

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA MEXICALI

ÁREA DE POSGRADO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



**CARACTERIZACIÓN DE ESPUMA DE CARBONO DE DIFERENTES DENSIDADES
EN ESTRUCTURAS COMPUESTAS**

TESIS

PRESENTA:

ING. CARLOS FABIÁN GONZÁLEZ LEÓN

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

DIRECTOR DE TESIS: DR. EMMANUEL SANTIAGO DURAZO ROMERO

CO-DIRECTOR: DR. ALEJANDR SEBASTIÁN ORTIZ PÉREZ

Mexicali, B.C., a 01 de diciembre 2022

Dedicatorias

Dedico este trabajo a mis padres, por ser mis ejemplos de vida, por ayudarme a ser quien soy, apoyarme con cada fibra de su ser para completar mis metas, porque cuánto hay de bueno en mí, comenzó con ustedes.

María Esperanza León Cerna

Ernesto González Rodríguez

A mis hermanos y sobrinos por darme su cariño, apoyo, compartir su compañía y mantenernos siempre unidos.

César, Ernesto, Marysol, Damián y Michael

A mi amigo y colega por asesorarme en cada paso de este proceso para poder completar la maestría.

M.C. Carlos Lora Alvarado

A mis amigos, por ser un ejemplo de profesionalismo, pero sobre todo de hermandad que sobrepasa las diferencias y el tiempo.

Rodrigo, Rene, Miguel, Rogelio, Ricardo

Agradecimientos

Mis agradecimientos al Programa de **Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería**, de la **Universidad Autónoma de Baja California**, por haberme permitido permanecer a esta institución y desarrollarme como investigador en sus aulas donde pude adquirir nuevo conocimiento.

A mi director de tesis: **Dr. Emmanuel Santiago Durazo** por aceptar guiarme, compartir tanto sus conocimientos, así como su paciencia y tiempo para la realización de la tesis.

A mi segundo asesor: **Dr. Juan de Dios Ocampo Díaz**, por su valiosa participación en los comentarios realizados con mucho respeto a este trabajo y por su aporte fundamental para la culminación de tesis. Así como agradecerle la oportunidad de emprender la maestría.

A la **M.C. Eddna Teresa Valenzuela Martínez** por permitirme realizar las pruebas en el laboratorio de las instalaciones de mecánica.

A mis compañeros de trabajo: **Dra. Virginia García Ángel, M.C. Jorge Miramón, Dra. Miriam Siqueiros Hernández y Dr. Nicolas Diaz**, por su apoyo, consejo y brindarme una mano amiga en la realización de este proyecto.

GRACIAS

Índice

Dedicatorias.....	1
Agradecimientos.....	2
Índice de Figuras.....	5
Índice de Tablas	9
Simbología	10
Glosario.....	11
Resumen.....	12
Abstract	14
Capítulo 1	16
Introducción	16
1.1 Nuevos materiales en aplicaciones aeroespaciales	17
1.2 Nanoestructuras de carbono	17
1.2.1 ¿Qué es la espuma de carbono?	17
1.3 El modelo y simulación a través del CAD - CAE	17
1.4 Problemática	18
1.5 Justificación	19
1.6 Hipótesis	20
1.7 Objetivo general	20
1.8 Objetivos específicos	20
1.9 Organización del trabajo	21
Capítulo 2	22
Antecedentes.....	22
2.1 Características de la espuma de carbono	23
2.2 Propiedades de la espuma de carbono	23
2.3 Aplicaciones de la espuma de carbono	24
2.3 Análisis estructural en ingeniería	26
2.4 Método de elemento finito aplicado a materiales y estructuras	28
2.5 Estructuras tipo sándwich	38
Capítulo 3	42
Marco teórico	42

3.1 Método del elemento finito	43
3.2 Ensayo de Tensión (Tracción)	44
3.3. Esfuerzo	45
3.3.1. Características del Ensayo de Tensión (Tracción)	46
3.3 Ecuaciones para tensión	48
3.3.1 Esfuerzo último	49
3.3.2 Análisis estadístico	50
3.4 Ensayo de Compresión	50
3.4.1 Ecuaciones para compresión	51
Capítulo 4	53
Metodología	53
4.1 Introducción	54
4.2 Análisis experimental	55
4.2.1 Adquisición de material	56
4.2.2 Documentación	58
4.2.3 Fabricación de laminados	59
4.2.4 Diseño de herramienta y probetas	62
4.2.5 Ensayos de tensión	64
Capítulo 5	74
Análisis de Resultados	74
5.1 Ensayos de tensión CFOAM 20	75
5.1.2 Ensayo de tensión	75
5.2 Ensayos de Tensión CFOAM 25	81
5.3 Ensayos de compresión CFOAM 20	85
5.4 Ensayos de Compresión CFOAM 25	90
5.5 Cálculo de los esfuerzos máximos de tensión y compresión	94
5.6 Simulación con CFOAM 20	97
5.6.1 Simulación de tensión	97
5.7 Simulación con CFOAM 25	99
5.7.2 Simulación de esfuerzo a compresión	101
5.8 Comparativo de resultados	102
Capítulo 6	103

Conclusiones y Trabajos Futuros	103
6.1 Conclusiones	104
6.2 Bibliografía	106
Apéndice	110
Concentrado de Resultados	113

Índice de Figuras

Figura 2-1. Aplicaciones de la espuma de carbono	25
Figura 2-2. Interacción de ondas electromagnéticas con espuma de compuestos de carbono	25
Figura 2-3. Configuración básica: material poroso bidimensional deformado entre dos placas bajo fuerza de compresión F. El gas se difunde a través de los poros y el material a granel (polímero) hacia ambos lados	29
Figura 2-4. Modelo bidimensional	30
Figura 2-5. Espécimen de prueba modelado en elemento finito	30
Figura 2-6. Imágenes SEM de espuma de PMMA puro y nanocompuestos reforzados con CNT	31
Figura 2-7. Micrografías SEM de las espumas de Ti ₂ AlC que tienen una porosidad total de 54 (a), 68 (b), 72 (c), 82% (d), morfología típica del puntal (e) y estructura típica nanolaminada dentro de los granos (f)	32
Figura 2-8. Distribución de la tensión de tracción mostrada para espumas de Ti ₂ AlC que tienen: a) 68 vol. %, b) 72 vol. % y c) 82 vol. % de porosidad	33
Figura 2-9. Ilustración del método multiescala	34
Figura 2-10. Configuración experimental: Vista general, Esquema del aparato experimental, Ubicación de los termopares	35
Figura 2-11. Ilustración esquemática del modelo físico con las condiciones de contorno	36
Figura 2-12. Temperatura transitoria para diferentes tamaños de malla para verificar la sensibilidad de la malla	36
Figura 2-13. Unas juntas adhesivas sándwich de espuma GFRP novedosas	37
Figura 2-14. Muestra de juntas adhesivas tipo sándwich de espuma GFRP novedosas	37
Figura 2-15. Malla de estructura de juntas adhesivas sándwich de espuma compuesta	38
Figura 2-16. Construcción típica en estructuras tipo sándwich	39
Figura 2-17. Muestra una estructura tipo sándwich de espuma de aluminio	39
Figura 2-18. Modelo de elementos finitos para ensayo de caída de martillo	40
Figura 2-19. Croquis de panel sándwich y parámetros geométricos de una celda unitaria	40
Figura 3-1. Diagrama de flujo de la simulación basada en modelos (MBS) por computadora.	43
Figura 3-2. Tipos de esfuerzo en estructuras.	45

Figura 3-3. Diseño geométrico de pequeñas probetas de tracción	45
Figura 3-4. La prueba de la muestra uniaxial estándar	46
Figura 3-5. Esfuerzo normal directo de tensión	47
Figura 3-6. Diagramas esfuerzo deformación de materiales dúctiles y frágiles.	48
Figura 3-7. Esfuerzo de compresión en una sección transversal arbitraria de un fuste de pedestal de apoyo	50
Figura 3-8. Configuraciones para pruebas de compresión. (A) Prueba DIC, (B) Prueba TSA, (C) Primer plano de los agarres hidráulicos para DIC, TSA y pruebas convencionales de fatiga y estática	50
Figura 4-1 Metodología general de análisis	53
Figura 4-2 Equipo de ensayos universal para pruebas mecánicas	56
Figura 4-3 Procedimiento de laminados: 1. Desmoldante, 2. Peel ply, 3. Film Perforado, 4. Respirador, 5. Bolsa de vacío, 6. Cinta de sellado, 7. Cinta de presión, 8. Válvula de vacío, 9. Conector rápido	57
Figura 4-4 Resina epóxica	57
Figura 4-5 Fabricación de laminados tipo sándwich	59
Figura 4-6 Laminados terminados	59
Figura 4-7 Ensamble de herramienta	60
Figura 4-8 Herramienta para ensayos de tensión bajo la norma ASTM C 297	61
Figura 4-9 Probetas para ensayos de tensión (superior) y ensayo de compresión (inferior)	62
Figura 4-10 Ensamble de probeta a tensión	63
Figura 4-11 Montaje para ensayos de tensión	64
Figura 4-12 Herramienta para ensayo a compresión	65
Figura 5-1 Probetas sometidas a cargas por tensión	67
Figura 5-2 Ensayos de tensión en las siete probetas: D ₁ y D ₂ son las probetas de ajuste y de la T ₁ a la T ₅ son los ensayos que se contemplaran en el estudio.	68
Figura 5-3 Gráficas de ensayos de ajuste a tensión para CFOAM 20, a) Ensayo de ajuste no.1, b) Ensayo de ajuste no.2	68
Figura 5-4 Falla a cortante por ensayo de tensión en CFOAM 20	69
Figura 5-5 Gráficas de resultados para ensayos de tensión en CFOAM 20	71
Figura 5-6 Comparativa de los ensayos para tensión del CFOAM 20	72
Fig 5-7 Gráficas de ensayos de ajuste para CFOAM 25 a) Ensayo de ajuste no.1, b) Ensayo de ajuste no.2	74
Figura 5-8 Falla a cortante por ensayo de tensión en CFOAM 25	74
Figura 5-9 Gráficas de tensión para CFOAM 25	76
Figura 5-10 Comparativa de los ensayos para tensión del CFOAM 25	77
Figura 5-11 Set up para las pruebas de compresión	78
Figura 5-12 Gráficas de ensayos de ajuste para CFOAM 20 a compresión	79

Figura 5-13 Modo de falla a compresión en ensayo para CFOAM 20	80
Figura 5-14 Gráficas de compresión para CFOAM 20	81
Figura 5-15 Comparativa de los ensayos a compresión del CFOAM 20	82
Figura 5-16 Graficas de ensayos de ajuste para CFOAM 25 a compresión	83
Figura 5-17 Modo de fallo a compresión en CFOAM 25	84
Figura 5-18 Graficas de compresión en CFOAM 25	85
Figura 5-19 Grafica comparativa de los ensayos de tensión del CFOAM 25	86
Figura 5-20 Vista frontal del modelo 2D	89
Figura 5-21 Propiedades mecánicas del material	91
Figura 5-22 Simulación de esfuerzo normal para tensión en CFOAM 20	91
Figura 5-23 Condiciones de carga para compresión en CFOAM 20	92
Figura 5-24 Propiedades mecánicas de a espuma de carbono CFOAM 25	93
Figura 5-25 Simulación de tensión a CFOAM 25	94
Figura 5-26 Simulación de compresión para CFOAM 25	95
Figura A-1Adaptador	105
Figura A-2 Bloque de unión	105
Figura A-3 Pasador	106
Figura A-4 Ensamble de herramienta	106
Figura A-5 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #1	107
Figura A-6 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #2	107
Figura A-7 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #3	108
Figura A-8 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #4	108
Figura A-9 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #5	109
Figura A-10 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #1	109
Figura A-11 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #2	110
Figura A-12 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #3	110
Figura A-13 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #4	111
Figura A-14 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #5	111
Figura A-15 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #1	112
Figura A-16 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #2	112
Figura A-17 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #3	113
Figura A-18 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #4	113
Figura A-19 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #5	114

Figura A-20 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #1	114
Figura A-21 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #2	115
Figura A-22 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #3	115
Figura A-23 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #4	116
Figura A-24 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #5	116
Figura A-25 Ensayo de Tensión CFOAM 20 Comparativa	117
Figura A-26 Ensayo de Tensión CFOAM 25 Comparativa	117
Figura A-27 Ensayo de Compresión CFOAM 20 Comparativa	118
Figura A-27 Ensayo de Compresión CFOAM 25 Comparativa	118
Figura A-29 Modelo 2D utilizado para las simulaciones	119
Figura A-30 Simulación de esfuerzo normal para tensión CFOAM 20	119
Figura A-31 Simulación de esfuerzo normal para compresión CFOAM 20	120
Figura A-32 Simulación de esfuerzo normal para tensión CFOAM 25	120
Figura A-33 Simulación de esfuerzo normal para compresión CFOAM 25	121

Índice de Tablas

Tabla 2-1. Principales características y normatividad de la espuma de carbono	24
Tabla 4-1. Principales características de pruebas para la espuma de carbono	57
Tabla 4-2. Principales características de la resina	60
Tabla 4-3. Principales características de la resina	63
Tabla 5-1. Carga promedio de los cinco ensayos de tensión para CFOAM 20	71
Tabla 5.2 Cálculo de desviación estándar para tensión en CFOAM 20.	74
Tabla 5-3. Esfuerzo normal promedio para el CFOAM 25	76
Tabla 5.4 Cálculo de desviación estándar para tensión en CFOAM 25.	79
Tabla 5-5 Esfuerzo normal promedio a compresión en el material CFOAM 20	81
Tabla 5.6 Cálculo de desviación estándar para compresión en CFOAM 20.	83
Tabla 5-7 esfuerzo normal promedio para el CFOAM 25.	85
Tabla 5.8 Cálculo de desviación estándar para compresión en CFOAM 25.	88
Tabla 5-9 Media aritmética de cada uno de los ensayos realizados	89
Tabla 5-10 Comparación de resultados experimentales y por simulación.	96

Simbología

A	Área de la sección transversal
CV	Coefficiente de variación de la muestra
E	Módulo de compresión del núcleo
F	Máxima resistencia a la tracción
h	Ancho del subintervalo del método de Euler
n	Número de especímenes
P_{max}	Carga máxima aplicada
S	Pendiente de la porción lineal inicial de la curva de deflexión de la carga
S_{n-1}	Desviación estándar de la muestra
σ	Esfuerzo normal
t	Espesor del núcleo
u	Desplazamiento del bloque de carga
x₀	Valor inicial del intervalo
x_f	Valor final del intervalo
x₁	Propiedad medida o derivada
$\bar{x}$	Media muestral

Glosario

ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Prueba de Materiales)
CAD	Computer Aided Design (Diseño Asistido por Computadora)
FEM	Finite Element Method
MEF	Método del Elemento Finito
CAI	Compression After Impact (Compresión Después del Impacto)
MCMB	Mesocarbon Microbeads (Microesferas de Mesocarbono)
PMMA	Polimetilmetacrilato
SEM	Scanning Electron Microscope (Microscopio Electrónico de Barrido)
MAX	Carburos y Nitruros Hexagonales Estratificados
CNT	Carbon Nanotubes (Nanotubos de Carbono)
PCM	Phase Change Materials (Materiales de Cambio de Fase)
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio)
DIC	Digital Image Correlation (Correlación de Imágenes Digitales)
TSA Ajustable)	Test Stand Adjustable (Banco de Prueba

Resumen

RESUMEN de la Tesis de Ing. Carlos Fabián González León, presentada como requisito parcial para la obtención de grado de MAESTRO EN CIENCIAS Mexicali, Baja California, México, Mayo de 2021

“CARACTERIZACIÓN DE ESPUMA DE CARBONO DE DIFERENTES DENSIDADES EN ESTRUCTURAS COMPUESTAS”

Resumen aprobado por:

Dr. Emmanuel S. Durazo Romero

Director de tesis

Resumen

Este trabajo de investigación presenta el análisis del comportamiento mecánico de materiales de espuma de carbono (FOAM 20 y FOAM 25), utilizado en procesos de manufactura en la industria aeroespacial, automotriz, entre otros, ya que su alta maquinabilidad, así como la posibilidad de variar su densidad a las necesidades requeridas, lo hacen un material con múltiples aplicaciones estructurales. Para lo anterior, se fabricaron probetas de prueba laminadas con estructura tipo sándwich; utilizando como núcleo la espuma de carbono. Las probetas se fabricaron con secciones rectangulares de acuerdo con la norma y una vez terminadas se llevaron hasta la falla por medio de la aplicación de cargas en una máquina universal de prueba. Se realizaron un total de veinte pruebas mecánicas entre tensión y compresión para los dos tipos de FOAM, que se diferencian entre sí, por tener diferente densidad. De los ensayos mecánicos realizados se obtuvieron valores promedio máximo de esfuerzos, los que se compararon con valores de corridas de simulación de un modelo bidimensional al cual se le aplicaron las cargas máximas promedio obtenidas en cada una de las pruebas y en cada tipo de material. El FOAM es un material poroso, por lo cual se comporta como un material anisotrópico. Como resultado en el modelado de los poros se incorporó una aproximación de las dimensiones de los mismos teniendo en consideración un patrón geométrico definido. Los valores de las cargas máximas registradas al momento del fallo de las probetas, tanto en las pruebas mecánicas de tensión y compresión, mostraron mayor resistencia para el FOAM 25 que para el FOAM 20, esto se concluye que fue debido a la diferencia de densidad de poros entre los materiales siendo el FOAM 25 un 20 % más denso que el FOAM 20 lo que representa una menor concentración de poros. El valor del esfuerzo mecánico promedio de la prueba a tensión contra el simulado para el FOAM 20, resultó ser del 67 % entre lo experimental y lo numérico, mientras que en la prueba de compresión fue del 63.9 %. Por otro lado, el valor del esfuerzo promedio en la prueba a tensión contra el simulado para el FOAM 25 fue del 59 % y la compresión fue de un 60 % de similitud. Es evidente que las propiedades de resistencia a la tensión y a la compresión del FOAM, se incrementa directamente con el aumento de la densidad del mismo.

Abstract

ABSTRACT of the Thesis of Eng. Carlos Fabián González León, presented as a partial requirement to obtain the degree of MASTER IN SCIENCES Mexicali, Baja California, Mexico, May 2021

" CHARACTERIZATION OF CARBON FOAM OF DIFFERENT DENSITIES
IN COMPOSITE STRUCTURES "

Summary approved by:

Dr. Emmanuel S. Durazo Romero

Thesis director

Abstract

This research work presents the analysis of the mechanical behavior of carbon foam materials (FOAM 20 and FOAM 25), used in manufacturing processes in the aerospace, automotive industry, etc., since its high machinability, as well as the possibility of varying its density to the required needs, make it a material with multiple structural applications. For the above, test specimens were manufactured as sandwich structure laminates, using carbon foam as a core. The specimens were manufactured with rectangular sections in accordance with the standard and once finished they were taken to failure by applying loads in a universal testing machine. A total of twenty mechanical tests between tension and compression were carried out for the two types of FOAM, which differ from each other, having different densities. From the mechanical tests carried out, average maximum stress values were obtained, which were compared with simulation run values of a two-dimensional model to which the average maximum loads obtained in each of the tests and in each type of material were applied (FOAM 20 and FOAM 25). FOAM is a porous material, so it can be inferred that it can behave as an anisotropic material, so the incorporation of the pores was integrated into the model as an approximation, but in a defined geometric pattern. The values of the maximum loads recorded at the time of failure of the specimens, both in the mechanical tests of tension and compression, showed greater resistance for FOAM 25 than for FOAM 20, this is concluded to be due to the difference in density between materials, which is of the order of 20%. The value of the average mechanical stress of the tension test against the simulated one for FOAM 20, turned out to be 67%, the value of the mechanical stress of the compression test for FOAM 20 and the one obtained from the numerical simulation showed 67% of similarity; the value of the average mechanical stress of the tension test against the simulated one for FOAM 25 was 59%, the value of the mechanical stress of the compression test for FOAM 25 and that obtained from the numerical simulation showed a 60% similarity. It can be affirmed that a better similarity was obtained in the behavior of FOAM 20 with respect to the data determined analytically through the average maximum load values of the mechanical tests.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Nuevos materiales en aplicaciones aeroespaciales

El gran desarrollo tecnológico registrado a partir de la mitad del siglo XX y lo que va del XXI, ha impactado fuertemente en el desarrollo de nuevos materiales con propiedades y características mecánicas que superan ampliamente a los tradicionales, ejemplo de esto lo podemos ver en aplicaciones aeroespaciales. Entre estos materiales destaca la espuma de carbono, que por sus características y propiedades mecánicas ofrece una posibilidad de uso amplia y ventajosa.

1.2 Nanoestructuras de carbono

Entre las estructuras de carbono se encuentra la espuma de carbono la cual es considerada una nanoestructura que tiene entre sus múltiples ventajas que la densidad de la misma puede ajustarse dependiendo del uso que se pretenda, tiene resistencia mecánica, es maquinable, conserva sus propiedades mecánicas a elevadas temperaturas, es ignífugo ^[1] (2004), se puede aplicar a elementos estructurales, por mencionar algunas características.

1.2.1 ¿Qué es la espuma de carbono?

La espuma de carbono es un material creado por pirolisis de resinas fenólicas, es tratado térmicamente y como resultado final queda un material rígido, térmicamente resistente y ligero, por mencionar algunas características. Es un material de alta porosidad, la cual tiene un orden aleatorio, es decir, que los poros están ubicados aleatoriamente en toda la composición del espécimen. Este material se manufactura con distintas densidades según se requiera lo que significa que a mayor densidad menor es el tamaño de poros tiende a ser menor.

1.3 El modelo y simulación a través del CAD - CAE

Por las mismas consideraciones aleatorias de los poros, así como su tamaño, es sumamente complicado la caracterización de material por medio de cálculos comunes o a mano. Si se requiere un mayor conocimiento debemos utilizar herramientas computacionales, lo que nos dará una mejor perspectiva y con ello un mejor entendimiento del comportamiento del material. Para esto necesitamos alimentar la base de datos con la información obtenida de pruebas experimentales.

Actualmente la industria en general se ha visto beneficiada de herramientas como el CAD-CAE-CAM, son las siglas de Computer Aided Engineering, Computer Aided Manufacturing y Computer Aided Design. Esas herramientas de cómputo se utilizan actualmente en un gran número de aplicaciones o desarrollos en diversas áreas de ingeniería, como son la manufactura, diseño de productos diversos, entre otros, ya sea en la industria aeroespacial, automotriz, de casting, entre otras. Estas herramientas han evolucionado de tal manera que proporcionan una ventaja de procesamiento y análisis de los comportamientos mecánicos de piezas o ensambles sometidos a cargas mecánicas, térmicas, etc.

Estos programas proporcionan información numérica e incluso visual, para facilitar la interpretación del comportamiento de la pieza, ensamble del elemento o conjunto de elementos que se estén analizando, tienen la capacidad analizar desde una simple viga sometida a carga puntual, así como un motor y todos los elementos que lo componen.

Otra de las ventajas que ofrecen estos programas, es que al diseñar el elemento virtualmente, se pueden simular las condiciones en las que se usará o estará expuesto, y de esta manera poder anticipar alguna posible falla y hacer correcciones o modificaciones en el diseño antes de fabricar físicamente las piezas.

Debido a que la industria requiere mayor demanda con la menor cantidad de defectos, así como producción en menor cantidad de tiempo posible, las compañías manufactureras cuentan con el departamento de diseño, en donde se analizan todos los aspectos relevantes del prototipado en caso de un nuevo producto o también para un rediseño, tales como: geometría, tamaño, material, tipo de función, esfuerzos y procesos.

Pero antes de poder agregar las características de los materiales a la librería de cualquier software CAD, se deben caracterizar el material que se pretende usar para la simulación. Primeramente, se deben realizar los estudios experimentales en base a una normativa o estándar. Después debemos recrear las características y condiciones de manera simulada, las cuales arrojen resultados que nos brinden retroalimentación fidedigna sobre el comportamiento de los materiales.

1.4 Problemática

Cuando un material se analiza en su comportamiento mecánico-estructural por medio de simulación numérica, usando el método del elemento finito a través de un software CAE, se utilizan las información de las propiedades del material que existen en la base de datos del software, y en caso de no existir dichas propiedades por ser un material nuevo o diferente a los existentes en dicha base, se deben generar estas propiedades mediante pruebas mecánicas, y una vez definidas experimentalmente, ser alimentadas a la base de datos del software, de esta forma se

pueden realizar trabajos de simulación del comportamiento mecánico-estructural y comparar los resultados de estos trabajos con los obtenidos mediante ensayos mecánicos.

Normalmente la composición de un material analizado en los softwares CAE se considera como un material perfecto y homogéneo (isotrópico en toda su estructura), esto indica que se le considera como un sólido al 100%, lo cual ayuda a simular que cada parte o elemento que compone este sólido soporta una fracción de la carga aplicada.

Por lo contrario, en un material aleatoriamente poroso con cierta rigidez como es el caso del foam, no podría aplicarse el mismo concepto, ya las cargas mecánicas aplicadas sobre éste se distribuirán en diferentes direcciones, es decir se comporta anisotrópicamente por lo que es necesario agregar la morfología del material como una variable adicional al análisis, lo cual requiere de una gran capacidad de máquina para el procesamiento numérico.

1.5 Justificación

La espuma de carbono es un material con un elevado potencial de ser utilizado en gran número de aplicaciones en diversos procesos para la manufactura de partes o piezas e incluso ensambles, como lo sería en el caso de la industria aeroespacial, automotriz, acústica, entre otros., ya que se trata de un material adaptable. Sin embargo, antes de aplicar este tipo de material a cualquier rama de la industria, es necesario conocer sus propiedades mecánicas y características físicas, las cuales determinarán si una determinada aplicación es factible. Como consecuencia de requerimientos más exigentes desde el punto de vista mecánico – estructural en nuevos materiales, la espuma de carbono es una alternativa viable, en caso particular la espuma de carbono a la cual se referirá en este trabajo (CFOAM 20 y CFOAM 25), ha demostrado ser un material resistente, maquinable y adaptable en muchas aplicaciones.

Por otra parte, es necesario realizar ensayos mecánicos y obtener valores de comportamientos y de propiedades mecánicas del foam, para futuros trabajos donde se requiera información confiable desde el punto de vista de la ingeniería de materiales, ejemplo de esto sería el caso de simulación numérica del comportamiento mecánico-estructural de estos materiales, que requerirían desde luego la incorporación de sus propiedades a la base de datos de la librería de materiales del software CAD.

Al igual que como cualquier otro material que se pretenda usar en la industria, se deben buscar minimizar la variabilidad que pueda afectar la integridad estructural de una pieza hecha de un material específico, lo que genera la necesidad de conocer las características intrínsecas que

definen a dicho material. Esto con el fin de hacer evidentes las ventajas y desventajas que pueda tener en algún uso particular.

1.6 Hipótesis

La posibilidad de realizar modelado y simulación numérica confiable dentro de ciertos rangos de carga en materiales porosos como lo es el foam (CFOAM 20 y CFOAM 25), utilizando una distribución de poro uniforme que facilite el cálculo numérico y disminuya el tiempo computacional dando una aproximación feasible en lo que respecta a su comportamiento mecánico en 2D usando el método de elemento finito, será función directa de las propiedades mecánicas que se alimenten en el simulador, las cuales deben ser obtenidas mediante pruebas mecánicas bajo la aplicación de las normas respectivas.

1.7 Objetivo general

Realizar análisis numéricos por medio de la simulación en 2D, usando el método de elemento finito, para recrear el comportamiento bajo cargas de tensión y compresión de un laminado en estructura tipo sándwich, mediante las propiedades mecánicas del CFOAM 20 y CFOAM 25 obtenidas por experimentación.

1.8 Objetivos específicos

- a) Una exhaustiva revisión de las propiedades mecánicas y comportamiento del foam, que existe en la literatura reportada.
- b) Revisión detallada de la normatividad relacionada a las pruebas mecánicas que apliquen a este tipo de material.
- c) Manufactura de las probetas para la realización de las pruebas de tensión – compresión usando el material tipo sándwich de espuma de carbono.
- d) Fabricación de una herramienta para la realización de los ensayos a tensión.
- e) Pruebas de tensión – compresión y obtención de propiedades mecánicas.

- f) Modelado y simulación.
- g) Análisis de resultados.

1.9 Organización del trabajo

Este trabajo se divide en seis capítulos, los cuales incluyen el siguiente contenido:

Capítulo 1, Introducción. Se presenta la introducción de la espuma de carbono, método de evaluación, justificación, hipótesis y objetivos de la investigación.

Capítulo 2, Antecedentes. Se describen las características de la espuma de carbono, los antecedentes históricos de la aplicación del método de elemento finito en materiales y su uso en distintas áreas de la industria aeroespacial, automotriz, etc.

Capítulo 3, Marco teórico. Se mencionan los conceptos fundamentales para el análisis de materiales por simulación numérica basados en análisis teóricos y experimentales por normatividad aplicadas a estructuras tipo sándwich.

Capítulo 4. Metodología. Se describe la metodología para los análisis realizados del análisis experimental teórico, y los resultados de la simulación por elemento finito.

Capítulo 5. Análisis de resultados. Se muestran los resultados, y se discuten los mismos.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros. Se presentan las conclusiones en base a la comparación de los resultados experimentales y teóricas obtenidas.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Características de la espuma de carbono

Los materiales de espumas existen de diferentes texturas y aplicaciones, pero tienen una particularidad en común que son los poros en toda su composición, estas espumas pueden ser rígidas o flexibles y los poros se encuentran en diferentes tamaños y ordenados aleatoriamente. La espuma de carbono, que se utilizó en este trabajo CFOAM 20, CFOAM 25, tiene características mecánicas adecuadas para diversas áreas de la industria como la aeroespacial, automotriz y militar, etc. La espuma de carbono es un material estructural de próxima generación que es económico, liviano, resistente al fuego, absorbente de impactos, termoaislante o conductor, y con conductividad eléctrica que puede variar en siete órdenes de magnitud ^[1] (2004). Se puede fabricar en una variedad de formas, tamaños y densidades para cumplir con los requisitos de propiedad de aplicaciones específicas.

Aunque este material es presentado como un producto con grandes cualidades, también debe ser inspeccionado por múltiples pruebas estandarizadas que ayuden a validar sus características y comportamiento mecánico-estructural, y así asegurar que cumplirá con su función una vez que sea utilizado como producto final.

2.2 Propiedades de la espuma de carbono

La Tabla 2-1, describe las principales características del material, así como las normas bajo las cuales se evalúa el mismo, algunas de las principales propiedades de la espuma de carbono ^[1] son:

- Capacidad a la alta temperatura, 343°C
- Herramientas de menor peso según su densidad
- Facilidad para reparar o modificar
- Bajos costos de fabricación
- Mejora en el desarrollo de durabilidad

Tabla 2-1. Principales características y normatividad de la espuma de carbono^[1]

Propiedades	Método de Prueba	Touchstone CFOAM		Unidades
		20	25	
Densidad Nominal	ASTM D1622	20 0.32	25 0.40	lbs/ft ³ g/cc
Fuerza de Compresión	ASTM C 365	>1200 8.3	>2000 15	Psi Mpa
Módulo a Compresión	ASTM C 365	90 620	120 830	Ksi Mpa
Fuerza de Tensión	ASTM C 297	>300 >2.2	>500 >3.5	Psi Mpa
Módulo a tensión	ASTM C 297	60 500	120 830	Ksi Mpa
Fuerza Cortante	Cortante Torsional	>250 1.7	>300 2.1	Psi Mpa
Coefficiente de Expansión Térmica	ASTM E 228	3.0 5.0	3.0 5.0	ppm/°F ppm/°C
Conductividad Térmica	ASTM E 1225	.15 a 16 .25 a 25 Adaptable		BTU/ft-hr°F W/m²K
Temperatura Máxima de uso Operativo		1100 Aire 600 Aire		°F
		5500 Inert 3000 Inert		°C
Resistividad Eléctrica	ASTM D 4496	4E-03 a 4E+06 1E-02 a 1E+07 Adaptable		ohm-in ohm-cm
Resistencia al Fuego	ASTM E 1354 ASTM E 1515 MIL-STD-1623 Guardia Costera OIM PPF Código Parte I y Parte III	El resultado indica que CFOAM pasará todas las pruebas de fuego clave, que incluyen: panel radiante, generación de humo, toxicidad, calorímetro de cono, resistencia al fuego y prueba de esquina de la habitación.		

2.3 Aplicaciones de la espuma de carbono

Existen diferentes tipos de espumas de carbono que, con la combinación apropiada de otros materiales, se pueden obtener distintas propiedades como las que muestra la espuma compuesta de carbono-MCMB, MesoCarbon MicroBeads (Microesferas de Mesocarbon), que pueden ampliar el campo de aplicaciones. En la Figura 2-1 se puede observar las piezas hechas con espuma de carbono y laminadas con fibras de carbono como lo son las aplicaciones estructurales.



Figura 2-1. Aplicaciones estructurales de la espuma de carbono^[2]

Por otra parte, también existen aplicaciones donde existe necesidad urgente de una excelente conductividad térmica y blindaje electromagnético, la cual puede obtenerse debido a la combinación de la espuma de carbono con el grafito. Un trabajo donde se realiza este análisis fue desarrollado por Anushi Sharma et al. (2020) ^[3], donde propone un enfoque novedoso para fabricar piezas con carbono como se muestra en la de blindaje de interferencia electromagnética y materiales conductores térmicos eficientes para evitar que los dispositivos electrónicos reciban radiación electromagnética y sobrecalentamiento por fuentes externas de calor ^[3], como las propiedades que mostró la combinación de espuma de carbono y grafito y esta se observa en la Figura 2-2.

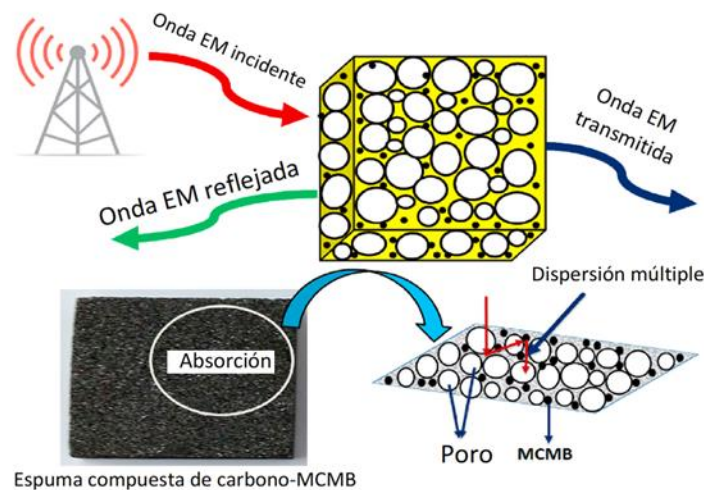


Figura 2-2. Interacción de ondas electromagnéticas con espuma de compuestos de carbono ^[3].

Este tipo de materiales de espuma de carbono muestran una característica particular, la cual consiste en que los poros al estar abiertos, crean lo que se conoce como pared celular. Esta característica se utiliza en diversas aplicaciones debido a sus propiedades morfológicas que dan como resultado peso ligero y buenas propiedades de resistencia, estas se pueden adaptar a diferentes niveles según se requiera. A pesar de la buena relación resistencia / peso comparad con las espumas de poliestireno de alta densidad, algunas de estas estructuras comunes presentan una

resistencia al aplastamiento inconsistente generalmente bajo la aplicación de cargas grandes, lo que las hace no ideales para aplicaciones como absorbentes de energía (2009) ^[19]. Los materiales de espuma, por otro lado, tienen una baja resistencia al aplastamiento inicial y son capaces de soportar grandes deformaciones ^[19].

Las aplicaciones de la espuma de carbono como material crecen cada vez más debido a su versatilidad mecánica quedando aún el estudio del uso de dicho material en diversas áreas para poder evaluar todo su posible rango de aplicación, dentro de límites seguros. Debido a esto, la posibilidad de realizar simulaciones MEF con este material ayudaría a reducir el tiempo de prueba, así como optimizar el uso equipos especializados de experimentación física.

2.3 Análisis estructural en ingeniería

El análisis estructural es el uso de las ecuaciones de la mecánica de materiales para encontrar los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre una estructura. El Método de Elemento Finito MEF (FEM por sus siglas en inglés) es una herramienta de ayuda para efectuar los cálculos estructurales, por lo que el MEF ya no solo es utilizado por la industria aeronáutica o automotriz, sino que, cada vez se extiende su uso a las pequeñas y medianas empresas por las ventajas que ofrece ^[6]. Esto es debido a que se los programas de MEF se han vuelto más versátiles y de un uso común e intuitivo comparado con los primeros programas desarrollados bajo este enfoque.

