



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

“ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DE PORO, ÁREA SUPERICIAL  
Y ADHERENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ESPUMAS  
METÁLICAS DE ALUMINIO EN PANELES TIPO SÁNDWICH”

**TESIS**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

**PRESENTA:**

YESSICA LIZBETH AVILA AVILA

**TUTOR PRINCIPAL**

DR. GABRIEL ÁNGEL LARA RODRÍGUEZ  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

**COMITÉ TUTOR**

DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ GALLEGOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA

DR. OMAR NOVELO PERALTA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

CIUDAD DE MÉXICO

NOVIEMBRE, 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **RESUMEN**

---

El presente trabajo estudia la fabricación de las espumas metálicas de la aleación de aluminio 1100 y el comportamiento mecánico de las estructuras de panel tipo sándwich empleando diferentes materiales de refuerzo como lamina de aluminio y tela de Kevlar.

La espuma metálica fue fabricada a partir de la infiltración de aluminio líquido en una preforma de sacrificio de NaCl, los tamaños de grano que se usaron fueron dos,  $P_1$  de 3.35 mm y  $P_2$  de 2.36 mm las cuales se emplearon como núcleo para la fabricación de las estructuras de panel tipo sándwich. La primera estructura constó de lámina de aluminio- espuma metálica- lámina de aluminio, la segunda estructura de tela de Kevlar- lámina de aluminio- espuma metálica- lámina de aluminio- tela de Kevlar, ambas estructuras pasaron por un proceso de preparación superficial para mejorar la adherencia conocido como sandblasting, el tipo de unión empleado fue mediante un adhesivo base metacrilato, el cual se seleccionó con base en sus propiedades mecánicas.

La evaluación de las estructuras tipo sándwich constó en determinar sus propiedades mecánicas mediante el ensayo de flexión en 3 puntos y el ensayo de impacto tipo Charpy, determinando la resistencia máxima a la flexión, módulo de elasticidad, módulo de elasticidad del refuerzo, módulo de cizalladura del núcleo, energía de absorción y resiliencia del material. Se determinó que las espumas reforzadas con lámina de aluminio y Kevlar (PSA-K) tuvieron un mejor comportamiento mecánico al estar sometidas a esfuerzos combinados y energía de absorción al impacto a altas velocidades, independientemente de los tamaños de poro empleados (3.35 mm y 2.36 mm), con respecto al comportamiento mecánico que presentan las espumas metálicas de aluminio reforzadas con lamina de aluminio (PSA).

## **RECONOCIMIENTOS**

---

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por mi formación profesional a lo largo de estos años, por seguirme permitiendo formar parte de su comunidad estudiantil.

Al posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales (PCeIM) por haberme aceptado en este programa y por todo el apoyo brindado para formarme como maestra en Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) por haberme permitido desarrollar mi proyecto en sus instalaciones y al personal que me apoyo en el desarrollo de este.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante estos dos años para realizar mis estudios de maestría.

Al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT "IN102422" por el financiamiento otorgado para la realización del presente proyecto.

Al Dr. Luis Enrique Sansores Cuevas como coordinador del PCeIM y profesor, el cual me guio para desarrollar el trabajo de tesis. Así mismo, quiero agradecer a las secretarias del PCeIM y del IIM: Diana Arias, Esther Carrillo, Lilia García, Rosario Santibáñez e Isabel Gómez, por todo su apoyo, paciencia y asesoría en trámites y papeleos.

Al Dr. Gabriel Ángel Lara Rodríguez por todo el apoyo otorgado a lo largo de estos años, en especial por haber sido mi tutor principal durante la maestría y por permitirme ser parte de su equipo de trabajo. Gracias por haberme otorgado las herramientas necesarias para la realización y culminación exitosa de mi proyecto, por su paciencia, apoyo y comprensión.

A mi comité tutorial: Dr. Miguel Ángel Hernández Gallegos y Dr. Omar Novelo Peralta por todo el seguimiento y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Ignacio Figueroa Vargas por haberme permitido continuar con el proyecto de investigación de las espumas metálicas.

A mis sinodales: Dr. Arturo Barba Pingarrón, Dr. Enrique Antonio Salas Reyes y Dr. Alejandro García Hinojosa por sus observaciones y comentarios en la revisión de esta tesis.

