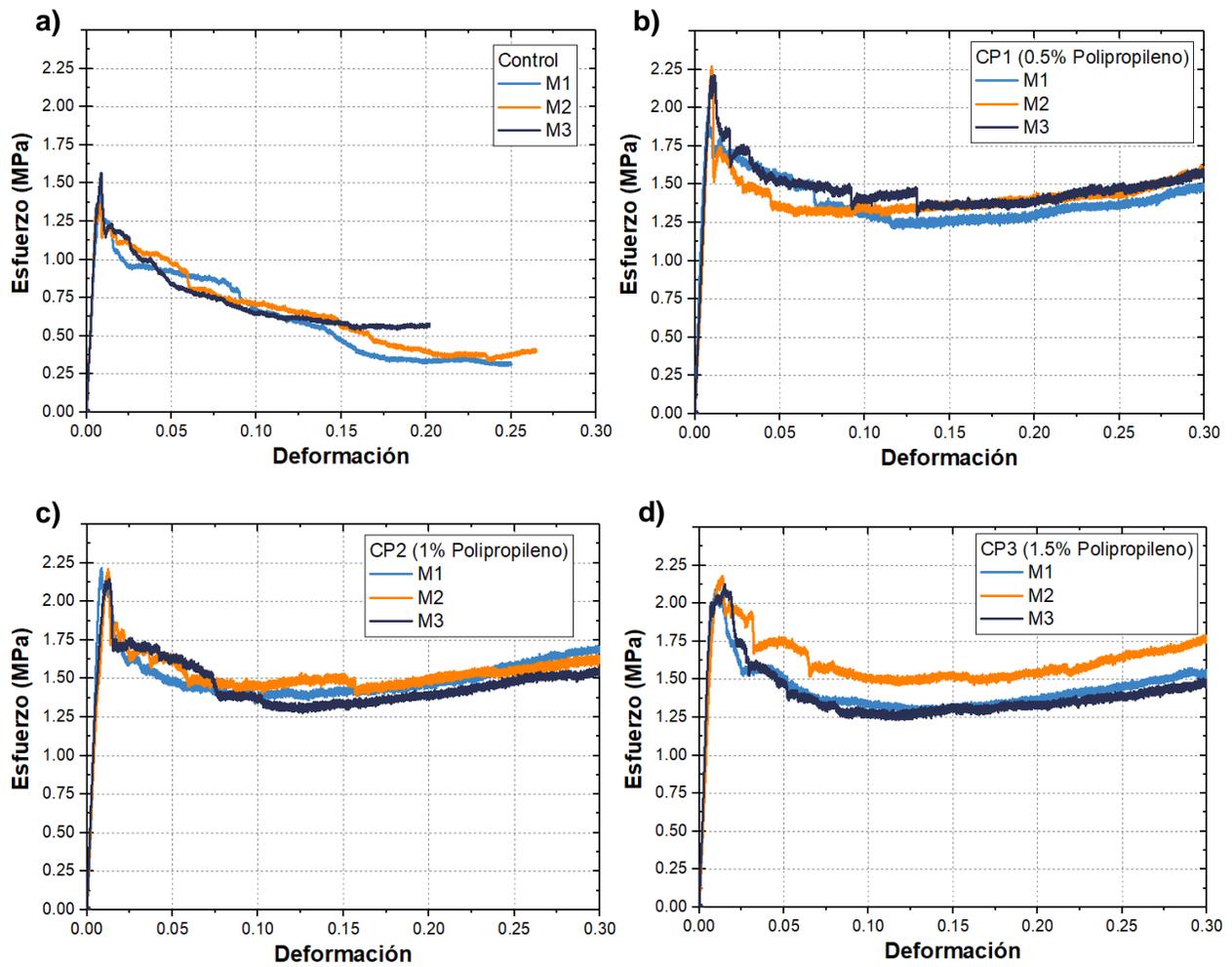


Figura 3.1. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno: a) Mezcla de control (Sin refuerzo de fibra), b) CP1 (Refuerzo de 0.5%), c) CP2 (Refuerzo de 1%), d) CP3 (Refuerzo de 1.5%).

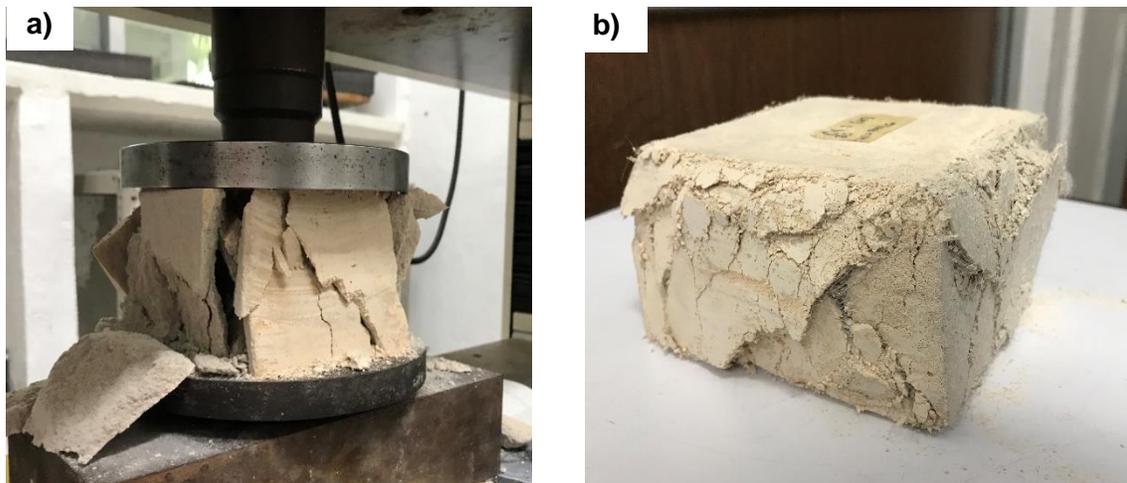


Figura 3.2. Diferencias en el comportamiento a compresión entre el concreto espumado sin refuerzo y con refuerzo de fibra: a) Mezcla de control a una deformación del 15%, b) Mezcla CP2 a una deformación del 30%.

En la Figura 3.3 se muestra con más detalle la comparación entre la resistencia a la compresión de todas las mezclas. Para todos los casos hubo un aumento en la resistencia a la compresión en comparación con la mezcla de control, siendo la mezcla CP2 la que obtuvo resultados más favorables aumentando la resistencia en un 51%. El uso de la fibra de polipropileno como refuerzo presentó mejoras en el comportamiento plástico a compresión cambiando el modo de falla frágil del concreto espumado sin refuerzo aumentando la tenacidad del material. Esto ocasionó que después de la falla, el espécimen pudiera resistir un porcentaje de la carga máxima a deformaciones crecientes y mantuviera su integridad.

A mayor porcentaje de fibra se redujo la trabajabilidad del concreto. Para las mezclas CP1 y CP2 no hubo una reducción muy notable de esta propiedad, sin embargo, la mezcla CP3 presentó una reducción considerable en la trabajabilidad lo que ocasionó que fuera más complicado el manejo de la mezcla en estado fresco y más complicada la elaboración de los especímenes. Esta reducción notable en la trabajabilidad es un comportamiento normal a mayores porcentajes de fibra de polipropileno [6, 16].

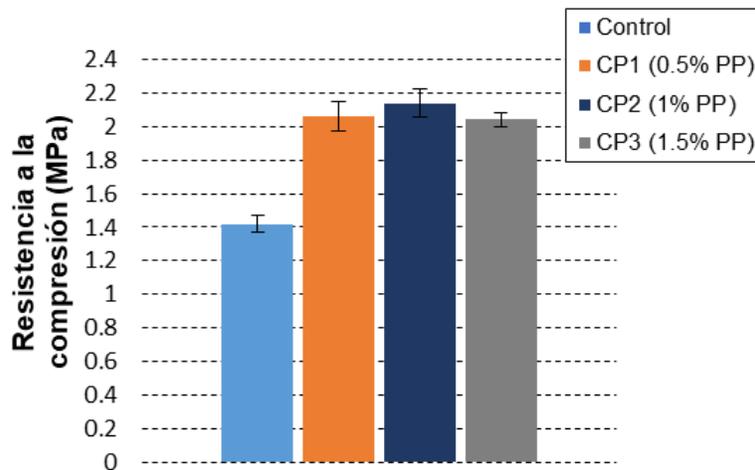


Figura 3.3. Comparación de la resistencia a la compresión de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno.

3.1.2 Prueba de compresión del concreto espumado reforzado con fibra de henequén

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin tratamiento y con tratamiento alcalino. Se puede observar que el aumento de la desviación estándar en los resultados promedio del módulo elástico de las mezclas con fibra es mayor en comparación con la mezcla de control. Esto es debido a la inclusión de la fibra y posiblemente a la dispersión de esta en la matriz. Las mezclas que presentaron mejores resultados en la resistencia a la compresión fueron la CH3, CHQ2 y CHQ3 con valores de 1.74 MPa, 1.72 MPa y 1.78 MPa, respectivamente. En cuanto a las densidades, se aprecia que CH2 es la que tiene el valor más bajo con 681 kg/m^3 variando 2.7% de la densidad objetivo de 700 kg/m^3 . La que presentó la densidad más alta fue CHQ2 la cual varió un 4% de la densidad objetivo. Estas variaciones en la densidad no se consideran significativas y no es un factor que pudiera afectar la resistencia a la compresión de una manera importante.

Tabla 3.3. Resultados de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén.

Mezcla	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Deformación a la cedencia (mm/mm)	Densidad (kg/m ³)
Control	230 ± 9	1.42 ± 0.05	0.007 ± 0.001	706 ± 8
CH1 (0.5%)	218 ± 25	1.62 ± 0.02	0.008 ± 0.002	713 ± 5
CH2 (1%)	277 ± 21	1.68 ± 0.04	0.007 ± 0.001	681 ± 1
CH3 (1.5%)	196 ± 31	1.74 ± 0.04	0.010 ± 0.002	691 ± 4
CHQ1 (0.5%)	224 ± 21	1.39 ± 0.07	0.008 ± 0.001	692 ± 3
CHQ2 (1%)	219 ± 23	1.72 ± 0.09	0.012 ± 0.001	729 ± 3
CHQ3 (1.5%)	269 ± 27	1.78 ± 0.05	0.009 ± 0.002	728 ± 7

En la Figura 3.4 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de las mezclas con refuerzo de henequén sin tratamiento y de la mezcla de control. Se puede ver que en todos los casos se obtuvo un comportamiento elástico con una respuesta lineal a bajas deformaciones hasta llegar al esfuerzo máximo correspondiente a la resistencia a la compresión. Para las mezclas CH1 (Figura 3.4b) y CH2 (Figura 3.4c) no se observó una zona de densificación evidente, sin embargo, si se obtuvo un comportamiento perfectamente plástico a partir de una deformación del 15% para CH1 y del 10% para CH2. De igual forma, este comportamiento es característico de los materiales celulares antes de entrar a la zona de densificación.

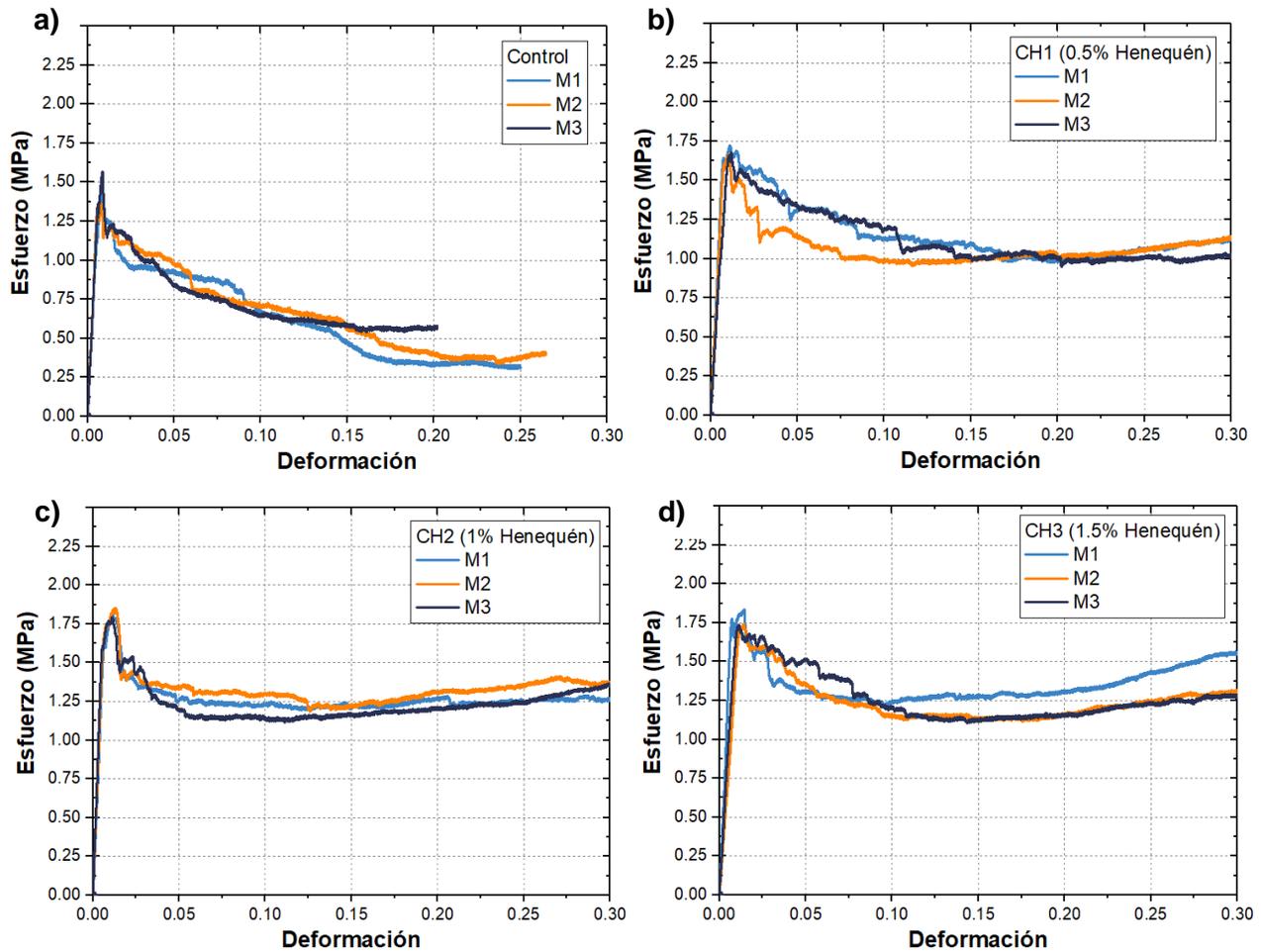


Figura 3.4. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin tratamiento: a) Mezcla de control, b) CH1 (Refuerzo de 0.5%), c) CH2 (Refuerzo de 1%), d) CH3 (Refuerzo de 1.5%).

La Figura 3.5 muestra el comportamiento a compresión de las mezclas con refuerzo de fibra de henequén con tratamiento alcalino. Se puede ver en la Figura 3.5b que la resistencia a la compresión y la capacidad de resistencia después de la falla es menor para CHQ1 en comparación con todas las demás mezclas con henequén. Comparando la Figura 3.5c con la Figura 3.4c se observa que con el tratamiento alcalino hay una pérdida de la capacidad de carga en la región plástica. El tratamiento alcalino para las fibras de henequén reduce la capacidad de refuerzo después de la falla en comparación con las mezclas con fibra sin tratamiento. Este comportamiento a compresión puede estar atribuido al tipo de degradación que tiene la fibra al tratarse químicamente con hidróxido de sodio, reduciendo algunas propiedades, pero mejorando otras.