La utilización del MEF como lo conocemos actualmente ha sido el resultado de un trabajo colectivo de muchos años, los primeros avances se han documentado desde el filósofo Arquímedes, con el afán de calcular geometrías complejas, dividía la geometría en triángulos y cuadriláteros para facilitar el cálculo de los mismos ^[7].

Cuando se requiere una predicción precisa sobre algún material, el cual pueda presentar una fuerte anisotropía, sus parámetros deben ser determinados por medio de ensayos, los cuales pueden ser reemplazados por simulaciones numéricas ^[8], y así tener una aproximación confiable sin necesidad de realizar ensayos destructivos.

Otro uso del MEF es detectar defectos en materiales compuestos haciendo simulaciones electromagnéticas. Los patrones de campo eléctrico transmitidos y reflejados, los cuales se analizan en frecuencia y en el dominio del tiempo para obtener información sobre los diferentes tipos de defectos en los materiales constituyentes de las estructuras compuestas ^[9].

El Método de los Elementos Finitos ha demostrado las amplias posibilidades que posee como herramienta para la solución de problemas de ingeniería y para el análisis de problemas de investigación. Como resultado de ello su empleo tiene una gran aceptación en la comunidad de ingenieros, tanto en centros de estudio como en centros de investigación y en empresas de producción ^[10]. J.F. Ramírez et. al. (2006) ^[10] describe que, por medio de la práctica, cualquier

usuario podría realizar simulaciones por medio de MEF, sin embargo, no todos entienden los fundamentos del cual se desarrollaron este tipo de softwares. Se pueden hacer simulaciones con software de CAM o CAD, y entender los resultados obtenidos, pero si se desea ir más allá, por ejemplo, caracterizar el comportamiento de un material, es ahí cuando es necesario conocer la teoría bajo la cual se sustenta matemáticamente el software. Además de que se tendrá una perspectiva más amplia de cómo se interpreta el problema físico a este tipo de herramientas virtuales. Para establecer un modelado por FEM y estudiar el comportamiento de deformación por compresión de espumas poliméricas con diferentes condiciones de carga y con una porosidad aproximadamente 95% en el material ^[8] se han definido previamente metodologías de trabajo como la propuesta por Shin Onoshima y Tetsuo Oya (2018) ^[8] y el trabajo de Kanako Emori y Shugo Fushimi, (2019) ^[11].

En estudios posteriores podemos encontrar distintos tipos de materiales con morfología de espuma, como lo es la espuma de metal, el cual es usado en estructuras para absorción de impactos debido a la tensión de meseta extendida que ejercen bajo cargas de compresión ^[12], como se muestra en el trabajo de Yan hu et al. (2019). El comportamiento a la compresión de las espumas de metal se ha estudiado mediante métodos experimentales y computacionales a diversas velocidades de deformación. Un trabajo similar en donde se estudian los metales porosos para determinar el amortiguamiento de este, así como sus aplicaciones en un trabajo similar hecho por Massimo Goletti, Andrea Rossi, (2014)^[13], aquí el material propuesto fue sometido a distintos procedimientos para caracterización mecánica. En este análisis se estudian las propiedades de materiales porosos ^[13].

Una investigación sobre características fractales cuyo objetivo fue experimentar con impacto de hipervelocidad y comparar resultados con la simulación, fue realizado por X. Zhang et al. (2011) ^[14] en espuma de aluminio, donde utilizó métodos de elementos finitos de Lagrange por separación de nodos y así simular el proceso de impacto del cual desarrollaron su trabajo ^[14].

Con el fin de determinar el comportamiento elastoplástico, se realizó una investigación que consiste en someter la espuma de aluminio a experimentación de compresión ^[15]. Para lograrlo se utilizó una representación sólida de las muestras para el modelo numérico basado en Métodos de Elementos Finitos y se estableció el comportamiento mecánico ^[15].

Conforme más se estudia este tipo de materiales con porosidad se va ampliando el campo de aplicabilidad, por ejemplo, también se suelen utilizar en la medicina como sustitutos de hueso, ya que este tipo de material se puede fabricar de distintas densidades y a su vez se puede asemejar a la morfología de un hueso. En la investigación de Ricardo Belda, Miguel Marco, (2020) ^[16], proponen un modelado de elemento finito para estimar las propiedades elásticas y de falla a compresión ^[16]. Además, de representar los resultados a una respuesta mecánica anisotrópica de la espuma.

Otro punto importante que se debe considerar al estudiar este tipo de materiales porosos para su aplicación en estructuras es que deberán soportar cargas, producto de las condiciones ambientales o circundantes del elemento en estudio. Una de ellas es la temperatura que juega un papel muy importante, ya que es necesario que el material conserve su integridad física aun cuando las temperaturas sean muy elevadas o bajas. Este fenómeno fue estudiado por Yang Hu, Qin-Zhi Fang, (2020) ^[17], quienes realizaron simulaciones de transferencia de calor en estado estacionario para

calcular la conductividad térmica efectiva de los materiales ^[17], a los cuales se les adiciono cargas de compresión para evaluar la resistencia mecánica que se involucra con las variables de esfuerzo y temperatura.

En otro estudio sobre el comportamiento de los materiales compuestos con núcleo de espuma, el material ha sido expuesto a pruebas de impacto a baja velocidad “CAI” por sus siglas en inglés Compression After Impact ^[18], el cual fue realizado con el uso de simulación numérica para encontrar la correlación de la resistencia a la compresión ^[13]. Lo cual se puede relacionar a un estudio sobre estructuras de materiales compuestos realizado por el equipo de Inés Ivañes, Carlos Santiuste y Sonia S., (2009) ^[14], donde se analizó el comportamiento de vigas con núcleo de espuma ^[19]. Aquí se realizó un modelado en 3D para estudiar el comportamiento del núcleo y así predecir el fallo de la misma, por medio de ensayos de flexión, donde los resultados revelaron que el colapso del núcleo de espuma por debajo de la región de impacto favoreció el fallo de la hoja frontal superior.

En investigaciones anteriores se estudió la deformación por flexión, en el comportamiento de falla de vigas tipo sándwich y multicapas compuestas por núcleo de espuma de aluminio, así como láminas metálicas mediante el método de elementos finitos y ensayo de flexión de cuatro puntos ^[20]. Los resultados revelaron que el colapso de las vigas multicapa está dominado por dos modos básicos: indentación y cizallamiento del núcleo. La espuma densa puede soportar una carga más alta, lo que a su vez aumenta la capacidad de absorber la energía de deformación de una viga.

2.4 Método de elemento finito aplicado a materiales y estructuras

Los métodos de elementos finitos, es un procedimiento que propone que un elemento a estudio sea analizado por medio de un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Estas divisiones pueden tener diferentes formas, como triangular, cuadrangular, entre otras dependiendo del tipo (geometría) y tamaño del problema. La aplicación de este método ha sido muy extensa debido al uso de sistemas de cómputo de alta velocidad. Esta herramienta es ampliamente aplicada para resolver problemas que cubren casi todo el sistema de análisis en la rama de la ingeniería. Algunas de sus aplicaciones más comunes incluyen el comportamiento de sistemas térmicos, estáticos, dinámicos, de alta complejidad. A continuación, se describen algunos de los trabajos de la aplicación del MEF en espumas o materiales porosos.

Como precursores del MEF debe citarse a Argyris y Kelsey (1955) y a Turner, Clough, Martin y Topp (1956) ^[20], quienes realizaron aportaciones en desarrollaron el análisis estructural por medio de matrices empleando por primera vez métodos energéticos, aunque con posterioridad el número de autores en el campo del MEF ha sido enorme, siendo uno de los campos de la ingeniería a los que más esfuerzos de investigación se han dedicado.

Una de las principales ventajas de usar el método elemento finito es visualizar la mayor cantidad de escenarios posibles en distintas aplicaciones y condiciones de carga. Así podremos observar el comportamiento que tendría el material, estructura o elemento mecánico que se esté estudiando.

El MEF se ha utilizado para el análisis de materiales con morfología anisotrópica son por ejemplo, “*Simulación MEF de la difusión de gas en materiales porosos sólidos de celda cerrada*” en donde se estudia la difusión del gas por medio de simulaciones numéricas bidimensionales de modelos porosos de celda cerrada bajo carga ^[21]. La Figura 2-3 muestra la imagen de un gas que se difunde a través de los poros.

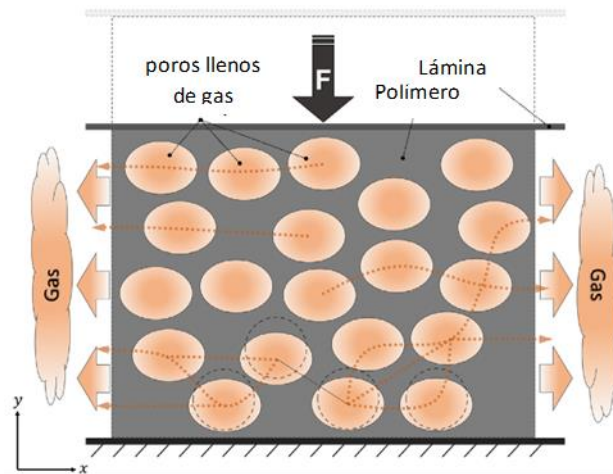


Figura 2-3. Configuración básica: material poroso bidimensional deformado entre dos placas bajo fuerza de compresión F . El gas se difunde a través de los poros y el material a granel (polímero) hacia ambos lados ^[21].

La Figura 2-4, muestra como parte de la misma investigación, los resultados obtenidos del gráfico de contorno y la correspondiente distribución unidimensional de presión de gas en dos momentos diferentes para un modelo con 54.4% de porosidad. Dado que la distribución aleatoria de los poros resulta parcialmente desequilibrada en la dirección vertical, la cantidad inicial de gas muestra un gradiente vertical.

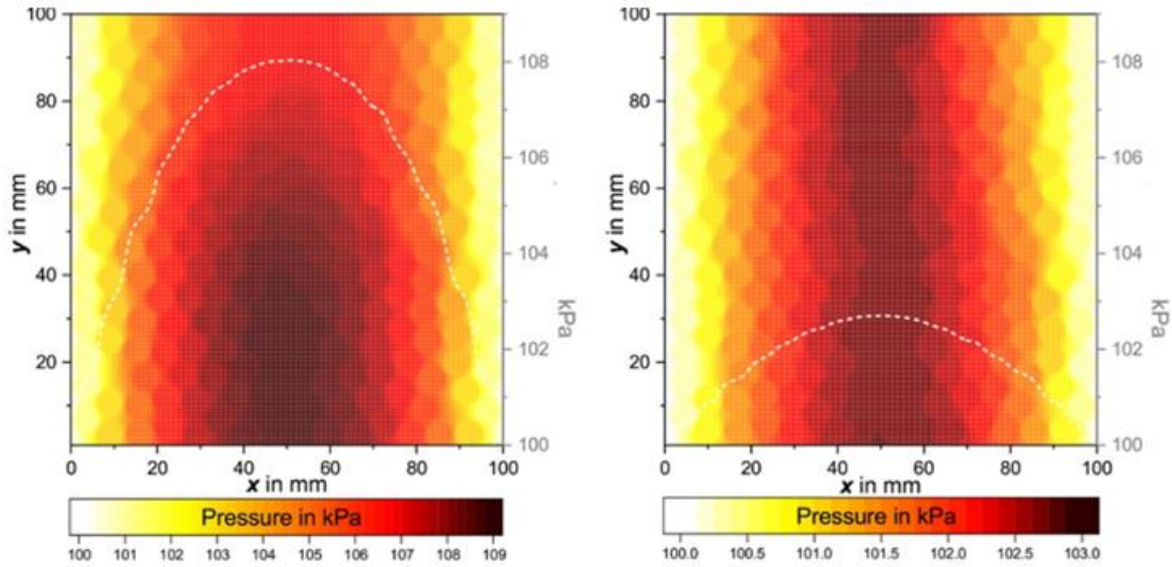


Figura 2-4. Modelo bidimensional ^[21].

En el estudio de nanotubos de carbono en polímero de polimetilmetadrilato, se desarrolló un método de elementos finitos multiescala para investigar el comportamiento mecánico de los materiales para analizar la distribución aleatoria de los poros ^[4]. Este análisis fue realizado por M.H. Namdari Pour .et al (2020) ^[4] y el modelado que utilizó se muestra en la Figura 2-5. Este estudio se efectuó utilizando el modelo de zona interfacial.

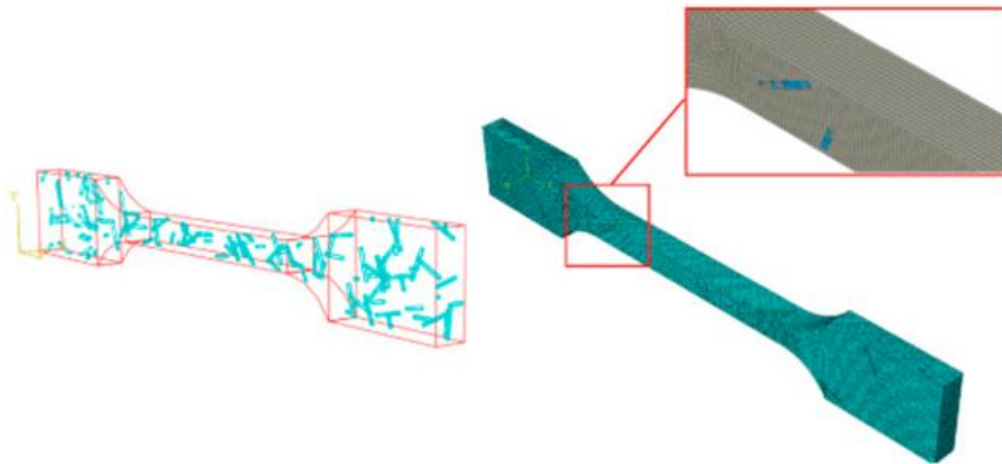


Figura 2-5. Espécimen de prueba modelado en elemento finito ^[22].

Así mismo, en este estudio, se utilizaron ensayos de tracción y microscopía electrónica de barrido para estudiar las propiedades mecánicas y la morfología de las muestras de espuma de PMMA reforzadas con nanotubos de carbono, como se observa en la Figura 2.6.

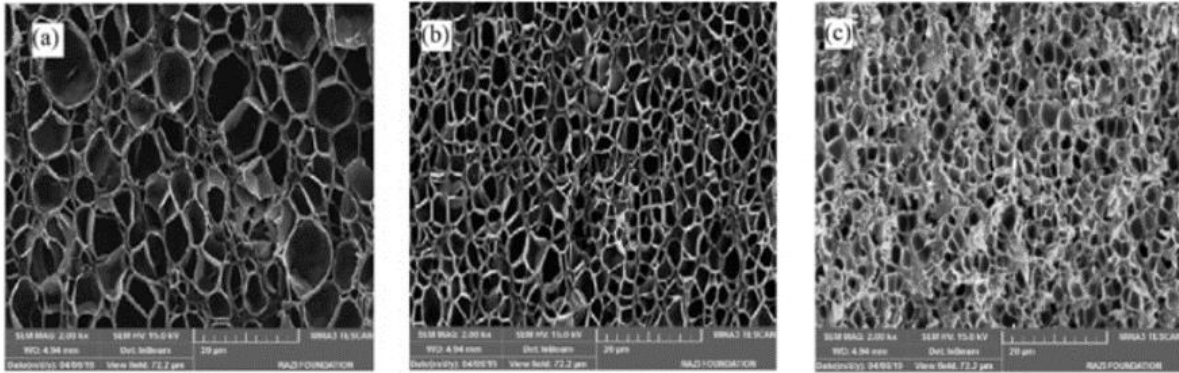


Figura 2-6. Imágenes SEM de espuma de PMMA puro y nanocompuestos reforzados con CNT ^[23].

La investigación de espumas moldeadas en gel de fase MAX (Ti_2AlC) fueron fabricadas con agarosa como agente gelificante en términos de sus propiedades microestructurales, como se muestra en el trabajo de Tobias Fey et. al (2018) ^[23], con el fin de estudiar sus propiedades mecánicas y térmicas como se muestra en la Figura 2-7. Al igual que en el trabajo de M.H. Namdari Pour et. al (2019) ^[4], desarrollaron un análisis microestructural de la espuma, pero en este caso de Ti_2AlC fabricadas mediante SEM se comparó con los que utilizan microtomografía de rayos X, como se puede observar en la siguiente Figura 2-7.

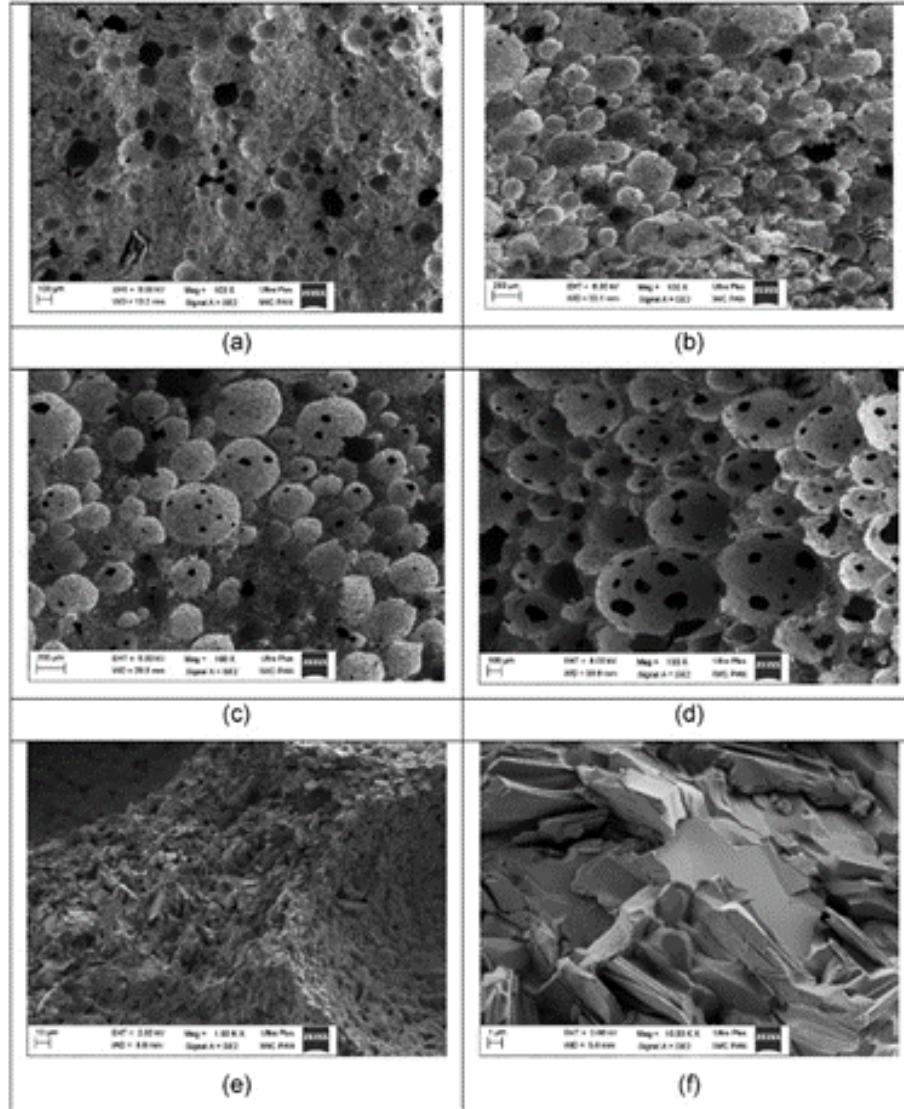


Figura 2-7. Micrografías SEM de las espumas de Ti_2AlC que tienen una porosidad total de 54 (a), 68 (b), 72 (c), 82% (d), morfología típica del puntal (e) y estructura típica nanolaminada dentro de los granos (f) [23].

En este trabajo, el módulo de Young de las espumas de Ti_2AlC se determinó mediante la técnica de excitación por impulso. Se llevaron a cabo simulaciones MEF del comportamiento mecánico en modelos de estructuras para determinar una distribución de esfuerzos en los puntales bajo carga, tal como se observa en la Figura 2-8.

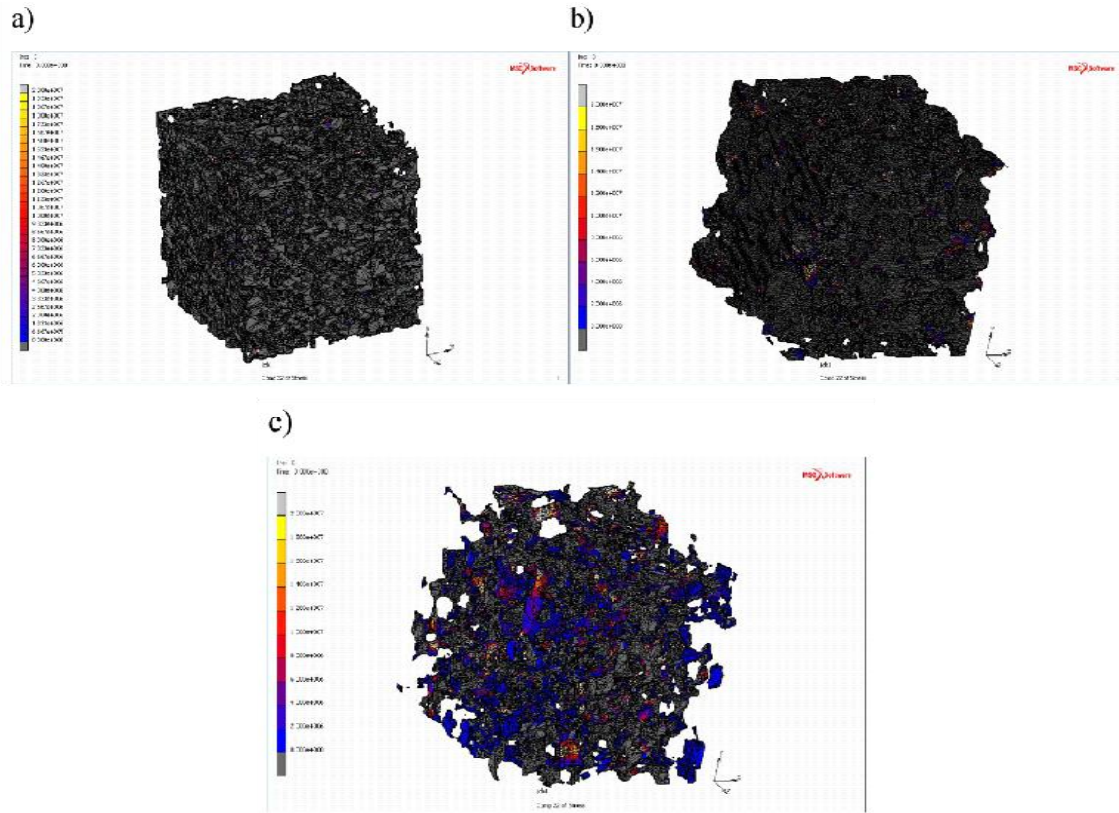


Figura 2-8. Distribución de la tensión de tracción mostrada para espumas de Ti_2AlC que tienen: a) 68 vol. %, b) 72 vol. % y c) 82 vol. % de porosidad [23].

Adicionalmente se han realizado estudios en espuma de caucho compleja, bajo carga de compresión cuasiestática utilizando el método de elementos finitos [19]. En el trabajo realizado por Huiyi Wang et. al (2017) [19] analiza la tensión ya que la deformación nominal alcanza casi el 80% y la espuma presenta un comportamiento hiperelástico. Los resultados de MEF logran buenas concordancias con los datos obtenidos de la simulación multiescala y las pruebas, ya que la deformación nominal de la espuma es inferior al 60%.

La respuesta al estrés de la espuma de caucho también se analiza utilizando el método de múltiples escalas, que se ilustra en la Figura. 2-9. Todos los poros son idealmente redondos y tienen un tamaño uniforme. Se distribuyen periódicamente en el modelo físico. El modelo a microescala se configura como un cubo con el tamaño de $1'' \times 1'' \times 1''$, y de él se cortan cuatro poros redondos $1/8''$ con un radio de 0.640375 in. Usando la aplicación periódica y simétrica a condiciones de contorno en la celda unitaria, la respuesta al estrés del modelo a microescala se simula y se traza [19].

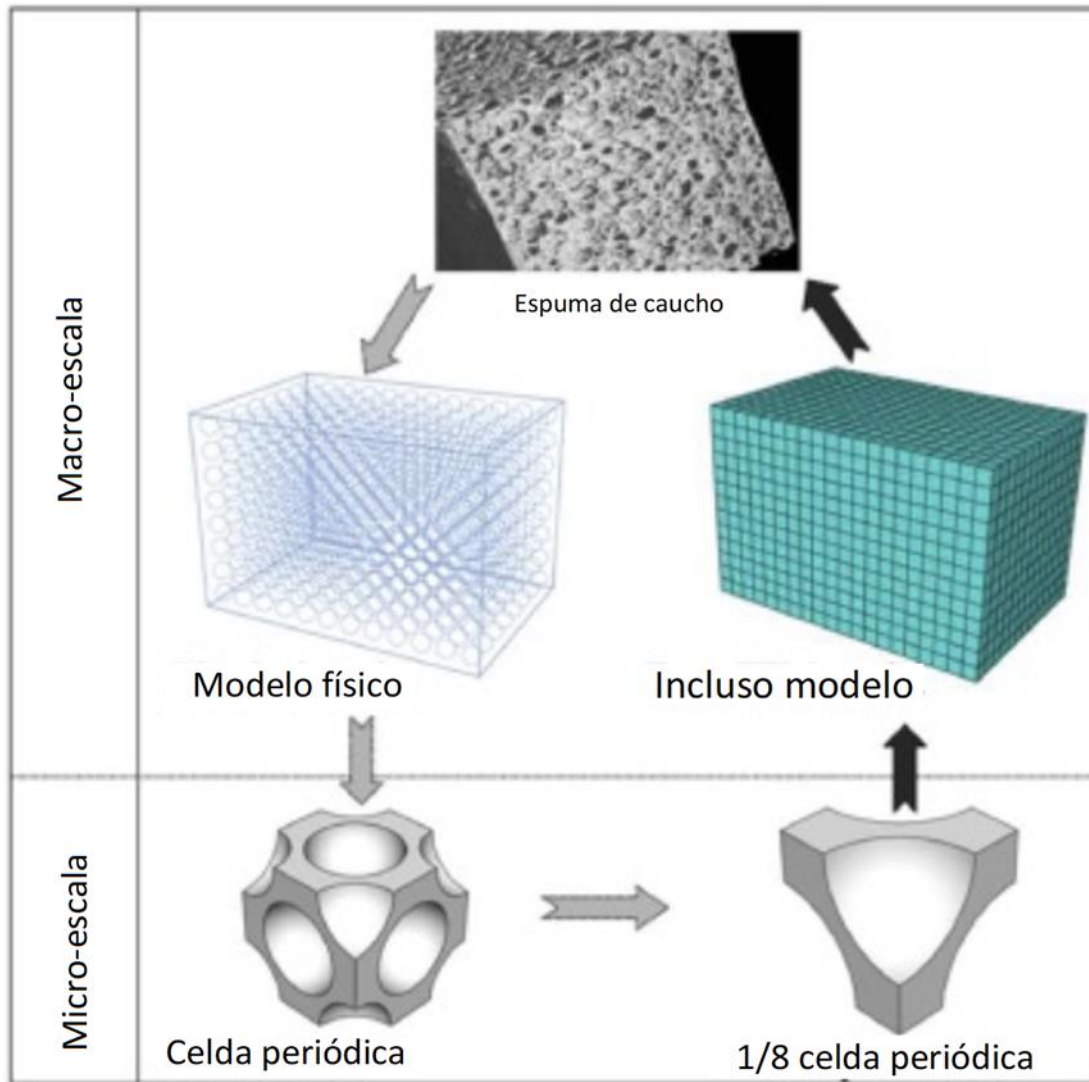


Figura 2-9. Ilustración del método multiescala ^[19].

Otra aplicación del elemento finito en materiales porosos fue en el uso de aislante, o en intercambiadores de calor, presentado por Ratiba Sabrina Ferfera et. al (2020)^[25], donde se realizó un estudio experimental y numérico sobre un intercambiador de calor equipado con un material compuesto para aplicación de gestión térmica electrónica, como se muestra en la Figura 2-10.

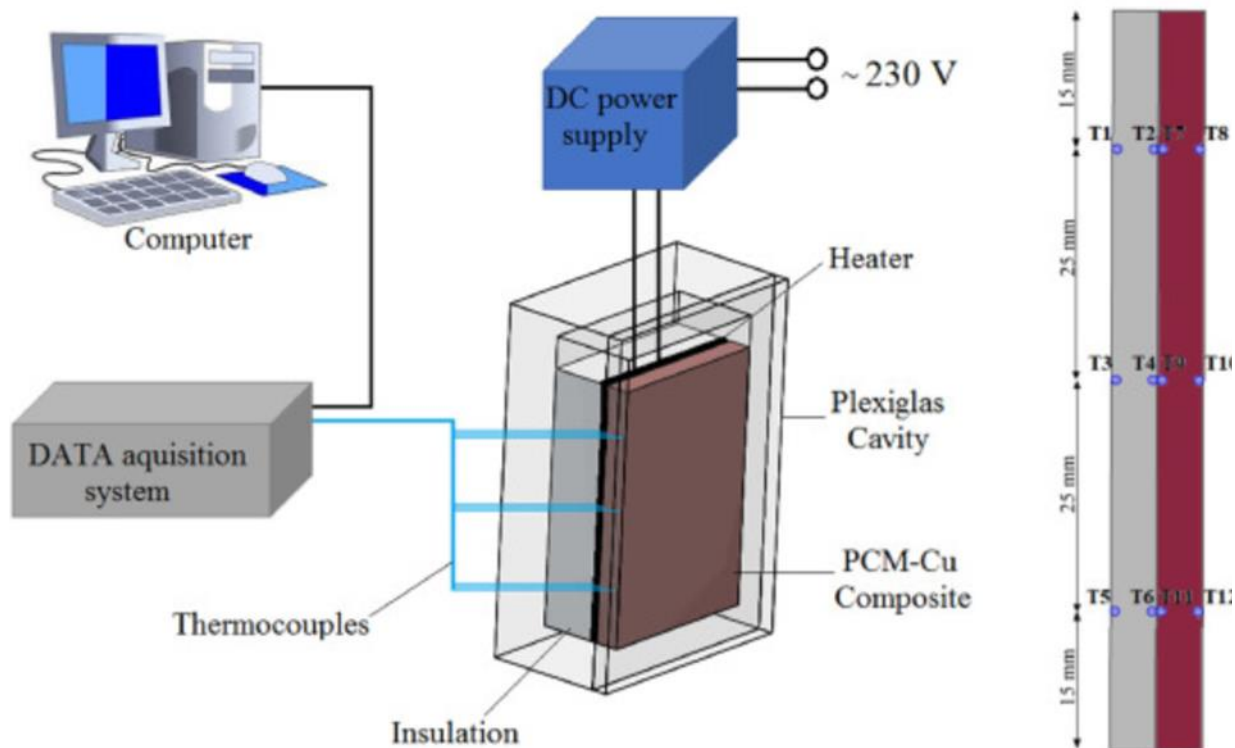


Figura 2-10. Configuración experimental: Vista general, Esquema del aparato experimental, Ubicación de los termopares ^[24].

En este estudio, el material se conformó por cera de parafina incorporada en espumas metálicas. Se ensayaron cinco muestras con una dimensión de $(80 \times 50 \times 5) \text{ mm}^3$: parafina pura, compuesto de espuma de parafina / níquel con una porosidad del 97.2% y una densidad de poros de 20 PPI (poros por pulgada) y compuestos de espuma de parafina / cobre con una porosidad de 96.1%, y densidades de poros de 10 PPI, 20 PPI y 40PPI ^[24].

Los principales resultados de este estudio se relacionaron a los efectos de la morfología de la matriz porosa sobre el rendimiento térmico del intercambiador de calor, así como de la capacidad de almacenamiento y la potencia acumulada, esto se puede observar en la Figura 2-11. Como principal conclusión de este trabajo se tiene que el inserto de espuma metálica mejora cuatro veces la difusión del calor en comparación con el PCM (Cambio de Fase de Material) puro.

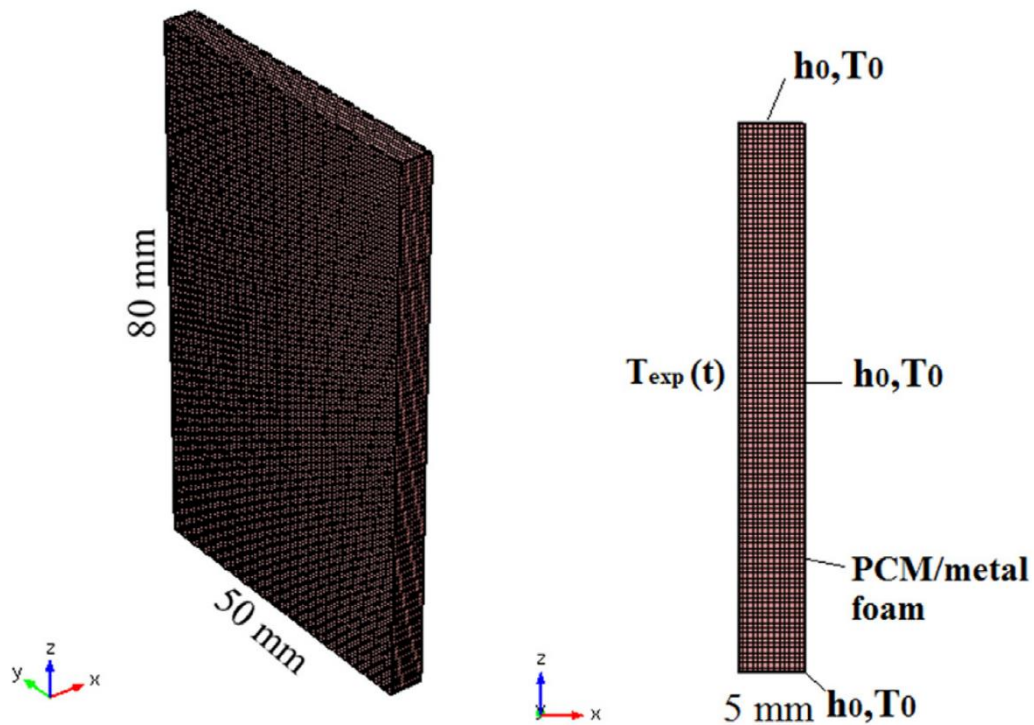


Figura 2-11. Ilustración esquemática del modelo físico con las condiciones de contorno ^[24].

El sándwich de espuma compuesta es un nuevo tipo de estructura que absorbe energía y soporta cargas, se usa ampliamente en ingeniería, como se vio en el trabajo de Ratiba Sabrina Ferfera (2020) ^[25] ver Figura 2-12. Además, la utilización de la conexión entre paneles sándwich de espuma compuesta es esencial ^[24].

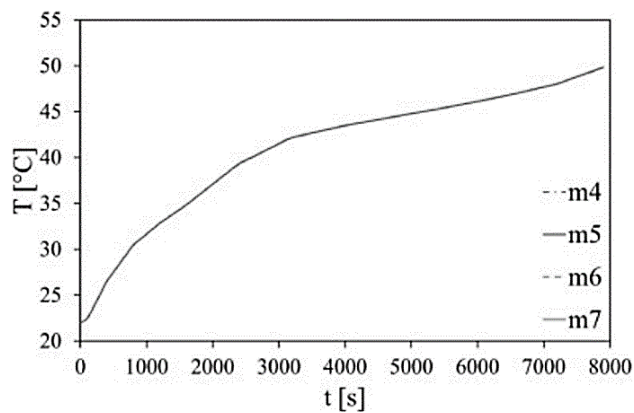


Figura 2-12. Temperatura transitoria para diferentes tamaños de malla para verificar la sensibilidad de la malla ^[25].