A los técnicos: Dr. Omar Novelo, Dr. Carlos Ramos, M. en C. Adrián Tejeda, M en C. Eliezer. Hernández, Dra. Lourdes Bazán, Ing. Ing. Fernando Silvar, Ing. Eriseth Reyes, Fis. Raúl Reyes, M en C. Ana Bobadilla, M. en C. Francisca García, M en C. Salvador López por su apoyo para el desarrollo de esta tesis.

Al personal de la biblioteca del IIM, en especial a la Lic. Ma. Teresa Vázquez Mejía y a la Lic. Oralía Leticia Jiménez Álvarez.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

A mi mamá por siempre creer en mi e impulsarme a llegar cada día más lejos, por el apoyo y comprensión que me das día a día. Las palabras jamás me van a bastar para agradecerte lo que has hecho por de mí, cada logro y éxito mío también es tuyo.

A mi papá, quién me enseñó a no tener obstáculos “porque una mujer puede hacer todo lo que se proponga”, me enseñaste a ser independiente, a ser perseverante y a nunca rendirme, te agradezco infinitamente porque ahora eres mi estrella.

A mi hermano Oscar por siempre cuidarme, apoyarme y darme su punto de vista sin importar la situación o la hora, de ti aprendí la importancia de la paciencia. A mi hermano Luis por haberme mostrado lo maravilloso del mundo de la ciencia.

Agradezco a mi novio Ramiro por su paciencia, comprensión y apoyo durante estos años, gracias por celebrar cada paso conmigo, por motivarme cuando ya no hay fuerzas, por siempre tener una sonrisa cuando estoy cansada, gracias, por sentirte orgulloso de mi y presumirme en cada oportunidad, te amo infinitamente.

Agradezco a mi amigo Alberto López por su gran amistad, apoyo incondicional y por seguir formando parte del equipo lego a lo largo de todo este tiempo.

Agradezco a mi gran amigo Andrés Soriano por haberme brindado su amistad durante todo este tiempo, aún nos falta camino por recorrer, pero ya estamos encaminados y estoy segura de que las risas nunca van a faltar.

Agradezco a mis compañeros de laboratorio: Farid, Carmen y Esteban por brindarme su apoyo y compañerismo durante este tiempo.

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS</b> .....	13
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	17
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b> .....	17
<b>ANTECEDENTES</b> .....	18
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	21
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	21
1.1. Introducción a los materiales porosos.....	21
1.2. Definición de espumas metálicas .....	22
1.3. Características de los materiales porosos .....	23
1.3.1. Densidad y porosidad.....	24
1.3.2. Absorción, resistencia a la humedad, permeabilidad .....	24
1.3.3. Elasticidad, plasticidad, fragilidad.....	24
1.3.4. Resistencia y dureza.....	25
1.4. Comportamiento mecánico de las espumas metálicas. ....	25
1.4.1. Poroplasticidad .....	27
1.5. Métodos de fabricación de espumas metálicas .....	27
1.5.1 Espumado de metales (aluminio) .....	29
1.5.2. Espumas metálicas mediante alporas.....	30
1.5.3. Gasar, solidificación eutéctica de gas sólido .....	31
1.5.4. Hydro/Alcan, espumado por inyección de gas .....	32
1.5.5. Alulight, espuma metálica mediante metalurgia de polvos .....	32
1.5.5. Fabricación de espumas de aluminio usando el método de infiltración de metal líquido. ....	33
1.6. Estructuras tipo sándwich .....	34
1.7 Aplicaciones de las espumas metálicas .....	38
1.7.1. Industria automotriz.....	39
1.7.2. Seguridad y defensa .....	39
1.7.3. Industria biomédica .....	40
1.7.4. Industria aeroespacial .....	40
1.7.5. Industria de la Construcción.....	41
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	43
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	43