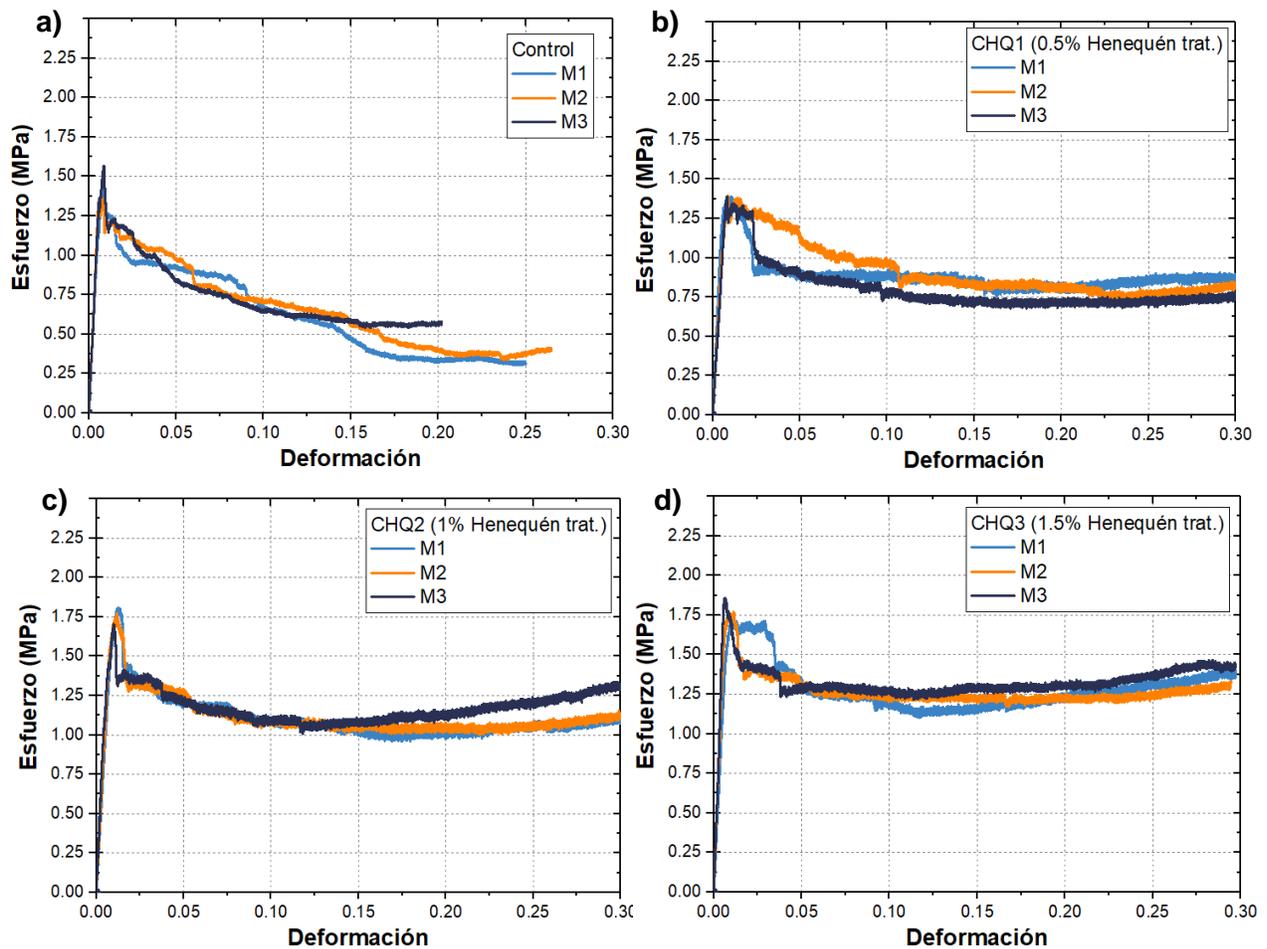


Figura 3.5. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén con tratamiento (Henequén trat.): a) Mezcla de control, b) CHQ1 (Refuerzo de 0.5%), c) CHQ2 (Refuerzo de 1%), d) CHQ3 (Refuerzo de 1.5%).

El resultado de la resistencia a la compresión del concreto espumado con fibra de henequén (sin y con tratamiento) se presenta en la Figura 3.6. Se obtuvieron resultados positivos para el concreto espumado con refuerzo de henequén sin tratamiento aumentando la resistencia de CH1 en un 14%, de CH2 en un 18% y de CH3 en un 22.5%, en comparación con la mezcla de control. En cuanto al concreto espumado con refuerzo de henequén con tratamiento, para CHQ1 hubo una reducción de la resistencia a la compresión del 15% al compararla con su similar sin tratamiento (CH1) y no hubo una mejora con relación a la mezcla de control. Sin embargo, a mayores porcentaje de fibra tratada químicamente si

mejoró la capacidad de refuerzo de la fibra. Esto se puede ver en los resultados de la resistencia a la compresión de la mezcla CHQ2 y CHQ3 en donde esta aumentó 21% y 25% respectivamente, al compararla con la mezcla de control. Las mezclas con 1.5% de refuerzo presentaron una reducción considerable de la trabajabilidad del concreto espumado.

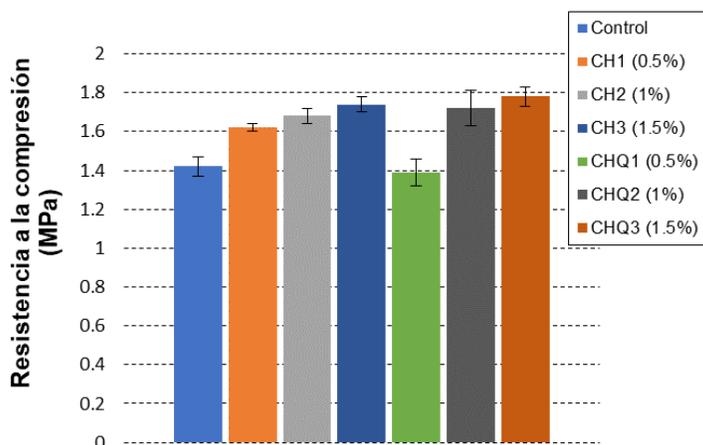


Figura 3.6. Comparación de la resistencia a la compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin y con tratamiento.

Es importante destacar que, aunque sea mayor la capacidad de carga después de la falla para las mezclas con henequén sin tratamiento al compararlas con las mezclas con las fibras tratadas, el tratamiento químico de las fibras es muy importante debido a la degradación de la lignina y la hemicelulosa en las lamelas y capas que conforman a las fibras, en ambientes altamente alcalinos debido al proceso de hidratación del concreto. Un mecanismo adicional que sucede durante el curado del concreto es la hidrólisis de las moléculas de celulosa que causa la degradación de las cadenas moleculares. Esto a su vez conlleva a una reducción en el grado de polimerización y una menor resistencia a la tensión con el paso del tiempo. Según lo reportado en la literatura [35, 37, 65], estos factores ocasionan una reducción con el tiempo, en la capacidad de refuerzo de las fibras de henequén o de otras fibras naturales sin tratamiento en matrices de concreto. Con el tratamiento superficial químico se puede mejorar la durabilidad y evitar la pérdida temprana

de propiedades mecánicas de las fibras de henequén en la matriz de concreto [37]. Esto se debe a que después del tratamiento con NaOH, la cristalinidad de las fibras aumenta, lo que conlleva a un mejor empaquetamiento de las cadenas de celulosa. Además, el tratamiento con NaOH puede producir un aumento en la orientación de las moléculas. Estos factores ocasionan un aumento en las propiedades a tensión y en la resistencia a la degradación de las cadenas de celulosa [66].

3.1.3 Prueba de tensión del concreto espumado reforzado con fibra de polipropileno

La Tabla 3.4 muestra los resultados de las pruebas de tensión del concreto espumado reforzado con fibra de polipropileno. Se presentan los resultados del módulo elástico en MPa, los resultados de la resistencia a la compresión en MPa y la deformación a la cedencia en (mm/mm). En todos los casos con refuerzo de fibra se presentó una mejora en la resistencia a la tensión en comparación con la mezcla de control, siendo la mezcla CP2 la que obtuvo los mejores resultados.

Tabla 3.4. Resultados de las pruebas de tensión de las mezclas con refuerzo de polipropileno.

Mezcla	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación a la cedencia (mm/mm)
Control	19.81 ± 2.5	0.225 ± 0.01	0.01 ± 0.001
CP1 (0.5%)	22.81 ± 2.4	0.242 ± 0.05	0.011 ± 0.001
CP2 (1%)	30.35 ± 4.19	0.341 ± 0.03	0.010 ± 0.003
CP3 (1.5%)	24.85 ± 3.64	0.275 ± 0.026	0.012 ± 0.002

En la Figura 3.7 se presenta el comportamiento a tensión que se obtuvo de todas las mezclas con polipropileno. En cada gráfica se muestra el comportamiento de 3 especímenes de cada mezcla. En la Figura 3.7a, correspondiente a la mezcla de control,

se observa un comportamiento lineal a bajas deformaciones. Se puede también observar que, al llegar a la resistencia máxima, el material falla de manera frágil. Este comportamiento es típico del concreto sin ningún tipo de refuerzo. Para la mezcla CP1 (Figura 3.7b) se puede observar que también hay una falla frágil en los especímenes, sin embargo, estos tienen la capacidad de resistir una porción de la fuerza máxima resistida conforme aumenta el desplazamiento; esta fuerza fue la resistencia friccional para que ocurriera el deslizamiento de las fibras de polipropileno en la matriz de concreto espumado. Al aumentar el porcentaje de fibra (Figuras 3.7c y 3.7d), es mayor la fuerza necesaria para que ocurra el desprendimiento y deslizamiento de las fibras en la matriz. Se puede incluso observar en la Figura 3.7d, que para la mezcla CP3 ya no existe una falla frágil en los especímenes.

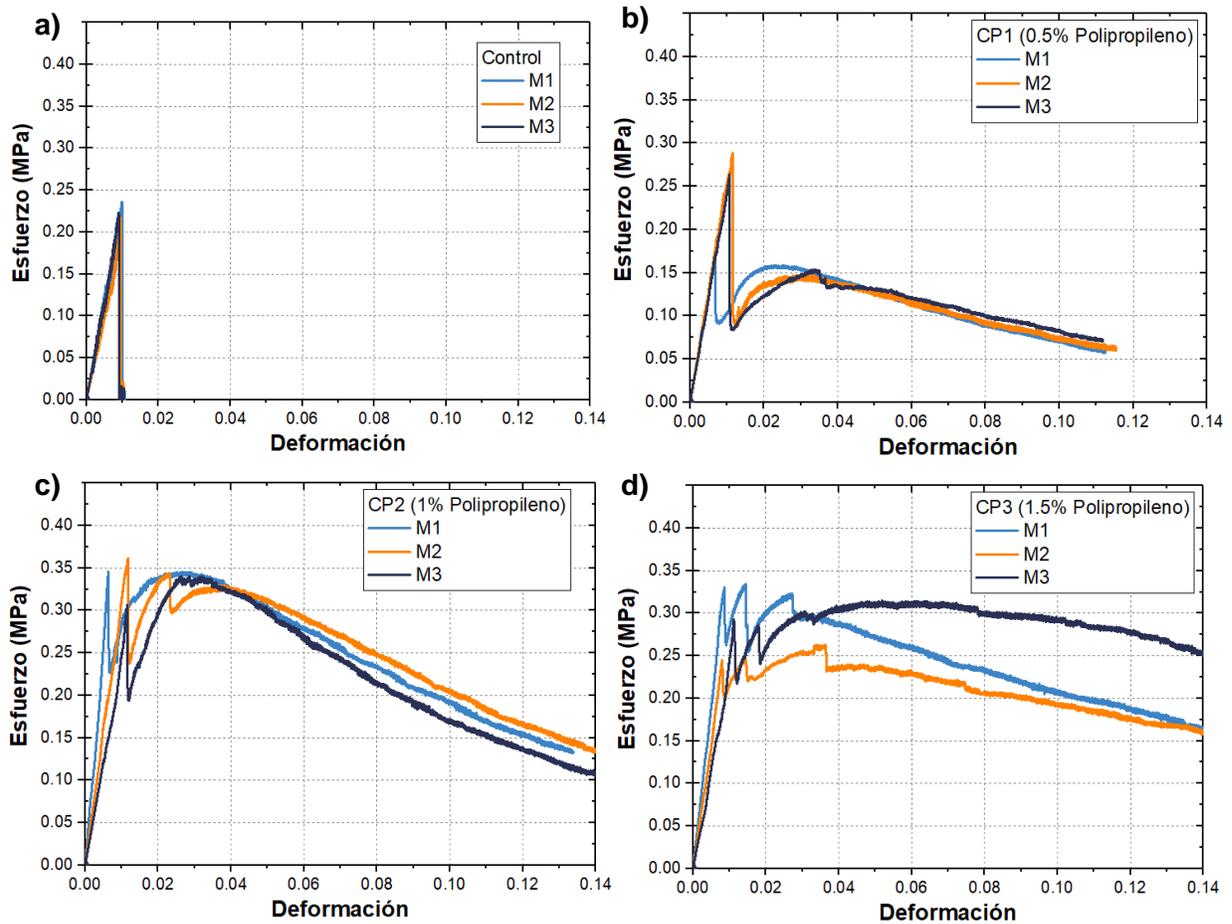


Figura 3.7. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de tensión de las mezclas reforzadas con fibra de polipropileno: a) Mezcla de control (Sin refuerzo de fibra), b) CP1 (Refuerzo de 0.5%), c) CP2 (Refuerzo de 1%), d) CP3 (Refuerzo de 1.5%).

En la Figura 3.8a se puede ver la falla frágil del concreto espumado sin refuerzo en donde después de llegar a la carga máxima, el material no es capaz de resistir más carga. Esto sucede habitualmente cuando el concreto sin refuerzo se somete a cargas de tensión o de flexión. Para el concreto espumado con refuerzo, se puede apreciar en la Figura 3.8b que después de la falla de la matriz, las fibras mantienen unido al espécimen ocasionando que se tenga un comportamiento plástico del material correspondiente a un efecto de Pullout entre la fibra y la matriz. Esto ocasiona un aumento en la tenacidad de las mezclas

reforzadas con fibra lo cual es muy importante para evitar una falla catastrófica cuando el material se encuentra en servicio.

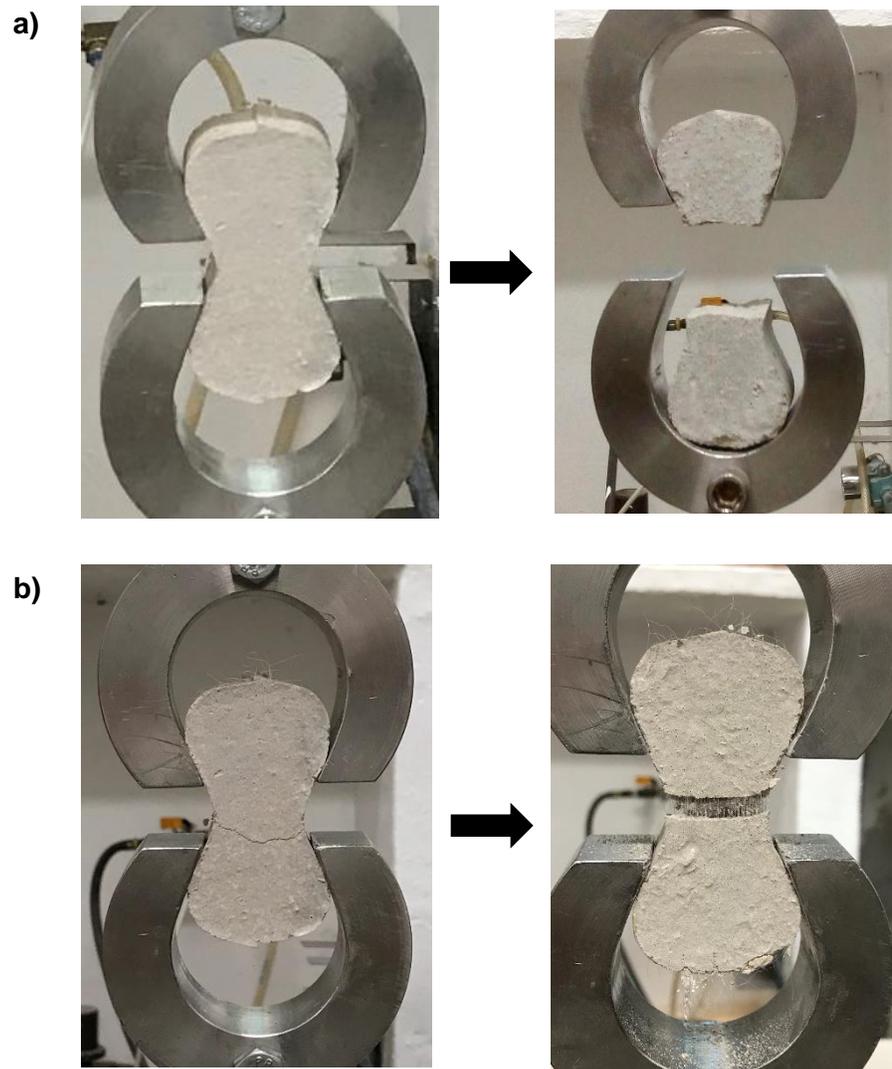


Figura 3.8. Comportamiento a tensión del concreto espumado: a) Mezcla de control (sin fibra), b) Mezcla con fibra de polipropileno CP2.