En este trabajo utilizaron un arreglo de junta adhesiva entre dos paneles sándwich de espuma GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) e investigan varios modos de falla principales de estructura a través de una prueba de flexión de cuatro puntos, desarrollado por Bo Cen et. al (2017) ^[26], tal como se puede observar en la Figura 2-13,

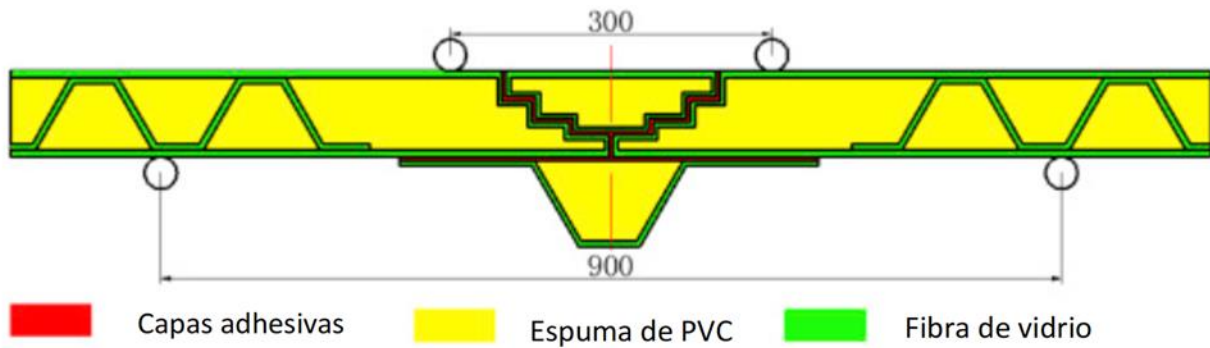


Figura 2-13. Unas juntas adhesivas sándwich de espuma GFRP novedosas ^[26].

Con el fin de analizar los efectos de la rigidez y resistencia en las propiedades mecánicas de la estructura, los autores propusieron tres conexiones más para comparar los resultados de la simulación, se estableció un diseño de ingeniería simple para la estructura conjunta, tal como esto se observa en la Figura 2-14.

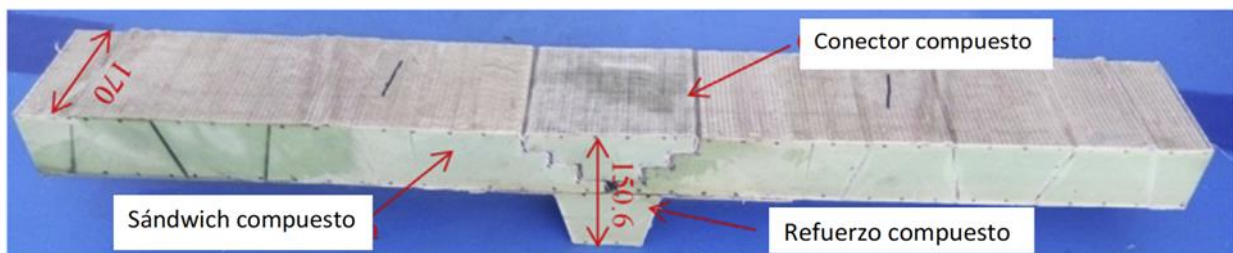


Figura 2-14. Muestra de juntas adhesivas tipo sándwich de espuma GFRP novedosas ^[26].

La Figura 2-15 es la representación del elemento estructural en un modelado 3D, que a su vez tiene un mallado de distinto tamaño, cuya finalidad fue la de utilizar un mallado más fino para elevar la presión.

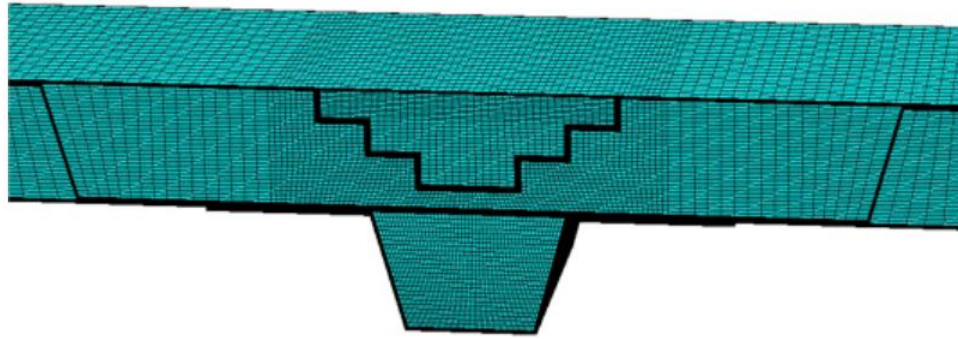


Figura 2-15. Malla de estructura de juntas adhesivas sándwich de espuma compuesta ^[26].

El patrón de deformación principal y el modelo de falla de las nuevas juntas adhesivas tipo sándwich de espuma GRP se demostraron mediante una prueba de flexión de cuatro puntos ^[26].

2.5 Estructuras tipo sándwich

Las estructuras tipo sándwich son ampliamente utilizadas en múltiples aplicaciones, porque presentan una óptima combinación de propiedades, como una alta rigidez, resistencia y una buena absorción energética, manteniendo un peso ligero. Una de las estructuras más efectivas para aumentar la relación rigidez-peso es el diseño de sándwich, que se encontró una aplicación generalizada en estructuras de fuselajes ^[27]. Los núcleos sándwich se pueden fabricar en una variedad de tipos y materiales, la composición más general de este tipo de estructura se muestra en la Figura 2.16.

- núcleo de panal de abeja
- núcleo sintético o de espuma

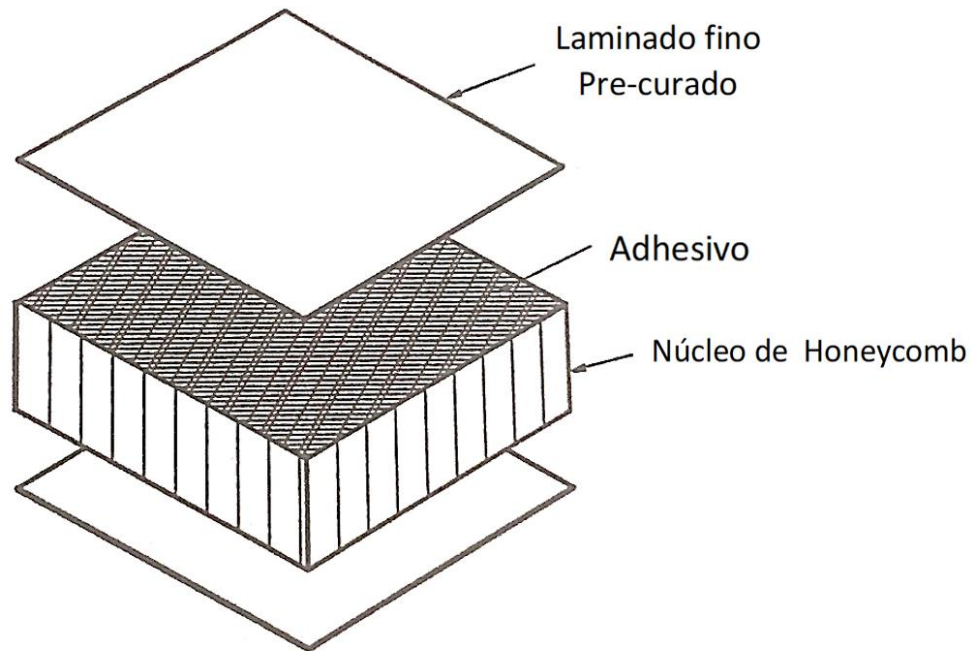


Figura 2-16. Construcción típica en estructuras tipo sándwich ^[27].

Para el análisis de densidad sobre el rendimiento de la absorción de energía en una estructura tipo sándwich con núcleo de aluminio, se evaluó cuantitativamente la influencia del espesor de la hoja frontal, como se menciona en el trabajo de Ying Zhao et. al (2021)^[28], sobre el rendimiento de la absorción de energía para las estructuras sándwich de acuerdo con los indicadores de absorción de energía, como se puede observar en la Figura 2-17.

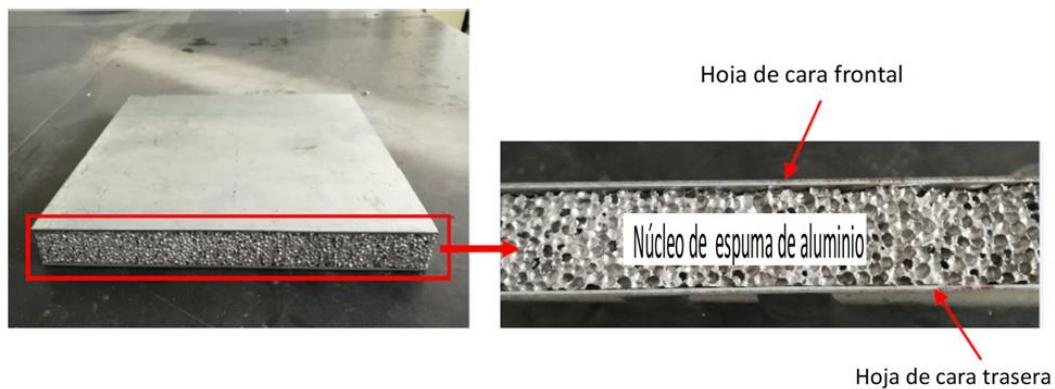


Figura 2-17. Muestra una estructura tipo sándwich de espuma de aluminio ^[28].

Las estructuras sándwich de espuma de aluminio tienen ventajas notables en la absorción de energía para la protección contra impactos la Figura 2-18, muestra el modelo de mallado por simulación.

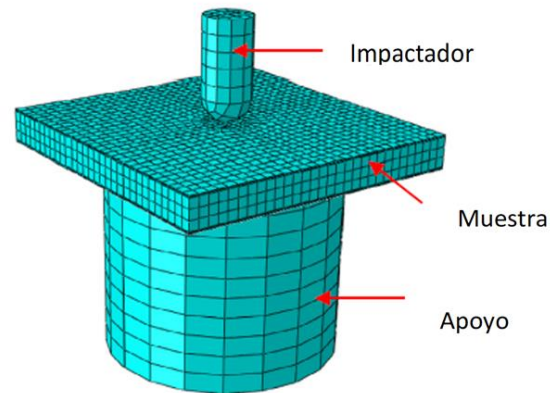


Figura 2-18. Modelo de elementos finitos para ensayo de caída de martillo ^[28].

Un estudio presentó una nueva estructura tipo sándwich con núcleo ondulado bidireccional en este trabajo diseñada y fabricada mediante impresión 3D, teniendo como principal finalidad el análisis de la respuesta a la compresión y los modos de falla estructural Lei Ge et. al (2020) ^[29]. Un modelo analítico fue desarrollado y verificado por métodos experimentales y de elementos finitos ^[29]. Como comparación, en este trabajo las propiedades de compresión de la estructura sándwich convencional también se evaluaron bajo carga de compresión. Como principal aportación de este trabajo es que la estructura del material tipo sándwich con núcleo bi-corrugado posee mejores propiedades de compresión que el convencional con núcleo de un solo corrugado, como se puede observar en la Figura 2-19.

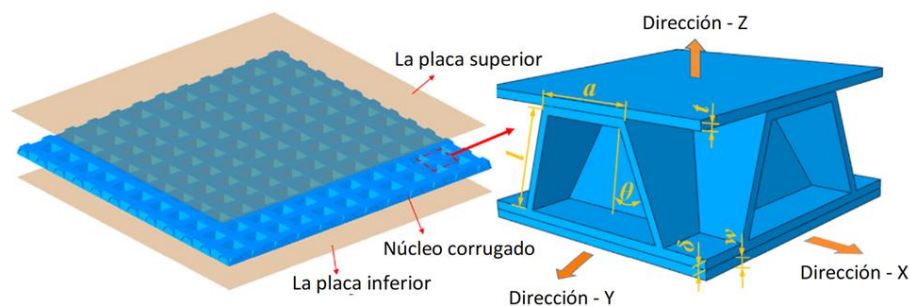


Figura 2-19. Croquis de panel sándwich y parámetros geométricos de una celda unitaria ^[29].

Un ejemplo de este tipo de pruebas se puede apreciar en el un estudio donde se caracterizó las propiedades de compresión estática y por fatiga de un material compuesto híbrido hecho de fibras sintéticas y naturales con una matriz epoxi ^[36], como se muestra en la Figura 2-20. El

material compuesto de vidrio / lino / epoxi se fabricó como una "estructura sándwich" con una configuración de Tipo A utilizando fibras unidireccionales de vidrio (G) y lino (F)) y una configuración de Tipo B (es decir, utilizando vidrio unidireccional (G) y fibras oblicuas de lino (F) de $\pm 45^\circ$).

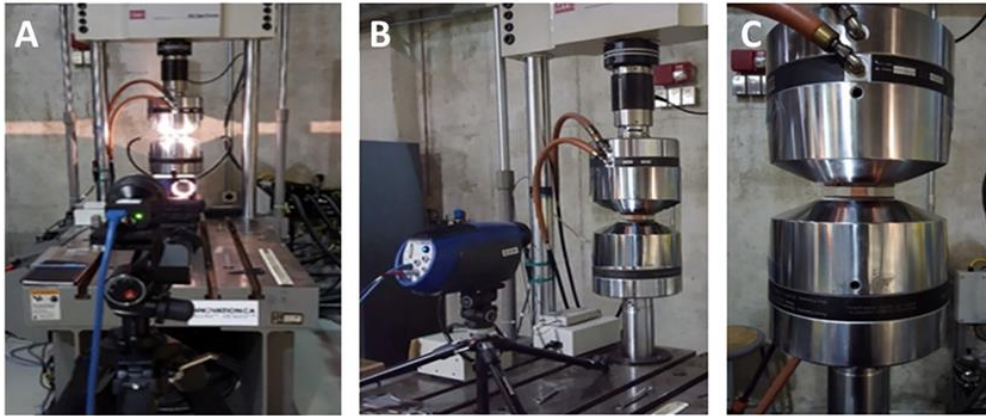


Figura 2-20. Configuraciones para pruebas de compresión. (A) Prueba DIC, (B) Prueba TSA, (C) Primer plano de los agarres hidráulicos para DIC, TSA y pruebas convencionales de fatiga y estática ^[36].

Capítulo 3

Marco teórico

3.1 Método del elemento finito

El método del elemento finito (Finite Element Method) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas en la ingeniería, ayudando a resolver casos en los que hasta hace poco tiempo hubieran resultado imposibles por métodos matemáticos tradicionales. Con el método del elemento finito se han logrado reducir considerablemente los tiempos de diseño y aumentado el rango de seguridad ^[26]. El método del elemento finito es un enfoque numérico para resolver ecuaciones diferenciales parciales (EDPs) mediante aproximaciones definidas localmente en subdominios no traslapados (llamados elementos) que conjuntamente forman el dominio global donde se busca una solución al problema gobernado por la EDP ^[27].

Los pasos principales bajo los cuales opera el método de elementos finitos se describen en los pasos siguientes definidos por G. P. Nikishkov, 2004 ^[31].

1. Discretizar el continuo. El primer paso es dividir una región de solución en elementos finitos. La malla de elementos finitos generalmente se genera mediante un programa de preprocesador. La descripción de la malla consiste en varias matrices de las cuales las principales son coordenadas nodales y conectividades de elementos.

2. Seleccionar las funciones de interpolación. Las funciones de interpolación se utilizan para interpolar las variables de campo sobre el elemento. A menudo, los polinomios se seleccionan como funciones de interpolación. El grado del polinomio depende del número de nodos asignados al elemento.

3. Establecer las propiedades del elemento. La ecuación matricial para el elemento finito debe establecerse que relaciona los valores nodales de la función desconocida con otros parámetros. Para esta tarea diferente se pueden utilizar enfoques; los más convenientes son: el enfoque variacional y el método de Galerkin.

4. Conjuntar las ecuaciones de los elementos. Para encontrar el sistema de ecuaciones global para toda la región de solución, se deben ensamblar todas las ecuaciones de los elementos. En otras palabras, se deben combinar ecuaciones de elementos locales para todos los elementos utilizados para la discretización. Las conectividades de los elementos se utilizan para el proceso de ensamblaje. Antes de la solución, se deben imponer condiciones de contorno (que no se tienen en cuenta en las ecuaciones de los elementos).

5. Resolver el sistema de ecuaciones global. El sistema de ecuación global de elementos finitos es típicamente escaso, simétrico, y definido positivo. Se pueden utilizar métodos directos e iterativos para la solución. Los valores nodales de la función buscada se producen como resultado de la solución.

6. Cálculo de resultados adicionales. En muchos casos necesitamos calcular parámetros adicionales. Por ejemplo, en problemas mecánicos, las deformaciones y los esfuerzos son de interés además de los desplazamientos, que se obtienen después de la solución del sistema de ecuaciones global.

La Figura 3-1, presenta un diagrama general de la secuencia de pasos o etapas de un “modelado basado en simulación” identificado en inglés como (MBS) ^[29].

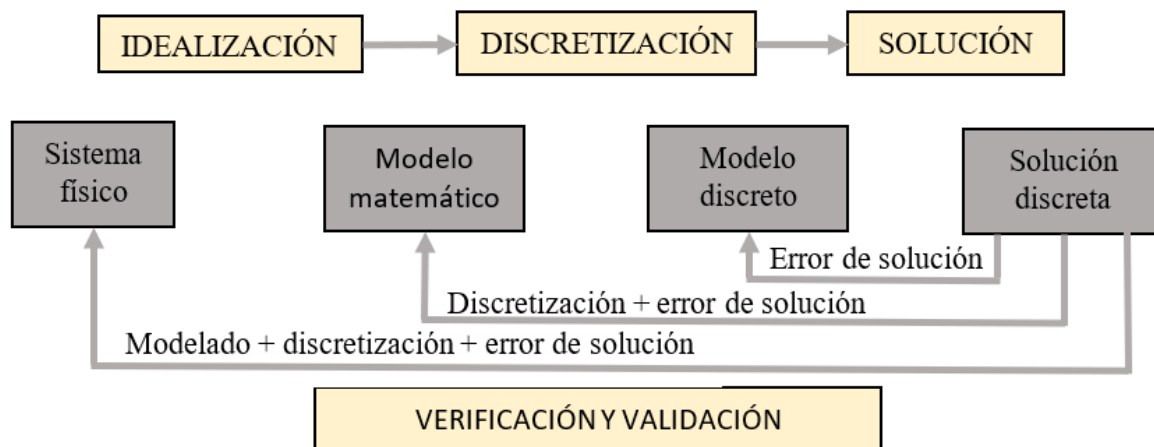


Figura 3-1. Diagrama de flujo de la simulación basada en modelos (MBS) por computadora.

Con los programas especializados de Análisis de Elementos Finitos se puede determinar el comportamiento mecánico-estructural de una pieza o elementos de una máquina, las aspas rotativas un helicóptero o el motor de un de combustión de un automóvil, o la forma aerodinámica de un submarino, un barco, etc. Con los programas de análisis de elementos se pueden analizar y resolver problemas relacionados a fenómenos de. transferencia de calor, vibraciones mecánicas, mecánica de fluidos, fatiga mecánica, electromagnetismo, etc.

3.2 Ensayo de Tensión (Tracción)

Uno de los aspectos más importante de la mecánica o resistencia de los materiales, es la determinación de las propiedades mecánicas de los mismos, esto se logra generalmente a través de la realización de pruebas del tipo destructivo en muestras previamente diseñadas y manufacturadas bajo un estándar internacional ya establecido; el procedimiento de prueba usual es la aplicación de

fuerzas a las probetas de prueba, hasta que se alcance las condiciones de fractura y falla de las mismas. De estos ensayos mecánicos se obtienen lo que se denomina propiedades mecánicas de los diversos materiales que se utilizan en ingeniería, las cuales son la base para la selección de materiales dependiendo de su uso o aplicación.

Las propiedades de los materiales se tienen que determinar, entre otras razones ^[32], para:

- 1) Determinar las características de nuevos materiales antes de que se puedan usar en forma confiable en los diseños.
- 2) Asegurar y controlar la calidad de las materias primas y los productos que se obtienen de ellos, para que cumplan con los requerimientos especificados por los clientes.
- 3) Comparar resultados obtenidos en diferentes partes del mundo.

3.3. Esfuerzo

En ingeniería estructural, los esfuerzos mecánicos o esfuerzos de sección son magnitudes físicas. El estrés es una cantidad física, este se produce cuando fuerzas como la tensión o la compresión actúan sobre un cuerpo. Cuanto mayor sea esta fuerza y menor sea el área de la sección transversal del cuerpo sobre el que actúa, mayor será la tensión. El estrés se mide en newton por metro cuadrado (N/m^2) o pascal (Pa).

Los tipos de esfuerzos a los que pueden estar sometidos los elementos de una estructura, como un barco, avión, motores, etc., son los que se muestran en la Figura 3-2, siguiente:



Figura 3-2. Tipos de esfuerzo en estructuras.

3.3.1. Características del Ensayo de Tensión (Tracción)

Las relaciones tensión-deformación uniaxiales y la resistencia de los materiales son propiedades mecánicas básicas que son vitales para el análisis mecánico, el diseño óptimo y la evaluación de seguridad de las estructuras de ingeniería ^[34]. Por tanto, se han estudiado ampliamente métodos de ensayo de muestras pequeñas capaces de reproducir las propiedades mecánicas. En la Figura 3-3 se muestra una representación del tipo de probetas que se pueden utilizar para ensayos de tracción.

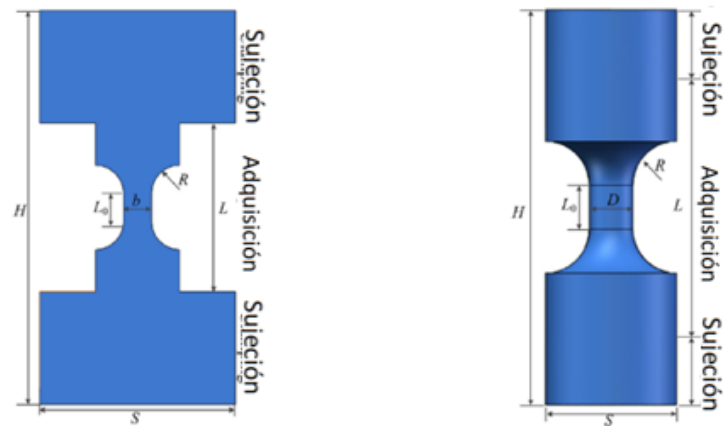


Figura 3-3. Diseño geométrico de pequeñas probetas de tracción ^[34].

Este tipo de ensayos nos proporcionan información respecto a las propiedades mecánicas de un material. Los ensayos no solo aplican a metales, también aplican a materiales cerámicos y compuestos donde generalmente se requiere hacer algún ajuste adicional dependiendo del material a estudiar, donde el principio de carga uniaxial es el mismo. Como resultado se obtendrá el esfuerzo generado debido a la carga externa aplicada al espécimen de prueba, como se puede observar en la Figura 3-4.

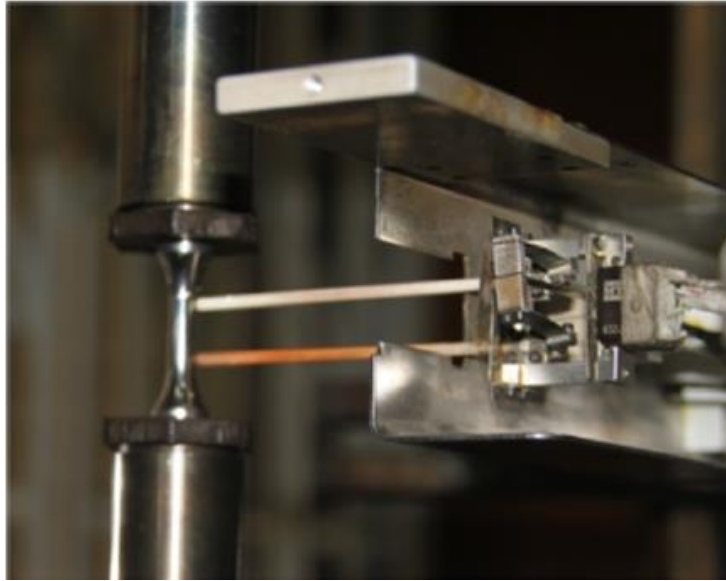


Figura 3-4. La prueba de la muestra uniaxial estándar ^[32].

El esfuerzo es la reacción interna de un material, el cual está sometido a algún tipo de carga externa, para tensión en particular, es el resultado de una carga que se aplica uniforme y perpendicularmente sobre la sección transversal del elemento de estudio.

Uno de los tipos fundamentales de *esfuerzo* es el *esfuerzo normal*, indicado por la letra griega minúscula σ (sigma), donde el esfuerzo actúa perpendicular o normal a la sección transversal del miembro de carga ^[35]. Si el esfuerzo también es uniforme a través del área resistente, el esfuerzo se llama *esfuerzo normal directo*, como se muestra en la Figura 3-5.

3.3 Ecuaciones para tensión

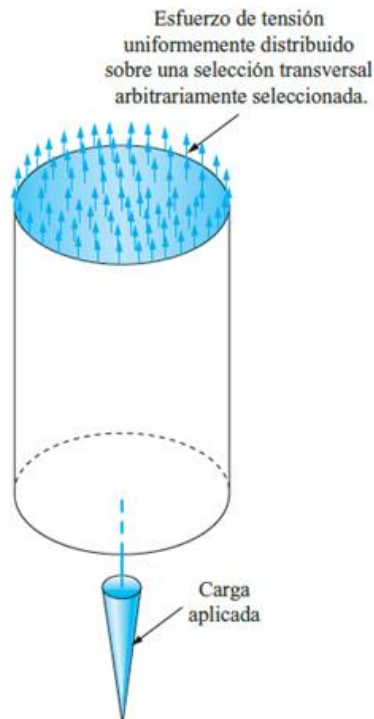


Figura 3-5. Esfuerzo normal directo de tensión ^[34].

La ecuación para esfuerzo normal directo se deriva de la definición básica de esfuerzo, debida a que la fuerza aplicada es compartida por igual a través de toda la sección transversal del miembro que soporta la fuerza, un ejemplo de ello se puede ver en la Figura 3-5.

Ec. 3.1

$$\text{Esfuerzo normal directo} = \sigma = \frac{\text{Fuerza aplicada}}{\text{Área de la sección transversal}} = \frac{F}{A}$$

El área de la sección transversal del miembro que soporta la carga se considera perpendicular a la línea de acción de la fuerza.

Un signo positivo indicará un esfuerzo de tensión, y un signo negativo señalará un esfuerzo de compresión ^[35].

3.3.1 Esfuerzo último

El diagrama esfuerzo-deformación puede variar en su comportamiento debido a las características inherentes de cada material y por ello podrán variar considerablemente, por lo que es necesario realizar múltiples ensayos. Sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes entre los diagramas esfuerzo-deformación de distintos grupos de materiales haciendo posible dividir los materiales en dos amplias categorías con base en estas características. Habrá así materiales dúctiles y materiales frágiles como se muestra en la Figura 3-6.

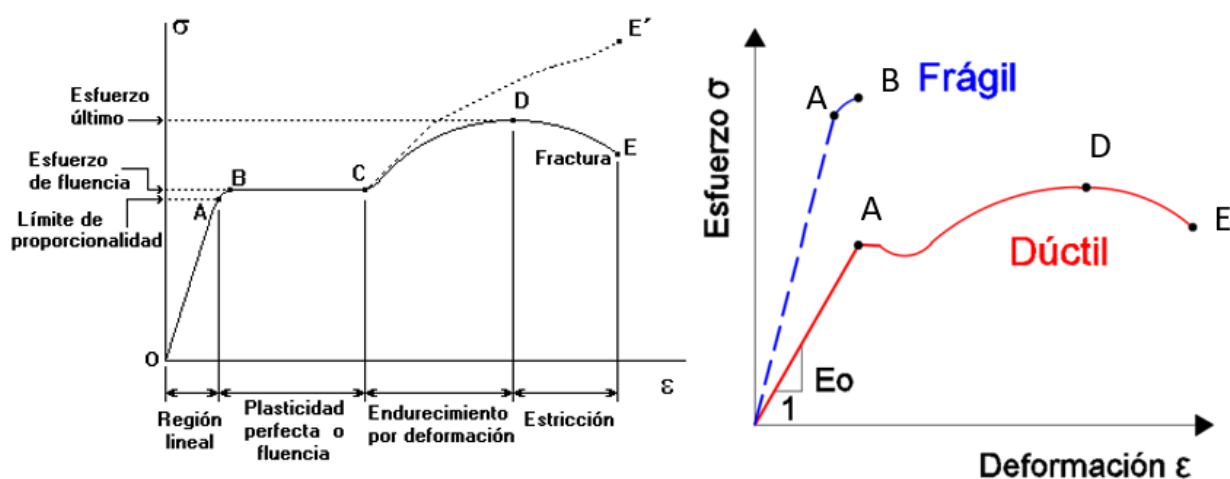


Figura 3-6. Diagramas esfuerzo deformación de materiales dúctiles y frágiles.

La ecuación usada para calcular la resistencia a la tracción plana última es la ecuación para esfuerzo y según la norma ASTM los resultados se reportarán con tres cifras significativas, según la norma.

$$F = P_{max}/A \quad \text{Ec.3.2}$$

Donde:

F = máxima resistencia a la tracción plana, MPa ó psi

P_{max} = fuerza máxima antes de la falla, N ó lbf

A = área de sección transversal, m^2 , mm^2 ó in^2

3.3.2 Análisis estadístico

Para cada serie de pruebas, se deberá calcular el valor promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (en porcentaje) para la resistencia máxima a la tracción plana, en cada uno de los distintos tipos de ensayos realizados.

$$\underline{x} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - nx^2 \right) / (n - 1)} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$CV = 100 \times S_{n-1} / \underline{x} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde:

$\underline{x}$ = media muestral (promedio)

S_{n-1} = desviación estándar de la muestra

CV = coeficiente de variación de la muestra

n = número de especímenes

x_1 = propiedad medida o derivada

3.4 Ensayo de Compresión

Un esfuerzo de compresión es uno que tiende a aplastar el material del miembro de carga y a acortarlo ^[34]. Por el contrario, al de esfuerzo de tensión que tiende a alargar el material hasta llevarlo a la falla. Como se puede observar el principio es el mismo al utilizado con los ensayos de tensión, pero el método de sujeción difiere un poco, como se observa en la Figura 3-7.

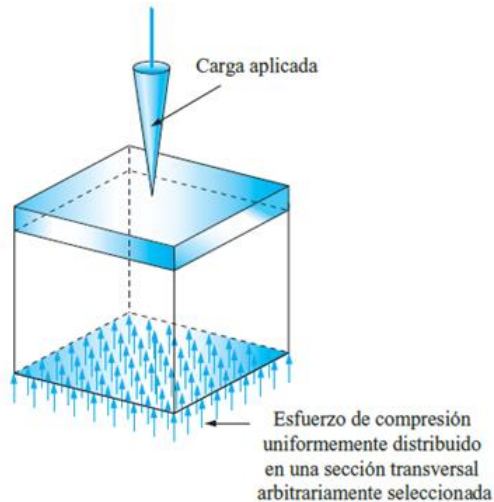


Figura 3-7. Esfuerzo de compresión en una sección transversal arbitraria de un fuste de pedestal de apoyo [34].

La principal diferencia entre un *ensayo de compresión* respecto a uno de *tensión* es el sentido de la carga externa aplicada sobre el elemento de estudio, ya que la dirección es sobre el mismo eje que en el de tensión, como se puede observar en la Figura 3-7.

La ecuación para determinar el esfuerzo normal directo σ es la Ec.3.6, la cual está definida por la carga F distribuida sobre la sección transversal A del elemento de estudio.

3.4.1 Ecuaciones para compresión

La ecuación utilizada para obtener el esfuerzo normal promedio es mediante el cálculo de la suma de las fuerzas entre el área la resistencia sobre el cual se aplica dicha fuerza que esta descrita en la Ec. 3.6, y puede aplicarse tanto a compresión como tensión plana.

Para calcular el módulo de Young, o también llamado módulo de elasticidad plano se utiliza la siguiente ecuación Ec.3.7.

$$E = \frac{St}{A} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Donde:

E = *módulo de compresión del núcleo*

$S = \left(\frac{\Delta P}{\Delta u} \right)$ *pendiente de la porción lineal inicial de la curva de deflexión de la carga*

u = *desplazamiento del bloque de carga*

t = *espesor del núcleo*

Capítulo 4

Metodología

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta el diseño experimental, analítico y de simulación numérica, para validar y comparar las características mecánicas obtenidas de las pruebas realizadas en las probetas de FOAM 20 y FOAM 25 diseñadas y manufacturadas para este trabajo. La parte experimental inicia con el diseño, manufactura y pruebas mecánicas de tensión y compresión; para posteriormente evaluar resultados y utilizar los más representativos para el análisis numérico. La Figura 4-1, presenta un diagrama de flujo en el que se muestra de forma general la metodología utilizada en este trabajo.

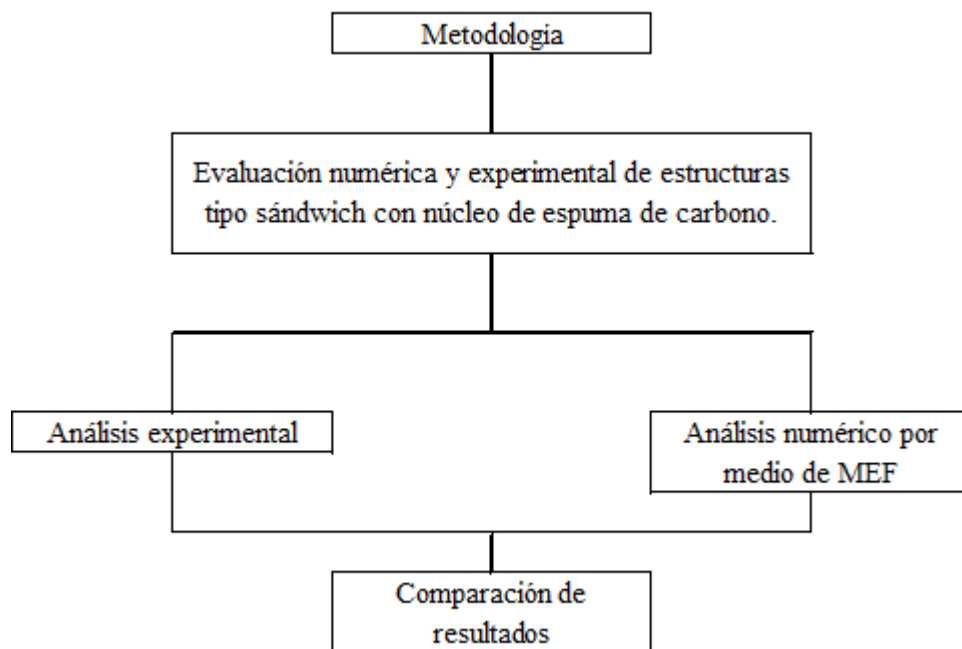


Figura 4-1 Metodología general de análisis

De esta forma se puede caracterizar el material, y contar con datos experimental de ensayos mecánicos de éste material (FOAM 20 y FOAM 25). La información recabada puede alimentar a las librerías de materiales de los softwares de CAE, las cuales se pueden utilizar para trabajos de simulación.

4.2 Análisis experimental

Para validar la resistencia al esfuerzo de la estructura tipo sándwich se usaron como referencia normas estandarizadas para el análisis experimental, las cuales proporcionan el procedimiento con el cual se obtendrá el comportamiento mecánico de la espuma de carbono. Estas normas definen como realizar el proceso para realizar ensayos de tensión y compresión. Y además del proceso también es necesario fabricar las probetas con una geometría específica. En la Figura 4-2 se puede observar la metodología de la etapa experimental.

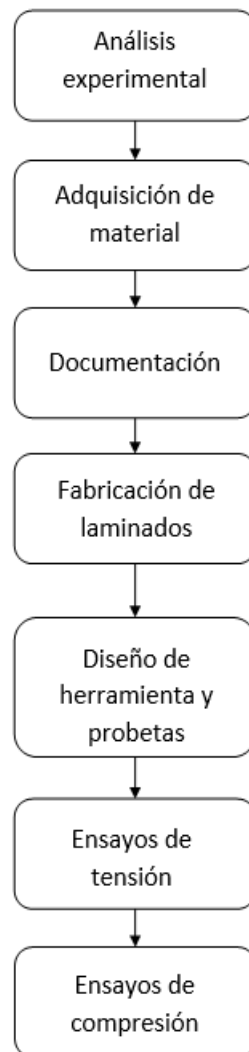


Figura 4-2 Etapas de la experimentación

4.2.1 Adquisición de material

Para adquirir el material que se utilizó para este trabajo se contactó a una empresa especializada en la fabricación de este recurso. Se solicitó espuma de carbono de alta densidad en dos variedades, un modelo CFOAM 20 y otro CFOAM 25. La diferencia entre cada uno de ellos es la densidad. En la Figura 4-3 se puede observar un ejemplo del tipo de material que es la espuma de carbono.