<b>2.1. Fabricación de las espumas de aluminio .....</b>	<b>43</b>
2.1.1. Materiales .....	44
2.1.2. Preparación y ensamblado del crisol de fusión para las espumas metálicas de Al.....	45
2.1.3. Fundición e infiltración del aluminio. ....	47
<b>2.2. Obtención del núcleo de la espuma metálica de aluminio tipo sándwich.....</b>	<b>49</b>
2.2.1. Preparación superficial (Sandblasting). ....	50
2.2.2. Solubilización del cloruro de sodio. ....	51
<b>2.3. Caracterización física y estructural.....</b>	<b>51</b>
2.3.1. Determinación de la porosidad.....	51
<b>2.4. Ensayo de adhesión a la cizalladura para adhesivos. ....</b>	<b>51</b>
2.4.1. Materiales. ....	51
2.4.2. Preparación de la probeta. ....	52
2.4.3. Condiciones de operación para el ensayo.....	53
<b>2.5. Fabricación de las espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich.....</b>	<b>53</b>
2.5.1. Espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich con refuerzo de lámina de aluminio (PSA).....	53
2.5.2. Espumas metálicas en panel tipo sándwich con refuerzo de lámina de aluminio y Kevlar (PSA-K).....	55
<b>2.6. Ensayo de flexión en 3 puntos.....</b>	<b>56</b>
2.6.1. Equipo y condiciones de operación para el ensayo de flexión en 3 puntos. ....	57
<b>2.7. Determinación de propiedades mecánicas mediante cálculos teóricos. ....</b>	<b>58</b>
2.7.1. Cálculo del módulo de elasticidad mediante la relación de Nielsen .....	58
2.7.2. Módulo elástico del refuerzo $E_f$ .....	59
2.7.3. Módulo de cizalladura del núcleo $G_c$ . ....	59
<b>2.8 Ensayo de impacto tipo Charpy.....</b>	<b>59</b>
2.8.1. Equipo y condiciones de operación para el ensayo de impacto tipo Charpy. ....	60
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>61</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>61</b>
<b>3.1 Espumas fabricadas por infiltración. ....</b>	<b>61</b>
<b>3.2 Resultados de la caracterización física y estructural. ....</b>	<b>62</b>

<b>3.3. Propiedades mecánicas de los adhesivos. ....</b>	<b>66</b>
<b>3.4. Ensayo de flexión en tres puntos en diferentes materiales. ....</b>	<b>67</b>
3.4.1. Ensayo de flexión en tres puntos aplicado en una barra rectangular de aluminio sólido. ....	67
3.4.2. Ensayo de flexión en tres puntos aplicado a las espumas metálicas de Al sin refuerzo para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ . ....	68
3.4.3. Ensayo de flexión en tres puntos aplicado a las PSA para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ . ....	72
3.4.4. Ensayo de flexión en tres puntos aplicado a los PSA-K para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ . ....	75
3.4.5. Ensayo de flexión en tres puntos comparando las propiedades mecánicas de los núcleos con los PSA y PSA-K para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ . ....	78
3.5. Ensayo de impacto tipo Charpy aplicado a PSA y PSA-K para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ . ....	82
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>86</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>93</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1. Espuma metálica de celda cerrada [13].	22
Figura 1.2. Espuma metálica de celda abierta [13].	23
Figura 1.3. medio poroso representado mediante la superposición de dos medios continuos [14].	23
Figura 1.4. Procesos de fabricación de las espumas metálicas.	29
Figura 1.5. Espuma de aluminio de celda semiabierta [19].	30
Figura 1.6. Proceso de fabricación de espumas mediante alporas [20].	31
Figura 1.7. Espuma metálica obtenida mediante Gasar [21].	31
Figura 1.8. Fabricación de espuma de aluminio mediante el proceso Hydro-Alcan [23].	32
Figura 1.9. Esquema de la técnica de espumado de compactados de polvo [24].	33
Figura 1.10. Sistema para el proceso de fabricación de las espumas de aluminio por infiltración, a) crisol, b) sistema de válvulas para la aplicación de vacío e inyección del gas, c) horno eléctrico [25].	34
Figura 1.11. Proceso de fabricación empleando el método de infiltración para las espumas de aluminio de poro abierto.	34
Figura 1.12. Esquema de una estructura de panel tipo sándwich, elaborada con un material poroso.	35
Figura 1.13. Estructura tipo sándwich con núcleo y revestimiento de aluminio [26].	35
Figura 1.14. Espuma de aluminio producida por el método de unión con laminado y metalurgia de polvos [28].	37
Figura 1.15. Espumas metálicas presentes en los automóviles [12].	39
Figura 16. Prototipo de soportes de motor BMW [12].	39
Figura 1.17. Blindaje híbrido con espuma metálica (aluminum foam) para vehículo militar [31].	40
Figura 1.18. Panel sándwich de espuma metálica con curvatura [31].	41
Figura 1.19. Bomba de calor con espuma metálica [32].	41
Figura 1.20. Emblema fabricado mediante una espuma metálica [32].	42
Figura 1.21. Biombo fabricado mediante una espuma metálica [32].	42
Figura 2.1. Sistema de infiltración y equipo empleado.	44
Figura 2.2. a) Lingote cilíndrico de Al 1100, b) Crisol de grafito con Al líquido.	44
Figura 2.3. Crisol de acero inoxidable recubierto con BN, a) plato superior, b) plato inferior, c) cilindro (cuerpo del crisol).	46
Figura 2.4. Plato inferior. Con las flechas rojas se señalan los espacios donde se posiciono la fibra de vidrio y la flecha azul señala el grafito.	46
Figura 2.5. Cantidad necesaria de NaCl y Al para producir las espumas de aluminio de celda abierta con tamaño de poro de 2.36 mm y 3.35 mm [34].	47
Figura 2.6. Proceso de fundición e infiltración para producir las espumas de aluminio de celda abierta con tamaño de poro de 2.36 mm y 3.35 mm, a) fundición, b) infiltración y c) solidificación. [34].	48
Figura 2.7. Crisol retirado del horno inmediatamente después, coloración uniforme rojo brillante, a) vista frontal, b) vista lateral.	48
Figura 2.8. Obtención de la espuma metálica de aluminio, a) remanente de la fundición y rechupe, b) infiltración del aluminio (espuma metálica).	49