La Figura 3.9 muestra la comparación de la resistencia a la tensión entre las diferentes mezclas de concreto espumado reforzado con fibras de polipropileno. Se puede ver que la

resistencia a la tensión aumentó 51.5% y 22% para CP2 y CP3, respectivamente, en comparación con la mezcla de control.

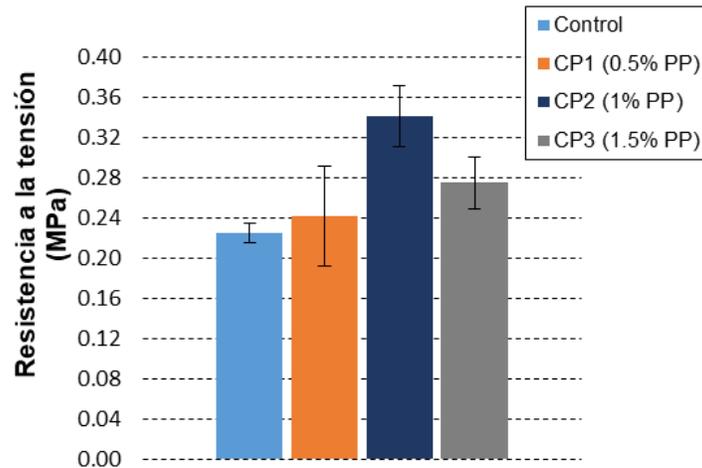


Figura 3.9. Resistencia a la tensión de las diferentes mezclas con refuerzo de polipropileno.

En la Figura 3.7d se puede observar que existe una variación en el comportamiento plástico a tensión en los especímenes de la mezcla CP3. La variación de este comportamiento puede ser atribuido a la cantidad de fibra en la mezcla (1.5%), lo que ocasionó que disminuyera la dispersión homogénea de la fibra en la matriz de concreto espumado. Esto a su vez ocasionó que las fibras se dispersaran de manera diferente en los especímenes ocasionando la amplia variación del comportamiento plástico a tensión. Es importante destacar que, con este refuerzo de fibra, los especímenes no tuvieron una falla localizada, es decir, se fracturaron en varios lugares diferentes a lo largo de la sección longitudinal.

A partir de la caracterización mecánica de las mezclas con polipropileno, es evidente que la mezcla CP2 fue la que mostró el mejor desempeño. Por esta razón, se decidió utilizar esta mezcla como uno de los núcleos de los compuestos tipo sándwich.

3.1.4 Prueba de tensión del concreto espumado reforzado con fibra de henequén

La Tabla 3.5 muestra los resultados de las pruebas de tensión de las mezclas de concreto espumado con refuerzo de fibra de henequén sin tratamiento y con tratamiento químico. Se presentan los resultados obtenidos del módulo elástico, de la resistencia a la tensión y de la deformación a la cedencia donde sucede el esfuerzo a la cedencia. En todos los casos hubo un aumento en la resistencia a la tensión en comparación con la mezcla de control. El valor más alto fue el de la mezcla CHQ2 (0.447 MPa) y el valor más bajo fue el de la mezcla CHQ1 (0.253 MPa).

Tabla 3.5. Resultados de las pruebas de tensión de las mezclas con refuerzo de henequén.

Mezcla	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación a la cedencia (mm/mm)
Control	19.81 ± 2.5	0.225 ± 0.01	0.01 ± 0.001
CH1 (0.5%)	27.96 ± 3.53	0.283 ± 0.025	0.011 ± 0.001
CH2 (1%)	20.69 ± 2.42	0.352 ± 0.03	0.019 ± 0.003
CH3 (1.5%)	23.31 ± 4.09	0.344 ± 0.037	0.013 ± 0.002
CHQ1 (0.5%)	20 ± 1.76	0.253 ± 0.021	0.013 ± 0.002
CHQ2 (1%)	25.95 ± 3	0.447 ± 0.025	0.016 ± 0.003
CHQ3 (1.5%)	23.51 ± 1.90	0.394 ± 0.019	0.016 ± 0.002

En la Figuras 3.10 y 3.11 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las mezclas con refuerzo de henequén sin tratamiento y con tratamiento químico, respectivamente. Para todos los casos se observó un comportamiento muy similar al obtenido en las mezclas con refuerzo de polipropileno. En todas las curvas de las mezclas reforzadas con fibra se presenta un comportamiento típico del concreto fibroreforzado [67],

en donde se observa un comportamiento elástico lineal seguido de una caída en el esfuerzo resistido que corresponde al primer agrietamiento y falla de la matriz. Esta caída en el esfuerzo es menor mientras más volumen de fibra se utilice. Posteriormente, se observa una región correspondiente al desprendimiento de la unión fibra-matriz, acompañada por una resistencia friccional al deslizamiento de las fibras en la matriz de concreto espumado. En las Figuras 3.10c y 3.10d se observa que hay una amplia variación en el comportamiento después de la falla de los especímenes. Esta diferencia puede deberse a que no hubo una muy buena dispersión de las fibras en la matriz de algunos de los especímenes.

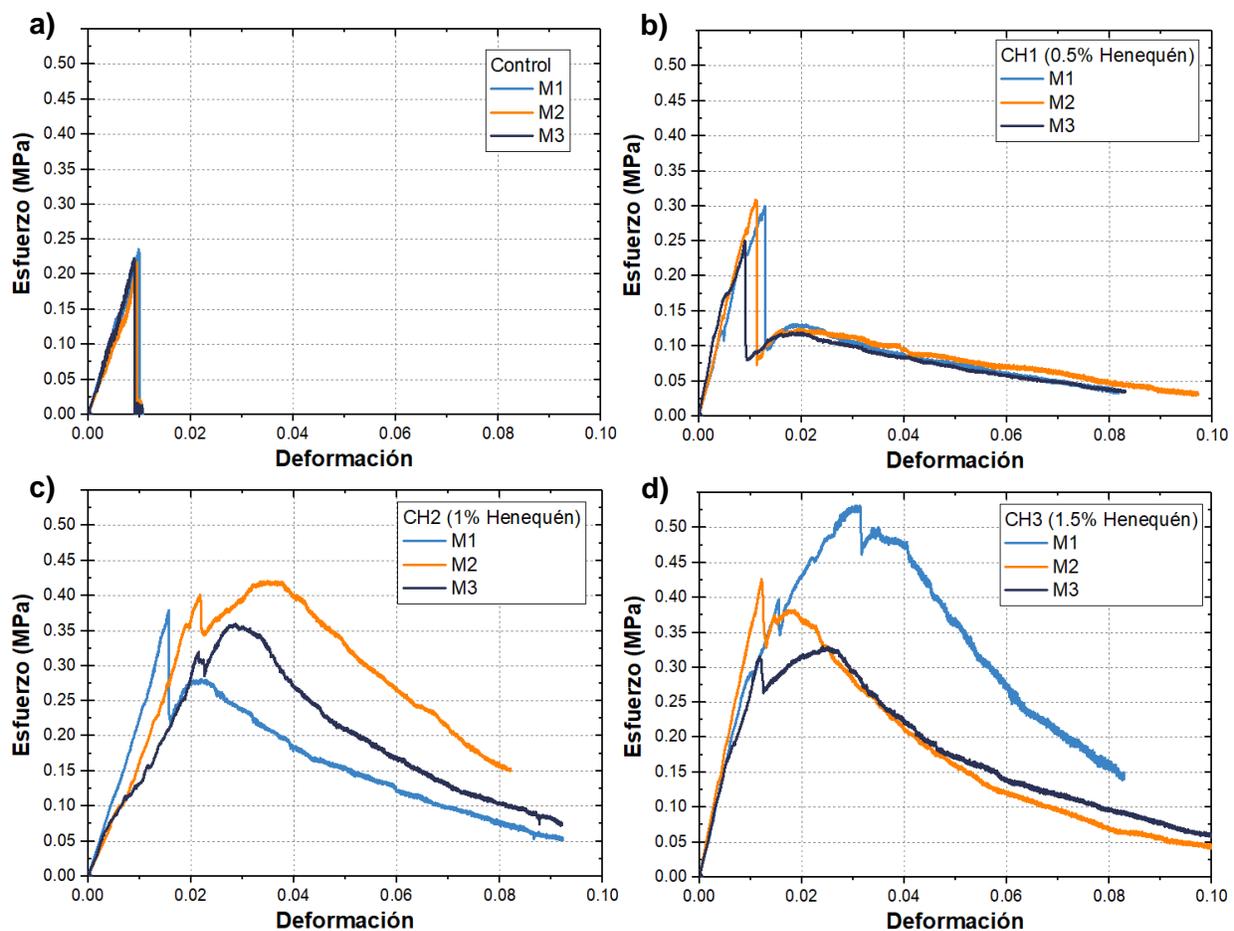


Figura 3.10. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de tensión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin tratamiento: a) Mezcla de control, b) CH1 (Refuerzo de 0.5%), c) CH2 (Refuerzo de 1%), d) CH3 (Refuerzo de 1.5%).

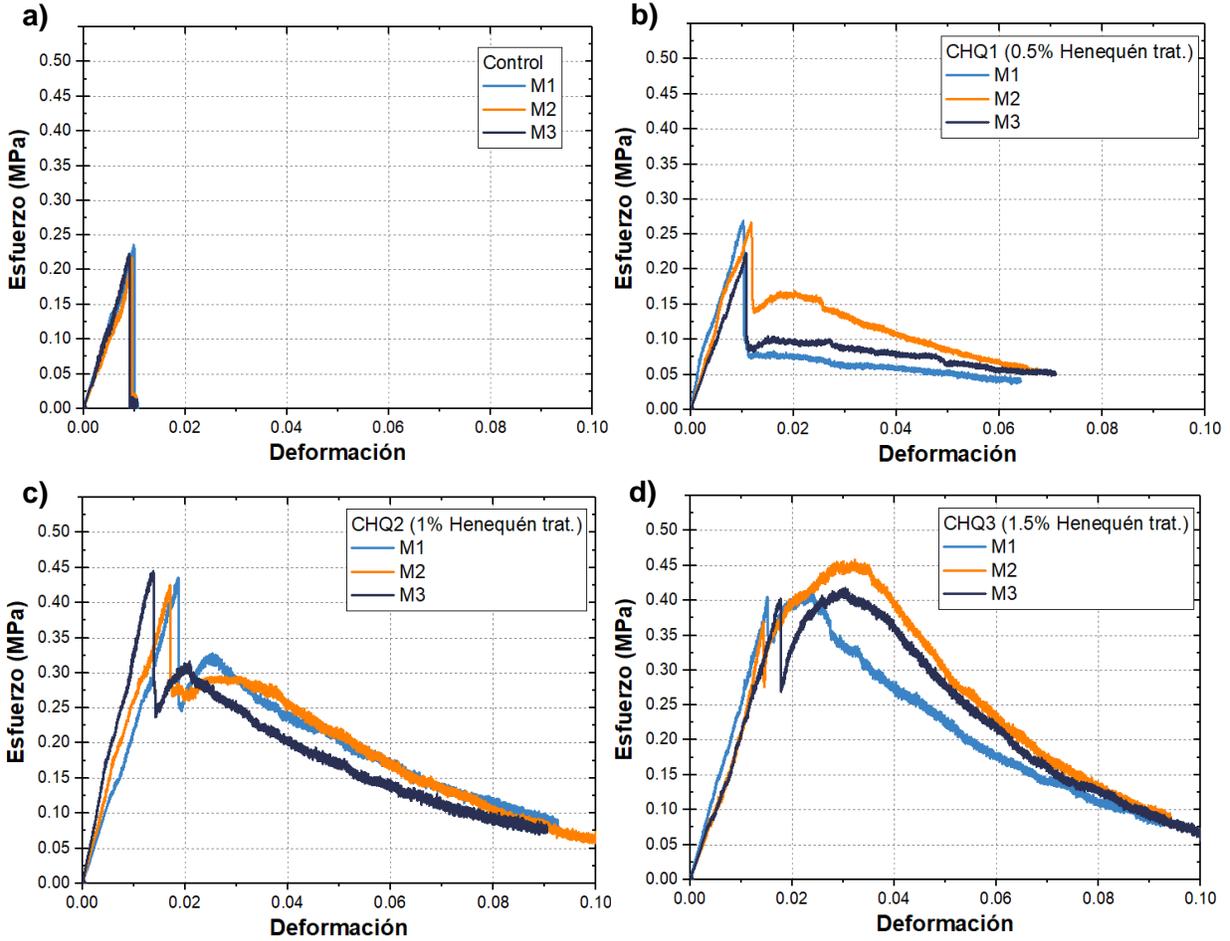


Figura 3.11. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de tensión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén con tratamiento (Henequén trat.): a) Mezcla de control, b) CHQ1 (Refuerzo de 0.5%), c) CHQ2 (Refuerzo de 1%), d) CHQ3 (Refuerzo de 1.5%).

La Figura 3.12 muestra una comparación de la resistencia a la tensión de las diferentes mezclas con refuerzo de henequén sin y con tratamiento. Se puede observar que la mezcla CHQ2, correspondiente al refuerzo con 1% de henequén con tratamiento alcalino, presentó la mejor resistencia a la tensión, aumentando en un 98.6% en comparación con el concreto espumado sin refuerzo. Se puede observar en la Figura 3.12 que a partir del refuerzo con el 1%, las mezclas con fibras con tratamiento alcalino presentaron un mejor comportamiento a tensión en comparación con la mezcla de control y las mezclas con fibra sin tratamiento.

Esto puede atribuirse al hecho de que el tratamiento con hidróxido de sodio elimina parcialmente la hemicelulosa y la lignina presentes en la superficie, produciendo una fibra con una superficie más rugosa [32, 68], y en consecuencia, se crea un mejor anclaje mecánico entre la fibra y la matriz. Con base en los datos obtenidos, la mezcla CHQ2 fue la que mejor desempeño tuvo a compresión y a tensión, por lo que se decidió utilizar esta mezcla como uno de los núcleos de los materiales compuestos tipo sándwich.

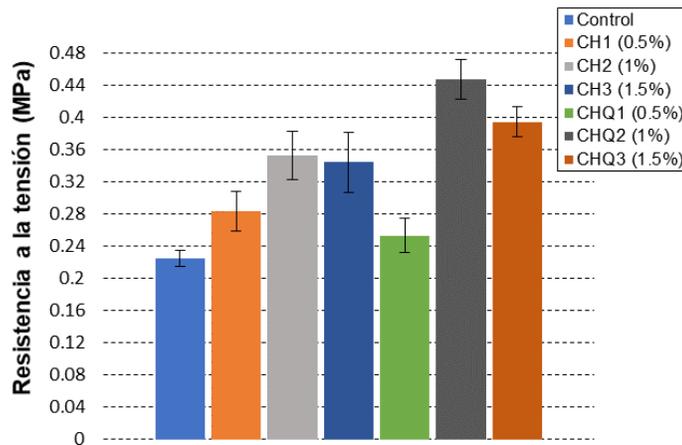


Figura 3.12. Comparación de la resistencia a la compresión de las mezclas reforzadas con fibra de henequén sin y con tratamiento.