Figura 4-3 Espécimen de espuma de carbono

Para la manufactura de las probetas para los ensayos, se utilizó espuma de carbono (FOAM 20 y FOAM 25). Entre las características de estos materiales se pueden mencionar la capacidad de soportar altas temperaturas, 343°C, menor peso, facilidad para reparar, fácil de maquinar, alta resistencia mecánica, tal como se observa en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Principales características de pruebas para la espuma de carbono ^[1]

Propiedades	Método de Prueba	Touchstone CFOAM		Unidades
		20	25	
Densidad Nominal	ASTM D1622	20 0.32	25 0.40	lbs/ft ³ g/cc
Fuerza de Compresión	ASTM C 365	>1200 8.3	>2000 15	Psi Mpa
Módulo a Compresión	ASTM C 365	90 620	120 830	Ksi Mpa
Fuerza de Tensión	ASTM C 297	>300 >2.2	>500 >3.5	Psi Mpa
Módulo a tensión	ASTM C 297	60 500	120 830	Ksi Mpa
Fuerza Cortante	Cortante Torsional	>250 1.7	>300 2.1	Psi Mpa
Coefficiente de Expansión Térmica	ASTM E 228	3.0 5.0	3.0 5.0	ppm/°F ppm/°C
Conductividad Térmica	ASTM E 1225	.15 a 16 .25 a 25 Adaptable		BTU/ft-hr°F W/m²K
Temperatura Máxima de uso Operativo		1100 Aire 600 Aire 5500 Inert 3000 Inert		°F °C
Resistividad Eléctrica	ASTM D 4496	4E-03 a 4E+06 1E-02 a 1E+07 Adaptable		ohm-in ohm-cm
Resistencia al Fuego	ASTM E 1354 ASTM E 1515 MIL-STD-1623 Guardia Costera OIM PPF Código Parte I y Parte III	El resultado indica que CFOAM pasará todas las pruebas de fuego clave, que incluyen: panel radiante, generación de humo, toxicidad, calorímetro de cono, resistencia al fuego y prueba de esquina de la habitación.		

Todas las pruebas realizadas de compresión y tensión fueron llevadas a cabo con espuma de carbono con dos tipos de densidad, CFOAM 20 y CFOAM 25, las cuales son 320 Kg/m³ y 400 Kg/m³ respectivamente.

4.2.2 Documentación

La documentación necesaria para realizar los ensayos de tensión y compresión se obtuvieron de la organización ASTM (American Society of Testing Materials), la asociación americana de pruebas en materiales. Para ensayos de tensión la norma es C297 y para los ensayos de compresión es la norma C365 [38]. En ambas pruebas se utilizó un equipo de prensa universal para aplicar la carga axial sobre los especímenes como lo especifican las normas. En la configuración de los laminados se usó de referencia la bibliografía de Composite airframes structures [42], con la cual se definieron la configuración de laminados tipo sándwich.

La función principal de la máquina universal de ensayo es la de comprobar la resistencia de un producto o material. Para llevar a cabo esta tarea, este equipo está compuesto de un sistema de servocontrol, el cual aplica cargas controladas sobre una probeta, la cual tiene un modelo de dimensiones preestablecidas de acuerdo con la normatividad utilizadas para el tipo de ensayo. Esta máquina proporciona en forma gráfica la deformación y carga al momento de la fractura y falla del espécimen de prueba.

Para el análisis de tensión y compresión en este trabajo, se utilizó un equipo universal Tinius Olsen, con el software Test Navigator, para obtener las gráficas de respuesta de la carga vs deformación, como la que se muestra en la Figura 4-3.



Figura 4-3 Equipo de ensayos universal para pruebas mecánicas

4.2.3 Fabricación de laminados

En la fabricación de los laminados tipo sándwich se utilizó un proceso de laminados en bolsa, el cual requiere de hacer un vacío que mejora la calidad de los laminados. Para la elaboración de las probetas se utilizó la espuma de carbono como núcleo del laminado tipo sándwich, esta configuración se muestra en la Figura 4-4, para unir los laminados se usó resina epóxica, Figura 4-3.

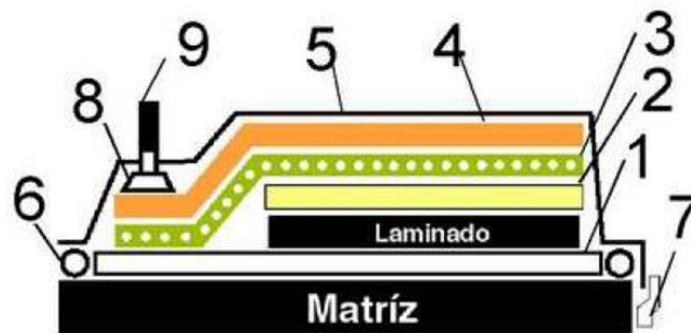


Figura 4-4 Procedimiento de laminados: 1. Desmoldante, 2. Peel ply, 3. Film Perforado, 4. Respirador, 5. Bolsa de vacío, 6. Cinta de sellado, 7. Cinta de presión, 8. Válvula de vacío, 9. Conector rápido ^[27].

Adicionalmente para realizar los laminados de materiales compuestos fue necesario aplicar resina epóxica, la información de esta se muestra tanto en la Figura 4-5, como en la Tabla 4-2.



Figura 4-5 Resina epóxica ^[40]

Para la fabricación de la estructura sándwich se utilizó fibra de carbono y resina de epóxica. Las características de la resina se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Principales características de la resina ^[40]

Technical Mechanical Properties	1000	1000 w/ 1025	ASTM
Proporción de mezcla, en peso	100:18:00	100:18:00	
proporción de mezcla, en volumen	05:01	05:01	
Vida útil, @ 77°F	9.5 Min	23 Min	D2471
Color	Lt. Amber	Lt. Amber	Visual
Viscosidad mixta, @ 77°F, cps	800 cps	575 cps	D2393
Dureza de curado, Shore D	87 Shore D	87 Shore D	D2240
Gravedad específica, Grams, cc	1.12	1.11	D1475
Resistencia a la tracción, psi (1)	39,374 psi	37,284 psi	D638
Alargamiento a la rotura, % (1)	21.30%	30.60%	D638
Módulo de tracción, psi (1)	2,527,828 psi	2,574,360 psi	D638
Fuerza flexible	46,101 psi	40,497 psi	D790
Módulo de flexión	2,073,453 psi	1,968,917 psi	D790
Resistencia al impacto Izod	1.24	0.94	D256
Temperatura de transición del vidrio	152.3°F Onset	172.2°F Onset	DMA
Temp. Tg	193.5°F Peak	200.0°F Peak	D4065
*Propiedades derivadas de un laminado de 1/8", colocación manual			
Estilo 7500 Fibra de vidrio, 40-45 % de contenido de vidrio			

La técnica utilizada para la elaboración de la resina fue la utilización de bolsas de vacío selladas, para lograr mejor cohesión y calidad en los laminados, tal como se muestra en la Figura 4-6. Los laminados tienen una configuración de tres capas con orientaciones de: $\pm 45^\circ$ / $0^\circ/90^\circ$ / $\pm 45^\circ$. ^[27], los cuales se colocaron sobre una superficie de vidrio para mejorar el acabado y reducir la posibilidad de poros durante el proceso de curación de la resina.

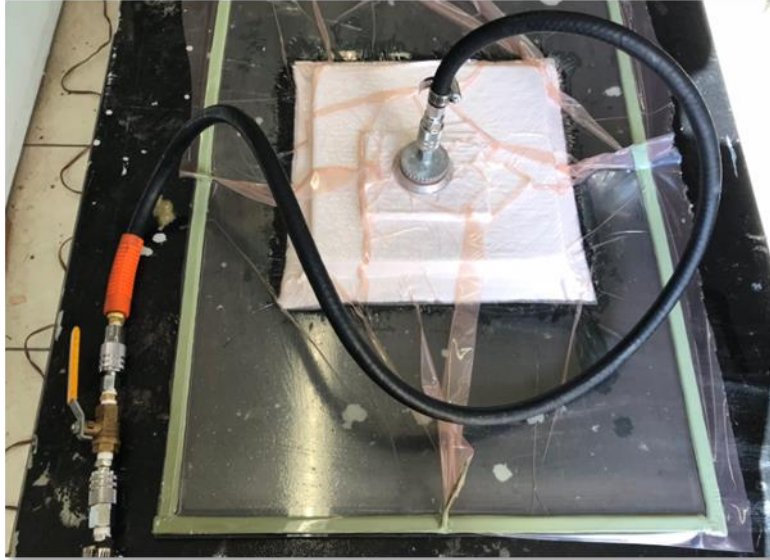


Figura 4-6 Fabricación de laminados tipo sándwich

Una vez finalizado el procedimiento de fabricación de los laminados, Figura 4-7, se procedió a crear probetas con las dimensiones, especificadas por la norma ASTM C 297 y ASTM C365, las cuales tuvieron una sección transversal de 1.5 in x 1.5 in y 1.5 in de espesor para cada una de ellas. Las probetas fueron cortadas y maquinadas para tener un mejor acabado y dimensionamiento.

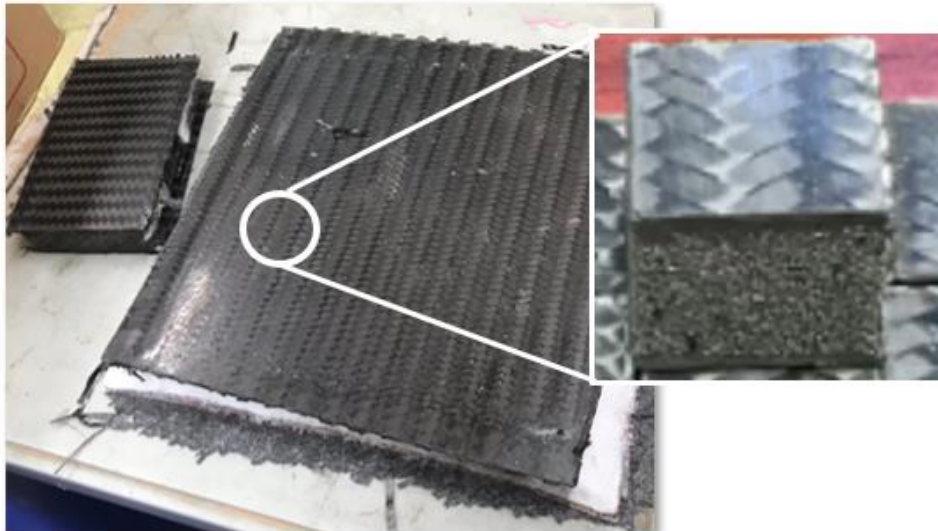


Figura 4-7 Laminados terminados

Los laminados fueron cortados en un taller de maquinados para tener una mejor precisión en los cortes de las probetas, de esta manera se obtuvo una sección transversal constante y facilitara la unión de las probetas a la herramienta de tensión que se fabricó en el mismo taller.

4.2.4 Diseño de herramienta y probetas

Para realizar los ensayos de tensión en estructuras tipo sándwich se requirió implementar una herramienta con determinadas características para poder lograr realizar los experimentos recomendados en la norma ASTM C 297, misma que describe las posibles variaciones que pueden tener las probetas. Por lo anterior, se diseñó un conjunto de dos sujetadores y siete pares de bloques para realizar los ensayos, así como un par de pernos para fijar las probetas en los sujetadores o mordazas. El diseño se muestra en la Figura 4-8.

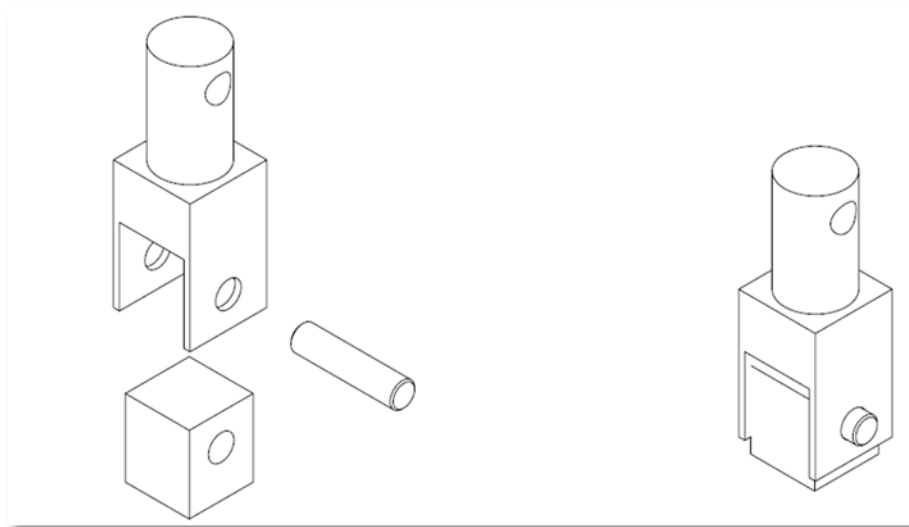


Figura 4-8 Ensamble de herramienta

La herramienta consistió en seis elementos que se utilizaron para sujetar la probeta por las caras superior e inferior. En la Figura 4-8, se muestran sólo tres elementos. Se fabricaron siete pares de bloques para realizar siete pruebas de tensión, debido a que la norma especifica un mínimo de cinco pruebas para validar el ensayo, las dos probetas adicionales se utilizaron como pruebas de montaje para verificar y afinar, tanto el conjunto de las muestras y el equipo. La herramienta

completa se puede observar en la Figura 4-9. Los planos de la herramienta se adjuntan al final de este trabajo en el apéndice.

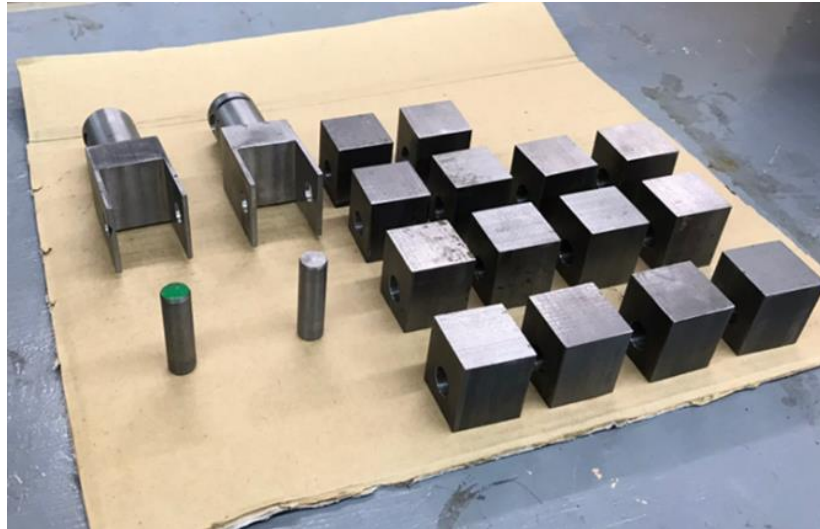


Figura 4-9 Herramienta para ensayos de tensión bajo la norma ASTM C 297

Para la aplicación de la carga normal a las probetas, estas fueron fijadas a las superficies de contacto con un pegamento con alta adhesión. En este caso se utilizó un pegamento epóxico J&B Weld, cuyas características se especifican en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Principales características de la resina ^[41]

PROPIEDADES	MÉTODO DE PRUEBA	RESULTADO
Color (curado)		Gris oscuro
Tiempo de trabajo (70 ° F)		45 min.max
Establecer la hora		4-6 horas
Tiempo de curación		16-24 horas
Temperatura máxima (intermitente)		600° F
Temperatura máxima (continua)		500° F
Resistencia a la tracción	ASTM CI,638	3960 psi
Resistencia a la adhesión	ASTM D297	3960 psi
Resistencia a la flexión	ASTM D790	3960 psi
Resistencia a la compresión	ASTM 0695	3960 psi
Dureza Shore D	ASTM 02240	85 (1 semana)
Encogimiento	ASTM 01779	0.0%
Flash Power (sin curar)		7400

Finalmente, las probetas ya terminadas que se utilizaron para los ensayos de tensión y compresión se pueden observar en la Figura 4-10.

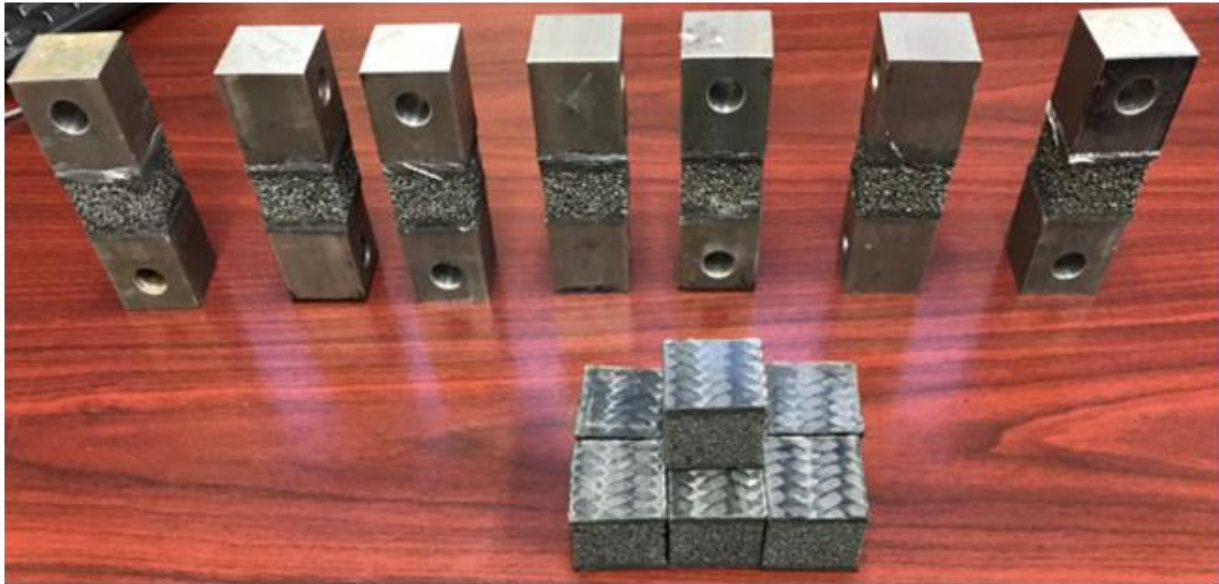


Figura 4-10 Probetas para ensayos de tensión (superior) y ensayo de compresión (inferior)

4.2.5 Ensayos de tensión

Para realizar los ensayos de tensión se requirió hacer un ensamble de las probetas con la herramienta y el equipo universal. Primero se realizó la colocación de cada probeta por separado a la herramienta de montaje como se muestra en la Figura 4-11. Los ensayos de tensión y compresión se realizaron a una tasa de movimiento transversal de la cabeza de 5.08×10^{-4} m/min, tal como se especifica en las normas ASTM C297 y ASTM C365.



Figura 4-11 Ensamble de probeta a tensión

Una vez unida la probeta a la herramienta, se procedió a instalarla en el equipo de tensión como, tal como se observa en la Figura 4-12. En este caso se realizaron siete pruebas, dos de ellas con el fin de utilizarlas como pruebas de práctica, es decir ensayos para verificar que el montaje de equipo y probetas fue realizado correctamente.



Figura 4-12 Montaje para ensayos de tensión

4.2.6 Ensayos de compresión

Los ensayos de compresión fueron realizados con el mismo equipo de pruebas, solo se cambió las mordazas para tensión por unos discos planos, los cuales consisten en superficies planas y opuestas para poder aplicar carga sobre el elemento de estudio, hasta llevarlo al fallo, como se muestra en la Figura 4-13. Este proceso se recomienda en la norma ASTM C365.



Figura 4-13 Herramienta para ensayo a compresión

La información experimental obtenida de cada uno de los ensayos se agrupo clasificándola en tipo de ensayo, tipo de material, y las variables que se midieron fueron la carga aplicada y la deformación generada. Estas mismas variables fueron incorporadas en el modelo 2D, a partir del cual se realizaron las simulaciones, con la finalidad de obtener un esfuerzo máximo aproximado al real determinado con los ensayos experimentales.

4.3 Análisis numérico por MEF

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos experimentales, se efectuará el modelado de los especímenes de prueba por medio de software CAD-CAE, utilizando las características geométricas que se especifican en las normas ASTM C297 y C365 para generar un modelo en 3D, del cual se extrae el modelo en 2D. Con este último modelo se realiza la simulación por elemento finito. Es aquí donde se especificarán las condiciones de frontera con las que se llevará a cabo el ensayo.

Para el desarrollo de los análisis experimentales se manufacturaron las probetas de acuerdo las especificaciones de las normas ASTM C297 y C365 antes mencionadas, procediendo a efectuar

los ajustes del equipo según la prueba a realizar, ya que los ensayos de tensión y compresión requieren distintos ajustes. En la Figura 4-14 se observan las etapas de la simulación.

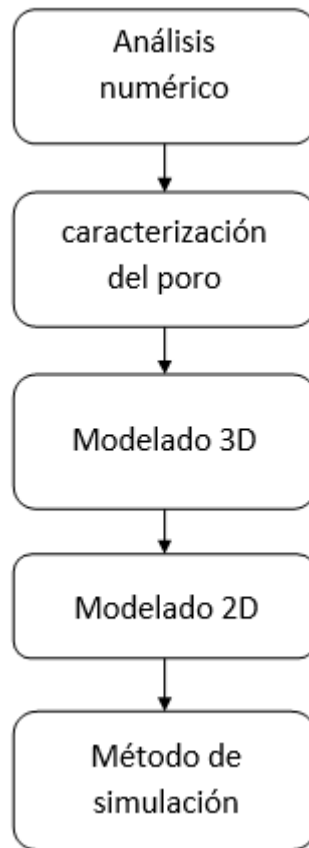


Figura 4-14 Etapas de la simulación

4.3.1 Caracterización de poro

Para medir el tamaño de poro se consideró el tamaño más pequeño y el más grande, con lo cual se agregará al modelado de la pieza. Para poder tomar las lecturas de tamaño se usó un microscopio metalográfico y una regla con escala. En la Figura 4-15 se puede ver el equipo utilizado para caracterizar el poro de la espuma de carbono.



Figura 4-15 Microscopio y regla

4.3.2 Modelado

El modelado de la muestra se realizó mediante software CAD, el cual primero se ingresaron las dimensiones de la geometría, posteriormente se agregó el arreglo de la distribución de poros que aplicaría a toda la extensión del modelado, que en este caso se usó un arreglo rectangular. Una vez que se tiene el modelado 3D, se procedió a ingresar un nuevo material a la biblioteca del CAD, en el cual se vaciará la información sobre las propiedades mecánicas proporcionadas por el proveedor. Esta información se puede observar en la Tabla 4-1 mencionada con anterioridad.

Ya que se tiene el modelado 3D y la información del material está habilitado en la biblioteca del software. En la Figura 4-16 se puede observar el modelado terminado de la probeta.



Figura 4-16 Modelado 3D de la espuma de carbono

Se realizaron unas placas que simulan los laminados de la probeta con el fin de construir una estructura tipo sándwich. Una vez que se tiene el modelado, las propiedades del material y los laminados en el software CAD, se hizo un ensamble que representa una probeta con la estructura que se pretende para este trabajo. En la Figura 4-17 se observa el modelado de la espuma de carbono con los modelados de las láminas.

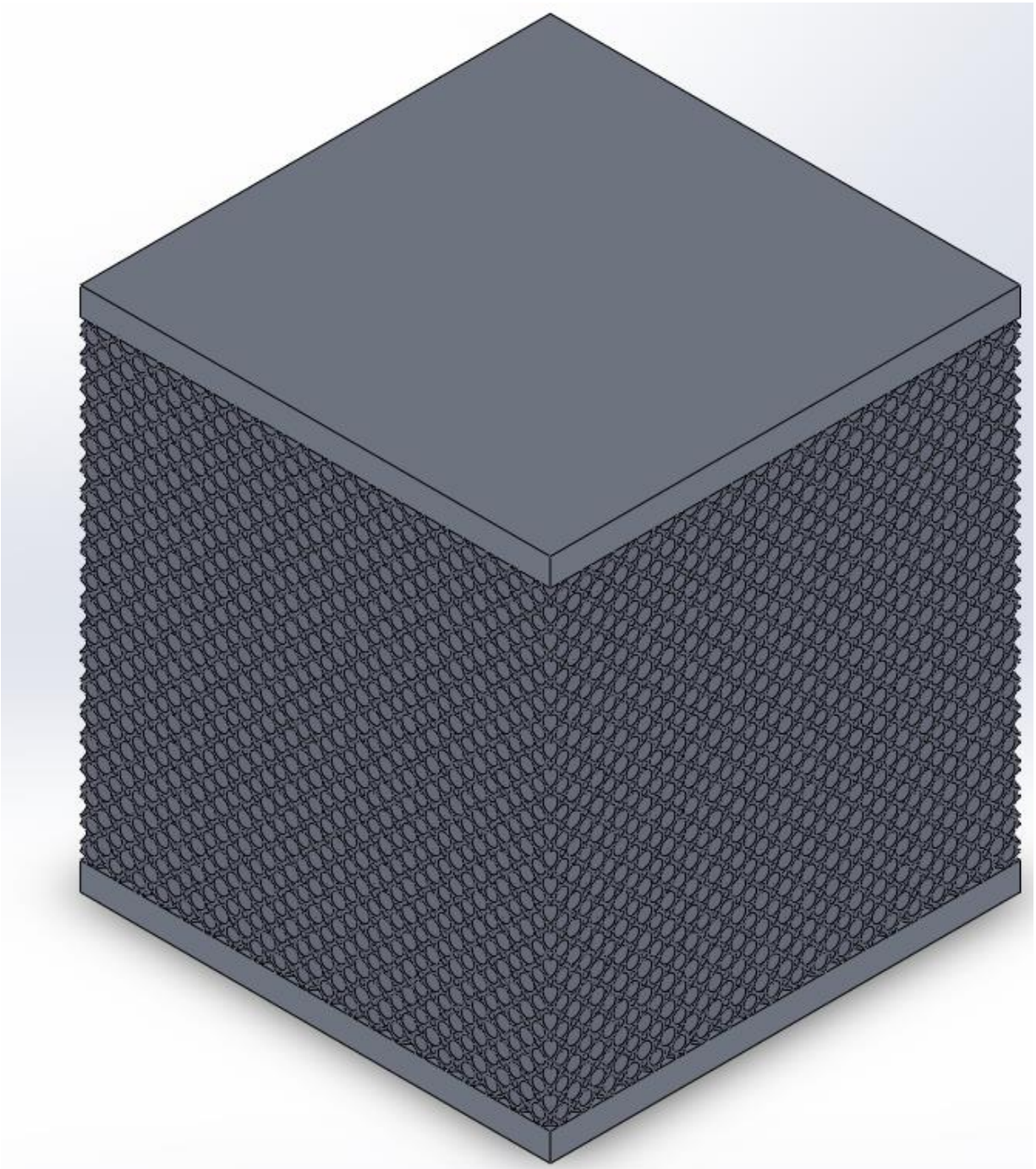


Figura 4-17 Modelado 3D de los modelos de espuma de carbono y laminados

4.3.3 Modelado 2D

Para realizar el modelado en 2D, esto se tiene que especificar durante el proceso de simulación, en donde solo se selecciona una opción y la vista del modelo 3D que se pretende usar para cambiar a 2D y realizar la simulación. En la Figura 4-17 se puede observar la opción de simulación en 2D.

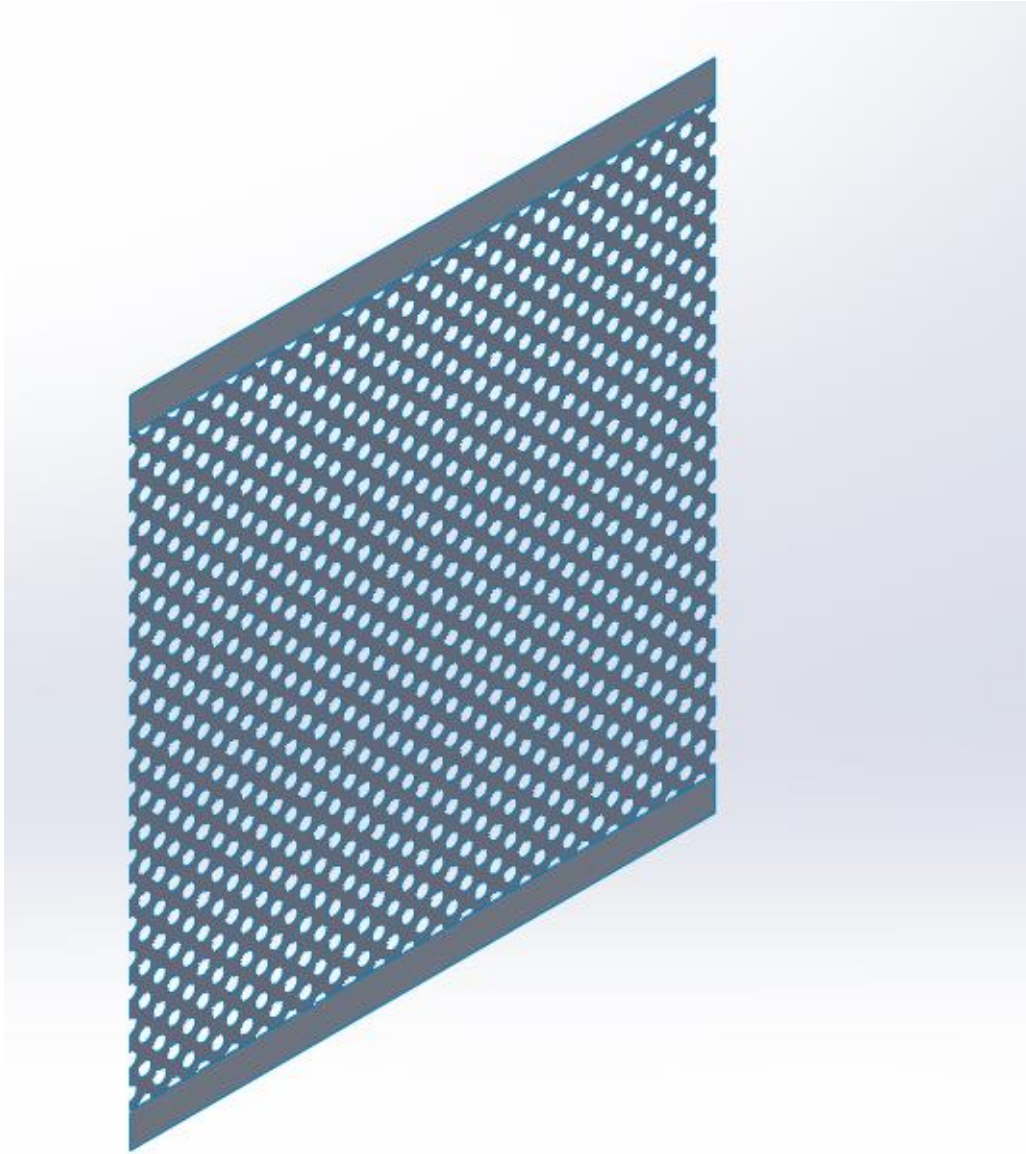


Figura 4-18 Modelado en 2D

4.3.4 Método de simulación

Durante el proceso de simulación fue necesario tener el modelado 3D de donde se derivó el modelo 2D, en este último fue donde se hizo la simulación, pero antes de obtener los resultados se deben ingresar las condiciones que definen el tipo de estudio, como lo fue la tensión y compresión en los ensayos experimentales. Estas restricciones y condiciones de carga deben aplicarse de manera que representen las mismas condiciones que en la prensa universal, donde las superficies del elemento de estudio son donde se aplican las cargas axialmente sobre las probetas. En la Figura 4-19 se pueden ver las restricciones y cargas aplicadas al elemento de estudio.

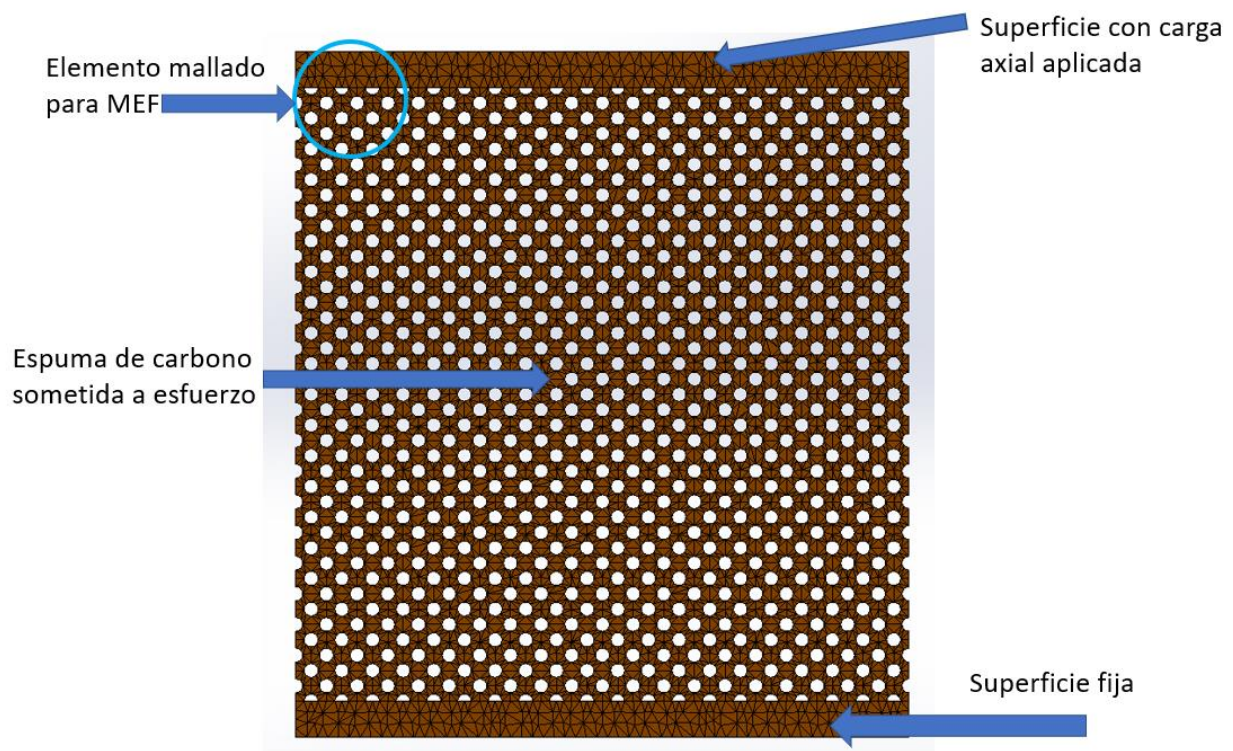


Figura 4-19 Características de la simulación por MEF

Capítulo 5

Análisis de Resultados

5.1 Ensayos de tensión CFOAM 20

En este capítulo se presenta el análisis de resultados de las pruebas experimentales de tensión y compresión realizadas a las probetas de ensayo de los laminados con CFOAM 20 y CFOAM 25.

5.1.2 Ensayo de tensión

Posterior a la calibración de la máquina de pruebas universal, se realizaron cinco ensayos de tensión, con la herramienta construida específicamente para este tipo de ensayos, facilitando la intercambiabilidad de las probetas y cada uno de éstos ensayos. Las pruebas se realizaron a una velocidad de 0.020 in/min , tal como se establece en la norma, hasta llegar a la falla y fractura de la probeta, ocasionando la falla por tensión como tal como se muestra en la Figura 5-1 donde se pueden observar la totalidad de las probetas después de los ensayos respectivos.



Figura 5-1 Probetas sometidas a cargas por tensión

Las probetas fueron clasificadas como se puede observar en la Figura 5-2, con la finalidad de describir su comportamiento e identificarlas entre la totalidad de las pruebas realizadas.