Figura 2.9. Obtención de las secciones de la espuma metálica de aluminio, a) espuma obtenida seccionada en partes iguales, b) secciones obtenidas.....	49
Figura 2.10. Pieza después del arenado con rugosidad uniforme, poro 2.36 mm. ....	50
Figura 2.11. Solubilización del NaCl de la espuma metálica de aluminio. ....	51
Figura 2.12. Arenado de las láminas empleadas para probetas del ensayo de adhesión. ....	52
Figura 2.13. Arenado de las láminas empleadas para la fabricación de espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich. ....	54
Figura 2.14. Fabricación de las espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich, a) pegado de la lámina de aluminio, b) ensamble y obtención de la espuma metálica tipo sándwich.....	55
Figura 2.15. Fabricación de las espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich con refuerzo de lámina de Al y Kevlar, a) pegado de la fibra de Kevlar sobre la lámina de Al, b) ensamble y obtención de la espuma metálica tipo sándwich.....	56
Figura 2.16. Dimensiones en milímetros de las probetas empleadas para el ensayo de flexión en 3 puntos. ....	56
Figura 2.17. Posición de la probeta para el ensayo de flexión en 3 puntos.....	57
Figura 2.18. Fallo de la espuma de Al con tamaño de poro de 2.36 mm en el ensayo de flexión en 3 puntos. ....	57
Figura 2.19. Fallo del adhesivo (base metacrilato marca Plastic Welder) en el ensayo de flexión en 3 puntos. ....	58
Figura 2.20. Dimensiones en milímetros de las probetas de impacto.....	60
Figura 2.21. Ensayo de impacto tipo Charpy, a) equipo empleado, b) posición de la probeta de impacto para el ensayo de impacto tipo Charpy. ....	60
Figura 3.1. Espuma metálica de Al tamaño de poro de 3.35 mm, a) espuma obtenida de fundición, b) núcleo obtenido de seccionar la espuma de Al. ....	62
Figura 3.2. Espuma metálica de Al tamaño de poro de 2.36 mm, a) espuma obtenida de fundición, b) núcleo obtenido de seccionar la espuma de Al. ....	62
Figura 3.3. Imagen procesada con el software Image J para determinar la porosidad de la espuma metálica de Al tamaño de poro de 3.35 mm.....	63
Figura 3.4. Imagen procesada con el software Image J para determinar la porosidad de la espuma metálica de Al tamaño de poro de 2.36 mm.....	64
Figura 3.5. Distribución de la redondez y esfericidad de la espuma metálica de Al para el tamaño de $P_1$ . ....	65
Figura 3.6. Distribución de la redondez y esfericidad de la espuma metálica de Al para el tamaño de $P_2$ . ....	66
Figura 3.7. Diagrama esfuerzo-deformación de una barra rectangular de aluminio sólido, ensayando 3 muestras del mismo tipo. ....	68
Figura 3.8. Diagrama esfuerzo-deformación de la espuma metálica de Al sin refuerzo con tamaño de poro de 3.35 mm (N 1), ensayando 3 muestras del mismo tipo.....	69
Figura 3.9. Diagrama esfuerzo-deformación de la espuma metálica de Al sin refuerzo (N 2) con tamaño de poro $P_2$ sin refuerzo, ensayando 3 muestras del mismo tipo.....	71
Figura 3.10. Diagrama esfuerzo-deformación de los PSA 1, ensayando 3 muestras del mismo tipo. ....	73
Figura 3.11. Diagrama esfuerzo-deformación de los PSA 2, ensayando 3 muestras del mismo tipo. ....	74