Para que un refuerzo con fibras sea efectivo en un concreto espumado sometido a cargas de tensión, este debe de aumentar la resistencia a la tensión y la tenacidad después del agrietamiento del material compuesto [67, 69]. Esto sucede por medio de la absorción de energía relacionada con los mecanismos de desunión y extracción de las fibras que unen las grietas. Los resultados obtenidos tanto para el refuerzo con fibra de polipropileno como para el refuerzo con fibra de henequén concuerdan con estos mecanismos, lo cual sugiere que las fibras en ambos casos, reforzaron de manera efectiva a la matriz de concreto espumado.

3.2 Caracterización microscópica y distribución de diámetros de celda en el concreto espumado

Para analizar el tamaño de celda se optó por seguir un procedimiento común empleado en la literatura [9, 70, 71], en donde, las imágenes tomadas con el microscopio se analizaron en el programa de procesamiento de imagen digital *ImageJ*. Con el programa *ImageJ* se midió el área total de cada celda y se obtuvo el diámetro equivalente con el empleo de la de la siguiente ecuación:

$$d_e = \frac{\sqrt{4 \times A_m}}{\pi} \quad (3.1)$$

en donde d_e es el diámetro equivalente y A_m es el área medida con el empleo del software de procesamiento de imágenes. El diámetro equivalente proporciona una manera fácil de estimar el diámetro de celda, asumiendo que la celda es de forma esférica [72]. En total se hicieron 35 mediciones de cada imagen para obtener un total de 140 datos de cada mezcla con lo cual se obtuvieron los diámetros promedio y los histogramas de la distribución de diámetros.

En la Figuras 3.13 y 3.14 se muestran las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido de las mezclas elaboradas. Se puede ver que para todas las mezclas de concreto espumado se obtuvo una estructura y tamaño de celda similar, lo cual corrobora el hecho de que el tamaño de celda depende principalmente de la densidad seca objetivo, es decir, de la cantidad de espuma agregada a la mezcla.

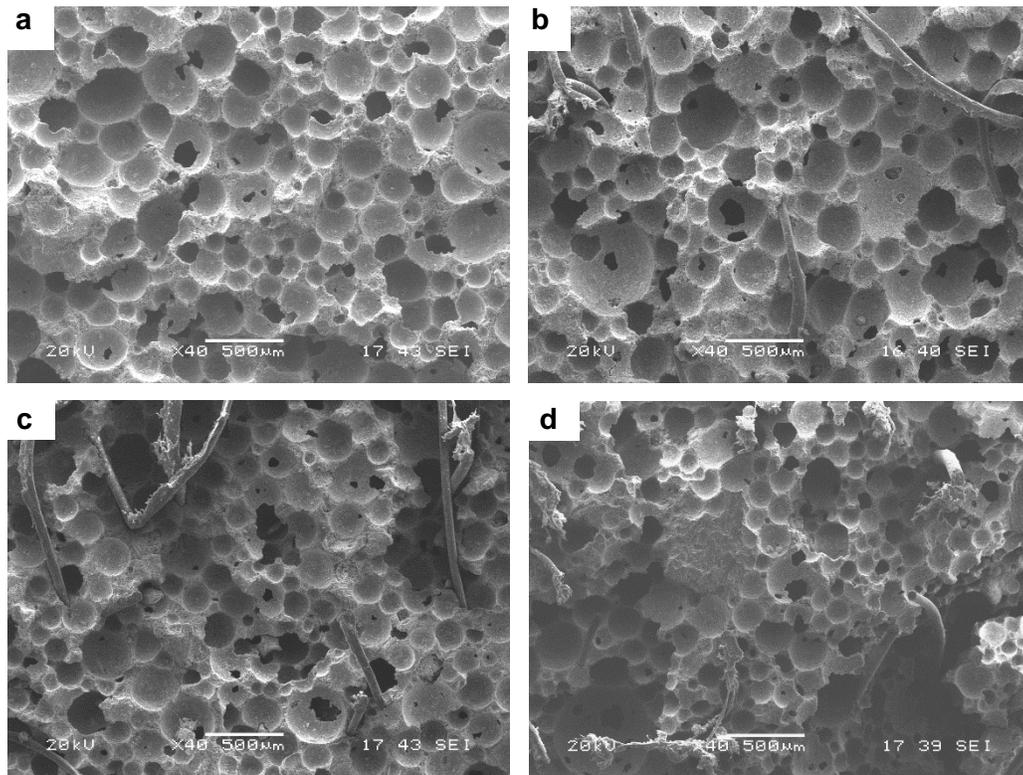


Figura 3.13. Micrografías de las mezclas realizadas tomadas con el SEM: a) Control, b) CP1, c) CP2, d) CP3.

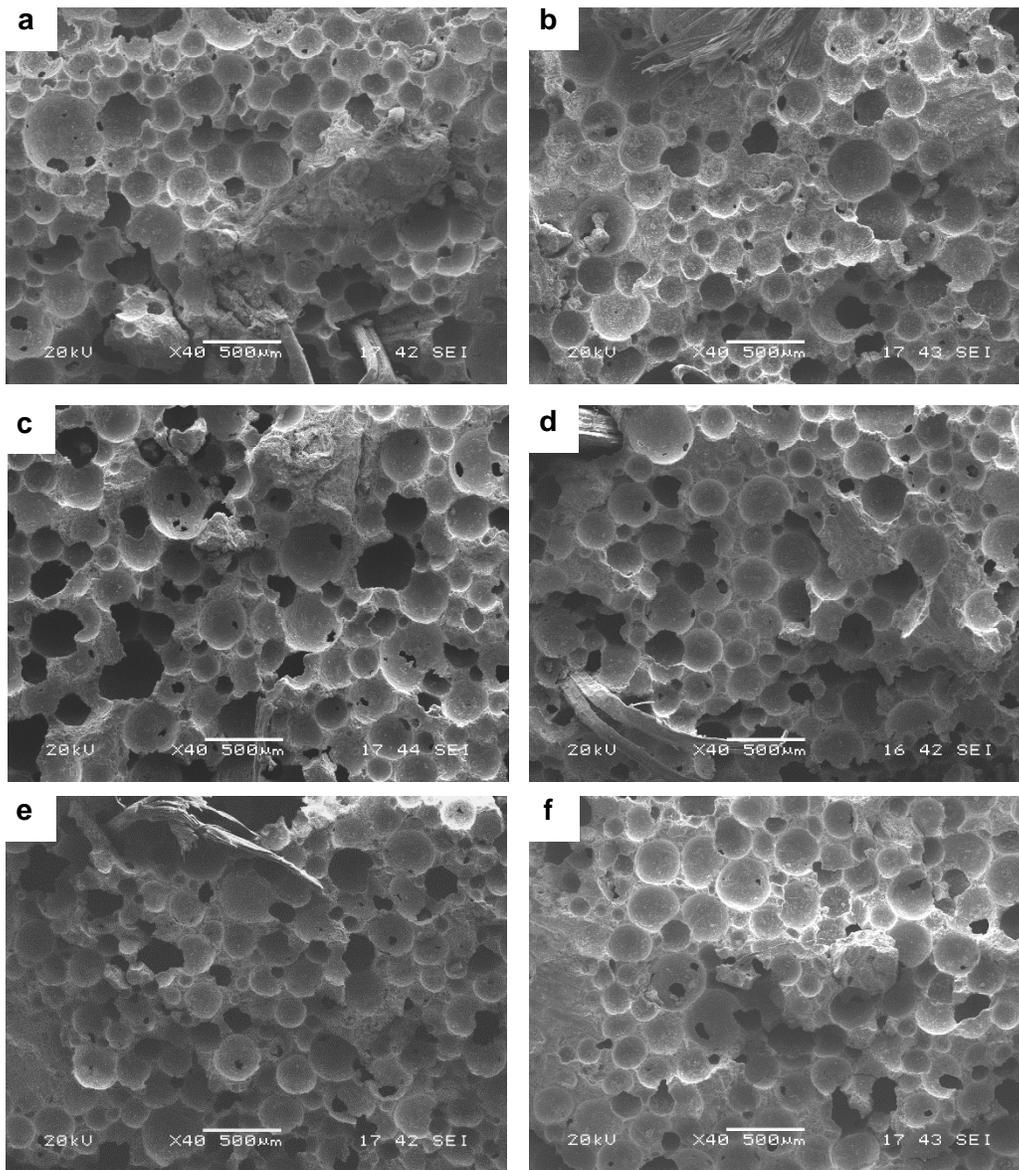


Figura 3.14. Micrografías de las mezclas realizadas tomadas con el SEM: a) CH1, b) CH2, c) CH3, d) CHQ1, e) CHQ2, f) CHQ3.

En la Tabla 3.6 se presentan los diámetros promedios que se obtuvieron de cada mezcla de concreto espumado. Se observa que no hay una variación muy notable en el diámetro equivalente, en donde el diámetro promedio menor es de 214.03 micrómetros

correspondiente a la mezcla CP3 y el diámetro promedio mayor de 235.45 micrómetros corresponde a la mezcla CH3.

Tabla 3.6 Diámetros promedios de las mezclas.

Mezcla	Diámetro equivalente promedio (μm)
Control	223.69 \pm 77.37
CP1 (0.5% PP)	224.37 \pm 68.84
CP2 (1% PP)	216.68 \pm 61.99
CP3 (1.5% PP)	214.03 \pm 60.59
CH1 (0.5% Henequén)	229.30 \pm 73.66
CH2 (1% Henequén)	226.12 \pm 71.51
CH3 (1.5% Henequén)	235.45 \pm 73.64
CHQ1 (0.5% Henequén trat.)	221.30 \pm 67.44
CHQ2 (1% Henequén trat.)	226.47 \pm 66.90
CHQ3 (1.5% Henequén trat.)	228.99 \pm 78.61

En las Figuras 3.15 y 3.16 se muestran los histogramas de la distribución de diámetros de cada mezcla. Se puede ver que el rango de diámetros más frecuentes se encuentra entre 150-250 micrómetros para todos los casos. También se puede observar que en algunas mezclas se presentaron diámetros superiores a 400 μm , aunque la frecuencia de su aparición fue muy baja. El hecho de que existan celdas de mayor tamaño puede deberse principalmente a la fusión o superposición de las celdas más pequeñas [9]. Con los resultados obtenidos, se puede llegar a la conclusión de que la inclusión de fibras, ya sean de henequén o de polipropileno, no modifica considerablemente la estructura celular del concreto debido a que se obtuvieron tamaños de celda muy similares para todas las mezclas.

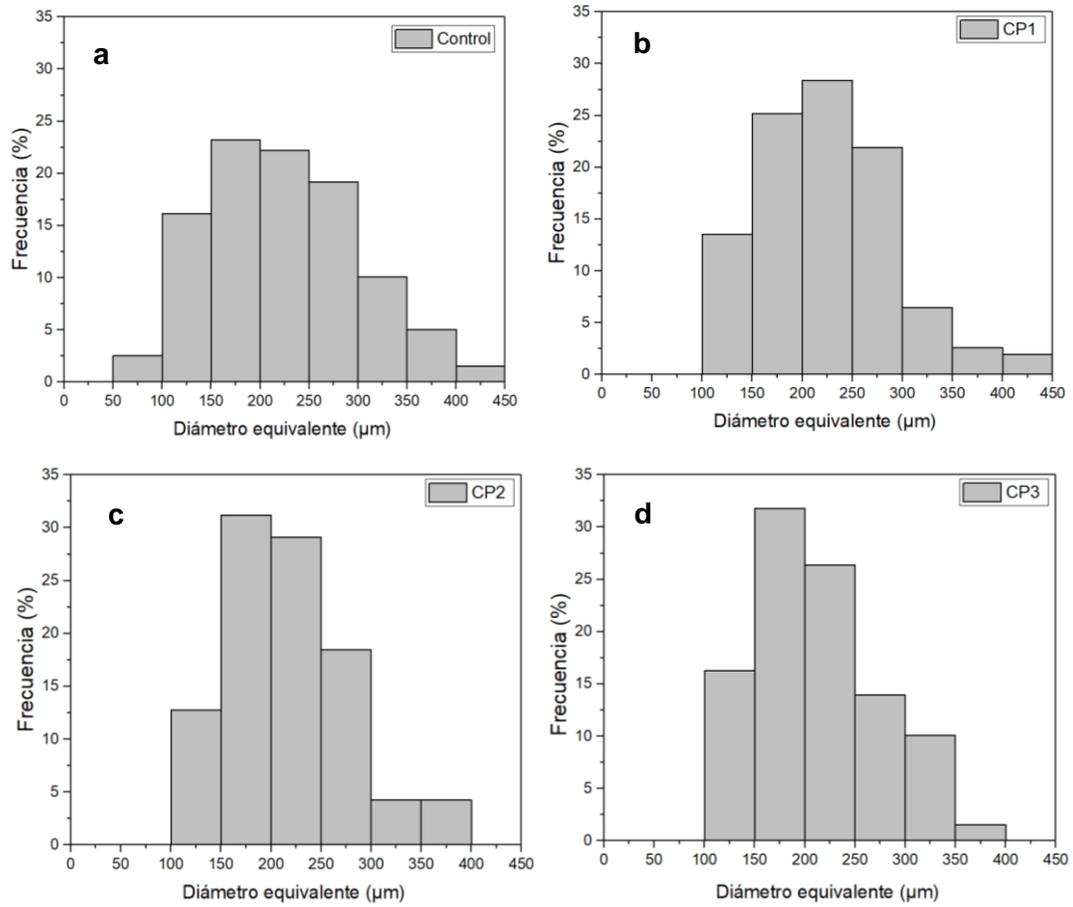


Figura 3.15. Histogramas de la distribución de diámetros de las mezclas realizadas: a) Control, b) CP1, c) CP2, d) CP3.

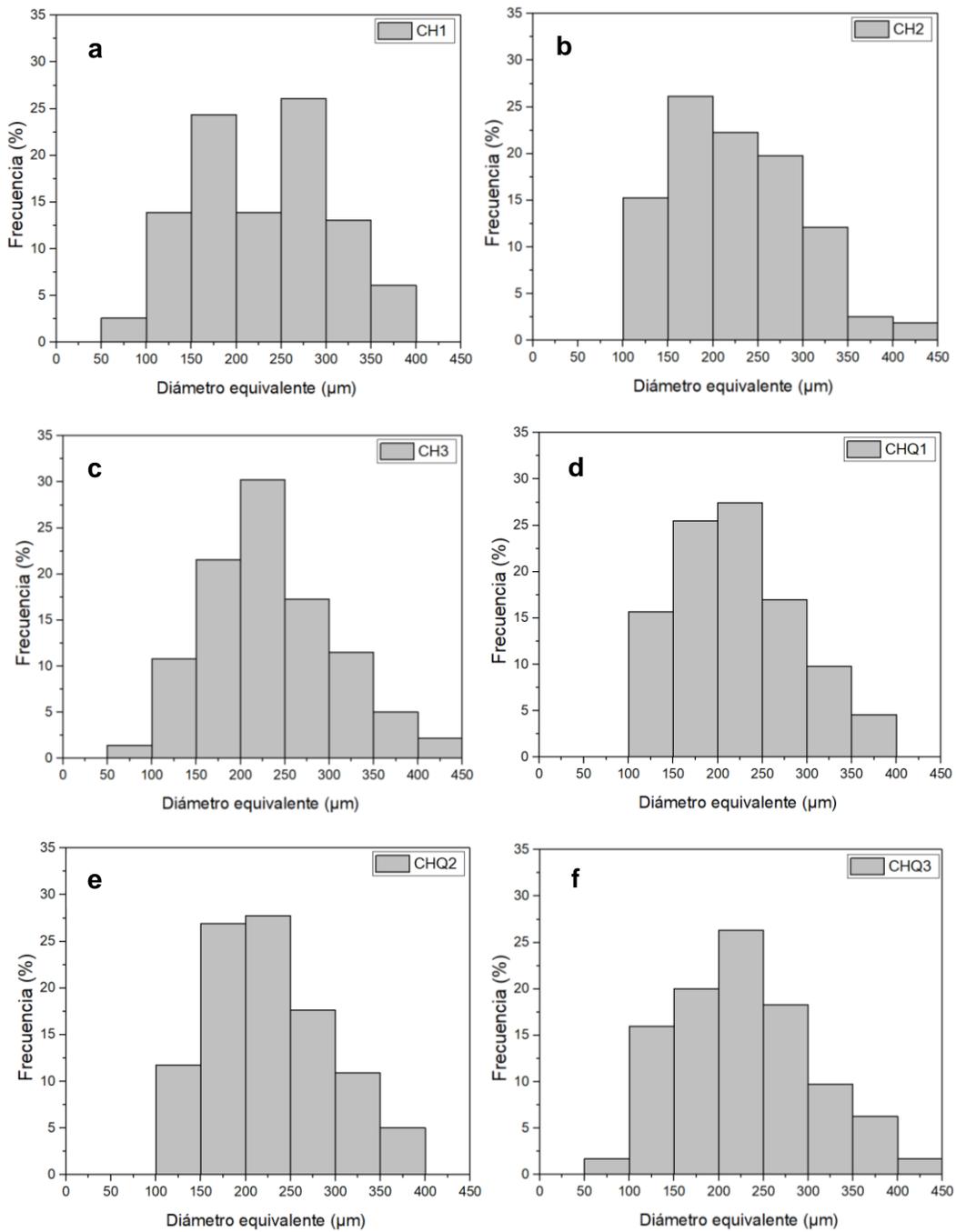


Figura 3.16. Histogramas de la distribución de diámetros de las mezclas realizadas: a) CH1, b) CH2, c) CH3, d) CHQ1, e) CHQ2, f) CHQ3.