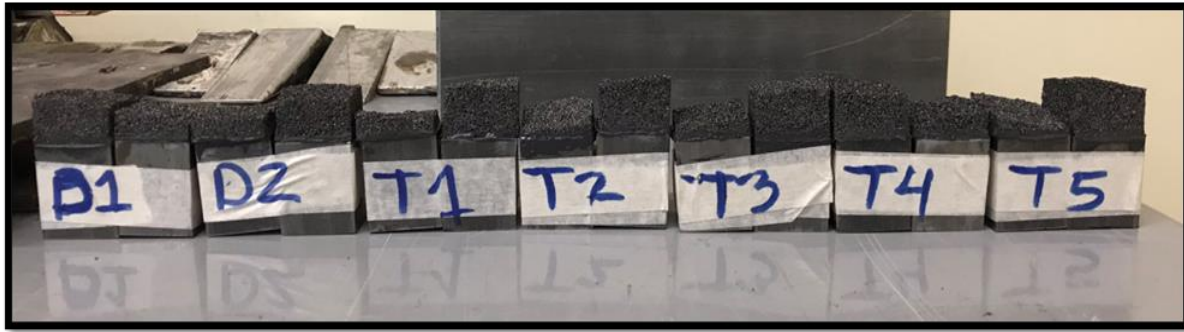


Figura 5-2 Ensayos de tensión en las siete probetas: D₁ y D₂ son las probetas de ajuste y de la T₁ a la T₅ son los ensayos que se contemplarán en el estudio.

Para poder obtener la información de manera confiable, primero se realizaron dos ensayos de prueba de ajustes, verificando el adecuado montaje de la herramienta de sujeción-probeta y equipo. De estos dos primeros ensayos de pruebas de ajustes, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 5-3.

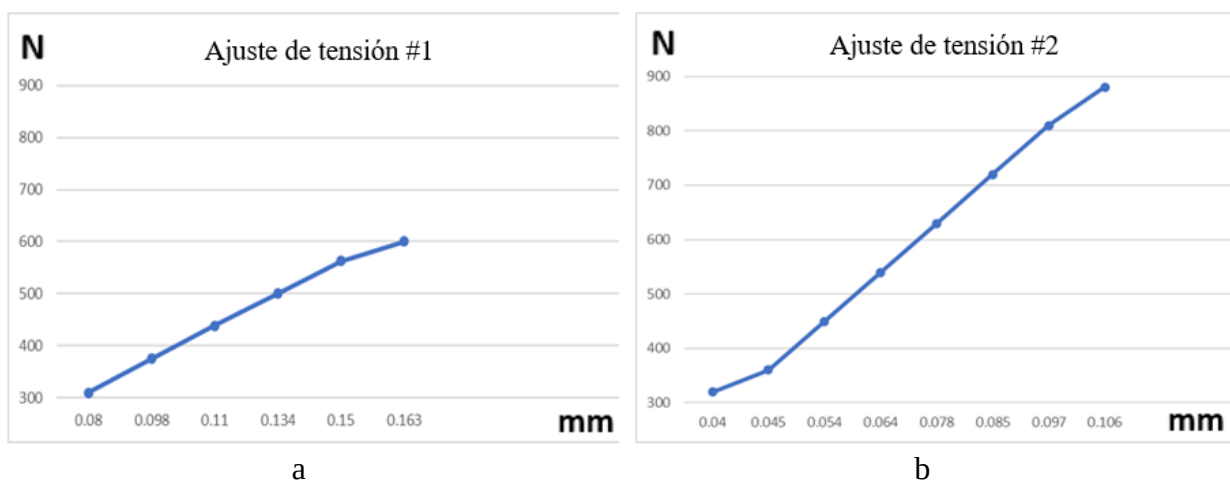


Figura 5-3 Gráficas de ensayos de ajuste a tensión para CFOAM 20, a) Ensayo de ajuste no.1, b) Ensayo de ajuste no.2

De las dos pruebas realizadas se puede observar una diferencia de la carga máxima aplicada de 300 N, la cual se debió a un problema de desalineamiento en el eje vertical de la herramienta durante la prueba de tensión, el cual fue corregido.

La Figura 5-4, presenta el modo de falla que se presentó en forma general en la totalidad de las probetas sometidas a tensión, la flecha en la figura muestra el modo típico de falla para las probetas sometidas a tensión.

Se realizaron un total de catorce ensayos mecánicos para cada uno de los materiales CFOAM 20 y CFOAM 25, es decir catorce pruebas de tensión y catorce pruebas de compresión, sin embargo, para el análisis de datos solo se consideraron cinco ensayos para cada material por cada prueba (cinco a tensión y cinco a compresión para cada material), ya que las dos primeras probetas fueron utilizadas como de ajuste y calibración de la máquina universal de pruebas.

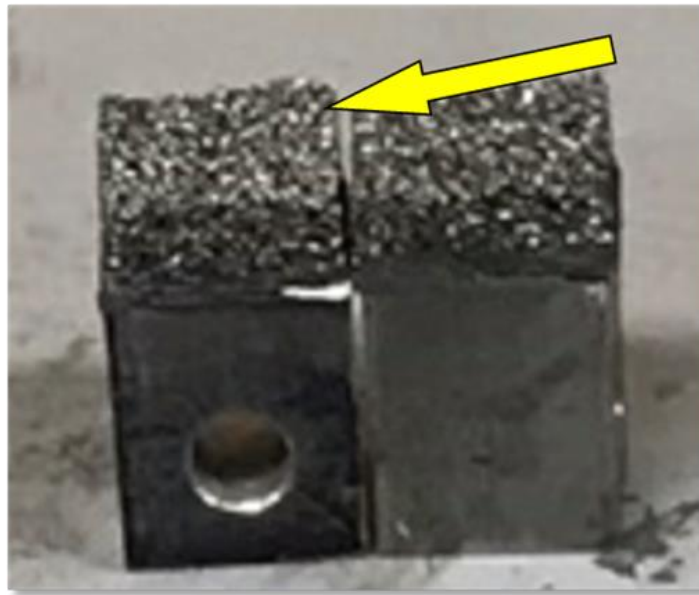


Figura 5-4 Falla a cortante por ensayo de tensión en CFOAM 20

En la Tabla 5-1 se presentan los valores de la carga máxima registrada a tensión por las probetas al momento de la falla, por cada espécimen el esfuerzo promedio obtenido de los ensayos realizados a tensión para el material CFOAM 20, obteniéndose un resultado promedio de los valores máximos del orden de los 878 N.

Tabla 5-1. Carga promedio de los cinco ensayos de tensión para CFOAM 20

Número de ensayo	Carga máxima (N)
1	880
2	875
3	885
4	875
5	875
Promedio	878

Analizando los resultados del comportamiento mecánico de las probetas de la tabla anterior, se observa que no existe gran dispersión en entre la magnitud de estos, ya que el rango de variación (875 N a 885 N), fue de tan solo 10 N.

En la Figura 5-5, se presentan en forma gráfica los resultados obtenidos en forma individual para cada una de las cinco pruebas de tensión realizada para el CFOAM 20, de la misma figura se puede ver que no existen variaciones significativas entre los comportamientos de las cargas y deformaciones de los cinco ensayos. Por otra parte, en las curvas de carga-tensión, para estas cinco pruebas, se observa el comportamiento típico de un material frágil.

Las curvas de comportamiento de carga vs deformación son muy cercanas a una línea recta con pendiente, y las pendientes entre las líneas de las probetas a prueba son muy aproximadas. Lo anterior indica el comportamiento estable del CFOAM y una repetibilidad adecuada de los ensayos realizados.

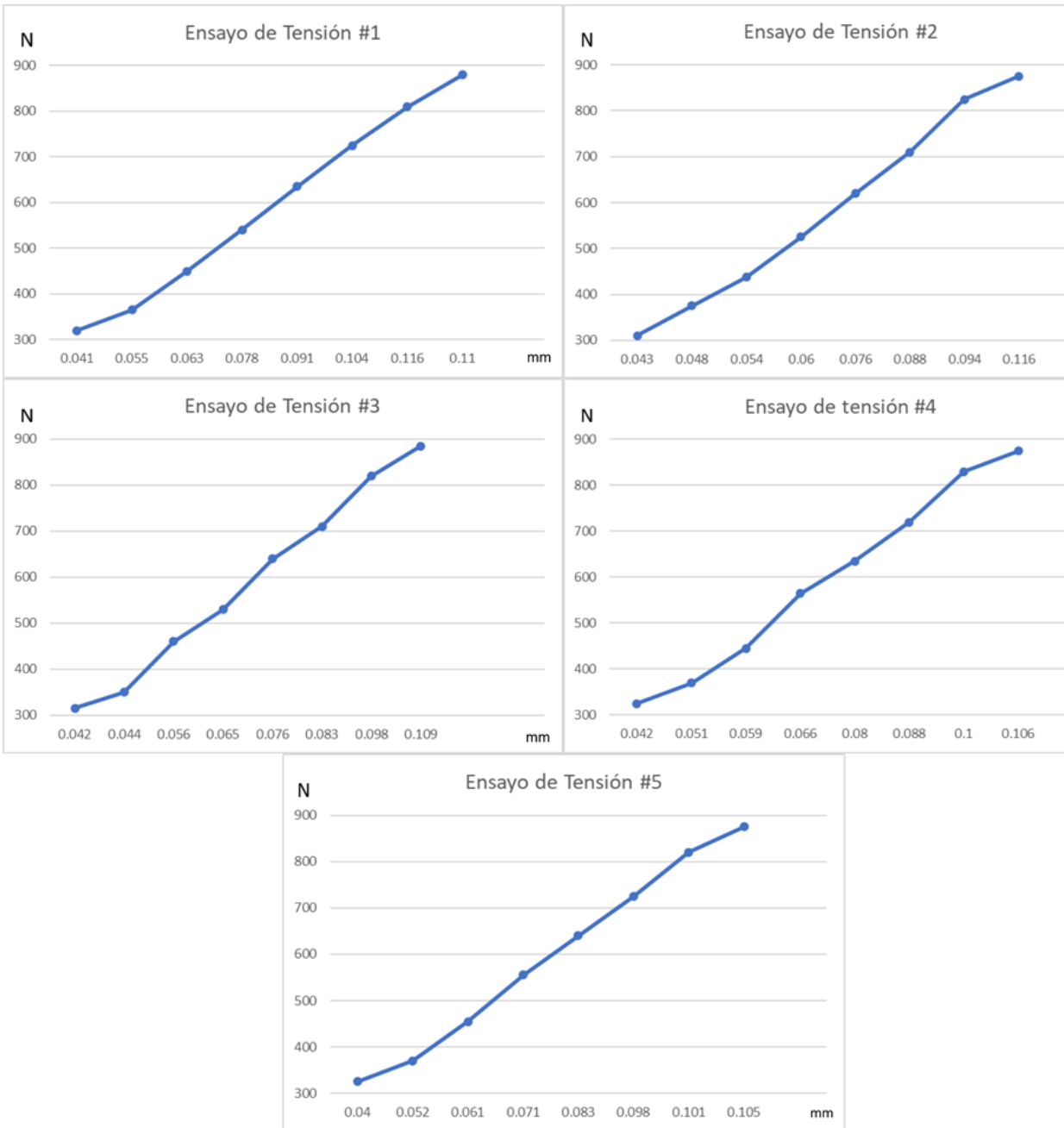


Figura 5-5 Gráficas de resultados para ensayos de tensión en CFOAM 20

En la Figura 5-6, se presentan la compilación de las gráficas de comportamiento de los resultados de la totalidad (cinco ensayos de tensión), en la que de igual manera se puede observar que no hay variaciones importantes en los valores y comportamientos obtenidos en las pruebas de a tensión para el CFOAM 20.

En la Figura 5-6, se muestra la zona de los valores máximo de carga registrados en los cinco ensayos del material CFOAM 20 a tensión, donde se observa un comportamiento mecánico constante y muy similar entre los ensayos realizados. Para calcular el esfuerzo máximo de tensión para cada ensayo se tomaron los valores correspondientes a la zona de cargas encerradas en el círculo de la figura.

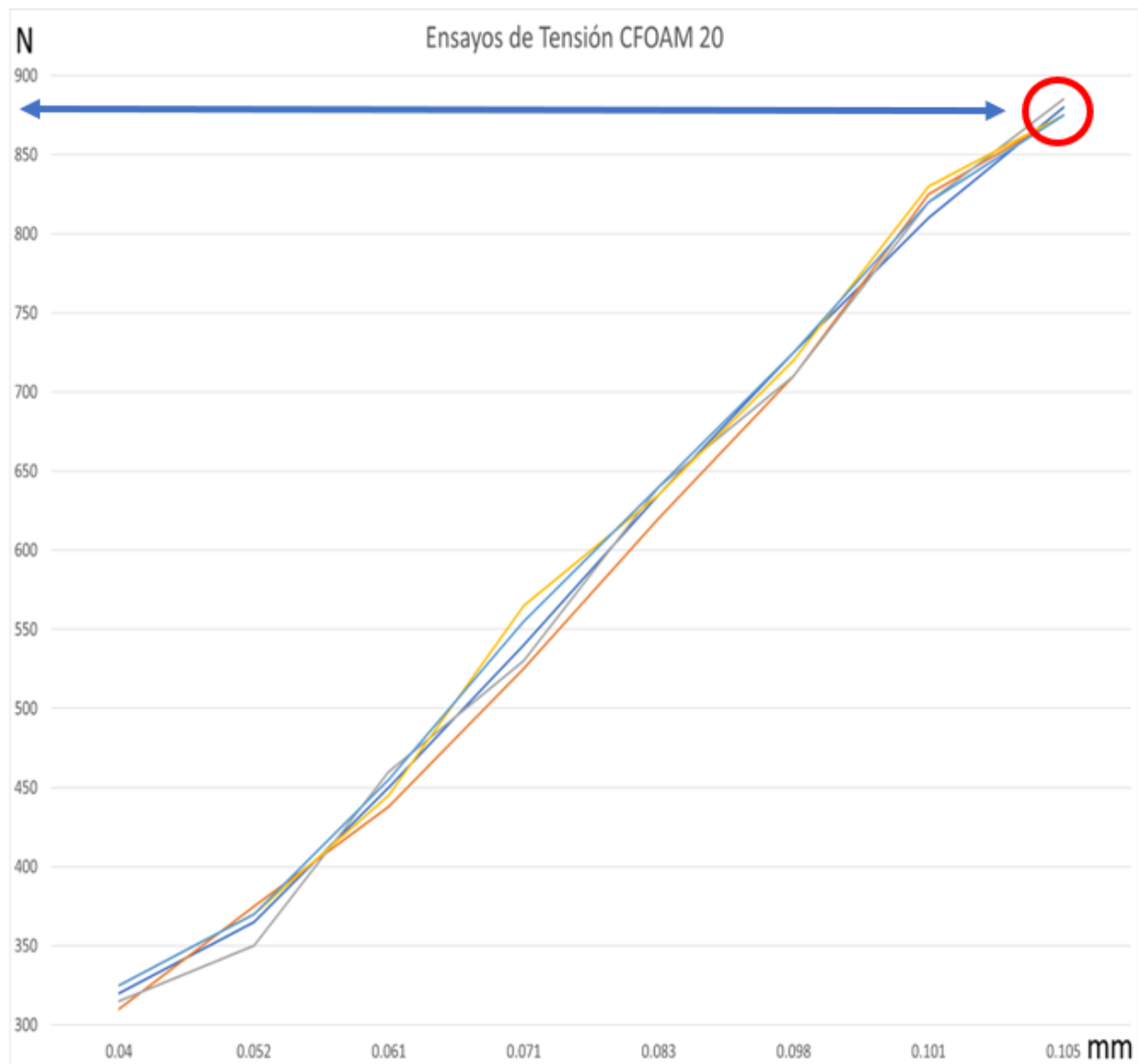


Figura 5-6 Comparativa de los ensayos para tensión del CFOAM 20

Con la finalidad de determinar el grado de dispersión en base a enfoque estadístico se determinaron la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación para los cinco ensayos. Esta información se encuentra tabulada en la Tabla 5-2, la cual se muestra a continuación.

Tabla 5.2 Cálculo de desviación estándar para tensión en CFOAM 20.

X	$X - \underline{x}$	$(X - \underline{x})^2$
880	2	4
875	-3	9
885	7	49
875	-3	9
875	-3	9
Σ		80

$\underline{x}$ (promedio)	878
s^2 (varianza)	19.98
s (desviación estandar)	4.47
CV (coeficiente de variación)	0.00509 (0.5090%)

5.2 Ensayos de Tensión CFOAM 25

En la Figura 5-7 se muestran las gráficas de comportamiento carga vs deformación, para los ensayos de las dos probetas de prueba de ajuste y preparación de la máquina universal, para la espuma CFOAM 25.

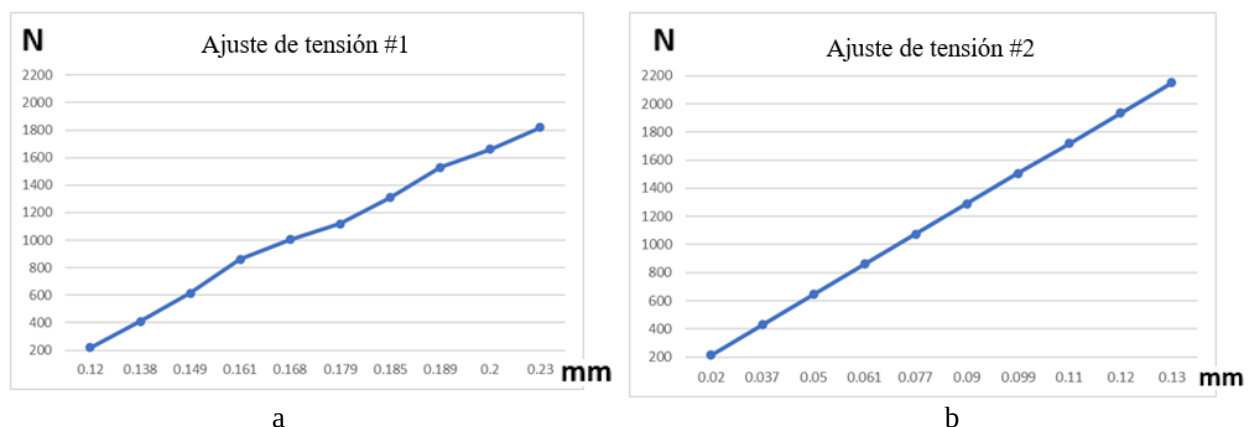


Fig 5-7 Gráficas de ensayos de ajuste para CFOAM 25 a) Ensayo de ajuste no.1, b) Ensayo de ajuste no.2

Las gráficas de la Figura 5-7, presentan los resultados de las probetas de ajuste para los ensayos de tensión de CFOAM 25. Donde la variación mostrada entre las cargas máximas registradas al momento de falla entre los dos especímenes se debió a residuos en la máquina universal, de los ensayos previamente realizados con las probetas el CFOAM 20, y a la falta de ajuste en el eje vertical a tensión del equipo de pruebas, situación que fue corregida para los ensayos posteriores.

En la Figura 5-8, se presenta una imagen de la probeta del CFOAM 25, después de la prueba de tensión realizada, donde se observa y se señala, el modo de falla por cortante (45 grados aprox) que presentó en el material cuando se alcanzó la carga máxima tensión.

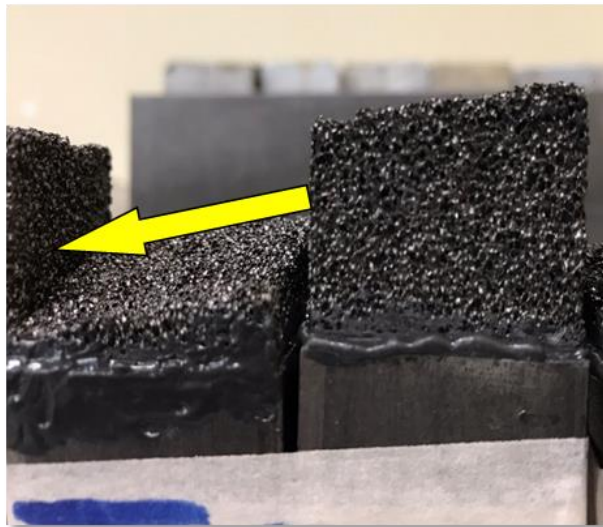


Figura 5-8 Falla a cortante por ensayo de tensión en CFOAM 25

La Tabla 5-3 presenta se observa la carga máxima registrada durante los cinco ensayos de tensión para el material CFOAM25, el valor promedio resultante de estos cinco ensayos fue de 2,185 N, rango de variación entre los resultados fue de 120 N (2130 N a 2250 N).

Tabla 5-3. Esfuerzo normal promedio para el CFOAM 25

Número de ensayo	Carga máxima (N)
1	2,250
2	2,150
3	2,195
4	2,200
5	2,130
Promedio	2,185

Es importante señalar que el modo de falla que se presentó en la totalidad de los cinco ensayos de tensión para el FOAM 25 , fue similar, tal como se mostró en la Figura 5-8.

El comportamiento individual de cada uno de los ensayos de tensión para el CFOAM 25, se muestran en la figura en la Figura 5-9. Siendo este comportamiento casi lineal y típico de un material frágil. De este conjunto de gráficas no se observa dispersión significativa entre ellas en lo que al comportamiento de su tendencia durante la prueba, además las pendientes de las casi rectas son muy similares entre sí.

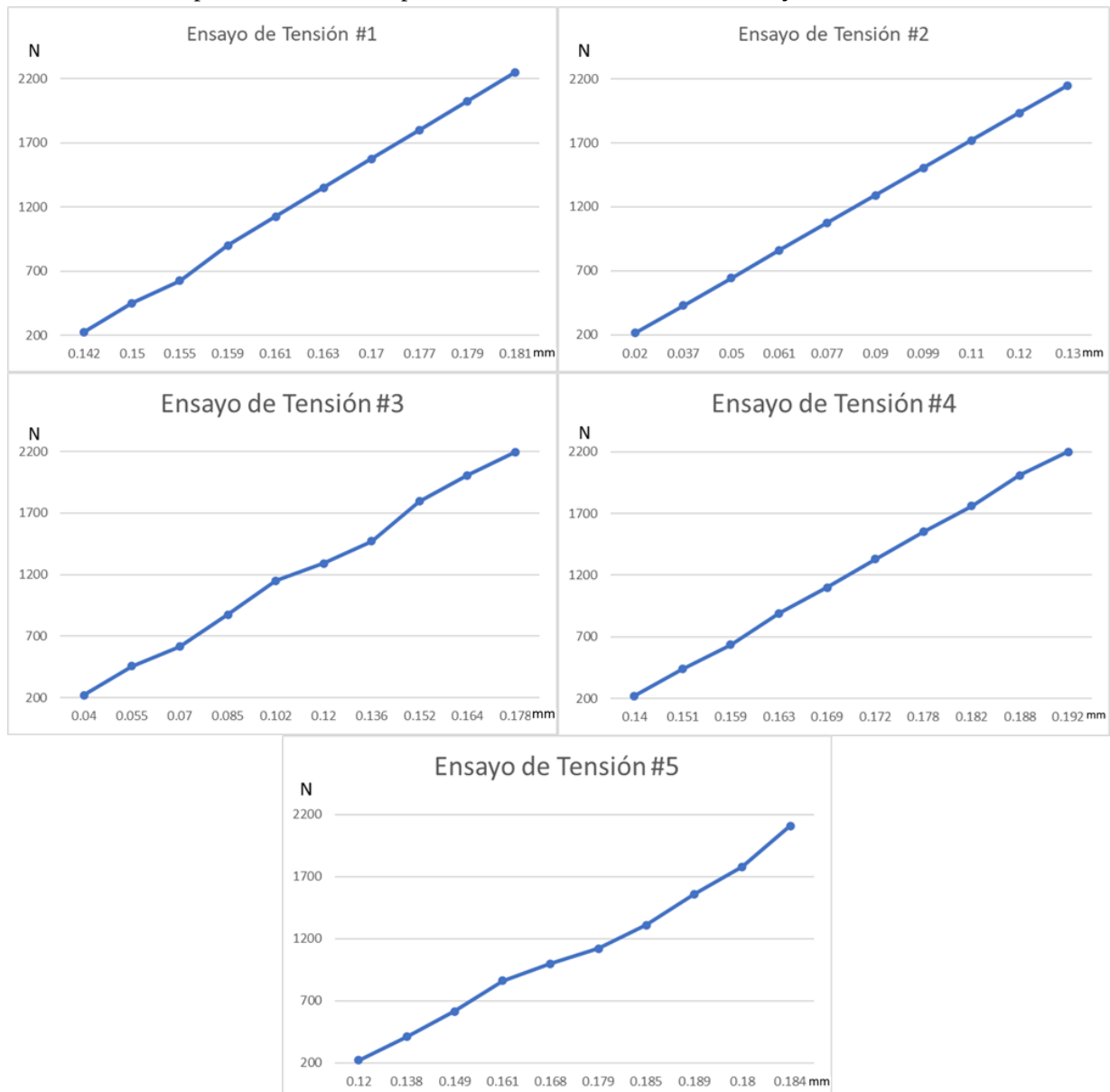


Figura 5-9 Gráficas de tensión para CFOAM 25

En la Figura 5-10 se encuentran la totalidad de los resultados de los comportamientos individuales, carga vs deformación, en una sola figura, permitiendo esto la comparación entre las cinco pruebas realizadas para el CFOAM 25.

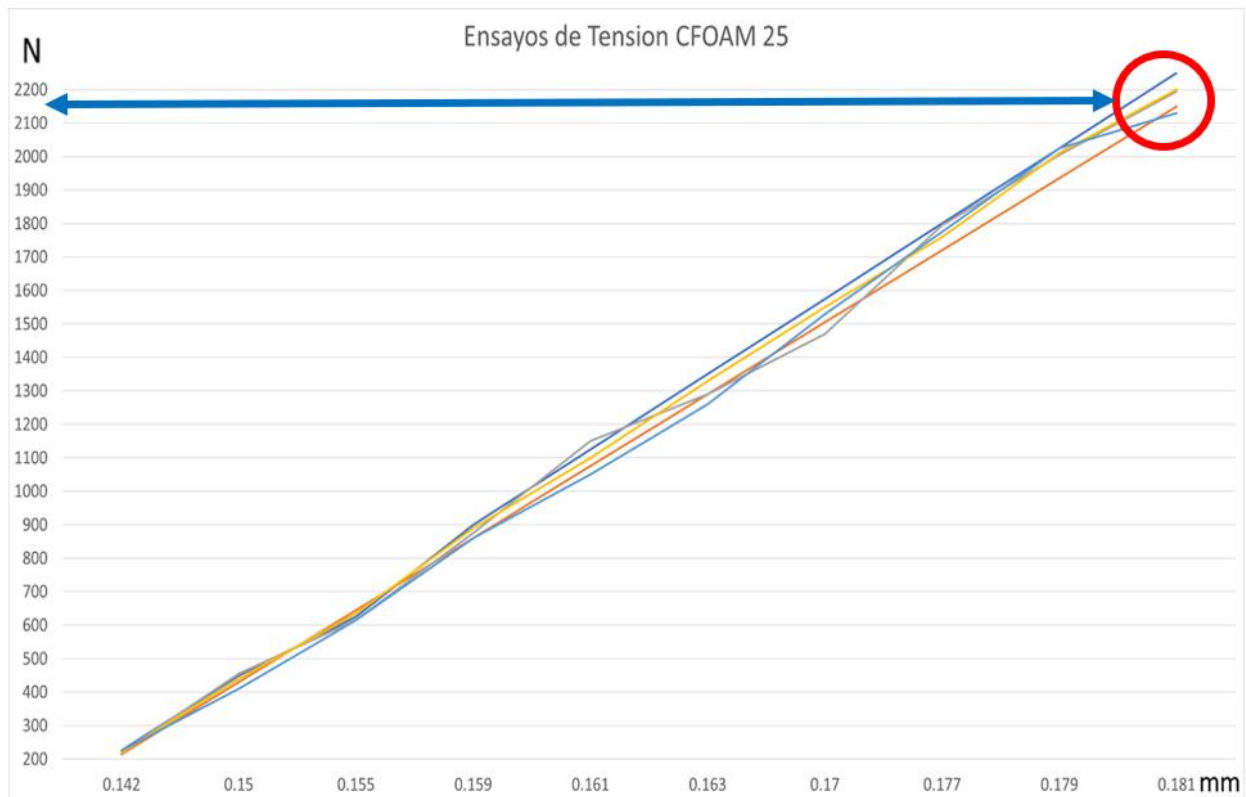


Figura 5-10 Comparativa de los ensayos para tensión de CFOAM 25

Como se puede observar en la figura anterior, los resultados obtenidos no mostraron variaciones importantes, y se mantuvieron en un rango tanto de carga máxima, como de comportamiento de las tendencias durante la prueba, es decir sin mostrar dispersión significativa, lo que derivó en un modo de falla muy similar entre los cinco ensayos realizados.

En la Tabla 5-4, se presentan los resultados de los valores máximos de carga, y a partir de estos se determinaron el valor medio, la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 5.4 Cálculo de desviación estándar para tensión en CFOAM 25.

X	$X - \underline{x}$	$(X - \underline{x})^2$
2250	65	4,225
2150	-35	1,225
2195	10	100
2200	15	225
2130	-55	3,025
		$\Sigma = 8,800$
$\underline{x}$ (promedio)	2,185	
s^2 (varianza)	2,199.6	
s (desviación estandar)	46.90	
CV(coeficiente de variación)	0.02146	

5.3 Ensayos de compresión CFOAM 20

Para las pruebas de compresión no se requirió fabricar herramientas especiales, ya que el mismo equipo tiene los elementos adecuados para realizar las pruebas. En este caso solo se colocaron las probetas entre dos discos como se muestra en la Figura 5-11. Estas pruebas fueron realizadas bajo la norma ASTM C 365.

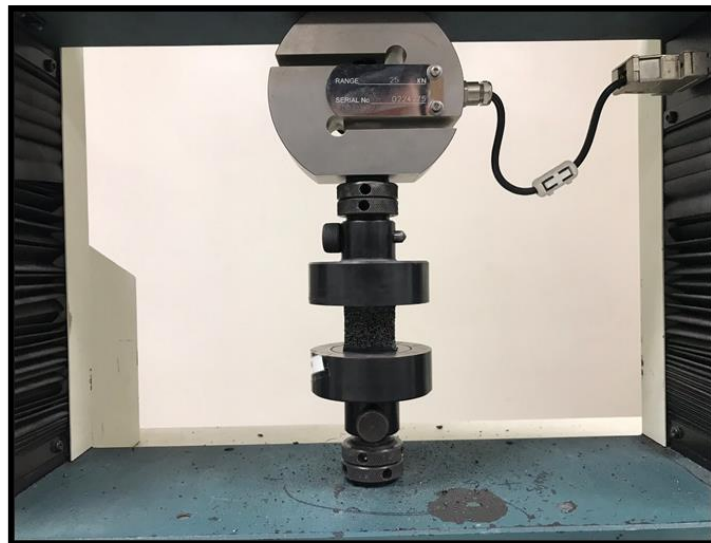


Figura 5-11 Set up para las pruebas de compresión

El montaje para este tipo de pruebas consistió en intercambio de mordazas para tensión por platos para compresión. La parte inferior se mantuvo inmóvil, y se sostuvo a la probeta. La parte superior fue la que realizó el desplazamiento para comprimir el material hasta llevarlo a la falla.

Al igual que en los ensayos de tensión realizados, se inició con dos ensayos de prueba para compresión, esto se efectuó con la finalidad de saber si el montaje fue el adecuado. Las gráficas carga vs deformación resultantes se presentan en la Figura 5-12.

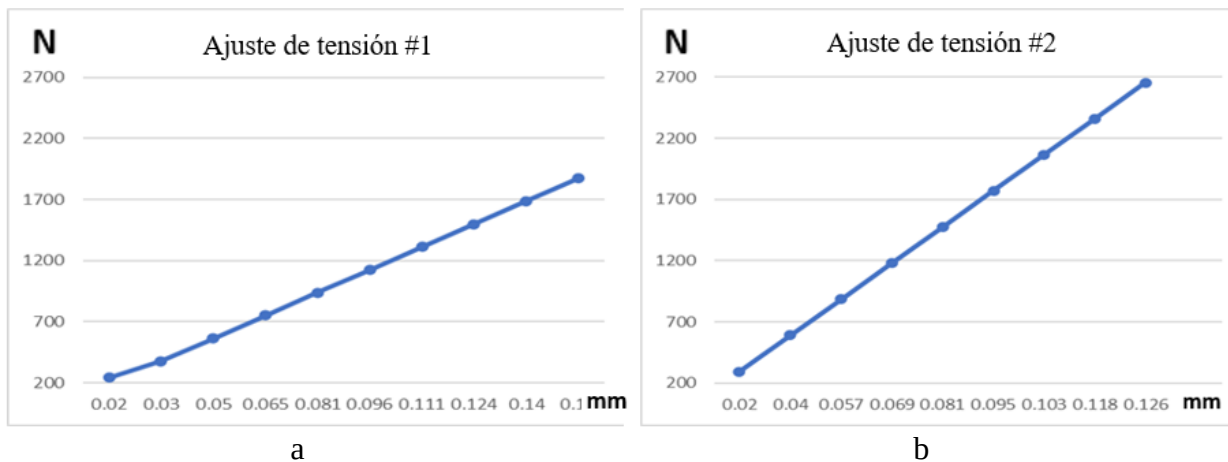


Figura 5-12 Gráficas de ensayos de ajuste para CFOAM 20 a compresión, a) primera prueba de ajuste, b) segunda prueba de ajuste

La variación presentada en ambos ensayos fue debido a residuos de los ensayos anteriormente realizados, y falta de ajuste en el eje vertical del equipo, situación que fue posteriormente corregida.

La totalidad de las probetas de prueba a compresión mostraron un comportamiento de falla similar, tal como el que se muestra en la Figura 5-13.



Figura 5-13 Modo de falla a compresión en ensayo para CFOAM 20

La Tabla 5-5 muestra el esfuerzo promedio obtenido de los ensayos realizados a compresión para el material CFOAM 20 fue de $2,668 \pm 45$ N.

Tabla 5-5 Carga máxima registrada para los ensayos de compresión CFOAM 20

Número de ensayo	Carga máxima (N)
1	2,650
2	2,675
3	2,655
4	2,665
5	2,695
Promedio	2,688

El rango de variación de la carga máxima a compresión fue de 45 N (2,650 N a 2,695 N), es decir no se registró una variación o dispersión alta, el comportamiento mecánico de las cinco probetas fue estable durante sus respectivas pruebas.

En la Figura 5-14, se observa cada una de las gráficas de compresión de manera independiente, las variaciones entre cada una de estas gráficas no representan valores significativos, por lo que, se puede considerar que se encuentran en un rango de valores y comportamiento similares.

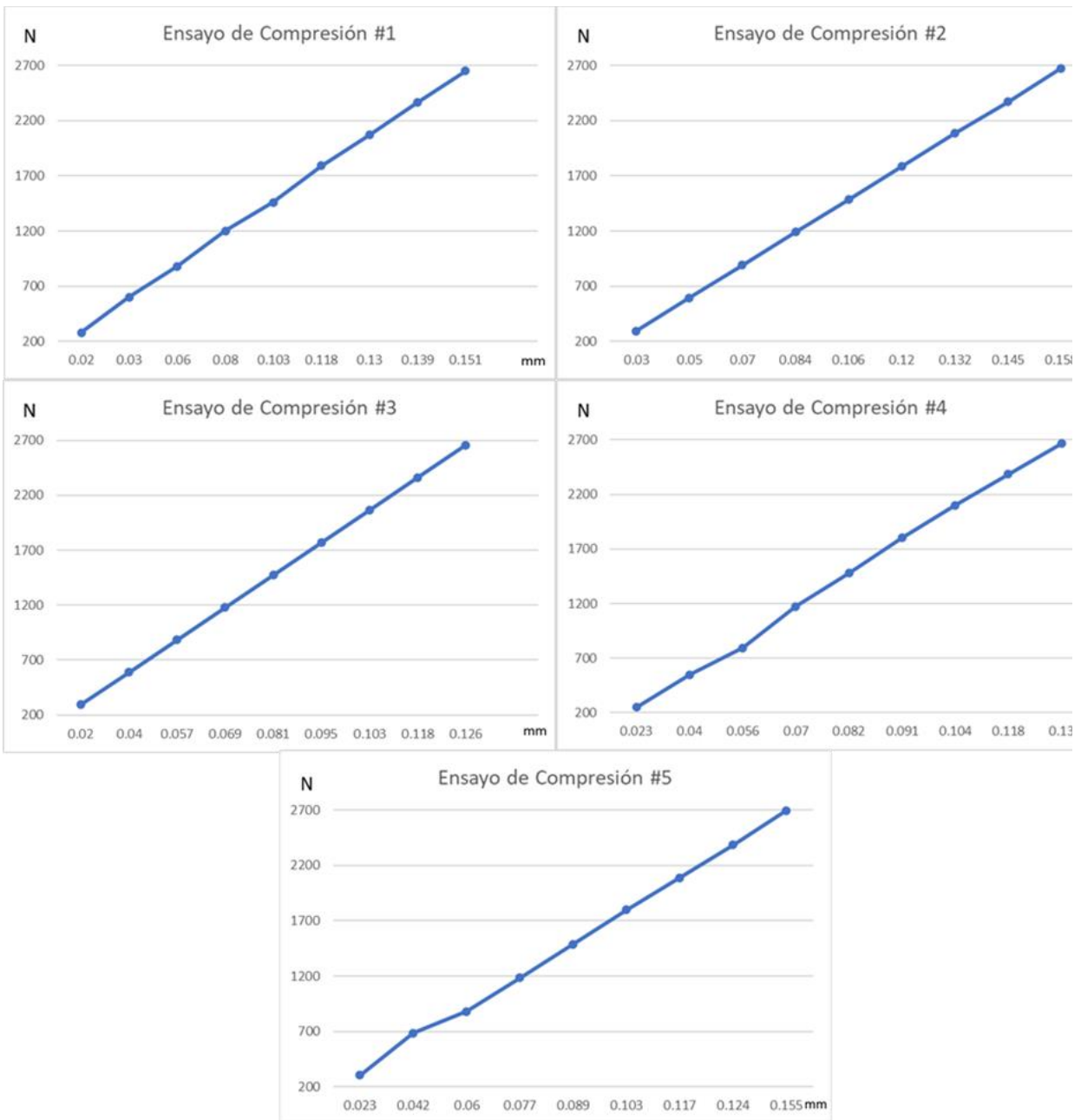


Figura 5-14 Gráficas de compresión para CFOAM 20

En la Figura 5-15, se puede observar un concentrado de las curvas de comportamiento carga de compresión vs deformación para las cinco pruebas realizadas en el CFOAM 20, mostrando un adecuado comportamiento de repetitividad entre ellas (pendientes similares). Los valores máximos de carga registrados los cuales se ubican dentro del círculo en la gráfica fueron utilizados para calcular el esfuerzo máximo de compresión promedio registrado antes de la falla del material.