Figura 3.12. Falla por cizalladura en el ensayo de flexión en tres puntos aplicado en el PSA 2. ....	75
Figura 3.13. Diagrama esfuerzo-deformación de los PSA-K 1, ensayando 3 muestras del mismo tipo. ....	76
Figura 3.14. Diagrama esfuerzo-deformación de los PSA-K 2, ensayando 3 muestras del mismo tipo. ....	77
Figura 3.15. Falla por cizalladura en el ensayo de flexión en tres puntos aplicado en los PSA-K 1 y PSA-K 2. ....	78
Figura 3.16. Diagrama esfuerzo-deformación comparativo de las muestras A, a) tamaño de poro $P_1$ , b) tamaño de poro $P_2$ . ....	79
.....	79
Figura 3.18. Diagrama esfuerzo-deformación comparativo de las muestras B a) tamaño de poro $P_1$ , b) tamaño de poro $P_2$ . ....	80
Figura 3.20. Diagrama esfuerzo-deformación comparativo de las muestras C, a) tamaño de poro $P_1$ , b) tamaño de poro $P_2$ . ....	81
.....	82
Figura 3.22. Energía absorbida Vs módulo de elasticidad para el tamaño de poro $P_1$ . ....	84
Figura 3.23. Energía absorbida Vs módulo de elasticidad para el tamaño de poro $P_2$ . ....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1. Relaciones para estimar comportamiento mecánico de espumas metálicas. [17].	26
Tabla 1.2. Métodos de unión entre el revestimiento y el núcleo de espuma, utilizados en investigaciones [29].	38
Tabla 2.1. Composición química de los lingotes de aluminio 1100.	45
Tabla 2.2. Composición química de los lingotes de aluminio.	45
Tabla 2.2. Parámetros determinados para el proceso de fundición e infiltración del aluminio en función del tamaño de poro.	48
Tabla 2.3. Parámetros determinados para el proceso de arenado en función del tamaño de poro.	50
Tabla 2.4. Características de los adhesivos empleados.	52
Tabla 2.5. Tiempos y temperatura de secado de los adhesivos empleados.	53
Tabla 2.6. Parámetros determinados para el proceso de arenado de la lámina de aluminio.	54
Tabla 3.1. Relación de infiltraciones y núcleos obtenidos para ensayos mecánicos.	61
Tabla 3.2. Cantidad de NaCl removido del núcleo.	62
Tabla 3.3. Determinación del porcentaje de porosidad mediante el área superficial total y el área de los poros.	64
Tabla 3.4. Determinación del factor de redondez y circularidad.	65
Tabla 3.5. Tabla de esfuerzos máximos de adhesivos ensayados y grafica esfuerzo Vs deformación.	66
Tabla 3.6. Propiedades mecánicas de la barra de Al sólido.	68
Tabla 3.7. Propiedades mecánicas, módulo de elasticidad experimental y teórico de la espuma metálica de Al N1.	70
Tabla 3.7. Propiedades mecánicas, módulo de elasticidad experimental y teórico de la espuma metálica de Al sin refuerzo con tamaño de poro $P_2$ .	71
Figura 3.17. Gráfico de las propiedades mecánicas de las muestras A de los PSA y PSA-K, a) tamaño de poro $P_1$ , b) tamaño de poro $P_2$ .	79
Figura 3.19. Gráfico de las propiedades mecánicas de las muestras B de los PSA y PSA-K, a) tamaño de poro $P_1$ , b) tamaño de poro $P_2$ .	81
Figura 3.21. Gráfico de las propiedades mecánicas de las muestras C de los PSA y PSA-K, a) tamaño de poro $P_1$ , b) tamaño de poro $P_2$ .	82
Tabla 3.8. Resultados del ensayo de impacto tipo Charpy aplicado a los PSA y PSA-K, con tamaño de poro $P_1$ y $P_2$ .	83
Parámetros morfológicos de los poros con base en el software de análisis de imagen Image J.	91
Tabla 5.1. Parámetros morfológicos de los poros determinados mediante el análisis de imagen.	91
Figura 5.1. Parámetros obtenidos para el estudio en el programa Image J a) área, b) aspecto, c) diámetro principal, d) perímetro, e) perímetro convexo, f) redondez.	92
Figura 5.2. Factor de forma y convexidad de algunas geometrías de los poros.	92
Tabla 5.2. Propiedades mecánicas de las muestras A, tamaño de poro $P_1$ .	93
Tabla 5.3. Propiedades mecánicas de las muestras A, tamaño de poro $P_2$ .	93