3.3 Prueba de Pullout

3.4.1 Prueba de Pullout de concreto espumado-fibra de henequén

Para cada longitud embebida (Le) que se utilizó para las pruebas de Pullout de la fibra de henequén en la matriz de concreto espumado, se elaboraron un total de 10 probetas, sin embargo, debido a la naturaleza de la prueba, al tipo de matriz, a la longitud embebida y al tipo de fibra, únicamente fue posible ensayar un número limitado de probetas debido a que varias de las probetas presentaron una adherencia pobre entre la fibra y la matriz por lo que fallaron prematuramente antes o al principio de la prueba. En la Figura 3.17 se presenta el comportamiento de Pullout de las fibras de henequén (sin o con tratamiento) embebidas a diferentes Le en una matriz de concreto espumado diseñado con una densidad seca objetivo de 700 kg/m^3 . En la Figura 3.17a, correspondiente a la Le de 5 mm de las fibras sin tratamiento, únicamente fue posible ensayar 2 probetas. Esto se atribuye a la falta de adherencia que se presentó entre la fibra de henequén sin tratamiento y el concreto espumado. Al realizar el tratamiento alcalino a las fibras de henequén (Figura 3.17b), se puede ver que aumenta el número de probetas que fue posible ensayar y que no fallaron, ya sea durante la colocación de estas para el ensayo o durante el desmolde. Para una Le de 8 mm (Figura 3.17c y 3.17d) y para una Le de 10 mm (Figura 3.17e y 3.17f) se puede apreciar un comportamiento más uniforme para la fibra con tratamiento alcalino en comparación con las probetas con fibra sin tratamiento, lo cual es atribuido al aumento de la adherencia debido al tratamiento y a una mayor longitud embebida. Para ambos casos existe un comportamiento de Pullout común encontrado en la literatura [57], en donde existe un rango elástico lineal con un aumento rápido de la carga, y posterior a la primera caída en la fuerza, se aprecia un régimen correspondiente al desprendimiento de la unión fibra-matriz, seguido por deslizamiento por fricción, en donde se puede presentar un aumento en la fuerza requerida para la extracción de la fibra. Esto se puede ver a más detalle en las curvas con Le de 10 mm (Figura 3.17f).

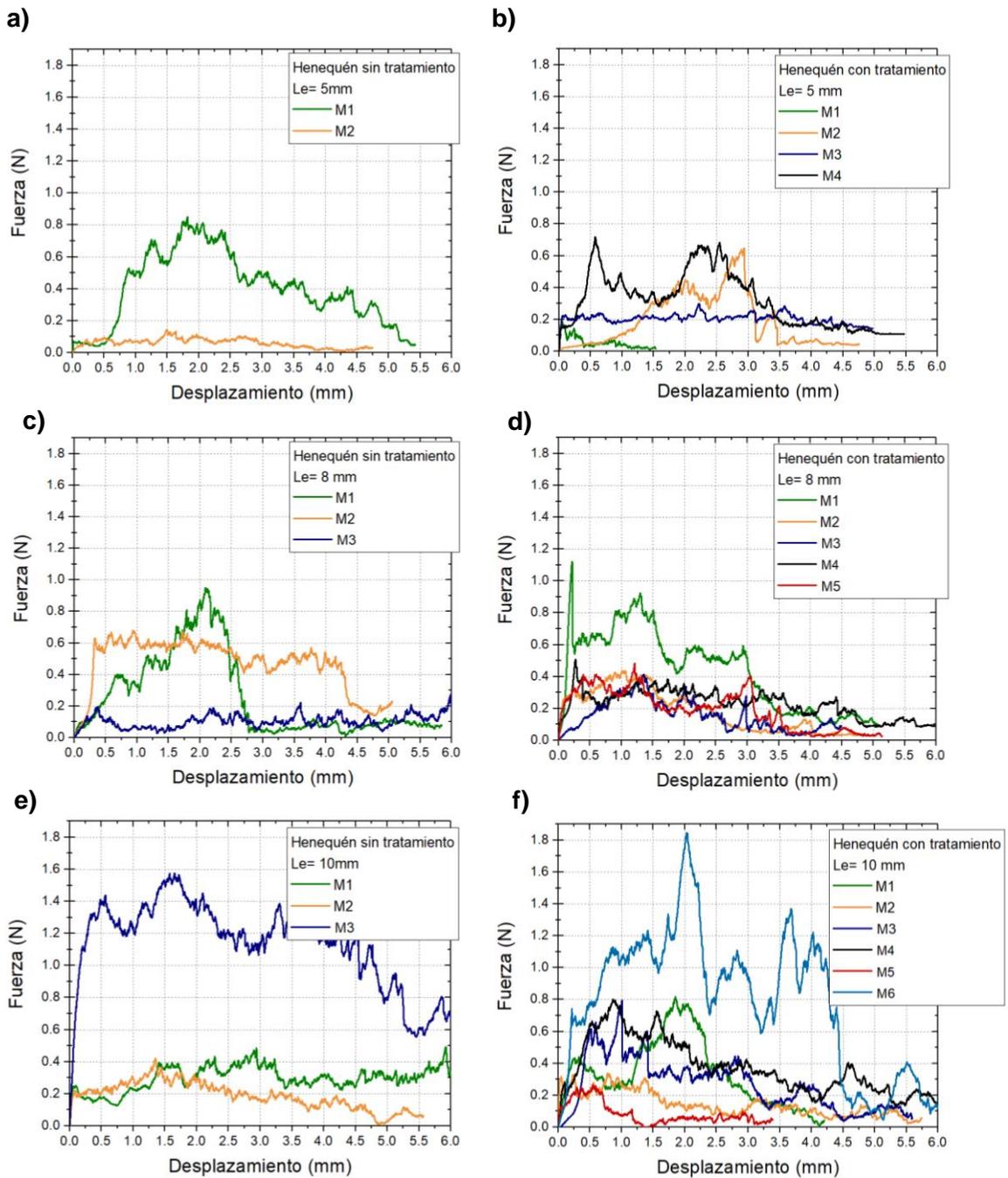


Figura 3.17. Curvas fuerza-desplazamiento de las pruebas de Pullout de la fibra de henequén a diferentes longitudes embebidas (L_e): a) $L_e=5$ mm Fibra de henequén sin tratamiento, b) $L_e=5$ mm Fibra de henequén con tratamiento, c) $L_e=8$ mm Fibra de henequén sin tratamiento, d) $L_e=8$ mm Fibra de henequén con tratamiento, e) $L_e=10$ mm Fibra de henequén sin tratamiento, f) $L_e=10$ mm Fibra de henequén con tratamiento.

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de Pullout. En donde P_i corresponde a la fuerza necesaria para que ocurra el desprendimiento fibra-matriz. Al esfuerzo en este punto se le denominó resistencia a cortante interfacial (τ_i) (Ver Sección 2.1.6). Para la fibra de henequén sin tratamiento a una L_e de 5 mm no se pudieron obtener resultados estadísticos debido a falta de especímenes. En la Tabla 3.7 se puede ver una amplia variación de la desviación estándar de los resultados, lo cual es atribuido a la naturaleza de la prueba y a la estructura celular de concreto, la cual resulta en menos zonas de anclaje en la matriz debido a los huecos dentro de la misma. En la literatura se ha reportado una variación similar en el comportamiento de las pruebas de Pullout con matriz de concreto y fibra natural de sisal [57] y de yute [58].

Tabla 3.7. Resultados de las pruebas de Pullout de la fibra de henequén sin y con tratamiento.

Fibra de Henequén	L_e (mm)	Diámetro promedio (mm)	P_i (N)	τ_i (MPa)
Sin tratamiento	5	0.288	$0.08 \pm 0.011^*$	$0.018 \pm 0.003^*$
Con tratamiento	5	0.256	0.365 ± 0.239	0.091 ± 0.06
Sin tratamiento	8	0.288	0.411 ± 0.223	0.057 ± 0.031
Con tratamiento	8	0.256	0.556 ± 0.315	0.087 ± 0.05
Sin tratamiento	10	0.288	0.601 ± 0.629	0.066 ± 0.069
Con tratamiento	10	0.256	0.445 ± 0.197	0.056 ± 0.025

* Únicamente se utilizaron dos probetas para la obtención de los resultados.

3.4.2 Prueba de Pullout de concreto espumado-fibra de polipropileno

Para las pruebas de Pullout con fibra de polipropileno, se decidió aumentar la velocidad de la prueba a 20 mm/min, debido a que en pruebas preliminares a 1 mm/min, los datos obtenidos correspondían a un comportamiento a tensión de la fibra [73], en lugar de un comportamiento correspondiente a la extracción por Pullout. Este aumento en la velocidad de prueba se realizó con base en la literatura [74], para aumentar la resistencia de la fibra y su módulo elástico para favorecer la extracción de esta en la prueba de Pullout. Para esta investigación, se utilizaron fibras de polipropileno comerciales con una longitud total de 19 mm por lo que se presentaron problemas para la elaboración de las probetas con una L_e de 8 mm y 10 mm. Estos problemas repercutieron en la cantidad de probetas obtenidas para las pruebas. En la Figura 3.18 se presenta el comportamiento de Pullout de la fibra de polipropileno embebida a diferentes longitudes en la matriz de concreto espumado. La extracción completa de la fibra generalmente tuvo lugar en dos etapas: primero, la separación de la fibra ocurre a lo largo de toda la longitud embebida, y segundo, se observa un comportamiento de fricción durante la extracción (Figura 3.18a y 3.18b). La contribución de la fluencia de la fibra de polipropileno también es notable ya que la extracción completa de la fibra ocurrió a desplazamientos superiores de los L_e utilizados [75], como se puede ver en todos los casos. La prueba de Pullout a una L_e de 10 mm no fue satisfactoria debido a que se obtuvo una curva que corresponde más bien a un comportamiento a tensión de la fibra, lo cual resultó incluso, en la fractura de la misma. Los resultados de las pruebas se presentan en la Tabla 3.8.

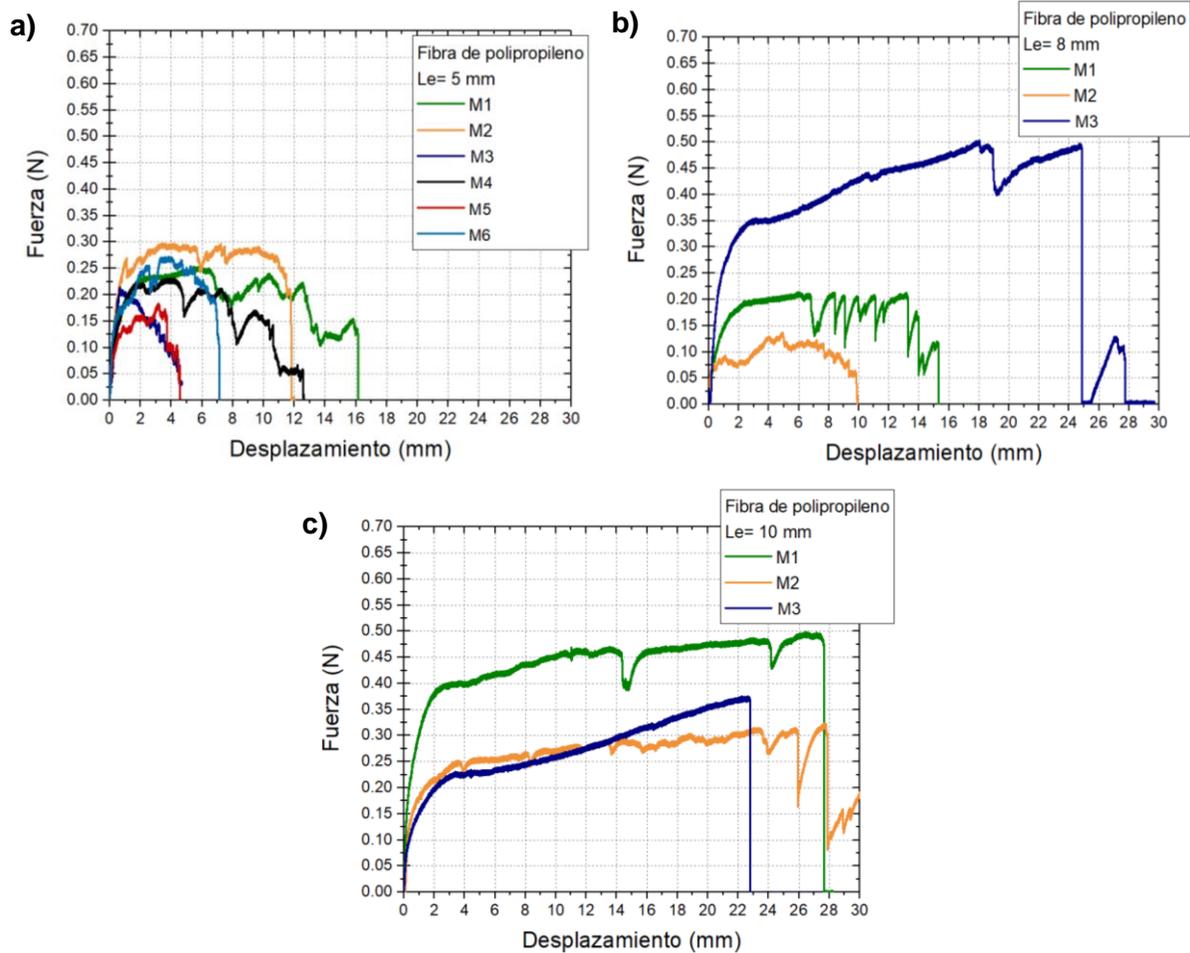


Figura 3.18. Curvas fuerza-desplazamiento de las pruebas de Pullout de fibra de polipropileno a diferentes longitudes embebidas (Le): a) $Le=5$ mm, b) $Le=8$ mm, c) $Le=10$ mm

Tabla 3.8. Resultados de las pruebas de Pullout de la fibra de polipropileno.

Fibra	Le (mm)	Diámetro promedio (mm)	P_i (N)	τ_i (MPa)
Polipropileno	5	0.059	0.228 ± 0.039	0.248 ± 0.043
Polipropileno	8	0.059	0.273 ± 0.183	0.185 ± 0.124
Polipropileno	10	0.059	-	-

3.4 Caracterización mecánica a tensión de lámina de acero Ternium TR-101

Los curvas esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril obtenidas a partir de las curvas fuerza-desplazamiento, se convirtieron a esfuerzo real y deformación real (logarítmica) por medio del empleo de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_t = \sigma_n(1 + \varepsilon_n) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (3.3)$$

En donde, σ_t es el esfuerzo real, σ_n es el esfuerzo ingenieril, ε_t es la deformación real o deformación logarítmica y ε_n es la deformación ingenieril.