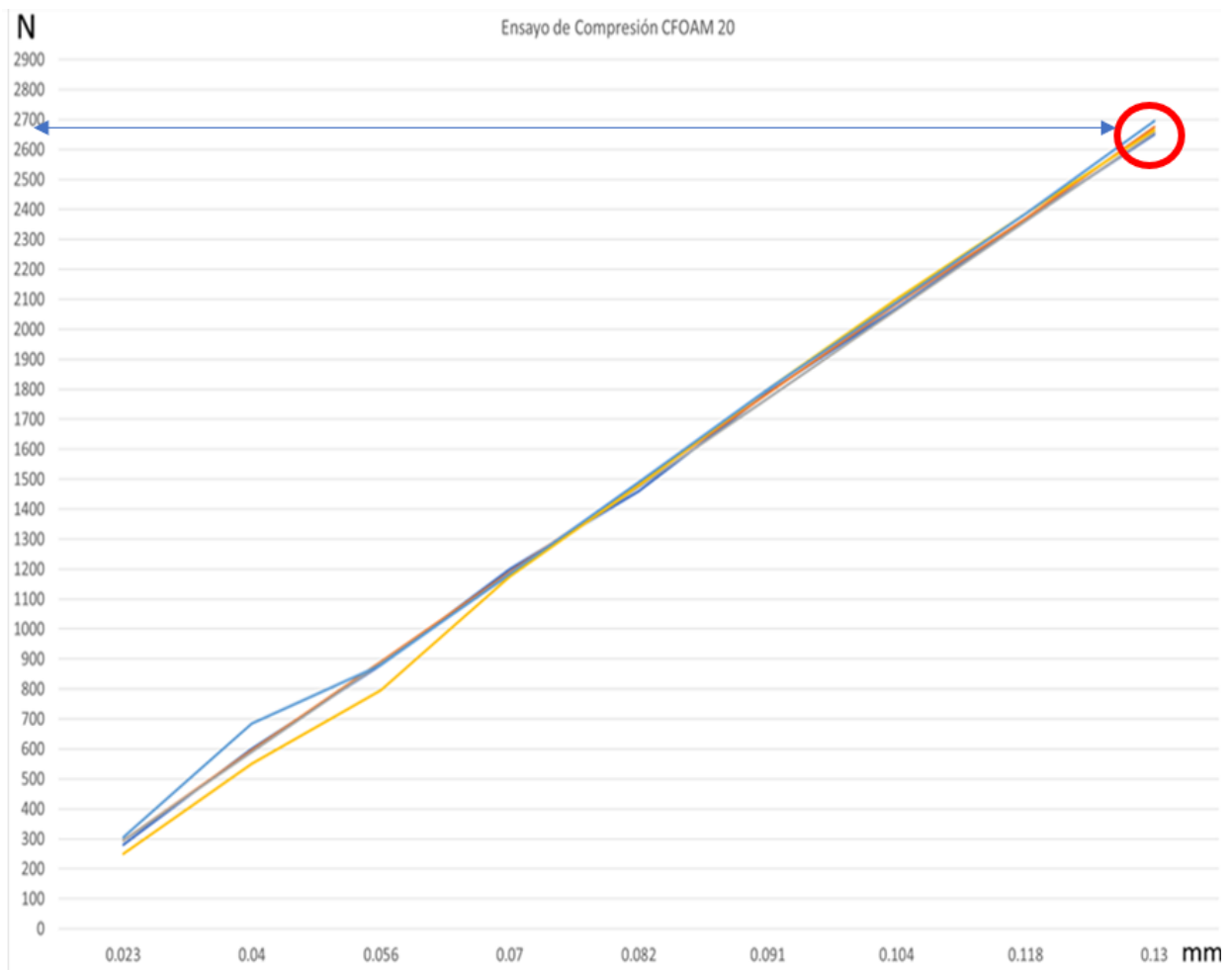


Figura 5-15 Comparativa de los ensayos a compresión del CFOAM 20

En la Tabla 5-6, se muestran los datos de la desviación estándar y la carga máxima aplicada en cada uno de los ensayos de compresión en el CFOAM 20. A partir de los valores de carga máxima aplicada en compresión se calcularon los estadísticos de media, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación.

Tabla 5.6 Cálculo de desviación estándar para compresión en CFOAM 20.

X (carga máxima en N)	$X - \underline{x}$	$(X - \underline{x})^2$
2650	-18	324
2675	7	49
2655	-13	169
2665	-3	9
2695	27	729
		$\Sigma = 1280$
$\underline{x}$ (promedio)	2,668	

s² (varianza)	316.12
s (desviación estándar)	17.88
CV(coeficiente de variación)	0.00670 (0.67016)

5.4 Ensayos de Compresión CFOAM 25

Posterior a la realización de las pruebas con la espuma de carbono modelo CFOAM 20, se prosiguió con el modelo CFOAM 25, el procedimiento fue similar, y aplicando la normatividad ASTM. Primeramente, se efectuaron las pruebas de ajuste y calibración con las dos probetas de prueba, que muestran los resultados de carga vs deformación en la Figura 5-16.

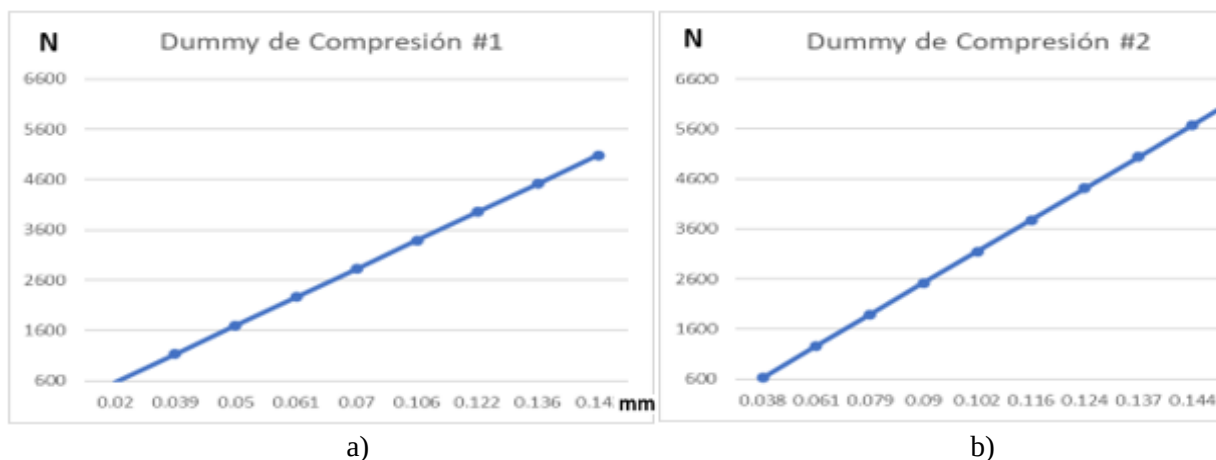


Figura 5-16 Gráficas de ensayos de ajuste para CFOAM 25 a compresión

Como se puede observar, los resultados de la Figura 5-16, ambos tienen un comportamiento similar, salvo una diferencia en la carga máxima soportada, esto fue debido a un desalineamiento en la probeta (ensayo probeta 'a' soporto menos carga que probeta 'b'). El modo de falla generado en el CFOAM 25 se puede observar en la Figura 5-17.

de los diferentes tipos de ensayos. El modo de falla generado en el CFOAM 25 se puede observar en la Figura 5-17.



Figura 5-17 Modo de fallo a compresión en CFOAM 25

La Tabla 5-7, presenta los valores máximos de las cargas máximas de compresión obtenidos de los ensayos realizados con el material CFOAM 25.

Tabla 5-7 Carga máxima registrada para el CFOAM 25.

Número de ensayo	Carga máxima (N)
1	6,550
2	6, 520
3	6,570
4	6,300
5	6,475
Promedio	6,483

De los datos obtenidos, se observa que el rango de variación de la carga máxima fue de 270 N (6300 N a 6,570 N), con excepción del valor máximo de la prueba no. 4, los otros valores fueron cercanos entre sí. Los resultados obtenidos de los ensayos individuales de cada una de las cinco pruebas de compresión se observan en la Figura 5-18, los patrones mostrados son similares entre sí, teniendo pendientes prácticamente iguales.

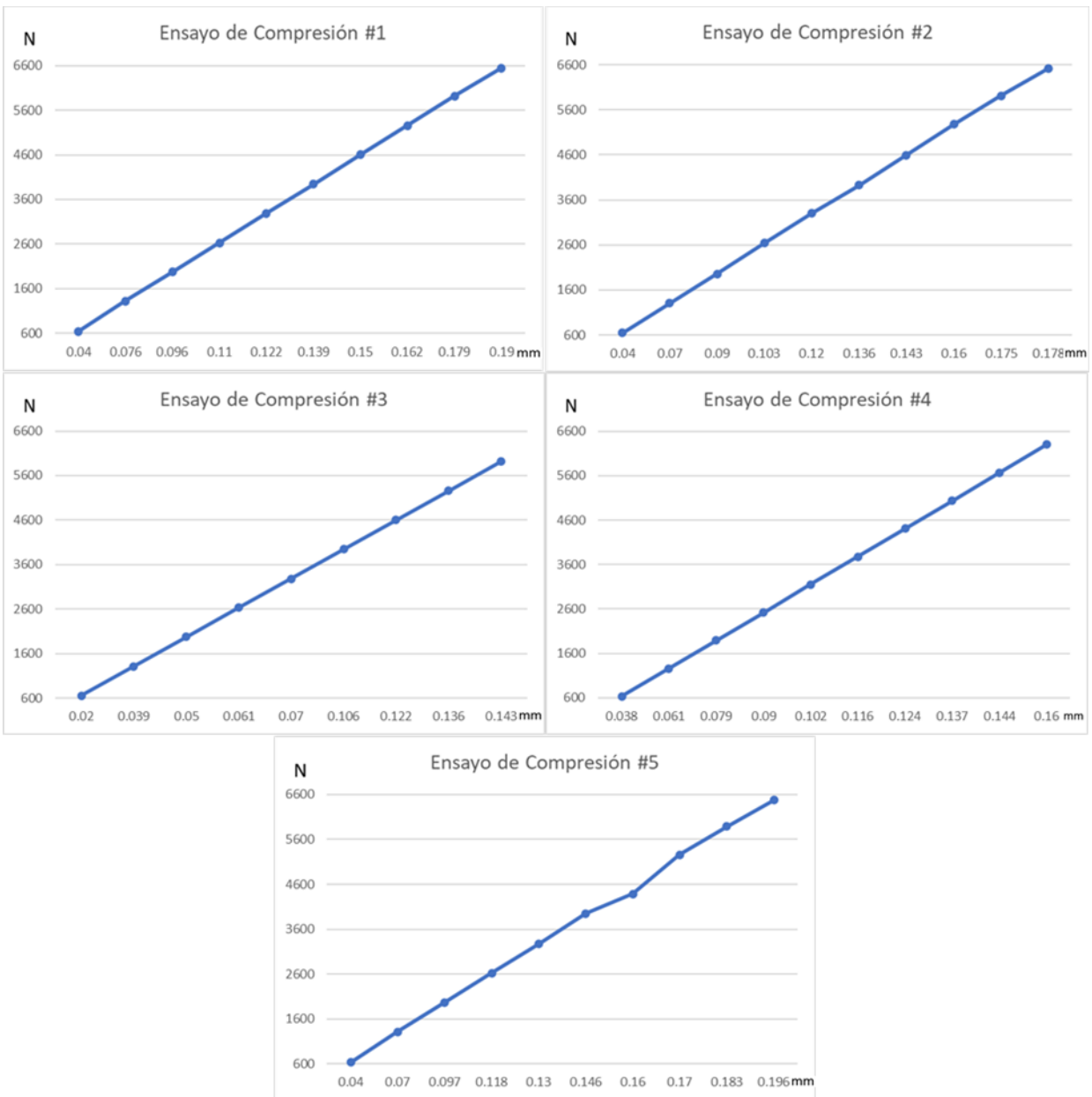


Figura 5-18 Gráficas de compresión en CFOAM 25

En la figura 5-19, se encuentran las gráficas de los cinco ensayos integradas en una sola figura para fines de comparación, observándose comportamientos de tendencia similares de las curvas carga vs deformación, con excepción de la probeta 4, que mostró una pendiente menor que el resto de las pruebas realizadas.

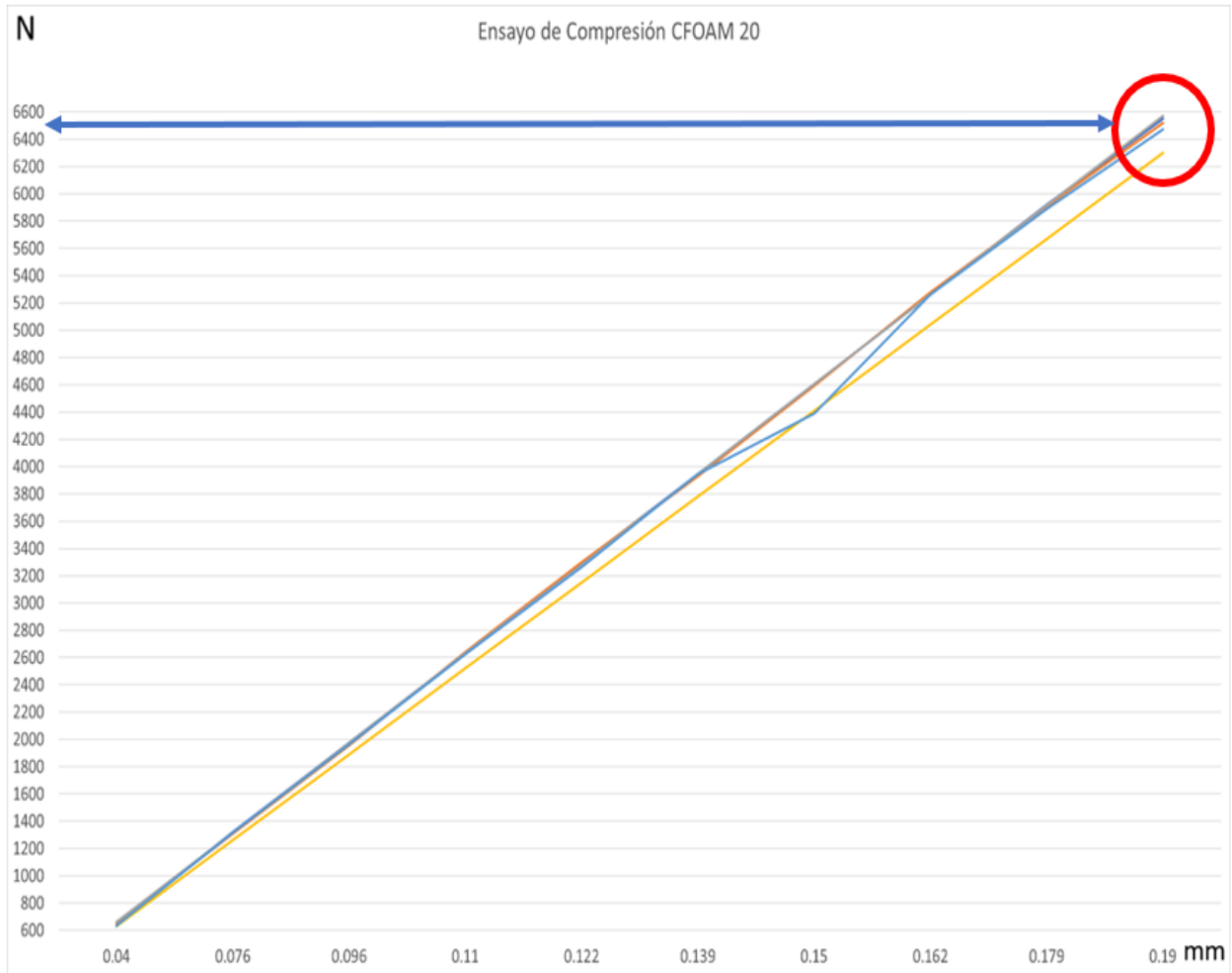


Figura 5-19 Gráfica comparativa de los ensayos de tensión del CFOAM 25

Una vez obtenidos los valores de la carga máxima que soporta el material, se procedió con el cálculo de estadísticos de media, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación para los valores de compresión máxima de las cinco pruebas.

En la Tabla 5-8 se muestran los cálculos de los datos estadísticos en base a la información obtenida de los cinco ensayos de compresión en el CFOAM 25.

Tabla 5.8 Cálculo de desviación estándar para compresión en CFOAM 25.

X	$X - \underline{x}$	$(X - \underline{x})^2$
6550	67	4,489
6520	37	1,369
6570	87	7,569
6300	-183	3,3489
6475	-8	64
		$\Sigma = 46,6980$
$\underline{x}$ (promedio)		6,483
s^2 (varianza)		11,744
s (desviación estándar)		108.37
CV(coeficiente de variación)		0.01671 (1.671)

5.5 Cálculo de los esfuerzos máximos de tensión y compresión

A partir de los ensayos de tensión y compresión se determinaron los valores promedio (estadísticamente) de la carga máxima requerida al fallo de la probeta, obteniéndose los resultados que se presentan en la Tabla 5-9. Así mismo a partir de estos datos promedios de carga se calculó el esfuerzo máximo, al cual se sometieron las probetas.

Tabla 5-9. Valores máximos medios de carga

Tipo de prueba	Material	P (máxima media)	σ (máxima media calculada)
Tensión	CFOAM 20	878 N	.869 MPa
Tensión	CFOAM 25	2,185 N	1.771 MPa
Compresión	CFOAM 20	2,668 N	2.369 MPa
Compresión	CFOAM 25	6,483 N	5.960 MPa

El principal problema para la etapa de los modelados fue la caracterización de los poros en el material, ya que estos se encuentran localizados aleatoriamente, por lo que se realizó una aproximación en el modelo virtual, por lo que se decidió primeramente considerar una distribución

simétrica del poro en el material y un tamaño de poro comprendido entre 0.700000124 mm y 0.299999908 mm, el cual se determinó, midiendo por medio de microscopio y una escala graduada, el material de FOAM 20 y FOAM 25.

Para complementar los resultados se realizaron simulaciones con software CAD, en donde se introdujeron las variables obtenidas con los ensayos. La configuración del modelo de la probeta se observa en la Figura 5-22. Las variables que se consideraron para incluir las características del material (espuma de carbono) fueron: modulo elástico, relación de Poisson, módulo cortante, densidad, esfuerzo de tensión y esfuerzo de compresión, información que fue obtenida de la Tabla 1.1 proporcionada por el proveedor que comercializo el material (foam – CFOAM 20 y CFOAM 25).

Una vez que se incluyó el material con todas sus propiedades mecánicas a la base de datos del software, se procedió con la simulación, para obtener los valores de esfuerzo y así, realizar la comparación de los resultados analíticos con respecto a los simulados.

Para la simulación de esfuerzos se optó por convertir el modelado 3D a uno 2D como se muestra en la Figura 5-20, debido a que de esta forma el uso de los recursos del equipo de cómputo resultó menor, y el tiempo de procesamiento también con respecto al modelado 3D.

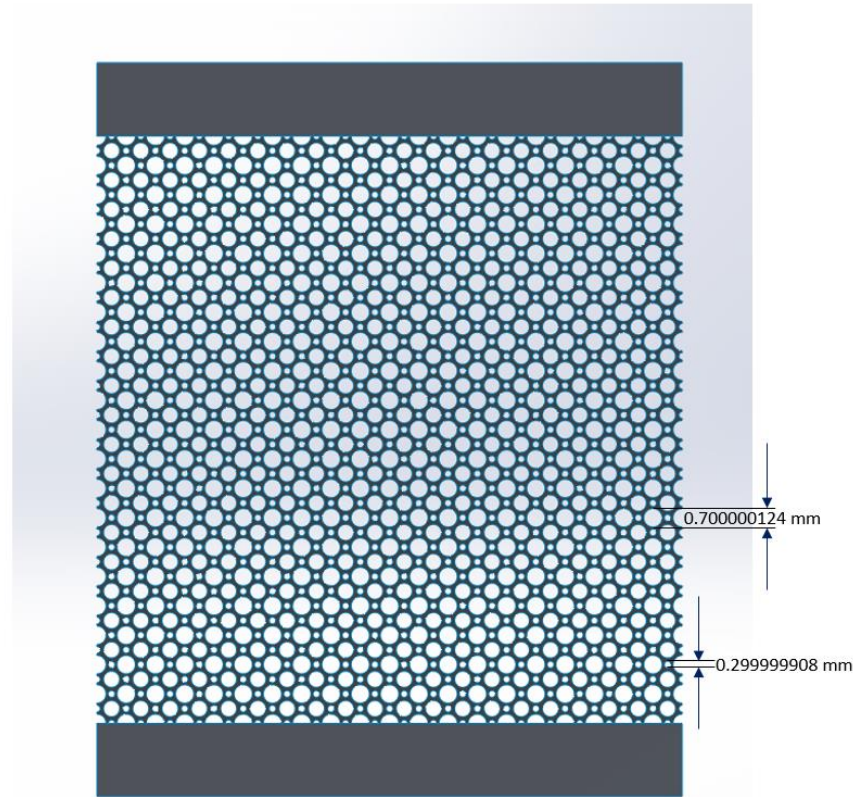


Figura 5-20 Vista frontal del modelo 2D

Cuando se realizaron los ensayos experimentales se obtuvo el valor de la carga requerida para hacer fallar el material, a partir de estos cinco resultados se calculó la media aritmética de cada tipo de ensayo, resultando lo que se presenta en la Tabla 5-9.

Estos valores promedio fueron los que se utilizaron en la simulación, la P_{media} , se tomó como carga externa. Por otra parte, el área de la sección transversal nominalmente es de $1.0099 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ para CFOAM 20 y $1.0604 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ para CFOAM 25 en base a las dimensiones de la probeta. Sin embargo, el material de estudio es anisotrópico y su morfología es porosa, por lo que el área que está soportando la carga es menor que la nominal, es aproximadamente 80 % poro y 20% sólido para el CFOAM 20 y 75% poro y 25% sólido para el CFOAM 25, por lo cual se consideraron áreas para el cálculo de 0.0002016125 m^2 y $0.000252015625 \text{ m}^2$, respectivamente.

Como los experimentos fueron realizados en base a cargas normales a la sección transversal del material, se consideró este criterio para determinar este valor en cada una de las simulaciones; se realizaron cinco pruebas para validar los resultados por cada tipo de material y por tipo de ensayo.

5.6 Simulación con CFOAM 20

El CFOAM 20 el cual tiene una densidad de 320 kg/m^3 , un módulo de elasticidad de $89,060,000 \text{ Pa}$. Este último fue determinado por los ensayos experimentales, además, de que la carga necesaria para poder llevarlo a la falla resulto de 828 N para el ensayo de tensión y $2,392.20 \text{ N}$ para compresión. Considerando estas variables y conociendo las dimensiones de la probeta se calculó el esfuerzo normal promedio máximo en la probeta.

Este resultado no proporcionó un cálculo preciso debido a que la sección transversal no es completamente sólida, lo cual ocasionó que otras regiones de la probeta soportará más esfuerzo, debido a que la muestra está compuesta en un porcentaje de 20% sólido y 80% poros distribuidos aleatoriamente, Por eso fue necesario realizar la simulación con estas características, para posteriormente calcular el área efectiva que estuvo soportada la carga.

5.6.1 Simulación de tensión

La información obtenida en el punto 5.2 referente a los ensayos de tensión para el CFOAM 20 se utilizó para complementar el modelado y realizar la simulación. Las características del material se especifican en la Figura 5-21.

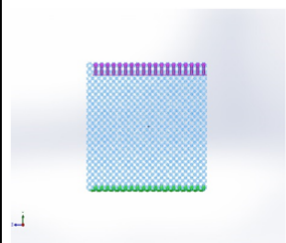
Model Reference	Properties	Components
	Name: CFOAM20 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Tensile strength: $2.2\text{e}+006 \text{ N/m}^2$ Compressive strength: $8.3\text{e}+006 \text{ N/m}^2$ Elastic modulus: $1.5435\text{e}+008 \text{ N/m}^2$ Poisson's ratio: 0.33 Mass density: 320 kg/m^3 Shear modulus: $7.40956\text{e}+007 \text{ N/m}^2$	SurfaceBody 1(Convertido1)(Cubo espuma3(1))

Figura 5-21 Propiedades mecánicas del material

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5-22 muestran un valor de esfuerzo máximo en la parte izquierda de la imagen se muestra el valor promedio de 1.283 MPa .

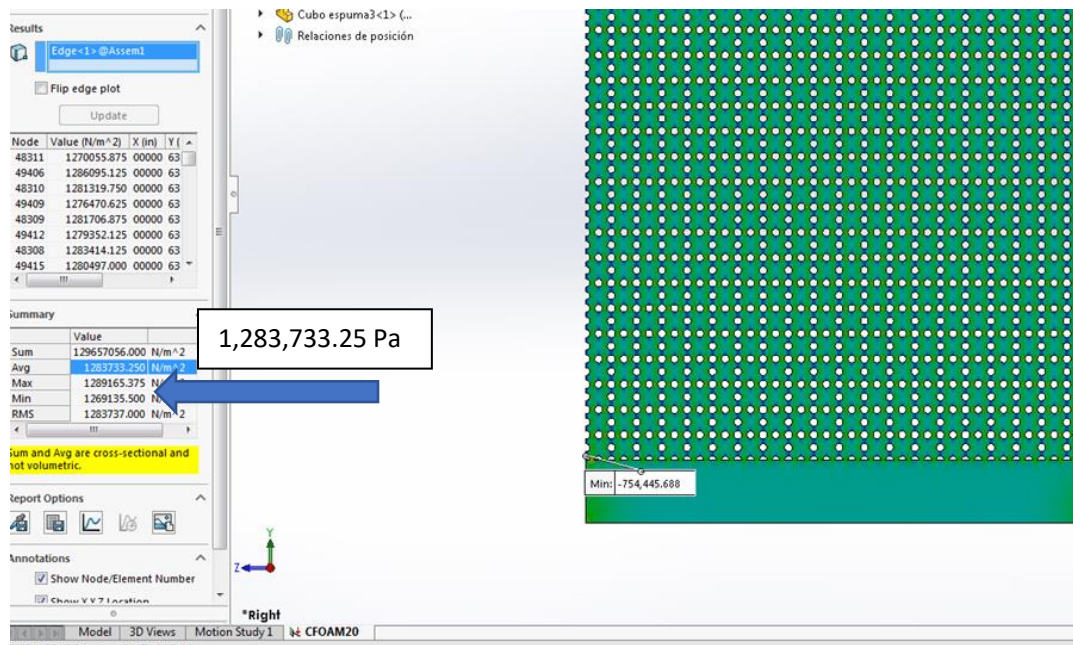


Figura 5-22 Simulación de esfuerzo normal para tensión en CFOAM 20

Los resultados de la simulación arrojaron un esfuerzo máximo promedio de $\sigma_{max} = 1.283$ MPa aproximadamente, y comparándolo contra el esfuerzo máximo promedio obtenido analíticamente de las pruebas que fue de $\sigma_{prom} = 0.869$ MPa, resulta en una diferencia del orden del 32 % o una similitud del 67 %.

$$\sigma_{prom} = \frac{F}{A} = \frac{878 \text{ N}}{1.0099 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 0.869 \text{ MPa}$$

5.6.2 Simulación de compresión

Para el ensayo de compresión se tomaron las mismas consideraciones que en el ensayo de tensión, lo que cambió fue la dirección de la carga y la magnitud de esta, ya que la espuma de carbono tiene mayor resistencia a compresión. La magnitud de la carga máxima para compresión resultó de 2,392N.

En la Figura 5-23 se puede observar los resultados de la simulación para el esfuerzo, esta muestra las consideraciones bajo las condiciones de prueba al igual que las pruebas experimentales. Y los resultados de esfuerzo obtenidos en el ensayo de compresión tienen una correlación del 99.99% con respecto a los analíticos.

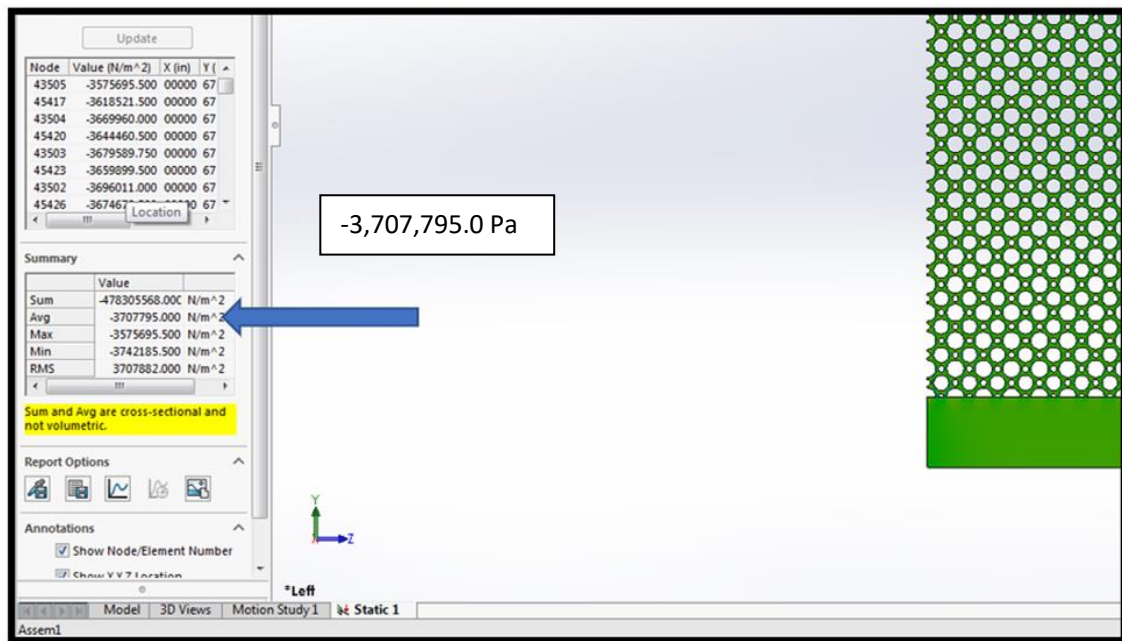


Figura 5-23 Condiciones de carga para compresión en CFOAM 20

El valor obtenido por el ensayo de compresión es de 3,707,607 Pa, y al igual que con el ensayo anterior el área resultante se obtiene con la Ec 6. Ya sustituyendo los valores de esfuerzo y carga el valor del área resultante fue de $1.0099 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Lo que confirma el área de la sección transversal por medio de dos ensayos distintos. Además, se puede observar una correlación de resultados de 60.90%.

$$\sigma_{prom} = \frac{F}{A} = \frac{2,392.20 \text{ N}}{1.0099 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 2.369 \text{ MPa}$$

5.7 Simulación con CFOAM 25

Para este modelo de material se aplicaron las mismas condiciones de simulación, pero tiene algunas características distintas al modelo anterior, este tiene una densidad de 400 kg/m^3 , un módulo de elasticidad de 98.180 kPa . La carga necesaria para poder llevarlo a la falla fue de $1,879 \text{ N}$ para tensión y $6,327 \text{ N}$ para compresión.

5.7.1 Simulación de tensión

Al igual que en los ensayos anteriores se ingresó la información obtenida experimentalmente a la librería de materiales del software CAE una espuma que cumpla con las propiedades mecánicas. Al tratarse de un material con mayor densidad, este mostró mayor capacidad para soportar cargas que el modelo de espuma anterior. La densidad de este material es de 400 kg/m^3 . En la Figura 5-24 se muestran las características de la espuma de carbono.

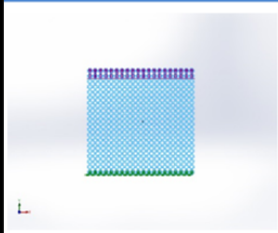
Model Reference	Properties	Components
	Name: CFOAM25	SurfaceBody 1(Convertido1)(Cubo espuma3(1))
	Model type: Linear Elastic Isotropic	
	Default failure criterion: Unknown	
	Tensile strength: $3.5\text{e}+006 \text{ N/m}^2$	
	Compressive strength: $1.5\text{e}+007 \text{ N/m}^2$	
	Elastic modulus: $9.818\text{e}+007 \text{ N/m}^2$	
	Poisson's ratio: 0.33	
	Mass density: 400 kg/m^3	
	Shear modulus: $3.69098\text{e}+007 \text{ N/m}^2$	

Figura 5-24 Propiedades mecánicas de a espuma de carbono CFOAM 25

Los resultados para este ensayo están especificados en la Figura 5-25, el consiste en un esfuerzo normal con un valor de 2.990 MPa.

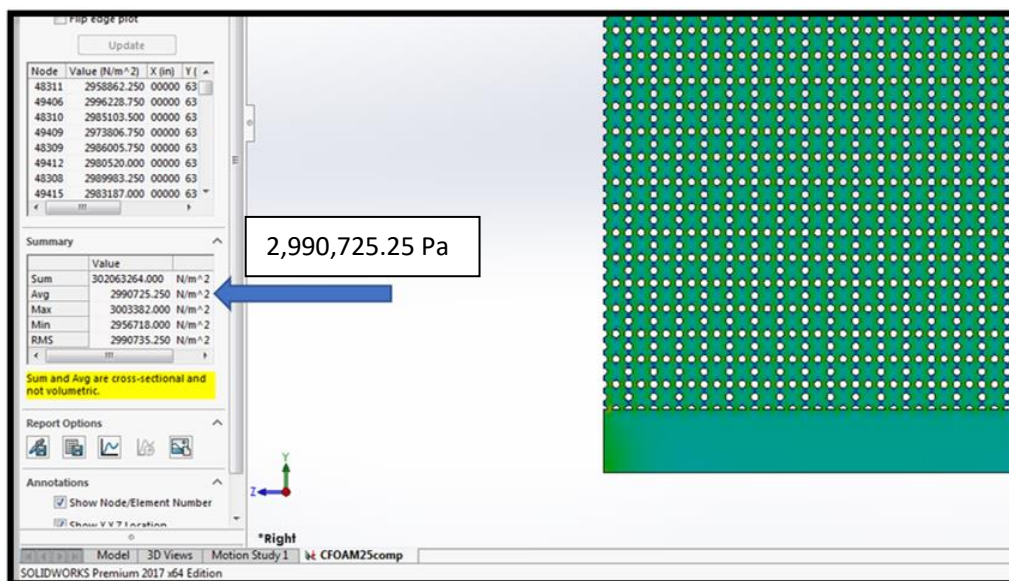


Figura 5-25 Simulación de tensión a CFOAM 25

Con el valor del esfuerzo y la carga aplicada fue de 1,879 N, se obtiene un área de un resultado de $1.0604 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, lo cual tiene correlación entre esfuerzos del 59.23% con respecto al CFOAM 25 que se está obteniendo aquí.

$$\sigma_{prom} = \frac{F}{A} = \frac{1,879 \text{ N}}{1.0604 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 1.771 \text{ MPa}$$

5.7.2 Simulación de esfuerzo a compresión

Para este ensayo de compresión se tomaron las mismas consideraciones que en el ensayo de tensión con respecto a las propiedades del CFOAM 25, lo que cambió fue la dirección de la carga y la magnitud de esta. La magnitud de la carga para compresión resultó ser del orden de 6,327 N. Esta diferencia es aproximadamente el 70% con respecto a la carga soportada a tensión. Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión se muestran en la Figura 5-26.