Tabla 5.4. Propiedades mecánicas de las muestras B, tamaño de poro $P_1$ .....	94
Tabla 5.5. Propiedades mecánicas de las muestras B, tamaño de poro $P_2$ .....	94
Tabla 5.6. Propiedades mecánicas de las muestras C, tamaño de poro $P_1$ .....	94
Tabla 5.7. Propiedades mecánicas de las muestras C, tamaño de poro $P_2$ .....	95

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

---

**PSA** Panel tipo sándwich reforzado con lámina de aluminio

**PSA-K** Panel tipo sándwich reforzado con lámina de aluminio y Kevlar

**Al** Aluminio

**Al<sub>1100</sub>** Aluminio 1100

**$\sigma$**  Esfuerzo uniaxial

**ASTM** American society for testing and materials

**A<sub>C</sub>** Área transversal

**Ar** Argón

**°C** Grado Celsius

**Fe** Hierro

**ISO** International standardization organization

**cm** Centímetro

**$\Delta P$**  Cambio de presión

**cm<sup>3</sup>** Centímetro cúbico

**kg/cm<sup>2</sup>** Kilogramo por centímetro

cuadrado

**Zr** Circonio

**NaCl** Cloruro de sodio

**kpsi** Kilo libra por pulgada cuadrada

**Co** Cobalto

**psi** Libra por pulgada cuadrada

**Cu** Cobre

**Cr** Cromo

**L** Longitud

**$\epsilon$**  Deformación

**Mg** Magnesio

**$\rho$**  Densidad

**Mn** Manganeso

**$\rho_M$**  Densidad del material base

® Marca registrada

**$\rho_P$**  Densidad del material poroso

± Más menos

**$\rho_{Rel}$**  Densidad relativa

**m** Masa

**$\tau$**  Esfuerzo cortante

**m<sub>Al</sub>** Masa de aluminio

**$\sigma_{CP}$**  Esfuerzo de colapso plástico

**MPa** Mega Pascal

**$\Delta P_{Iny}$**  Intervalo de presión inyectado

**$\sigma_{fl}$**  Esfuerzo de fluencia

**T** Temperatura

**O** Oxígeno

**T<sub>Amb</sub>** Temperatura ambiente

**T<sub>fus</sub>** Temperatura de fusión

**Pa** Pascal

**t<sub>f</sub>** Tiempo de fundición

**t<sub>i</sub>** Tiempo de infiltración

**P<sub>i</sub>** Presión de infiltración

**P<sub>f</sub>** Presión de fusión

**P<sub>1</sub>** Poro 1

**P<sub>2</sub>** Poro 2

**A<sub>1</sub>** Adhesivo 1

**A<sub>2</sub>** Adhesivo 2

**A<sub>3</sub>** Adhesivo 3

**A<sub>4</sub>** Adhesivo 4

**V** Volumen

% Porcentaje

**$E$**  Módulo de Young (módulo de elasticidad)

**$\epsilon_D$**  Deformación de compactación

**$\sigma_{pl}$**  Meseta de tensión

**$p_p$**  Porosidad plástica

**$G$**  Módulo de cizalladura

**$\sigma_{fl}$**  Esfuerzo de fluencia

**$\sigma_{m\acute{a}x}$**  Esfuerzo máximo

**$G_c$**  Módulo de cizalladura del núcleo

**$E_f$**  Módulo elástico del refuerzo

## **INTRODUCCIÓN**

---

Los materiales porosos son materiales ligeros que ofrecen una gran variedad de aplicaciones estructurales y funcionales. Las espumas metálicas son un caso particular de los mismos, dichas espumas pueden fabricarse de poro cerrado y poro abierto, enfocándonos en este último, el gas se encuentra disperso en la matriz metálica lo cual genera una baja densidad. Existen diversos materiales metálicos que se pueden emplear para la fabricación de las espumas, uno de ellos es el aluminio el cual posee propiedades como una baja densidad, resistencia a la corrosión y un punto de fusión relativamente bajo que las hace fácilmente manejables. Las espumas de aluminio poseen interesantes combinaciones de propiedades físicas y mecánicas que les otorgan entre otras características, alta tenacidad y gran absorción de energía de impacto, haciéndolas atractivas para aplicaciones en la industria automotriz, aeroespacial, naval y militar.