En la Tabla 3.9 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de tensión de la lámina de acero. Los resultados presentados son las propiedades reales (esfuerzo y deformación reales) del material.

Tabla 3.9. Resultados obtenidos de la prueba de tensión de la lámina de acero.

Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo a la cedencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación a la rotura (mm/mm)
200	282.65 ± 12.53	438.33 ± 18.81	0.299 ± 0.018

En la Figura 3.19 se muestra una de las curvas esfuerzo real–deformación real de las probetas de lámina de acero. Únicamente se presenta la curva de una muestra, la cual representa el comportamiento típico que se obtuvo. Esta misma curva se empleó para configurar el comportamiento plástico del acero en la simulación numérica (Sección 3.6).

En la curva se pueden observar 3 partes, un comportamiento elástico lineal a bajas deformaciones, fluencia a un esfuerzo de 300 MPa aproximadamente, y a partir de una deformación aproximada de 0.075, un endurecimiento por deformación. El punto de cedencia se obtuvo a partir del método de desviación del 0.2%, especificado en la norma ASTM E8 y en la literatura [76]. El material con el cual está fabricado la lámina Ternium TR-101 tiene un comportamiento a tensión común del acero, el cual presenta un comportamiento dúctil [76].

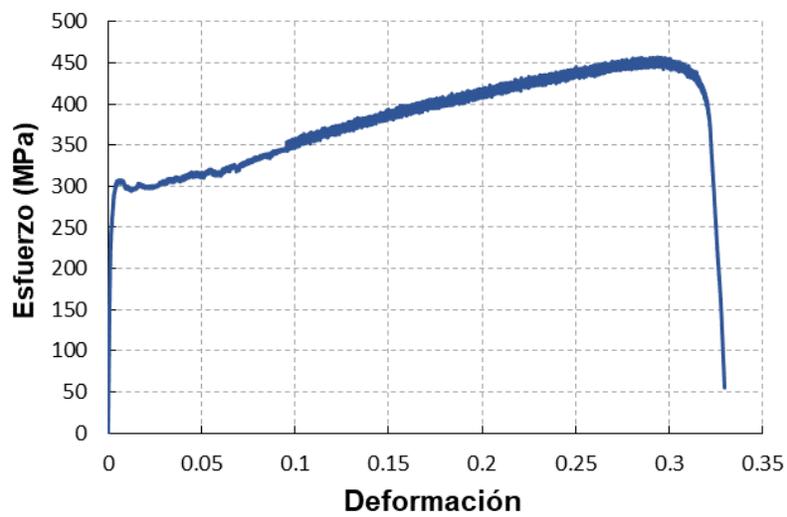


Figura 3.19. Curva esfuerzo real-deformación real de la lámina de acero.

3.5 Prueba de flexión a 4 puntos de los materiales compuestos tipo sándwich con núcleo de concreto espumado

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de flexión a 4 puntos de los materiales compuestos tipo sándwich con núcleo de concreto espumado sin refuerzo (Paneles PC), con núcleo de concreto espumado con refuerzo del 1% de fibras de polipropileno (Paneles PP) y con núcleo de concreto espumado con refuerzo del 1% de fibras de henequén con tratamiento químico (Paneles PH). Se presentan los promedios y las desviaciones estándar de la carga a la falla en N, del desplazamiento en la falla en mm, de la carga máxima en N, del desplazamiento en la carga máxima en mm, y de la carga resistida a los 25 mm de deflexión en N. Los paneles con el núcleo con refuerzo del 1% de henequén fueron los que resistieron menos antes de la falla, mientras que los paneles con refuerzo de polipropileno fueron los que más resistieron. En general, todos los paneles presentaron los mismos tipos de fallas, es decir, por cortante del núcleo, de tensión en el centro de los especímenes, falla por adherencia, arrugamiento y deslizamiento de las caras. El agrietamiento de los paneles con el núcleo sin refuerzo fue más crítico en comparación con los paneles con refuerzo de fibra.

En la Figura 3.20 se muestran las curvas del comportamiento a flexión que se obtuvieron de todos los paneles tipo sándwich, y en la Figura 3.21 se muestran los modos de falla observados en los paneles durante las pruebas. En todos los casos, al inicio de la prueba hubo un régimen lineal-elástico. Esta zona lineal corresponde al desempeño en conjunto a tensión de la cara inferior, a compresión de la cara superior y a la transferencia de esfuerzos por medio del desempeño a cortante del núcleo. Seguido a esto, hubo una caída en la fuerza soportada correspondiente al desprendimiento en algunas zonas de la unión cara-núcleo (Figura 3.21a). Posteriormente, se puede ver una zona en las curvas en donde hay un aumento de la fuerza seguido por caída de la misma; esta zona corresponde tanto a la falla en la unión de los materiales y al inicio de la falla por cortante del núcleo (Figura 3.21b). Posteriormente, se puede ver que en todos los casos existe un aumento en la carga soportada, lo cual resulta en un aparente endurecimiento del compuesto. Esto es atribuido principalmente a la transferencia de la resistencia a cortante del núcleo a los sujetadores [4] De igual forma, en esta zona, y hasta llegar a la carga máxima de los paneles, se

presenta el agrietamiento por tensión (Figura 3.21c y Figura 3.21d). Después de esta región, comienza el arrugamiento por compresión de la cara superior de los paneles (Figura 3.21e). En las curvas fuerza-desplazamiento se observa una zona de un aparente comportamiento perfectamente plástico, en la cual existe una degradación paulatina de la integridad estructural del panel y un deslizamiento de las caras (Figura 3.21f). Esto conduce a una caída gradual de la fuerza resistida conforme aumentó el desplazamiento, lo cual es deseable ya que con este comportamiento se evita una falla catastrófica y repentina durante la vida útil del material.

Tabla 3.10. Resultados de la prueba de flexión a 4 puntos de los paneles tipo sándwich.

Mezcla	Carga a la falla (kN)	Desplazamiento en la falla (mm)	Carga máxima (kN)	Desplazamiento en la carga máxima (mm)	Carga a los 25 mm de desplazamiento (kN)
PC	6.43 ± 0.50	3.37 ± 1.18	8.55 ± 0.22	13.19 ± 0.13	8.03 ± 0.21
PP	7.33 ± 1.59	2.82 ± 0.23	10.25 ± 0.41	14.16 ± 0.36	9.30 ± 0.33
PH	6.17 ± 1	2.36 ± 0.14	9.25 ± 0.23	13.1 ± 0.42	8.80 ± 0.13

En la Figura 3.22 se muestra la comparación entre las cargas soportadas por todos los tipos de paneles diseñados. La Figura 3.22a presenta la comparación de la primera caída en la fuerza resistida (carga a la falla) correspondiente al desprendimiento cara/núcleo y al inicio del agrietamiento por cortante del núcleo. La Figura 3.22b muestra la comparación de las cargas máximas resistidas por los diferentes paneles. Se puede ver en la Figura 3.22a que el promedio de la carga a la falla de los paneles PP aumentó 13% con respecto a los paneles PC, mientras que los paneles PH con refuerzo de henequén con tratamiento disminuyó un 4%. La desviación estándar para los paneles con refuerzo es amplia y esto puede deberse a que la inclusión de la fibra afecta en la adherencia de la unión cara núcleo. Este tipo principal de falla por adherencia y agrietamiento a cortante es común en paneles con caras de acero y núcleo de concreto [4, 77, 59, 60]. En la Figura 3.22b se puede ver que el refuerzo con fibra de polipropileno fue el más efectivo en aumentar la capacidad máxima

de carga, la cual aumentó un 20% con respecto a los paneles sin refuerzo. El refuerzo con henequén aumentó la capacidad máxima de carga en un 8%. Este aumento se atribuye al hecho de que el refuerzo con fibra ayuda a que disminuya el agrietamiento de los materiales compuestos y a que sea más efectiva la transferencia de esfuerzos después de que el núcleo comienza a agrietarse. Debido a esto, la carga soportada a los 25 mm de deflexión del panel, es mayor para los paneles fibroreforzados en comparación con los paneles sin refuerzo (Tabla 3.10). Esto demuestra que el refuerzo con fibra tiene un papel importante en el aumento de las propiedades mecánicas después de que ha ocurrido la falla, en los materiales compuestos tipo sándwich.

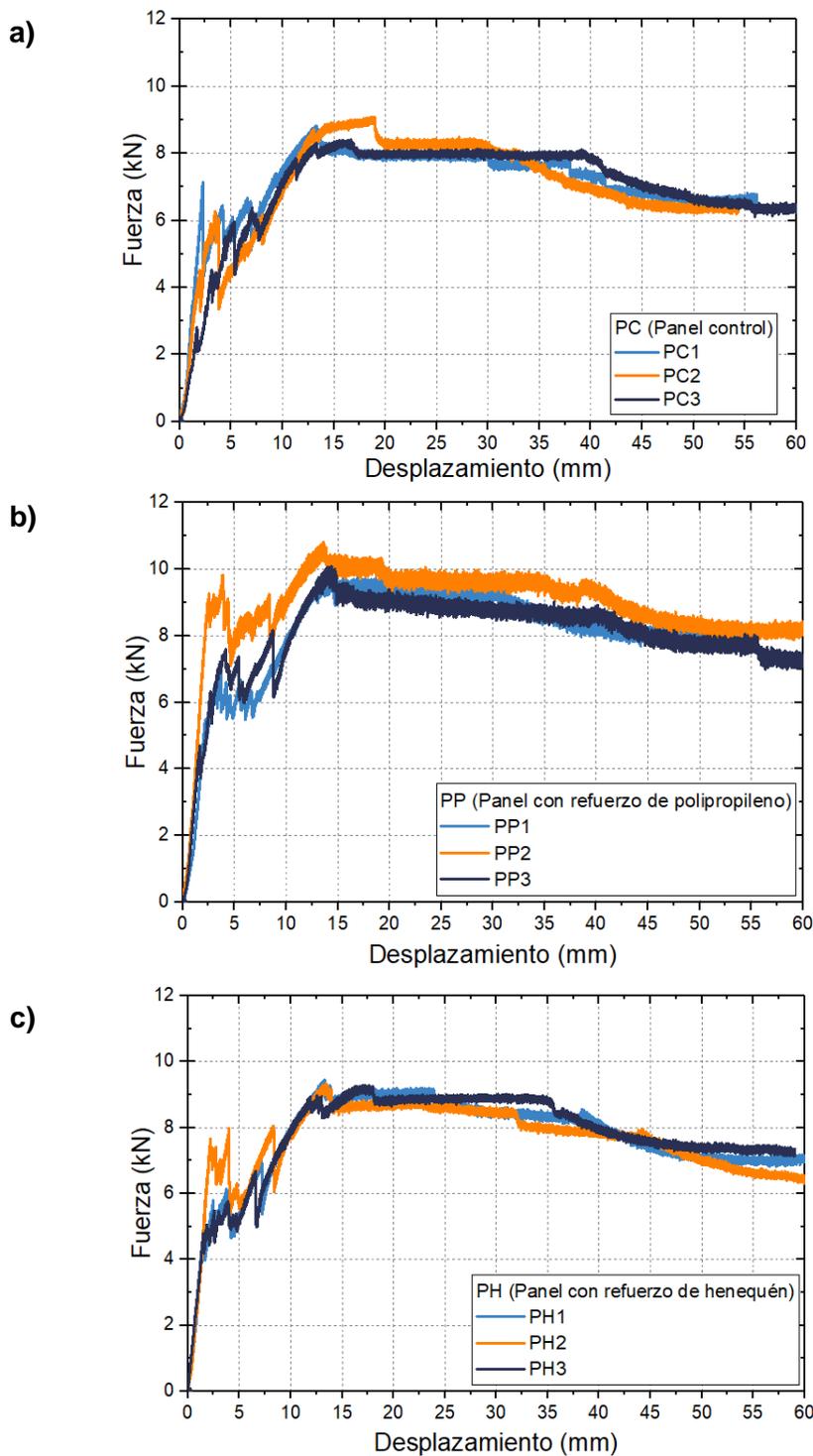


Figura 3.20. Curvas fuerza-desplazamiento de los paneles tipo sándwich: a) PC (Con núcleo de concreto espumado sin refuerzo), b) PP (Con núcleo de concreto espumado con refuerzo de polipropileno, c) PH (Con núcleo de concreto espumado con refuerzo de henequén con tratamiento).



Figura 3.21. Modos de falla de los paneles tipo sándwich durante la prueba de flexión a 4 puntos: a) Desprendimiento cara/núcleo, b) Falla por cortante del núcleo y desprendimiento cara/núcleo, c) Falla por cortante por debajo del cargador, d) Falla por tensión del núcleo en la mitad del panel, e) Arrugamiento de la cara superior y desprendimiento, f) Deslizamiento de la caras del panel.

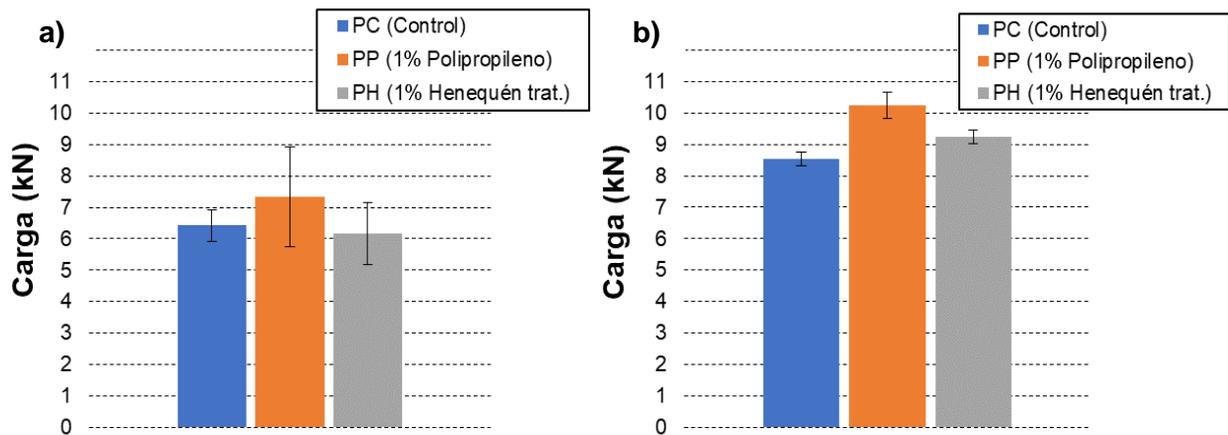


Figura 3.22. Comparación de la carga resistida por los paneles: a) Carga a la falla, b) Carga máxima.

3.6 Simulación numérica de la prueba de flexión a 4 puntos de los materiales compuestos tipo sándwich

El análisis por el método de los elementos finitos de los paneles tipo sándwich se desarrolló en Abaqus/Explicit, el cual se utilizó como herramienta para analizar el rendimiento estructural y comprender los efectos de la unión cara-núcleo en el comportamiento de los paneles sándwich a partir de la respuesta de la prueba de flexión a 4 puntos. La metodología completa de la elaboración del modelo se encuentra detallada en la Sección 2.4.

Para analizar los efectos de la unión cara-núcleo y el efecto que tiene en el comportamiento a flexión de los paneles se analizaron 4 casos diferentes, los cuales se compararon con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Caso 1: Unión perfecta de las láminas con el núcleo en donde se aplicó la opción Tie Constraint en toda la superficie de contacto de las láminas con el núcleo de concreto espumado; caso 2 y caso 3: unión parcial en las zonas donde se encuentran los sujetadores (Figura 3.23); Caso 4: únicamente contacto general, lo cual representa una situación en la que no hay ninguna adherencia entre las caras y el núcleo. La adherencia entre los materiales que componen el compuesto juega un

papel importante debido a que es el primer modo de falla de los materiales compuestos, como se pudo ver en las Figuras 3.20 y 3.21.