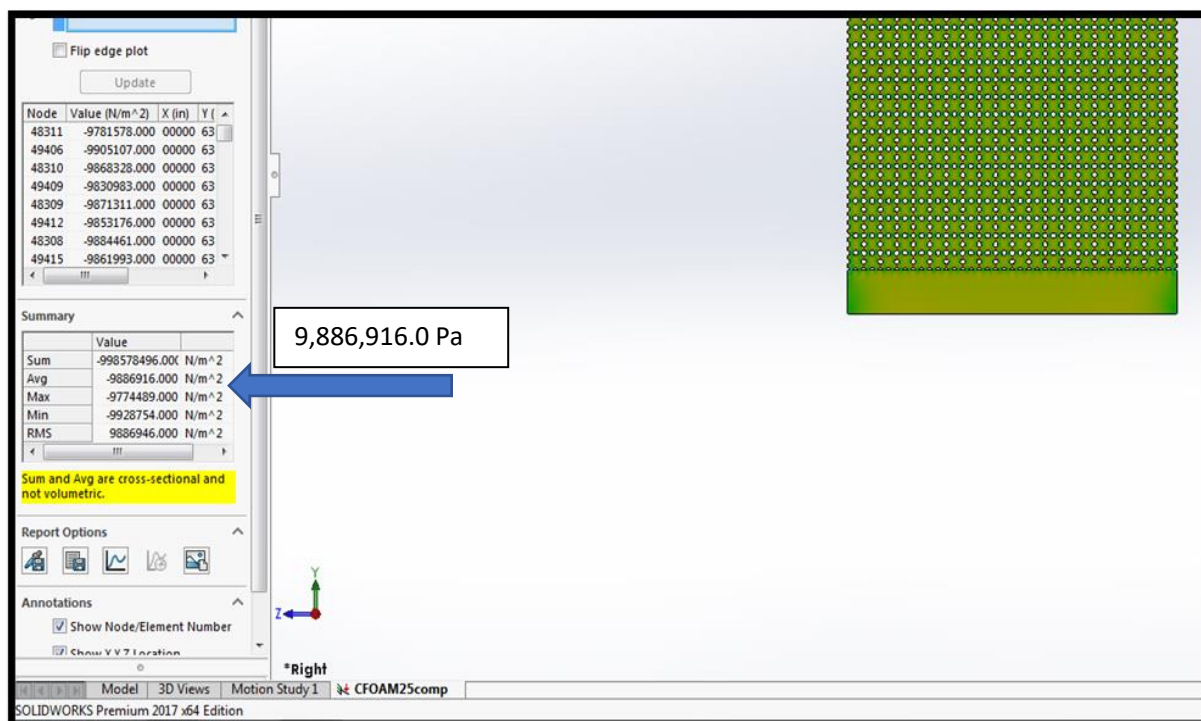


Figura 5-26 Simulación de compresión para CFOAM 25

Las condiciones de carga del método experimental son similares en el método de simulación.

$$\sigma_{prom} = \frac{F}{A} = \frac{6,327 \text{ N}}{1.0604 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 5.966 \text{ MPa}$$

Los resultados del esfuerzo normal máximo para compresión fueron de 5.996 MPa y el área de sección transversal obtenida fue exactamente igual al resultado de tensión para este material, donde la correlación de resultados es de 60.34%. Se observa un comportamiento de un material con alta resistencia a los esfuerzos, principalmente a los de compresión, con un área considerablemente menor y con una morfología particular.

5.8 Comparativo de resultados

De los resultados de las pruebas realizadas y de las simulaciones realizadas se obtuvieron los datos que se presentan en forma comparativa en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10 Comparación de resultados experimentales y por simulación.

Tipo de material	Tipo de prueba	Esfuerzo máximo de prueba	Esfuerzo máximo de simulación	Similitudes en porcentaje (numérico vs experimental)
FOAM 20	tensión	0.869 MPa	1.283 MPa	67.73%
FOAM 20	compresión	2.369 MPa	3.707 MPa	63.90%
FOAM 25	tensión	1.771 MPa	2.990 MPa	59.23%
FOAM 25	compresión	5.966 MPa	9.886 MPa	60.34%

De los resultados presentados en la tabla anterior se puede asentar que con el modelo en 2D utilizado se logró registrar un promedio de similitud del 63.48 %, para las pruebas de tensión y un 62.12 % para las de compresión.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos Futuros

6.1 Conclusiones

En este trabajo se presenta el análisis del comportamiento mecánico de material tipo foam (CFOAM 20 y CFOAM 25) de diferente densidad, los cuales fueron utilizados para fabricar probetas de laminados tipo sándwich.

Las probetas fabricadas bajo normas ASME, fueron sometidas a pruebas mecánicas de tensión y compresión, para obtener la carga máxima al momento de falla y de aquí determinar el esfuerzo máximo correspondiente.

Los resultados presentados confirman la posibilidad de realizar modelado y simulación numérica confiable en materiales porosos como lo es el foam (CFOAM 20 y CFOAM 25), utilizando una distribución de poro uniforme, la cual facilita el cálculo numérico y disminuyendo el tiempo computacional con equipo estandar, dando una aproximación del 67% a tensión y del 63% a compresión para el CFOAM-20 respectivamente para tensión y compresión., mientras que para el CFOAM-25 el porcentaje de similitud fue del 59% y 60% .

Los valores obtenidos entre los ensayos mecánicos de CFOAM 20 y CFOAM 25, muestran una resistencia mayor a la compresión que a tensión. Además se presentó una diferencia a la compresión de un 39.7% con respecto del CFOAM 20 contra el CFOAM 25; teniendo en cuenta que la diferencia de densidades entre los dos materiales es solo del 20%. Esto indica un gran cambio en la resistencia del material con un mínimo de cambio en su densidad, lo que permite soportar cargas mucho mayores con un cambio relativamente pequeño en su peso. Es posible analizar el CFOAM por medio de simulación en 2D, pero debido a la naturaleza del material se requiere hacer ajustes el arreglo y tamaño de la posición de los poros.

Definir el área efectiva que soporta las cargas axiales por medio de elemento finito, haciendo primero el modelado 3D y reduciendo su masa en relación 80% poro y 20% sólido, para posteriormente simplificar el modelado a una versión 2D, es factible. Los datos obtenidos por esta forma nos sirven para conceptualizar que el área de la sección transversal tiene una correlación directa sobre la influencia del tamaño de poro con cada uno de los ensayos, validando de esta manera que el área efectiva sometida a carga era menor que el área calculada como sólido al cien por ciento.

Ya sea para cualquiera de las dos densidades utilizadas como los 320 kg/m³ o 400 kg/m³ son capaces de soportar cargas superiores a los 1000 N en un área de sección transversal de 0.000001992 m². Pero el modelo de espuma de carbono CFOAM 25 es el material cuya densidad es mayor en 80 kg/m³, muestra posibilidad de ser utilizado como elemento estructural en cargas que no sean superiores a los 6,000 N.

Los resultados registrados en las pruebas de tensión indicaron que la carga promedio máxima aplicada al FOAM 25, resulto ser mayor que la correspondiente al FOAM 20 en 1307 N, es decir existe una diferencia entre estos valores de carga máximos promedio del orden de 59.81 %. Mientras que en las pruebas de compresión los resultados sugieren que la carga promedio máxima registrada que se aplicó al FOAM 25, resulto mayor que el promedio máximo aplicada al FOAM 20 en 3,815 N, es decir existe una diferencia entre estos valores de carga máximos del orden de 58.84 %.

En los ensayos de tensión para los dos tipos: FOAM y FOAM 25, no se presentó valores altos de dispersión en su comportamiento de la tendencia de las curvas de carga VS deformación siendo muy similares dichas curvas entre sí, incluso en sus valores máximos de carga soportada por el material, estos mostraron valores bajos de variación, lo que sugiere la estabilidad del material a estas condiciones de carga. Mientras que en los ensayos de compresión para los dos tipos: FOAM y FOAM 25, no se presentó valores altos de dispersión en sus comportamientos de la tendencia de las curvas de carga vs deformación siendo muy similares dichas curvas entre sí, incluso en sus valores máximos de carga soportada por el material, estos mostraron valores bajos de variación.

Es evidente que las propiedades de resistencia a la tensión y a la compresión del FOAM, se incrementa directamente con el aumento de la densidad del mismo.

6.2 Bibliografía

- [1] T. M. Centre and C. P. Sheet, “PRODUCT DATA SHEET : CFOAM ® Carbon Foams,” pp. 1–2, 2004.
- [2] F. Savira and Y. Suharsono, “CFOAM LTD Presentation,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 01, no. 01, pp. 1689–1699, 2013.
- [3] A. Sharma *et al.*, “Phenol formaldehyde resin derived carbon-MCMB composite foams for electromagnetic interference shielding and thermal management applications,” *Compos. Commun.*, vol. 22, no. May, p. 100433, 2020, doi: 10.1016/j.coco.2020.100433.
- [4] M. H. Namdari Pour, G. Payganeh, and M. Tajdari, “Mechanical behavior of carbon nanotube reinforced polymethylmethacrylate foam: A multi-scale finite element method approach,” *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 83, no. May, p. 104019, 2020, doi: 10.1016/j.euromechsol.2020.104019.
- [5] Z. Li, W. Chen, and H. Hao, “Mechanical properties of carbon foams under quasi-static and dynamic loading,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 161–162, no. June, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105039.
- [6] J. A. Vásquez Angulo, *Análisis y diseño de piezas de máquinas con CATIA V5*. 2012.
- [7] L. T. Tenek and J. Argyris, “A brief history of FEM,” pp. 17–25, 1998, doi: 10.1007/978-94-015-9044-0_2.
- [8] S. Onoshima and T. Oya, “Numerical material testing using finite element polycrystalline model based on successive integration method,” *Procedia Manuf.*, vol. 15, pp. 1833–1840, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.207.
- [9] S. Runke, M. Zang, and M. Clemens, “Detection of Defects in Single and Multilayer Composite Material Models by Numerical Nondestructive Testing Simulations,” pp. 6–10, 2017.
- [10] “Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225117945001>,” 2006.
- [11] K. Emori, S. Fushimi, T. Miura, and A. Yonezu, “FEM simulation of polymeric foam with random pore structure: Uniaxial compression with loading rate effect,” *Polym. Test.*, vol. 82, no. December 2019, p. 106303, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106303.
- [12] N. Michailidis, “Strain rate dependent compression response of Ni-foam investigated by experimental and FEM simulation methods,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 12, pp. 4204–4208, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2011.02.002.
- [13] M. Goletti, V. Mussi, A. Rossi, and M. Monno, “Procedures for Damping Properties Determination in Metal Foams to Improve FEM Modeling,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 4, pp. 233–238, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.611.

- [14] X. Zhang, G. Jia, and H. Huang, "Numerical investigation of aluminum foam shield based on fractal theory and node-separation FEM," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 24, no. 6, pp. 734–740, 2011, doi: 10.1016/S1000-9361(11)60086-1.
- [15] J. F. Ramírez *et al.*, "Numerical Modeling and Simulation of Uniaxial Compression of Aluminum Foams Using FEM and 3D-CT Images," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 4, pp. 227–231, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.609.
- [16] R. Belda, M. Palomar, M. Marco, A. Vercher-Martínez, and E. Giner, "Open cell polyurethane foam compression failure characterization and its relationship to morphometry," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 120, no. April 2020, p. 111754, 2021, doi: 10.1016/j.msec.2020.111754.
- [17] Y. Hu, Q. Z. Fang, H. Yu, and Q. Hu, "Numerical simulation on thermal properties of closed-cell metal foams with different cell size distributions and cell shapes," *Mater. Today Commun.*, vol. 24, no. February, p. 100968, 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.100968.
- [18] R. Bai, J. Guo, Z. Lei, D. Liu, Y. Ma, and C. Yan, "Compression after impact behavior of composite foam-core sandwich panels," *Compos. Struct.*, vol. 225, no. May, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111181.
- [19] I. Ivañez, C. Santiuste, and S. Sanchez-Saez, "FEM analysis of dynamic flexural behaviour of composite sandwich beams with foam core," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 9, pp. 2285–2291, 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2009.07.018.
- [20] J. B. Sha, T. H. Yip, and M. H. Teo, "FEM modelling of single-core sandwich and 2-core multilayer beams containing foam aluminum core and metallic face sheets under monolithic bending," *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, vol. 21, no. 2, pp. 127–138, 2011, doi: 10.1016/S1002-0071(12)60046-X.
- [21] J. Celigüeta, "*Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural.*" 2008.
- [22] A. Raßloff, S. Heitkam, G. Dalongeville, C. Gauthier, and T. Roland, "FEM-simulation of gas diffusion in solid closed-cell porous materials," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 190, pp. 216–225, 2020, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2019.11.013.
- [23] T. Fey, M. Stumpf, A. Chmielarz, P. Colombo, P. Greil, and M. Potoczek, "Microstructure, thermal conductivity and simulation of elastic modulus of MAX-phase (Ti₂AlC) gel-cast foams," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 38, no. 10, pp. 3424–3432, 2018, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.04.012.
- [24] H. Wang, W. Hu, and F. Zhao, "Numerical simulation of quasi-static compression on a complex rubber foam," *Acta Mech. Solida Sin.*, vol. 30, no. 3, pp. 285–290, 2017, doi: 10.1016/j.camss.2017.03.009.
- [25] R. S. Ferfera and B. Madani, "Thermal characterization of a heat exchanger equipped with a combined material of phase change material and metallic foams," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 148, p. 119162, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119162.

- [26] Darío Ferrari Mora, Felipe Díaz del Castillo Rodríguez, (2018). Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Ingeniería Eléctrica Departamento de Ingeniería Laboratorio de Tecnología de Materiales Método del Elemento Finito y AutoFEM.
http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Elemento_finito_Autofem.pdf
- [27] Alejandro Ortiz-Bernardin, (2010). Primeros Pasos en el Método del Elemento Finito: Teoría e Implementación en Una Dimensión.
file:///C:/Users/juano/Documents/METODO%20DE%20ELEMENTO%20FINITO/primeros_pasos_mef1d_rev4.pdf
- [28] INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD G. P. Nikishkov 2004 Lecture Notes. University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan
<https://www.iitg.ac.in/mech/documents/128/introfem.pdf>
- [29] Finite Element Method: An Overview Vishal JAGOTA¹, Aman Preet Singh SETHI² and Khushmeet KUMAR^{1,*} ¹ Department of Mechanical Engineering, Shoolini University, Solan, India ² Department of Mechanical Engineering, B.B.S.B. Engineering College, Fatehgarh, India (* Corresponding author's e-mail: khush2k3@yahoo.com) Received: 3 October 2012, Revised: 27 November 2012, Accepted: 28 January 2013
- [30] M.C. Cosme Gómez Pineda, (2013). La importancia de las pruebas mecánicas estándares de materiales, 8 julio, 2013 Expresiones.
<https://blog.udlap.mx/blog/2013/07/estandaresdemateriales/>
- [31] A. Martínez Finkelshtein, “El análisis numérico en los últimos 25 años,” *Llull Rev. la Soc. Española Hist. las Ciencias y las Técnicas*, vol. 26, no. 57, pp. 919–928, 2003.
- [32] U. Cataluña, “Capítulo 4. Técnicas de modelado y simulación,” pp. 42–54.
- [33] A. Nieves Hurtado and F. C. Domínguez Sánchez, *Métodos numéricos aplicados a la ingeniería*. 2014.
- [34] R. L. Mott, *Resistencia de Materiales*, 5ta ed. Prentice Hall, 2009.
- [35] A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, and J. R. Buck, “Libros universitarios y solucionarios de muchos de estos libros gratis en descarga directa,” *Termodinamica*, p. 1001, 2009, doi: 10: 0-8400-5444-0.
- [36] S. Manteghi, A. Sarwar, Z. Fawaz, R. Zdero, and H. Bougherara, “Mechanical characterization of the static and fatigue compressive properties of a new glass/flax/epoxy composite material using digital image correlation, thermographic stress analysis, and conventional mechanical testing,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 99, no. January 2018, pp. 940–950, 2019, doi: 10.1016/j.msec.2019.02.041.
- [37] A. International and files indexed by mero, “Standard Test Method for Flexural

Properties of Sandwich Constructions 1.”

- [38] ASTM International, “ASTM Standard C365/C365M, 2003, ‘Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores,’” *Current*, vol. i, pp. 2–4, 2003, [Online]. Available: www.astm.org.
- [39] A. D. 1622, “Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics1 This,” vol. i, no. December 1998, pp. 3–5, 2004.
- [40] F. Glast *et al.*, “System 1000 Laminating Epoxy Resin,” 2020.
- [41] D. Grey, “T ECHNICAL DATA J-B Weld,” 2013.
- [42] Michael C.Y. Niu, *Composite Airframe Structures*, Third Edition, Dec. 2010

Apéndice

Resultados de simulaciones

Se anexan todas las simulaciones realizadas en método de elemento finito

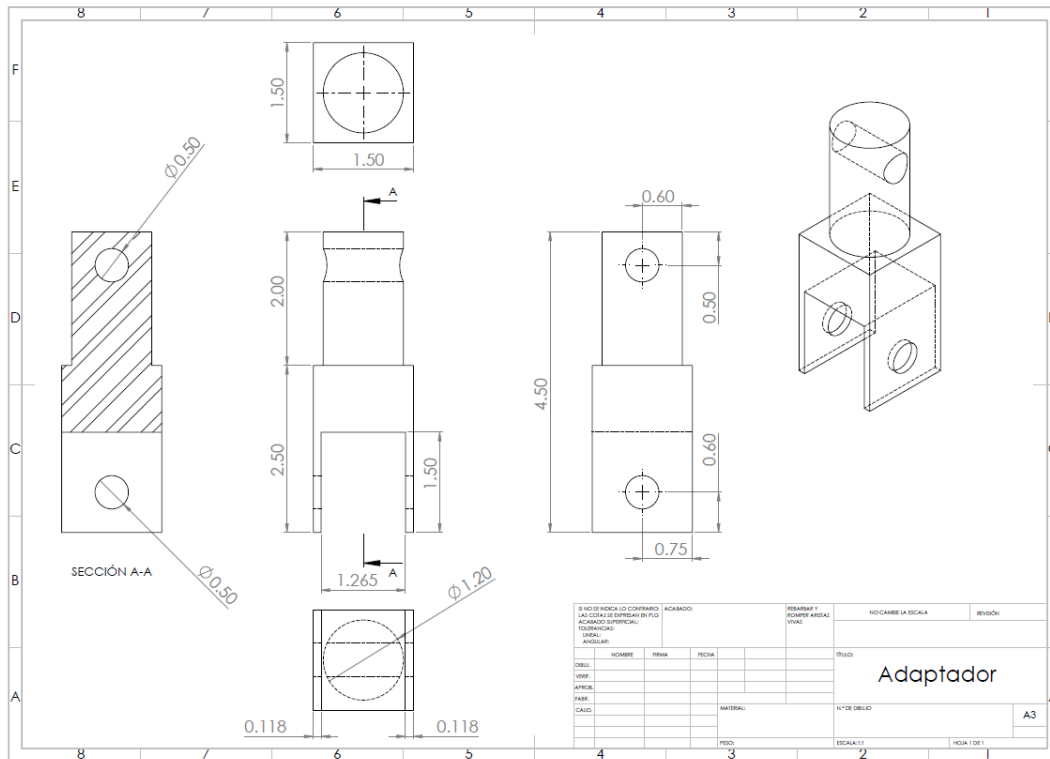


Figura A-1 Adaptador

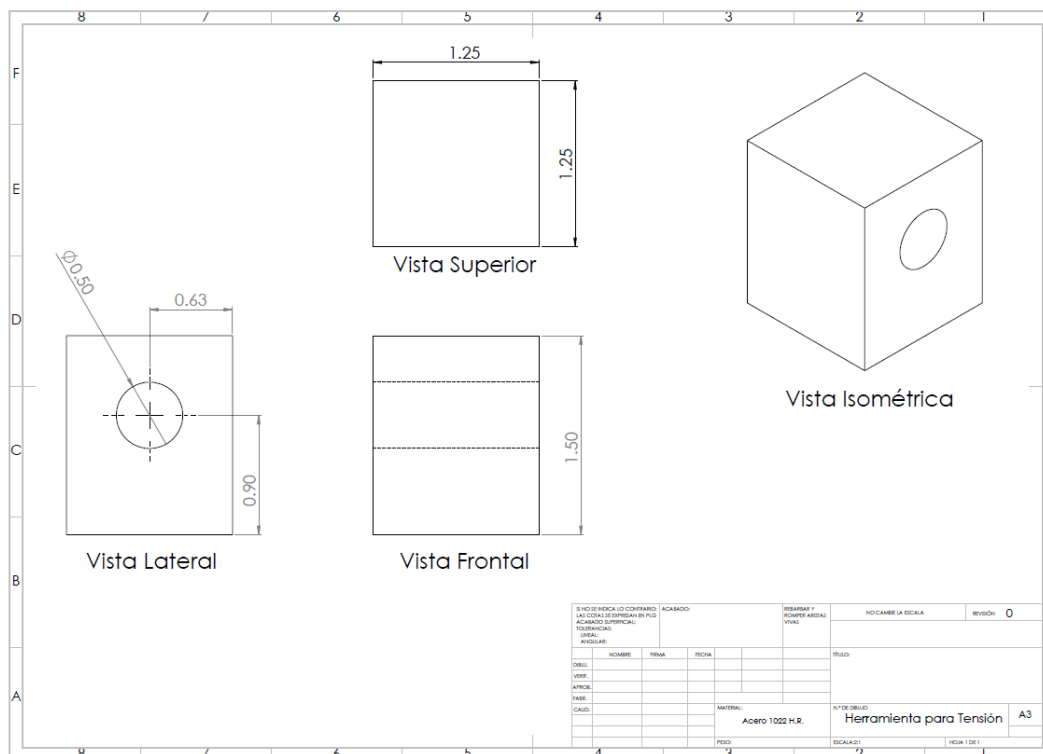


Figura A-2 Bloque de unión

Concentrado de Resultados

En esta sección se muestra un compilado de todos los resultados en orden según se fueron realizando durante el transcurso de esta investigación.

Graficas de Ensayos de Tensión para CFOAM 20:

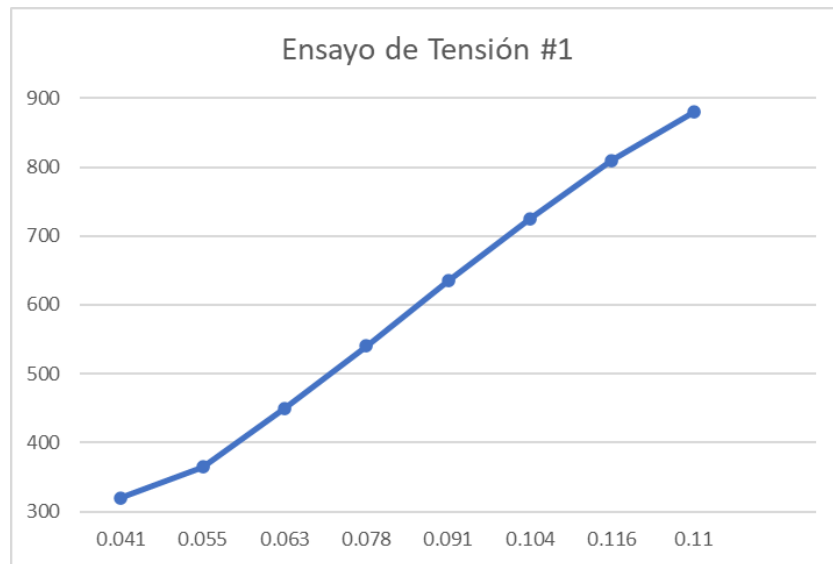


Figura A-5 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #1

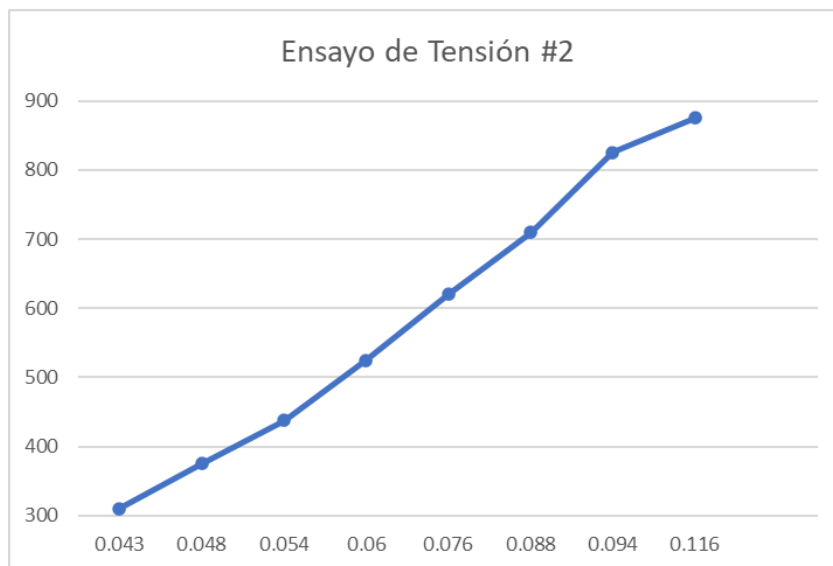


Figura A-6 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #2



Figura A-7 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #3

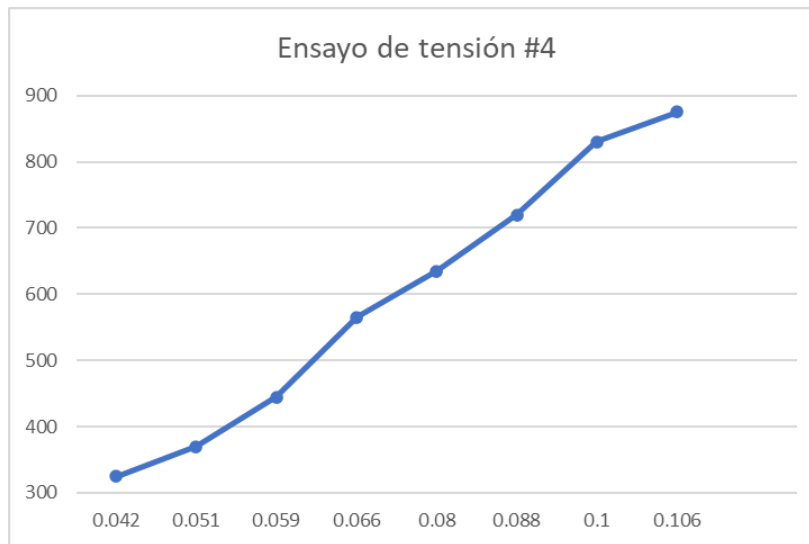


Figura A-8 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #4

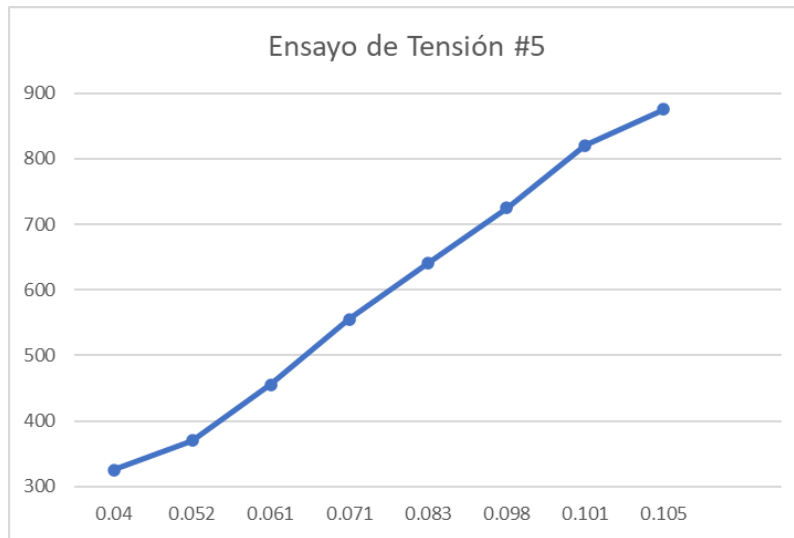


Figura A-9 Ensayo de Tensión CFOAM 20 probeta #5

Graficas de Ensayos de Tensión para CFOAM 25:

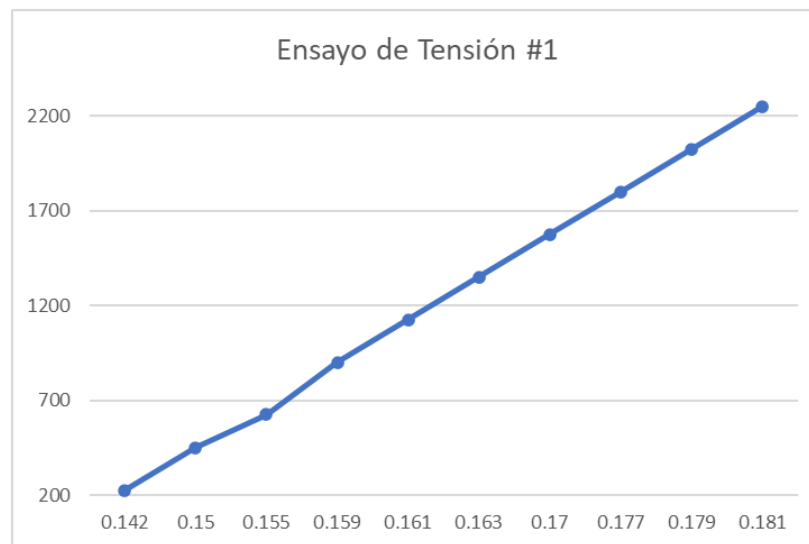


Figura A-10 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #1

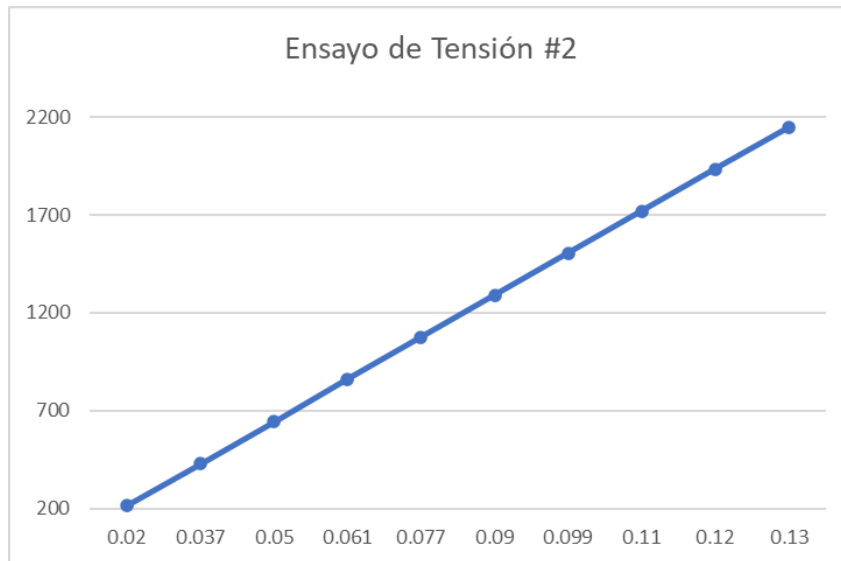


Figura A-11 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #2

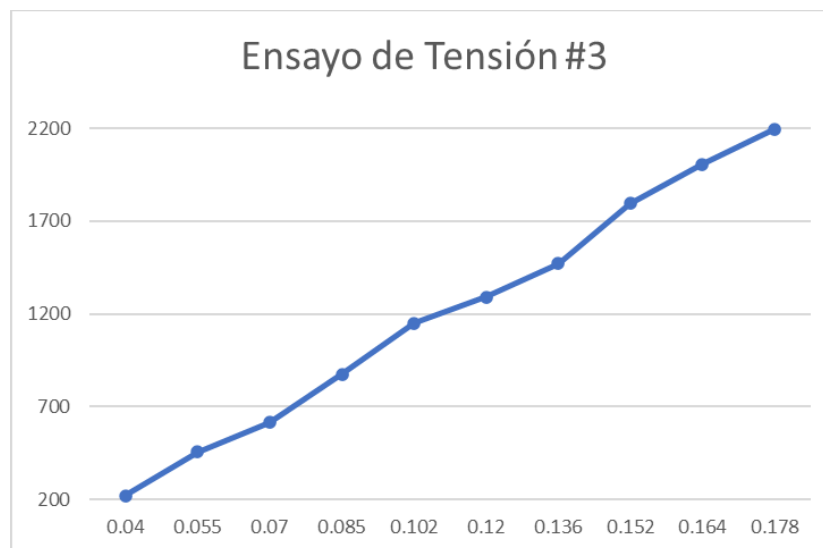


Figura A-12 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #3

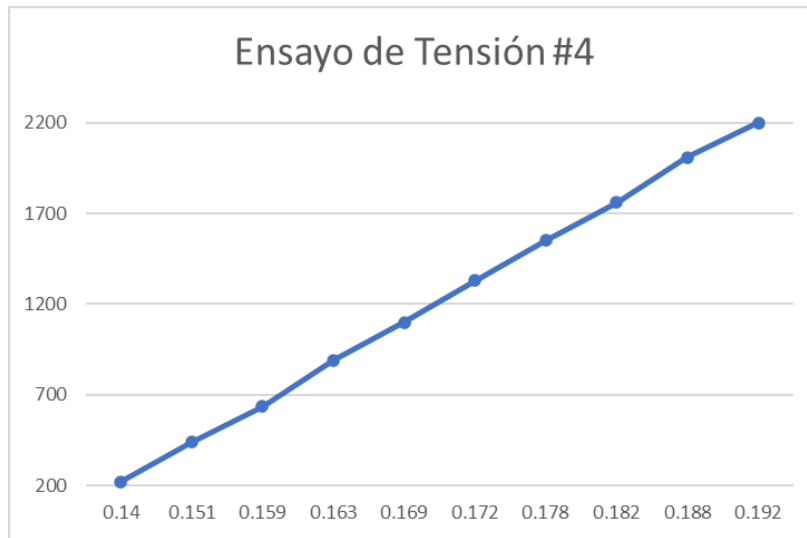


Figura A-13 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #4

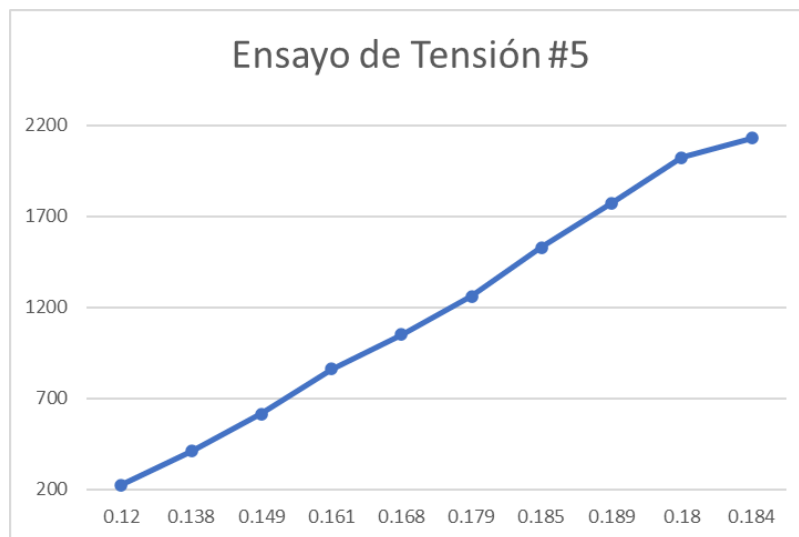


Figura A-14 Ensayo de Tensión CFOAM 25 probeta #5

Graficas de Ensayos de Compresión para CFOAM 20:

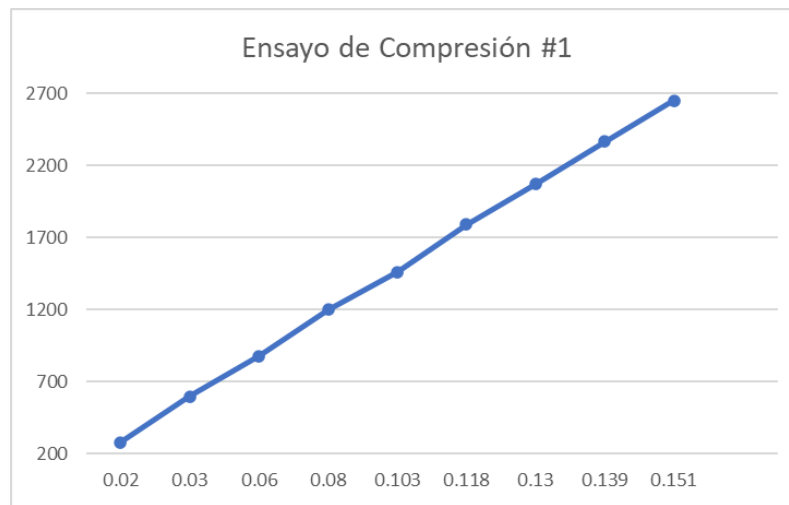


Figura A-15 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #1

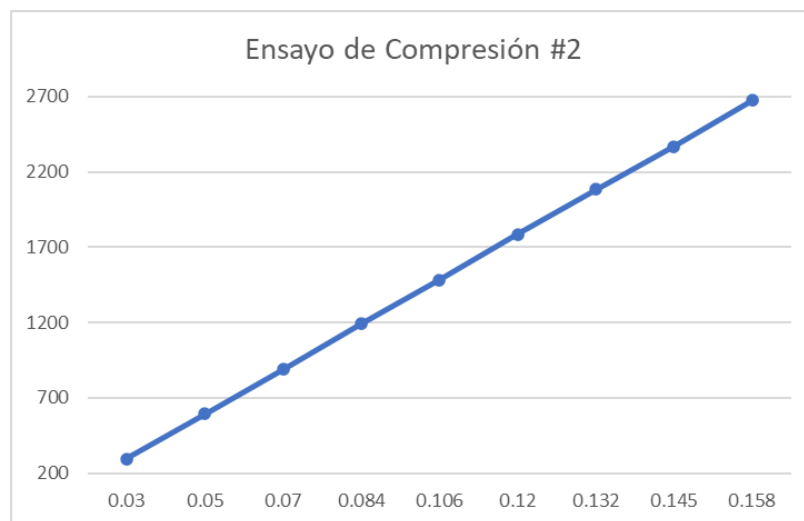


Figura A-16 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #2

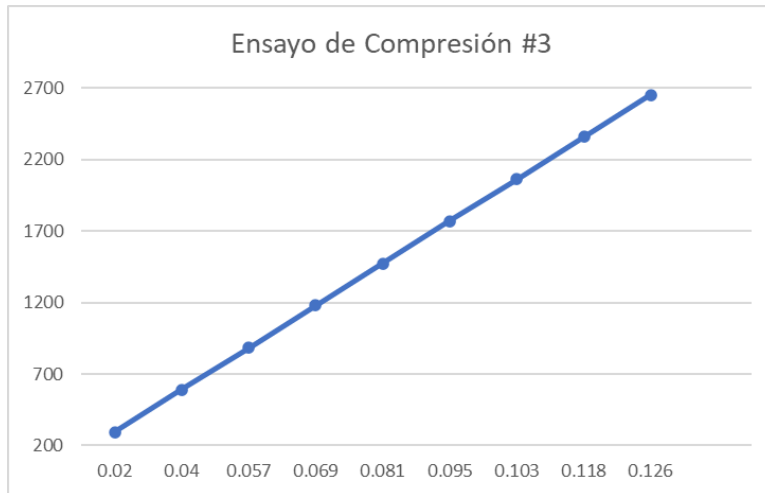


Figura A-17 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #3

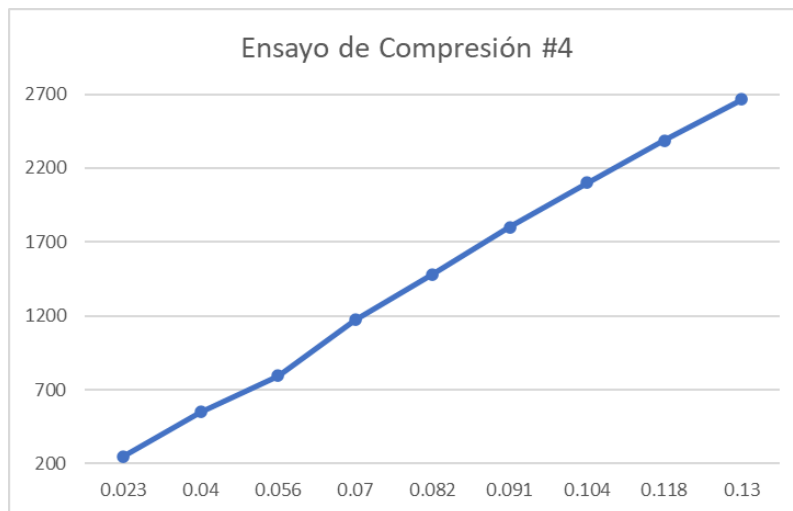


Figura A-18 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #4

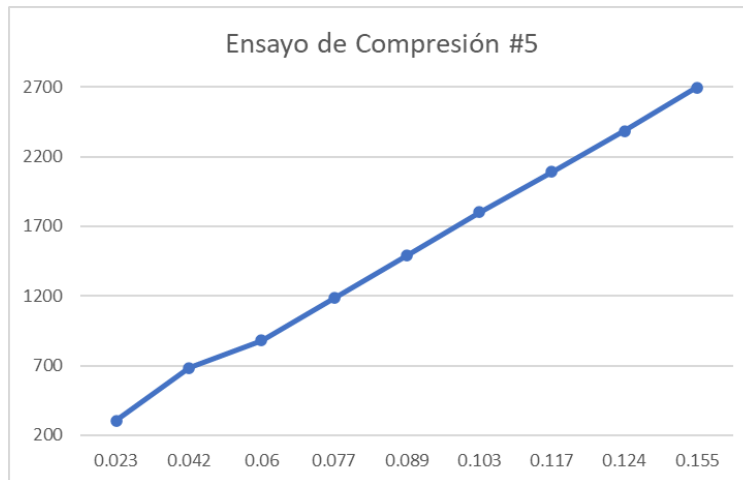


Figura A-19 Ensayo de Compresión CFOAM 20 probeta #5

Graficas de Ensayos de Compresión para CFOAM 25:

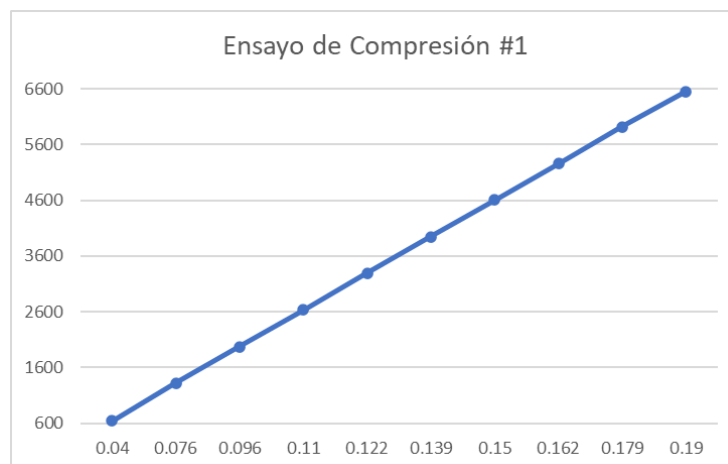


Figura A-20 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #1

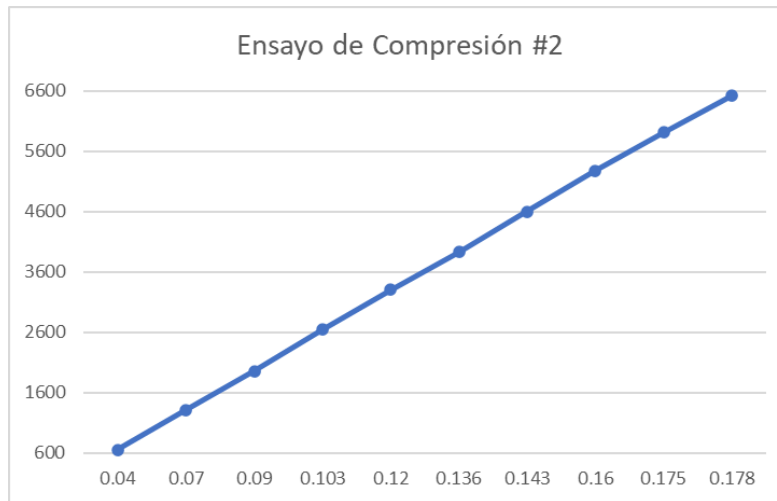


Figura A-21 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #2

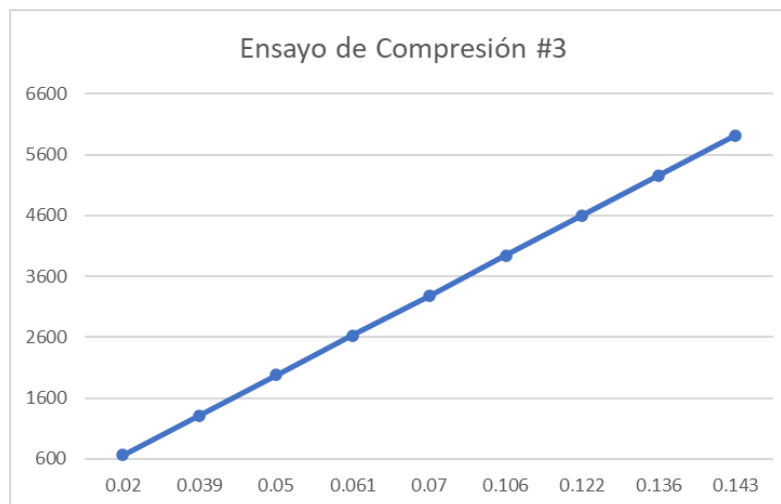


Figura A-22 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #3

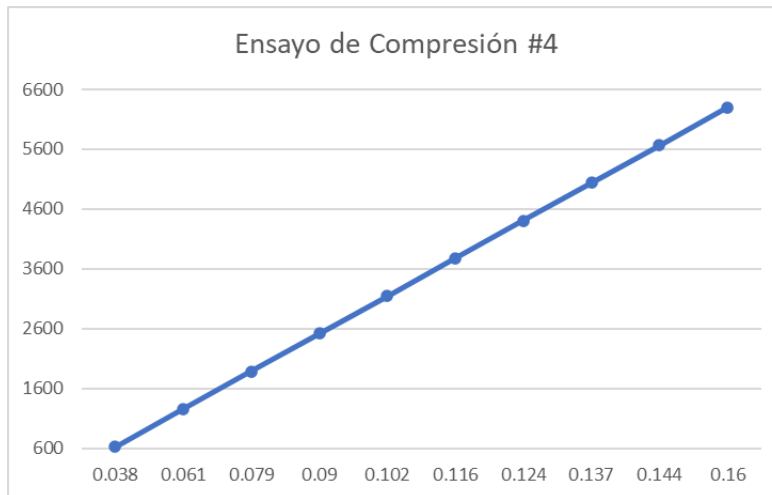


Figura A-23 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #4

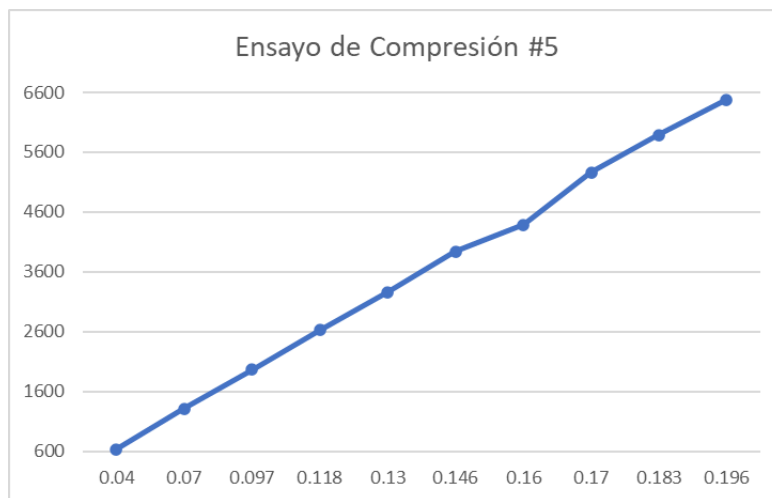


Figura A-24 Ensayo de Compresión CFOAM 25 probeta #5

Comparación de Graficas de Ensayos de Tensión para CFOAM 20 y CFOAM 25:

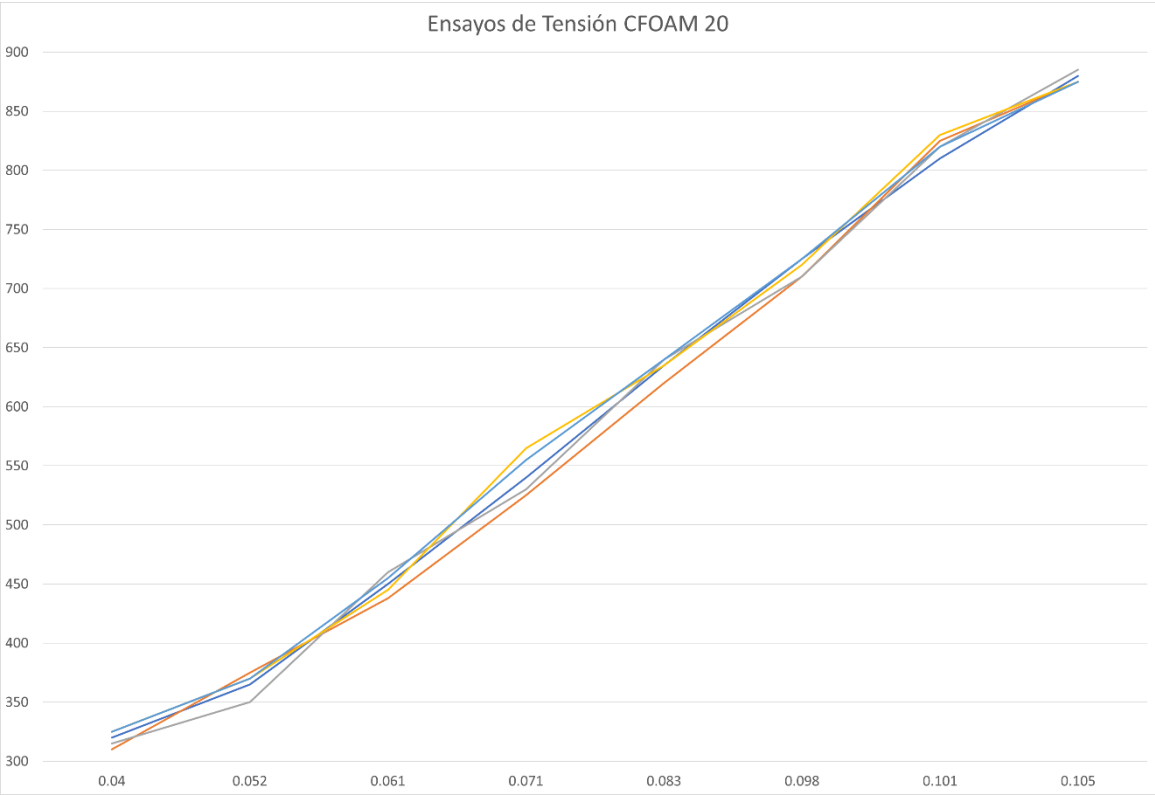


Figura A-25 Ensayo de Tensión CFOAM 20 Comparativa

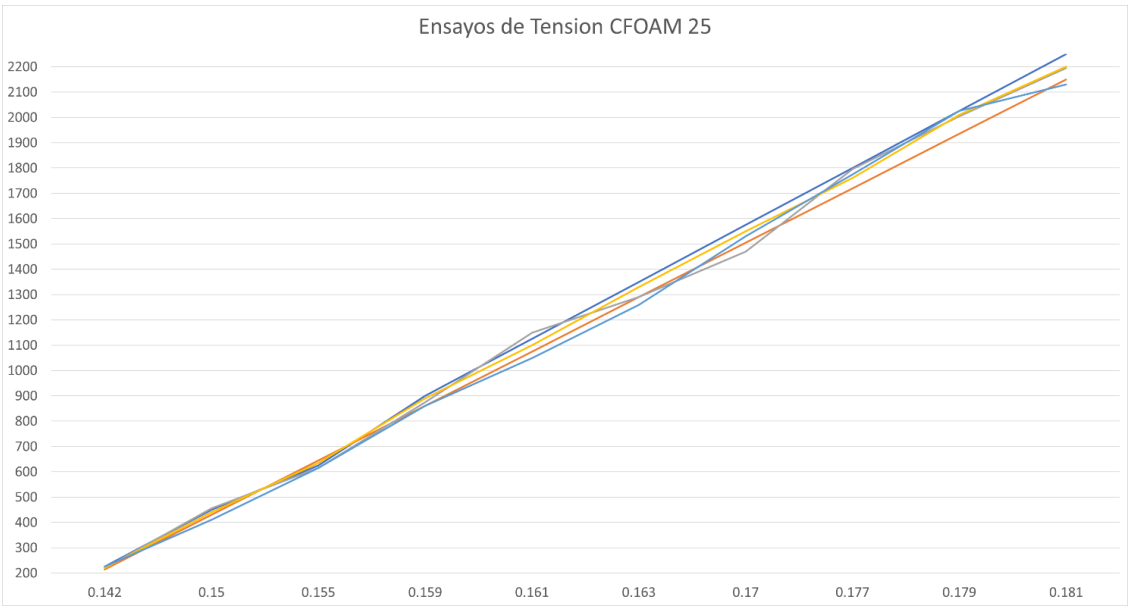


Figura A-26 Ensayo de Tensión CFOAM 25 Comparativa

Comparación de Graficas de Ensayos de Compresión para CFOAM 20 y CFOAM 25:

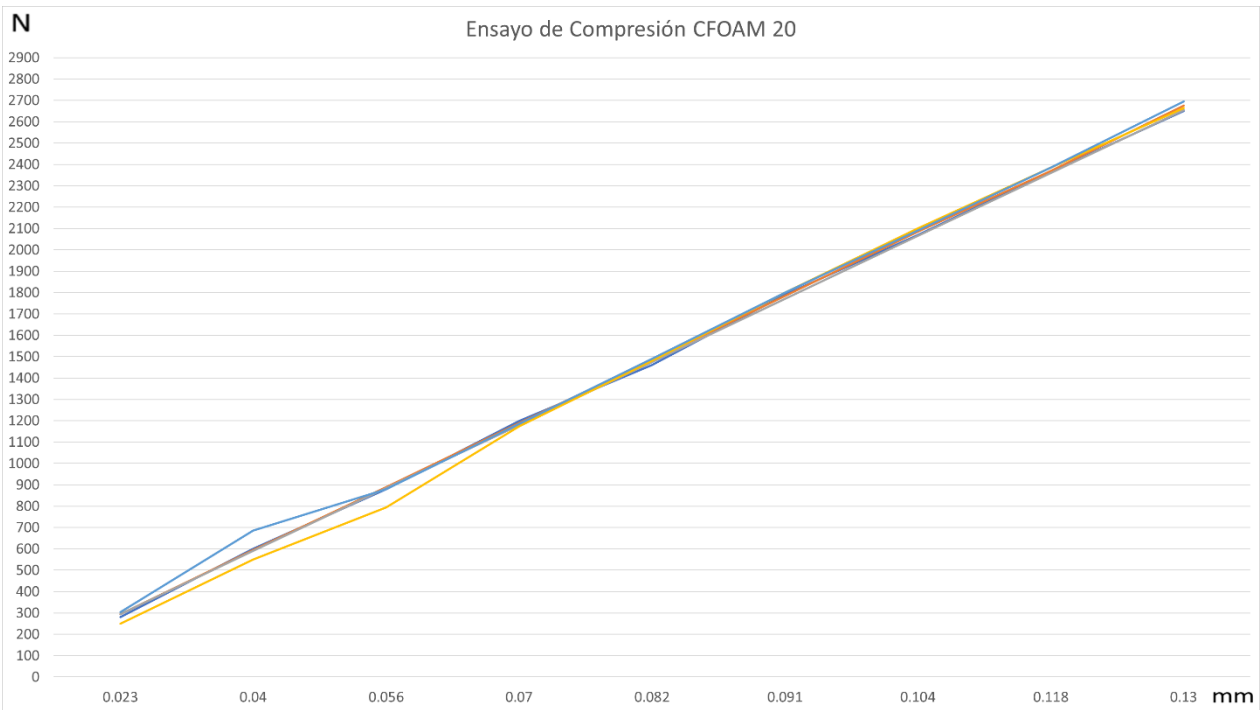


Figura A-27 Ensayo de Compresión CFOAM 20 Comparativa

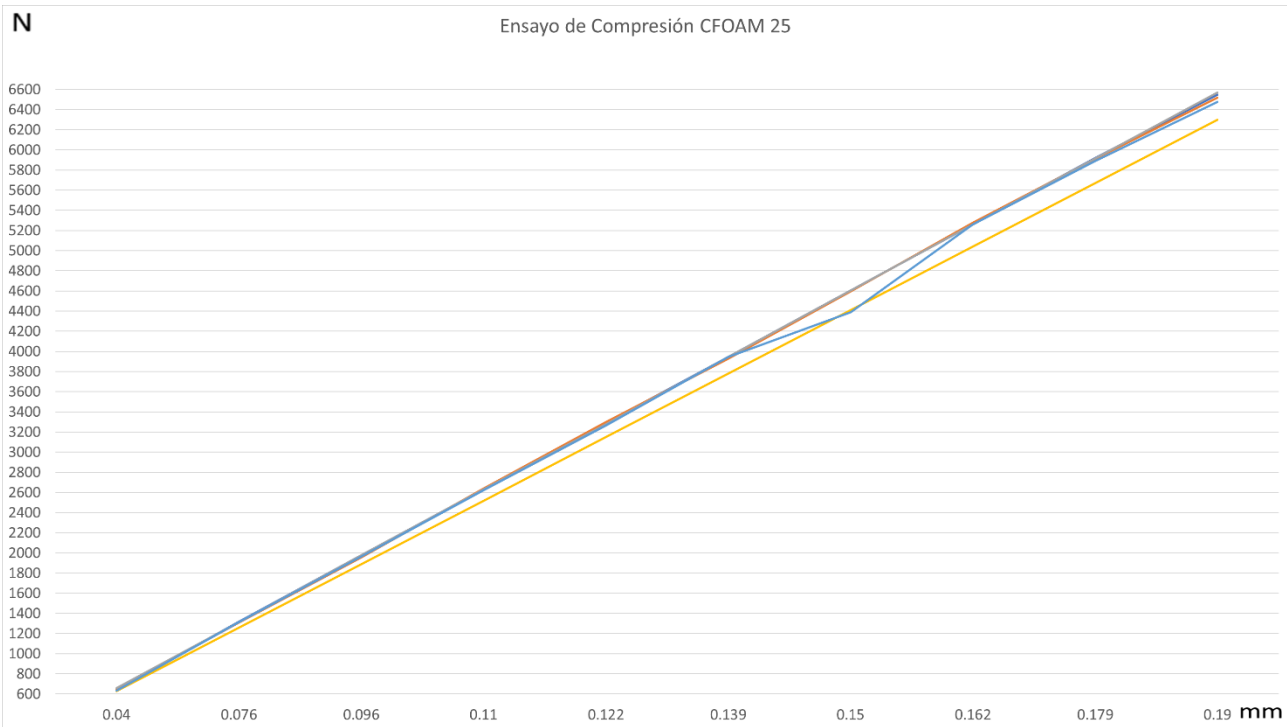


Figura A-27 Ensayo de Compresión CFOAM 25 Comparativa

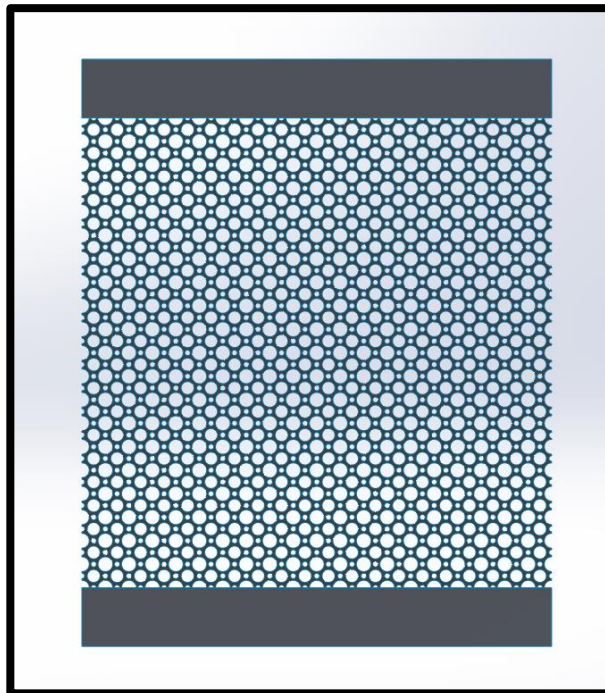


Figura A-29 Modelo 2D utilizado para las simulaciones

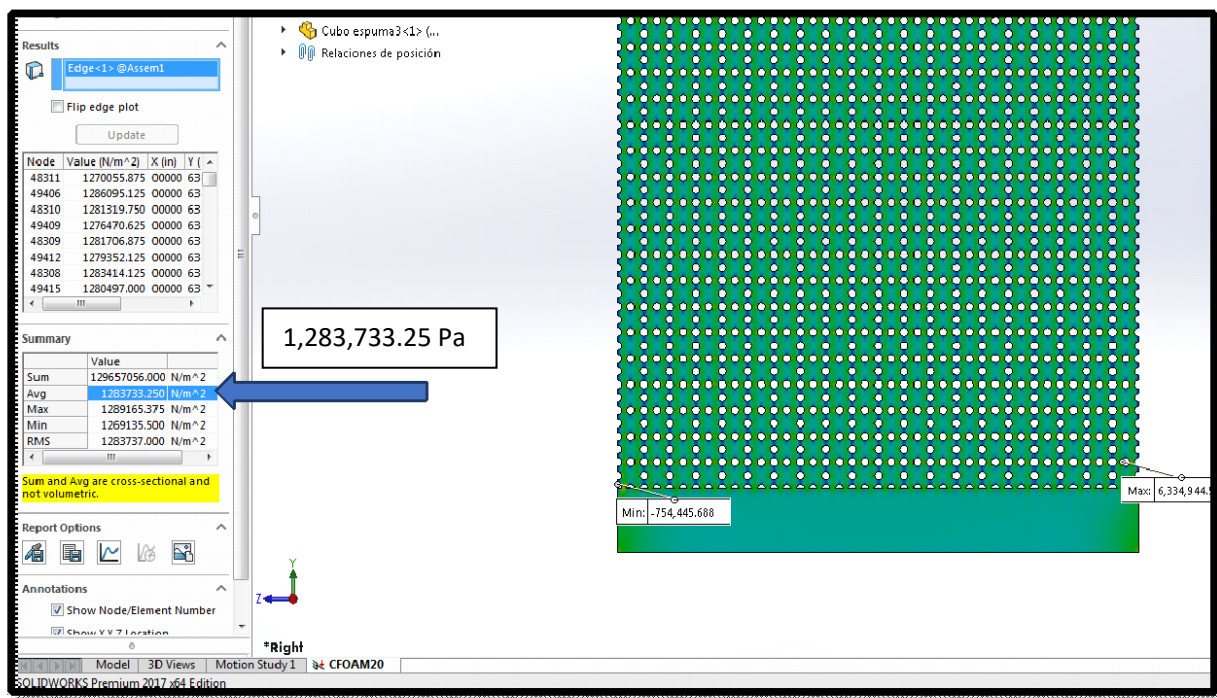


Figura A-30 Simulación de esfuerzo normal para tensión CFOAM 20

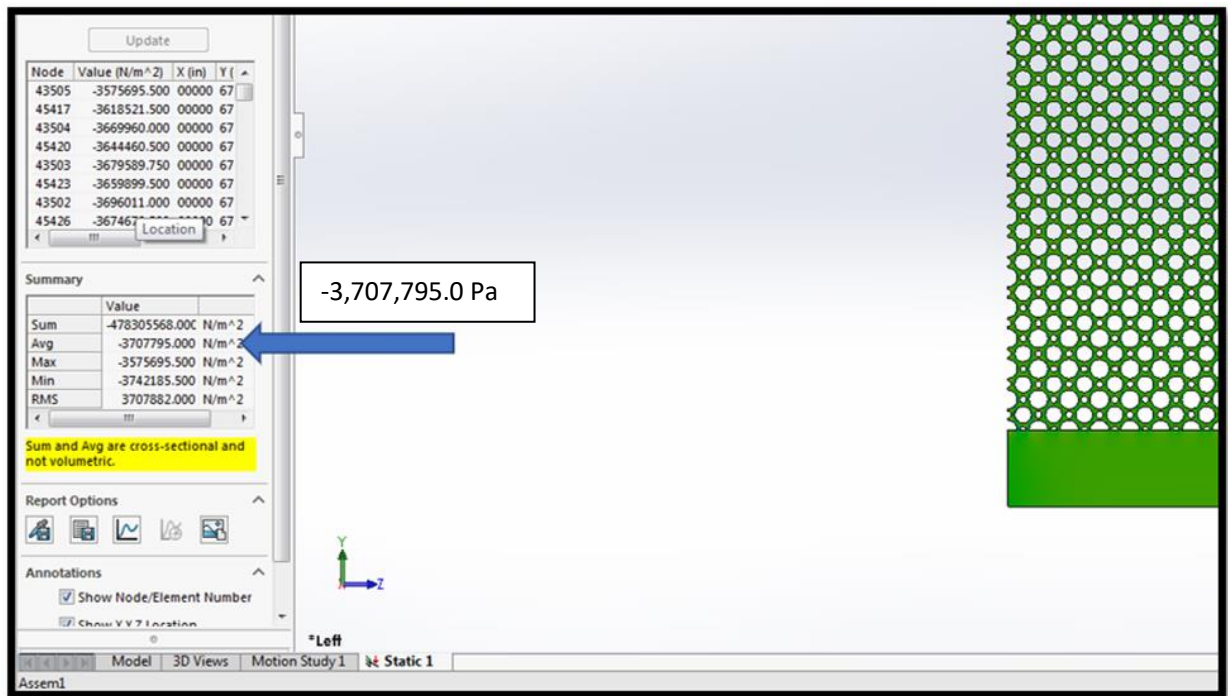


Figura A-31 Simulación de esfuerzo normal para compresión CFOAM 20

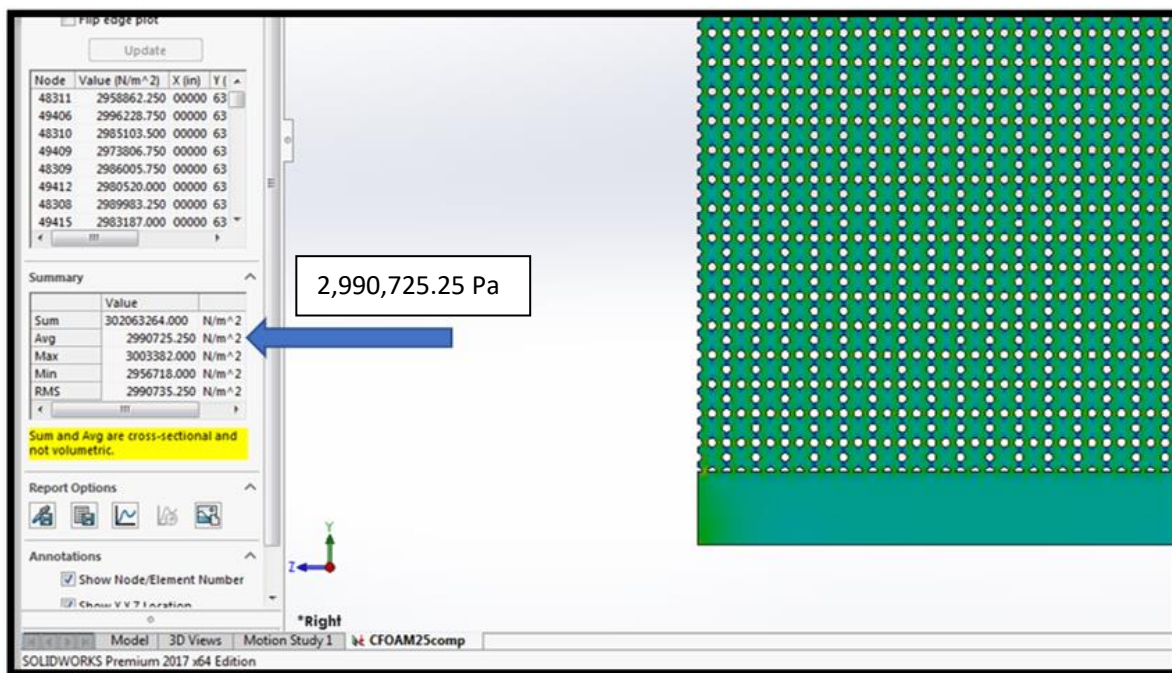


Figura A-32 Simulación de esfuerzo normal para tensión CFOAM 25

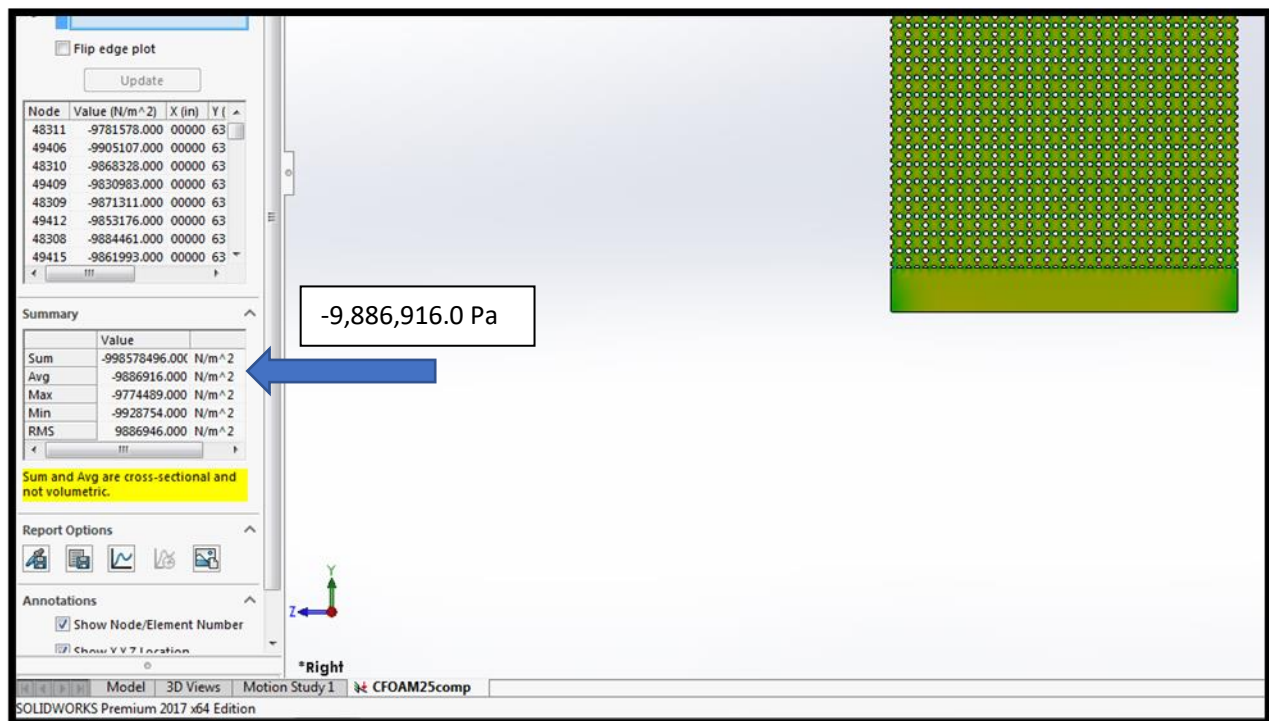


Figura A-33 Simulación de esfuerzo normal para compresión CFOAM 25