Dichas espumas pueden fabricarse mediante diferentes métodos. Entre los más utilizados se encuentran la fundición, técnicas de pulvimetalurgia y deposición. La producción de las espumas metálicas mediante fundición en específico por el método de infiltración se ha desarrollado desde 1948 con la patente de Benjamín Sosnick [1], cuyo proceso consta en tener una preforma y hacer pasar el metal fundido por los huecos una vez solidificado el metal se obtiene una espuma de poro abierto, este proceso se ha ido actualizando y modificando a través de los años, dando como resultado una producción de espumas metálicas de aluminio de alta calidad y reproducibles.

Las propiedades físicas y mecánicas de las espumas de aluminio dependen, en gran medida de su densidad y de la estructura de los poros que las conforman. Diversas investigaciones han evaluado la relación que mantiene la variación de la densidad con los valores de modulo elástico, alargamiento, límite elástico, carga de rotura y absorción de energía al impacto, cuantificando el límite elástico de la espuma metálica a tracción o a compresión en función del límite elástico de la pared del poro (interconexiones), número de poros por unidad de superficie y el volumen de los poros por unidad de volumen. Asimismo, la distribución del tamaño de los poros, especialmente de la presencia de los poros pequeños [1].

Las espumas de aluminio por si solas poseen grandes propiedades; sin embargo, pueden aumentar empleándolas como núcleos de estructuras compuestas, a estas estructuras se les llama paneles tipo sándwich, las cuales están compuestas por distintas capas de materiales con propiedades diferentes, a estas capas se les denomina pieles o refuerzo, las cuales deben estar unidas al núcleo, se unen mediante distintos métodos de unión permanente. Al unir el o los refuerzos al núcleo el material manifiesta características más favorables que se toman en cuenta para su aplicación, entre estas se encuentran la ligereza y la rigidez a la

flexión. Para entender la forma de trabajo de un panel tipo sándwich es necesario diferenciar las formas de trabajo de los refuerzos y el núcleo. Los refuerzos soportan las cargas inducidas por la flexión y el núcleo el esfuerzo cortante que actúa sobre el panel. Es decir, los refuerzos trabajan como laminas, soportando el momento flector que aparece sobre el panel [1].

Este trabajo tiene como objetivo principal estudiar el comportamiento mecánico de las espumas metálicas tipo sándwich, tomando en consideración los materiales de refuerzo, así como los distintos tamaños de poro. Las propiedades de las espumas metálicas tipo sándwich dependen en gran parte por las propiedades de la espuma metálica que se encuentra como núcleo en la parte central del sándwich, la cual está relacionada con la forma de los poros, distribución, tamaño y tipo de celda, estas características juegan un papel muy importante al estudiar su comportamiento, ya que de ello dependen propiedades como, esfuerzo cortante,  $\sigma_{fl}$ ,  $\sigma_{m\acute{a}x.}$ ,  $\epsilon$ , etc. Sin embargo, no se realizará un análisis profundo de la influencia de la irregularidad de los poros en las espumas metálicas tipo sándwich.

El presente trabajo fue dividido en 4 capítulos para facilitar su comprensión y lectura. En el **capítulo 1** se encuentra el marco teórico, **capítulo 2** Desarrollo experimental, **capítulo 3** resultados y análisis de resultados, finalmente las conclusiones.

## **OBJETIVO GENERAL**

---

Estudiar la influencia de las variables como tamaño de poro, material de refuerzo y adhesivo, sobre las propiedades mecánicas en flexión e impacto en estructuras de panel tipo sándwich de aluminio 1100.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

---

- Modificar el método de infiltración para fabricar espumas metálicas de Aluminio 1100 de calidad con dos tamaños de poro.
- Determinar el adhesivo óptimo, mediante la aplicación de normas estandarizadas, para la unión mecánica de las espumas metálicas de panel tipo sándwich.
- Estudiar el comportamiento mecánico de las espumas metálicas con refuerzo de lámina de aluminio y las reforzadas con lámina de aluminio y Kevlar (PSA y PSA-K, respectivamente) en un estado de esfuerzos combinados y energía de absorción a altas velocidades.