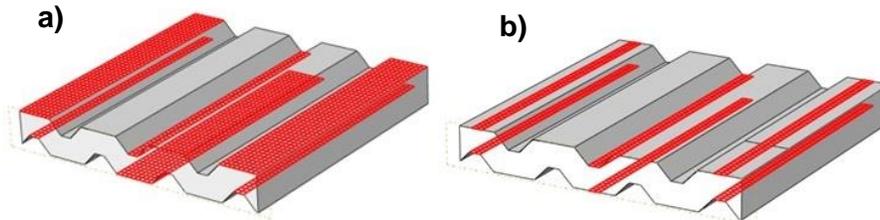


Figura 3.23. Zonas donde se aplicó la unión parcial con Tie Constraint: a) Caso 2, b) Caso 3.

En la Figura 3.24 se presentan las curvas de esfuerzo-deformación que se utilizaron para simular el comportamiento del núcleo de los diferentes paneles analizados. Las curvas representan el comportamiento general que se obtuvo de cada mezcla correspondiente en las pruebas experimentales de compresión (Figuras 3.1a, 3.1c y 3.5c). De igual forma, se presenta la comparación y validación del comportamiento del núcleo a partir de los resultados de la simulación numérica de la prueba de compresión. Se puede ver que se obtuvieron resultados muy similares entre el comportamiento de la simulación y el comportamiento experimental. El comportamiento plástico de cada tipo de núcleo se ingresó en la opción “*strain hardening*” del modelo de plasticidad para materiales elasto-plásticos “*Crushable Foam*”. La simulación de la prueba se realizó hasta una deflexión de 15 mm debido a la falta de parámetros de fractura para simular la prueba de flexión completa.

En la Figura 3.25 se presenta la comparación de las pruebas experimentales de flexión a 4 puntos con las simulaciones realizadas, en donde, la Figura 3.25a corresponde a los paneles PC, la Figura 3.25b a los paneles PP y la Figura 3.25c a los paneles PH. En todas las gráficas se puede ver que para el caso 1 (unión completa cara-núcleo), el modelo sobreestima la capacidad de respuesta de los materiales compuestos aumentando la rigidez y la capacidad máxima de carga. En las pruebas experimentales no se obtuvo un

comportamiento parecido al caso 1 de la simulación, lo cual sugiere que existe una falta de adherencia o un desprendimiento inicial entre los materiales en algunas zonas antes de realizar las pruebas experimentales. Se puede observar que el comportamiento experimental en la respuesta lineal es muy parecido al que se obtuvo en la simulación numérica para los casos 2 y 3 (adherencia parcial). Esto indica que el grado de adherencia entre los materiales es similar a estos casos. Se puede ver que, en casi todas las pruebas, el caso 4 subestima la respuesta a flexión de los paneles. Esto quiere decir que si existe una adherencia parcial entre las caras y el núcleo. El comportamiento experimental del panel PC3 (Figura 3.25a) es muy similar al obtenido en la simulación del caso 4. Esto sugiere que este espécimen fue el que tuvo el menor grado de adherencia antes de la prueba experimental. Esta falta de adherencia, en comparación con los otros paneles, pudiera ser atribuido al proceso de curado o al manejo del espécimen antes de la prueba.

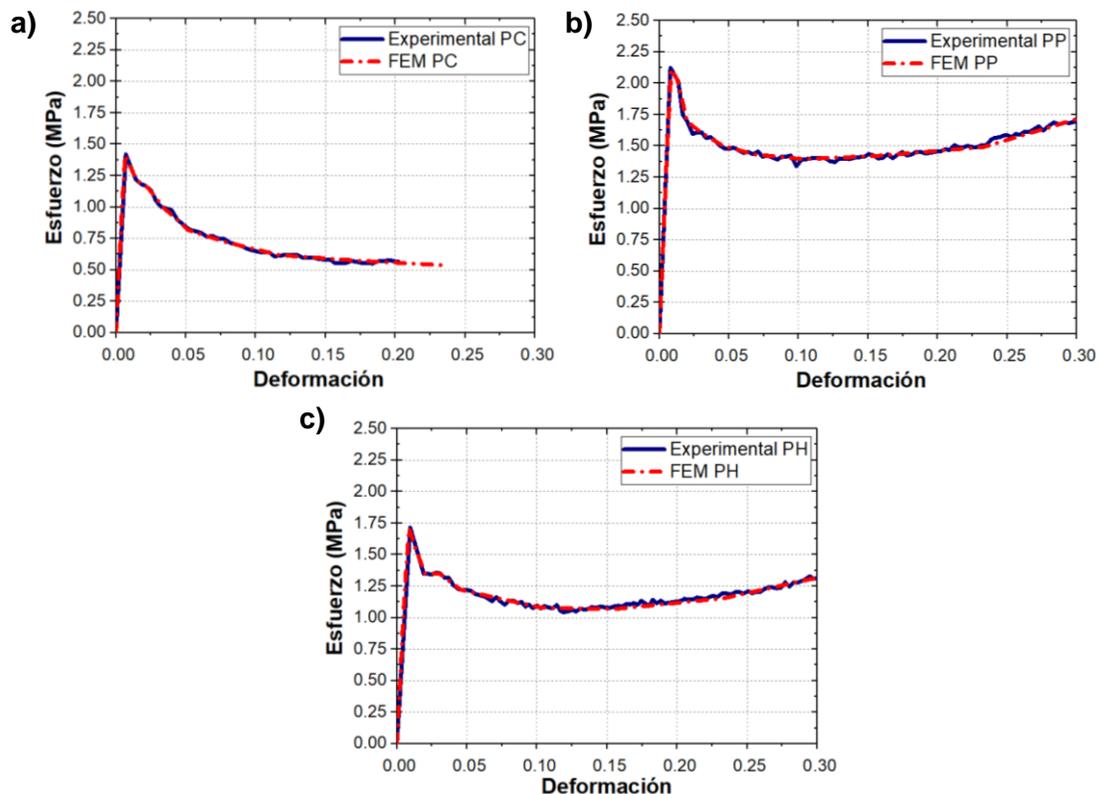


Figura 3.24. Comportamiento a compresión del núcleo de los diferentes paneles (experimental y simulación): a) Comportamiento del núcleo del panel PC (sin fibras), b) Comportamiento a compresión del núcleo del panel PP (con refuerzo del 1% de polipropileno), c) Comportamiento a compresión del núcleo del panel PH (con refuerzo del 1% de henequén con tratamiento).

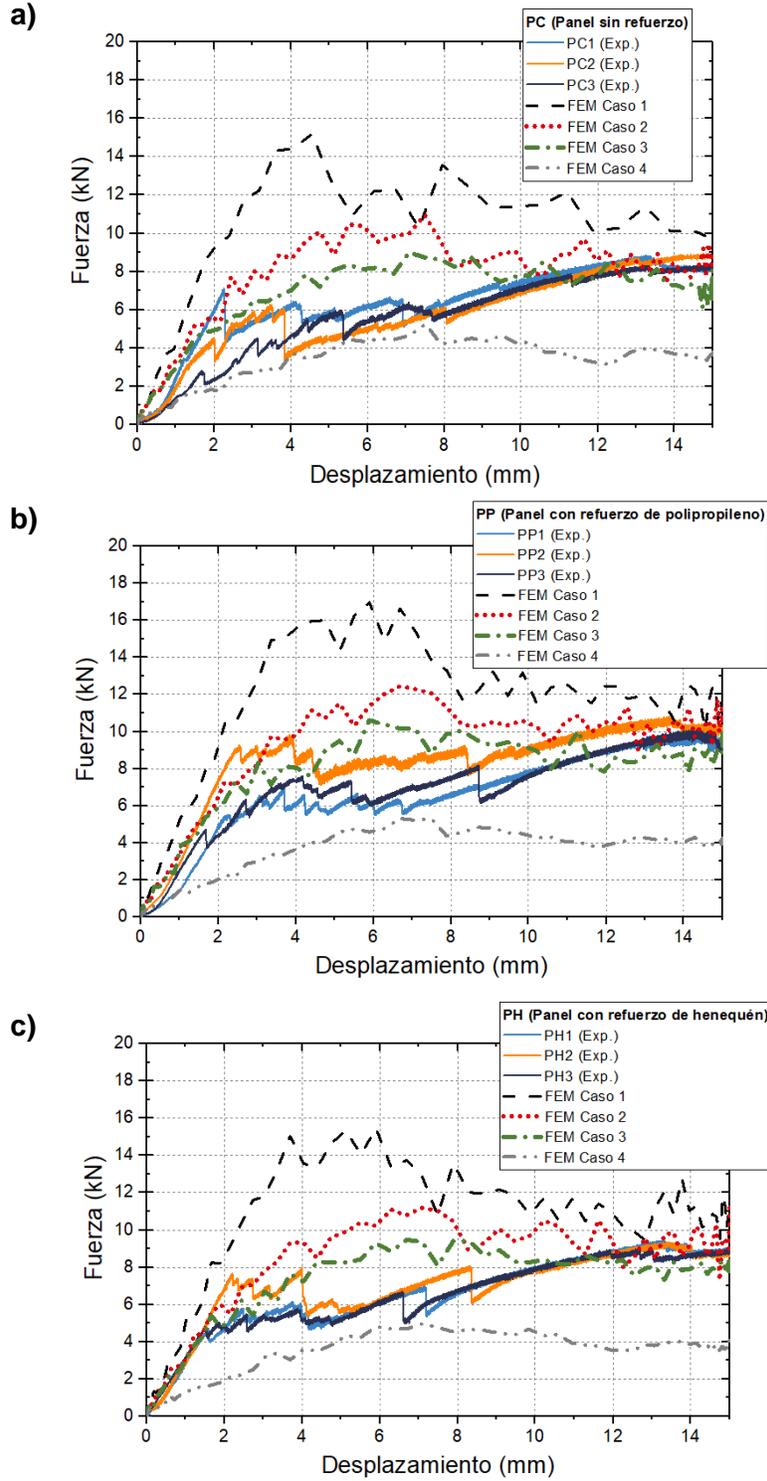


Figura 3.25. Comparación de la simulación numérica con las pruebas experimentales:
a) Paneles PC, b) Paneles PP, c) Paneles PH.

El resultado de la simulación del caso 3 de la prueba de flexión a 4 puntos desarrollada en Abaqus/Explicit del panel PP se presenta en la Figura 3.26. Únicamente se presenta el resultado visual de un tipo de panel debido a que todos tuvieron patrones similares de esfuerzos de von Mises en la simulación. Como se mencionó en la Sección 2.2, por simetría únicamente se modeló la mitad del panel como se muestra en la Figura 3.26a. En la Figura 3.26b se muestra el panel completo durante la prueba de flexión, lo cual se logró aplicando la opción “mirror” en el plano XY. Se puede ver que, en el caso de la lámina superior, los esfuerzos máximos se encuentran en el centro del panel.

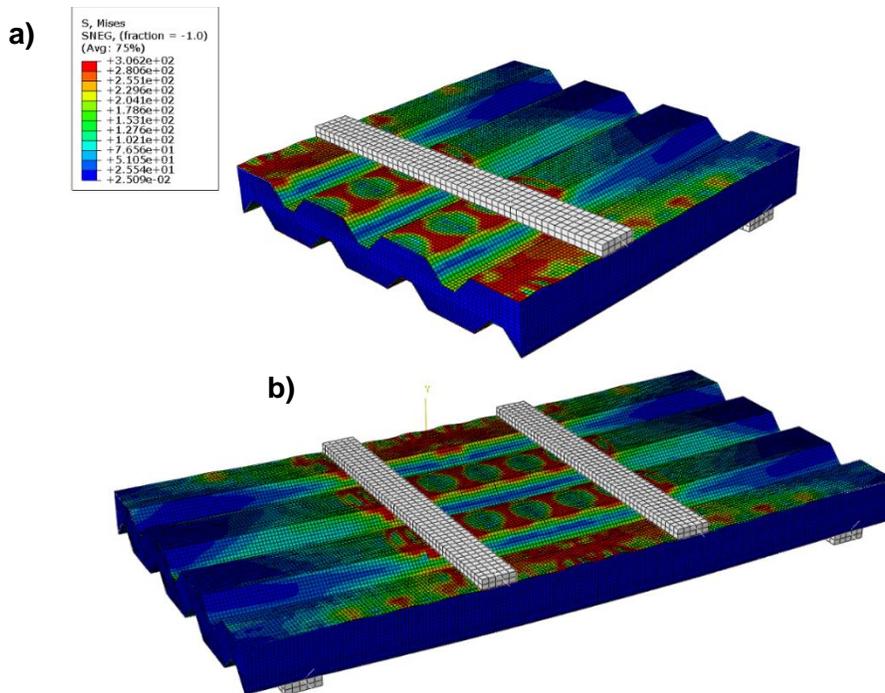


Figura 3.26. Resultado de la prueba de flexión a 4 puntos del caso 3 (contorno de esfuerzos de von Mises): a) Modelo analizado, b) Resultados con la opción mirror.

Las simulaciones numéricas demostraron que la unión cara-núcleo es un factor muy importante en el diseño de los paneles, ya que juega un papel crucial en la mejora de la capacidad de carga antes de la falla. Al mejorar la unión entre las caras de acero y el núcleo

de concreto espumado, se puede mejorar la respuesta estructural de los materiales compuestos tipo sándwich. Esto se podría lograr a partir del uso de conectores a cortante entre las caras, como pueden ser conectores tipo ganchos en J [44] o conectores tipo T [78]. De igual forma se podría mejorar la adherencia entre las caras y el núcleo por medio de adhesivos de resinas poliméricas o de otro tipo. Se deben realizar investigaciones adicionales para analizar qué tan efectivo es utilizar este tipo de conexiones o adhesivos para mejorar el desempeño de los paneles tipo sándwich con núcleo de concreto espumado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo de investigación se caracterizaron diferentes tipos de mezclas de concreto espumado con una densidad objetivo seca de 700 kg/m^3 . La inclusión de fibra de polipropileno o de henequén al concreto espumado, mejoró el comportamiento plástico a la compresión permitiendo que, después de la falla, no hubiera una pérdida considerable en la resistencia a la compresión y se pudiera llegar a la zona de densificación del material. Esto es atribuido principalmente al hecho de que los especímenes fibroreforzados mantuvieron más su integridad ante grandes deformaciones.

Todas las mezclas con refuerzo de fibra de polipropileno presentaron mejoras en la resistencia a la compresión en comparación con el concreto espumado sin refuerzo, siendo la mezcla CP2 (1% polipropileno) la que mostró un mejor desempeño, aumentando la resistencia en un 52%. De igual forma, el refuerzo con el 1% de polipropileno fue el más eficiente en mejorar la resistencia a la tensión, la cual aumento en un 51.5% en comparación con el concreto sin refuerzo.

El refuerzo con el 0.5% de henequén con tratamiento químico presentó una reducción en la resistencia a la compresión y no mostró mejoras considerables en la resistencia a la tensión. Sin embargo, al aumentar al 1% el refuerzo de henequén con tratamiento (CHQ2), se obtuvo la mezcla que presentó el mejor desempeño tanto en compresión como en tensión.

En cuanto al comportamiento a tensión, el refuerzo con fibra ya sea de henequén o de polipropileno, cambió el modo de falla del concreto espumado de frágil (sin refuerzo) a falla dúctil (con refuerzo), permitiendo que el material resistiera carga después de la falla inicial. Este aumento en la tenacidad del concreto espumado es muy importante para evitar una falla catastrófica cuando el material se encuentra en servicio.

La caracterización microscópica de las diferentes mezclas mostró que la inclusión de fibras, ya sean de henequén (con tratamiento o sin tratamiento) o de polipropileno, no modifica

considerablemente la estructura celular del concreto ya que se observaron tamaños de celda muy similares para todas las mezclas.

El tratamiento alcalino para las fibras de henequén mejoró la adherencia interfacial con el concreto espumado, esto se comprobó a partir de las pruebas de Pullout debido a los resultados obtenidos y a la cantidad de probetas que no fallaron antes de la prueba.

La fibra de polipropileno presentó una mayor adherencia con la matriz de concreto espumado en comparación con la fibra de henequén.

El acero con el cual está fabricado la lámina Ternium TR-101, la cual se emplea para la fabricación de los paneles tipo sándwich, tiene un comportamiento a tensión común del acero, el cual es un comportamiento dúctil con endurecimiento por deformación. Para este material se obtuvo un esfuerzo a la cedencia de 282.65 MPa.

Las pruebas de flexión a 4 puntos de los paneles tipo sándwich elaborados con concreto espumado sin refuerzo (Paneles PC), concreto espumado con refuerzo del 1% de fibras de polipropileno (Paneles PP) y concreto espumado con refuerzo del 1% de fibras de henequén con tratamiento químico (Paneles PH), mostraron que la principal mejora que produce el refuerzo de fibra es en la carga máxima suportada por los paneles. Esto se debe a que las fibras ocasionan que el agrietamiento del núcleo sea menor en comparación con el núcleo sin refuerzo. El panel con refuerzo de polipropileno resultó ser el más eficiente en cuanto a la mejora de las propiedades mecánicas.

El primer modo de falla que se observó en los materiales compuestos tipo sándwich fue el desprendimiento de la unión cara/núcleo, seguido por la falla a cortante del núcleo.

Se realizaron simulaciones por el método de los elementos finitos con el programa Abaqus/Explicit para investigar la influencia de la unión cara/núcleo en la respuesta de flexión a 4 puntos de los paneles tipo sándwich. Los resultados demostraron que la unión cara/núcleo tiene un papel muy importante en el rendimiento estructural de los materiales compuestos tipo sándwich. De acuerdo con el comportamiento obtenido en la simulaciones, se puede concluir que existe una unión parcial entre la caras y el núcleo.

Recomendaciones

- Para trabajos futuros se recomienda diseñar un método y un equipo para realizar el corte de las fibras de henequén de manera más rápida, debido a que el proceso de corte tradicional empleado en este trabajo fue laborioso y largo.
- Para el análisis por FEM, se recomienda analizar el modo de falla de los materiales utilizados en el compuesto, ya que de esta forma se podría simular la prueba completa de flexión incluyendo la parte plástica, la falla y la fractura, y poder así analizar en detalle los modos de falla de los paneles.
- Se recomienda analizar sistemas de anclaje entre las caras y el núcleo para mejorar la respuesta estructural de los paneles.
- Se recomienda estudiar el grado de adherencia entre las caras y el núcleo a partir de pruebas no destructivas.

REFERENCIAS

- [1] C. Bakis, L. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. Davalos, J. Lesko, A. Machida, S. Rizkalla y T. Triantafillou, Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review, *Journal of composites for construction*, pp. 73-87, 2002.
- [2] V. Dey, G. Zani, M. Colombo, M. Prisco y B. Mobasher, Flexural Impact Response of Textile-Reinforced Aerated Concrete Sandwich Panels, *Materials & Design*, vol. 86, pp. 187-197, 2015.
- [3] J. Arbaoui, Y. Schmitt, J. Pierrot y F. Royer, Comparison study and mechanical characterisation of a several composite sandwich structures, *International Journal of Composite Materials*, pp. 1-8, 2015.
- [4] E. Flores Johnson y Q. Li, Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces, *Composite structures*, pp. 1555-1563, 2012.

- [5] M. Othuman y Y. Wang, Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 705-716, 2011.
- [6] J. M. y A. McCarthy, Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, *Magazine of concrete research*, vol. 57, n° 1, pp. 21-31, 2005.
- [7] M. Ardanuy, J. Claramunt y R. Toledo, Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research, *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 115-128, 2015.
- [8] K. Ramamurthy, E. Kunhanandan y G. Siva, A classification of studies on properties of foam concrete, *Cement & concrete composites*, vol. 31, pp. 388-396, 2009.
- [9] F. Batool y V. Bindiganavile, Air-void size distribution of cement based foam and its effect on thermal conductivity, *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 17-28, 2017.
- [10] N. Narayanan y K. Ramamurthy, Structure and properties of aerated concrete: a review, *Cement & Concrete Composites*, vol. 22, pp. 321-329, 2000.
- [11] EABASSOC, EABASSOC, waterproofing, coatings and construction chemicals, [En línea]. Available: <https://www.eabassoc.co.uk/uses-of-foamed-concrete.php>. [Último acceso: 15 Mayo 2019].
- [12] Y. H. Mugahed Amran, N. Farzadnia y A. Abang Ali, Properties and applications of foamed concrete; a review, *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 990-1005, 2015.
- [13] M. A. Othuman Mydin, An Experimental Investigation on Thermal Conductivity of Lightweight Foamcrete for Thermal Insulation, *Jurnal Teknologi*, vol. 63, n° 1, pp. 43-49, 2013.
- [14] J. J. Ramírez Zamora, Comportamiento de muros de concreto celular con diferentes cuantías de acero de refuerzo, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007.
- [15] E. Kearsley y M. Visagie, Properties of Foamed Concrete as Influenced by air-void parameters, *Concrete Beton*, vol. 101, pp. 9-13, 2002.
- [16] O. Karahan y C. Duran Atis, The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, *Materials and Design*, vol. 32, pp. 1044-1049, 2011.

- [17] P. S. Song, S. Hwang y B. C. Sheu, Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1546-1550, 2005.
- [18] O. Kayali, M. N. Haque y B. Zhu, Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, pp. 207-213, 2003.
- [19] P. Zhang y Q. Li, Fracture Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Containing fly ash and silica fume, *Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 5, nº 2, pp. 665-670, 2013.
- [20] P. S. Song y S. Hwang, Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 18, pp. 669-673, 2004.
- [21] S. Kakooei, H. Md Akil, M. Jamshidi y J. Rouhi, The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures, *Construction and Building Materials*, vol. 27, pp. 73-77, 2012.
- [22] F. Zollo y C. Hays, Engineering Material Properties of a Fiber Reinforced Cellular Concrete, *ACI Materials Journal*, vol. 95, nº 5, 1998.
- [23] B. Arisoy y H. Wu, Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA, *Construction and building materials*, nº 22, pp. 635-645, 2008.
- [24] Dificonsa, Dificonsa, [En línea]. Available: <https://www.dificonsa.com/portfolio/fibras-de-polipropileno/>. [Último acceso: 10 Diciembre 2018].
- [25] J. K., R. Toledo, B. James, S. Thomas y L. Hecker, A review on sisal fiber reinforced polymer composites, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 3, nº 3, pp. 367-379, 1999.
- [26] S. F., N. Chawla y R. Toledo, Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers, *Composites science and technology*, nº 68, pp. 3438-3443, 2008.
- [27] K. Joseph, R. Toledo, B. James, S. Thomas y L. Hecker de Carvalho, A review on sisal fiber reinforced polymer composites, *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, vol. 3, nº 3, pp. 367-379, 1999.

- [28] V. Cantarell, Yucatán Today, [En línea]. Available: <http://yucatan.com/de-yucatan-para-el-mundo-artesantias-de-henequen/>. [Último acceso: 24 Diciembre 2018].
- [29] P. Herrera Franco y A. Valadez González, A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites, *Composites, Part B: engineering*, nº 36, pp. 597-608, 2005.
- [30] S. Ferreira, M. Pepe, E. Martinelli, F. De Andrade Silva y R. Toledo Filho, Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices, *Composites Part B*, vol. 140, pp. 183-196, 2018.
- [31] C. Frazao, J. Barros, R. Toledo, S. Ferreira y D. Goncalves, Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement composites and fiber-reinforced lightweight concrete, *Cement and concrete composites*, vol. 86, pp. 206-223, 2018.
- [32] A. Valadez, M. Cervantes, R. Olayo y P. Herrera, Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites, *Composites: Part B*, pp. 309-320, 1999.
- [33] N. Manikandan, S. Diwan y S. Thomas, Tensile Properties of Short Sisal Fiber Reinforced Polystyrene Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 60, nº 9, pp. 1483-1497, 1996.
- [34] L. Mohammed, M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid y M. Saiful, A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications, *International Journal of Polymer Science*, pp. 1-15, 2015.
- [35] R. Toledo Filho, K. Scrivener, G. England y K. Ghavami, Durability of alkali-sensitive sisal and coconut Fibres in cement mortar composites, *Cement & concrete composites*, vol. 22, pp. 127-143, 2000.
- [36] J. Claramunt, M. Ardanuy, J. García y R. Toledo, The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites, *Cement & concrete composites*, vol. 33, pp. 586-595, 2011.
- [37] J. Wei y C. Meyer, Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment, *Applied Surface Science*, pp. 511-523, 2014.
- [38] R. Coutts y P. Kightly, Microstructure of autoclaved refined wood-fibre cement mortars, *Journal of materials science*, vol. 17, pp. 1801-1806, 1982.

- [39] H. Cuypers y J. Wastiels, Analysis and verification of the performance of sandwich panels with textile reinforced concrete faces, *Journal of sandwich structures & materials*, vol. 13, nº 5, pp. 589-603, 2011.
- [40] Gurit, *Guide to composites*, pp. 1-71.
- [41] G. Camata y P. Benson Shing, Static and fatigue load performance of a gfrp honeycomb bridge deck, *Composites: Part B*, vol. 41, pp. 299-307, 2010.
- [42] H. Tuwair, M. Hopkins, J. Volz, M. ElGawady, M. Mohamed, K. Chandrashekhara y V. Birman, Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam cores and ribs, *Composites Part B*, vol. 79, pp. 262-276, 2015.
- [43] J. Correia, M. Garrido, J. Gonilda y A. Branco, GFRP sandwich panels with PU foam and PP honeycomb cores for civil engineering structural applications, *International Journal of Structural Integrity*, vol. 3, nº 2, pp. 127-147, 2012.
- [44] J. Richard Liew y K. Sohel, Structural Performance of Steel-Concrete-Steel Sandwich Composite Structures, *Advances in Structural Engineering*, vol. 13, nº 3, pp. 453-470, 2010.
- [45] M. Othuman y Y. Wang, Structural performance of lightweight steel-foamed concrete–steel composite walling system under compression, *Thin-walled structures*, vol. 49, pp. 66-76, 2012.
- [46] G. Giraldo, Simscale, 23 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/blog/2019/05/fea-for-beginners/>. [Último acceso: 10 Agosto 2019].
- [47] D. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, 5 ed., Platteville, Wisconsin: Cengage Learning, 2012.
- [48] E. Barbero, *Finite element analysis of composite materials using abaqus*, Boca Ratón, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.
- [49] D. S. Simulia, *Abaqus Documentation-Getting Started with Abaqus/CAE*, 2016.
- [50] E. Flores-Johnson y Q. M. Li, Degradation of elastic modulus of progressively crushable foams in uniaxial compression, *Journal of cellular plastics*, vol. 44, pp. 415-434, 2008.

- [51] Q. Li, I. Magkiriadis y J. Harrigan, Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids, *Journal of Cellular Plastics*, vol. 42, pp. 371-392, 2006.
- [52] V. Rizov, A. Shipsha y D. Zenkert, Indentation Study of Foam Core Sandwich Composite Panels, *Composite Structures*, vol. 69, pp. 95-102, 2005.
- [53] L. Qiao, U. Zenker, E. Kasperek y H. Völzke, Simulation of Damping Concrete under Severe Impact Loads using a Crushable Foam Model with Damage Mechanisms, *Civil-Comp Press*, 2014.
- [54] U. Ozturk y G. Anlas, Finite element analysis of expanded polystyrene foam under multiple, *Materials and Design*, vol. 32, pp. 773-780, 2011.
- [55] I. Ivañez, C. Santiuste, E. Barbero y S. Sanchez-Saez, Numerical modelling of foam-cored sandwich plates under high-velocity impact, *Composite Structures*, vol. 93, pp. 2392-2399, 2011.
- [56] M. A. Othuman Mydin, H. Awang y A. Farhan, Effect of additives on mechanical and thermal properties of lightweight foamed concrete, *Advances in Applied Science Research*, vol. 3, nº 5, pp. 3326-3338, 2012.
- [57] S. Ferreira, F. Andrade Silva, P. Lopes Lima y R. Toledo Filho, Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems, *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 730-740, 2015.
- [58] Y. G. dos Santos Mendonça, Dosagem micromecanica de compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta, Tesis de Maestría, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduacao e Pesquisa de Engenharia, Brasil, 2018.
- [59] R. A. Campos Valencia, Estudio de propiedades mecánicas de paneles con núcleo de concreto espumado fibro-reforzado, Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, 2019.
- [60] B. D. Aké Concha, Estudio del comportamiento estructural y mecánico de paneles sándwich con núcleo de concreto espumado fibroreforzado, Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Superior de Motul, Motul, Yucatán, 2019.
- [61] Simulia, *Abaqus Analysis User's Manual*, vol. Versión 6.13, 2013.

- [62] X. Tan, W. Chen, H. Liu y A. Cheong Chan, Stress-strain Characteristics Of Foamed Concrete Subjected to Large Deformation under Uniaxial and Triaxial Ccompressive Loading, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, nº 6, 2018.
- [63] I. Ivañez, S. Sanchez y C. Santiuste, FEM analysis of dynamic flexural behaviour of composite sandwich beams with foam core, *Composite Structures*, vol. 92, pp. 2285-2291, 2009.
- [64] L. Gibson y M. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2 ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [65] N. Shafiq, L. Robles-Austriaco y P. Nimityongskul, Durability of Natural Fibers in RHA Mortar, *Journal of Ferrocement*, vol. 18, nº 3, pp. 249-262, 1988.
- [66] X. Y. Liu y G. C. Dai, Surface modification and micromechanical properties of jute fiber mat reinforced polypropylene composites, *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 1, nº 5, pp. 299-307, 2007.
- [67] R. Toledo Filho, K. Joseph, K. Ghavami y G. Leslie, The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 3, nº 2, pp. 245-256, 1999.
- [68] I. Sanal y D. Verma, Construction materials reinforced with natural products, *Handbook of Ecomaterials*, pp. 1-24, 2017.
- [69] Y. Abbas y M. Iqbal Khan, Fiber–Matrix Interactions in Fiber-Reinforced Concrete: A Review, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, pp. 1183-1198, 2016.
- [70] E. Kearsley y M. Visagie, Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters, *Concrete Beton*, vol. 101, pp. 9-13, 2002.
- [71] E. Kunhanandan Nambiar y K. Ramamurthy, Air-void characterisation of foam concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 37, pp. 221-230, 2007.
- [72] P. Soroushian y M. Elzafraney, Morphological operations, planar mathematical formulations, and stereological interpretations for automated image analysis of concrete microstructure, *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, pp. 823-833, 2005.
- [73] H. Parkravan, M. Jamshidi y M. Latifi, Polymeric fibers pull-out behavior and microstructure as cementitious composites reinforcement, *Journal of The Textile Institute*, vol. 104, nº 10, pp. 1056-1064, 2013.

- [74] A. J. Babafemi y W. P. Boshoff, Pull-out response of macro synthetic fibre from concrete matrix: Effect of loading rate and embedment length, *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 590-599, 2017.
- [75] P. Maida, E. Radi, C. Sciancalepore y F. Bondioli, Pullout behavior of polypropylene macro-synthetic fibers treated with nano-silica, *Construction and Building Materials*, vol. 82, pp. 39-44, 2015.
- [76] F. Beer, R. Johnson, J. DeWolf y D. Mazurek, *Mecánica de materiales*, 5 ed., McGraw Hill, 2009, pp. 50-58.
- [77] P. Prabha, G. Palani, N. Lakshmanan y R. Senthil, Flexural behavior of Steel- Foam Concrete Composite Light-Weight Panels, *Structural Engineering*, vol. 22, pp. 3534-3545, 2018.
- [78] I. Valente y P. Cruz, Experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, nº 10, pp. 1954-1963, 2009.
- [79] T. R., K. Joseph, K. Ghavami y G. Leslie, The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 3, nº 2, pp. 245-256, 1999.
- [80] m. a. m. The institute of materials, IOM3, [En línea]. Available: <https://www.iom3.org/materials-world-magazine/news/2010/mar/01/going-strong-foam-concrete>. [Último acceso: 22 Diciembre 2018].
- [81] H. Awang, M. A. Othuman Mydin y M. Hafiz Ahmad, Mechanical and Durability Properties of Fibre Lightweight Foamed Concrete, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 7, nº 7, pp. 14-21, 2013.