## **ANTECEDENTES**

---

Las espumas metálicas han tenido gran auge en los últimos años, actualmente se han realizado diversos estudios caracterizando dichos materiales. La importancia de estos estudios se basa en sus propiedades físicas, mecánicas, así como estructurales, siendo la baja densidad una de las propiedades más importantes de este material, sin dejar de lado su bajo punto de fusión, precio de mercado moderado y su alto interés tecnológico. La investigación de las espumas metálicas comienza por sus métodos de fabricación determinando las aleaciones con mayor potencial y la búsqueda de la preforma “ideal” para obtener productos con propiedades relativamente homogéneas.

Diversas áreas han tenido un gran interés en estos nuevos materiales, realizando diversos trabajos con la finalidad de investigar, conocer, aplicar y divulgar su importancia, uno de estos trabajos es el titulado “Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones” Gutiérrez y Oñoro [1] publicado en el año 2008, el cual es un artículo de divulgación y nos introduce al mundo de las espumas metálicas de aluminio, mencionando algunos procesos de fabricación, aplicaciones y datos bibliográficos como los primeros registros de la fabricación de las espumas metálicas de las cuales se tiene conocimiento comenzaron a producirse desde 1948 con la patente de Benjamín Sosnick trabajo titulado “Proceso para hacer espuma con masa de metal” [2], su método aprovechó el disponer de fases intermedias con diferentes puntos de fusión y de ebullición para formar un sólido lleno de poros cerrados. Los usos sugeridos para este nuevo producto aprovechaban las mejoras de la resistencia al impacto de la espuma, así como las propiedades de absorción de calor y sonido, el proceso era bastante costoso y sólo produjo cantidades pequeñas de una espuma bastante irregular. En 1958, diez años después, se registró otro acontecimiento importante donde se obtuvieron las primeras espumas metálicas de aluminio con poro abierto, el proceso de fabricación consto en verter sobre el aluminio fundido partículas de sal, que una vez disueltas, daban lugar a una estructura con poros abiertos; sin embargo, dicho material se apreció más como una curiosidad que como un material tecnológico [3]. Con el paso del tiempo este proceso ha ido cambiando y mejorando, actualmente forma parte de los procesos más empleados para la elaboración de las espumas metálicas de aluminio debido a los bajos costos y simplicidad del proceso.

Las espumas metálicas obtenidas a partir de metal fundido han causado gran interés comercial, varios centros de investigación y empresas han trabajado en métodos para producir espumas las cuales se han desarrollado con éxito, algunos procesos se basan en la infiltración, deposición y otros sistemas. Debido a su multifuncionalidad y aporte científico se han convertido en un atractivo campo de investigación de los nuevos materiales teniendo un gran auge en gran parte de

Latino América y Europa, donde se hace investigación de alto nivel dedicada a este tipo de materiales, cuya finalidad es caracterizar los materiales porosos de acorde al método de fabricación, este trabajo se basó en gran cantidad de investigaciones que se han realizado en los últimos 10 años, uno de los trabajos basados en estos desarrollos es el titulado “Estudio de la permeabilidad a altas presiones de espumas de aluminio” desarrollado por M.F. Azamar, [4]. Llevado a cabo en el Instituto de Investigaciones en materiales de la UNAM, este trabajo además de estudiar una de las propiedades características de las espumas metálicas de aluminio, estudia el proceso de fabricación mediante la infiltración del metal líquido en una preforma de sacrificio de NaCl, se basó en este proceso de fabricación para desarrollar una nueva variante la cual se presenta en el desarrollo experimental de este trabajo generando un aporte a la investigación. Esta institución ha sido cuna del estudio de las espumas metálicas en México, ya que se ha dedicado al estudio de estos nuevos materiales tanto de forma teórica como experimental, algunos investigadores basan sus estudios en este tipo de materiales, como es el caso de los investigadores I.A. Figueroa y G.A. Lara-Rodríguez los cuales junto con su equipo de investigación ha realizado grandes aportaciones al tema publicando diversos artículos como “Production of Al–Cu–Fe metallic foams without foaming agents or space holders” [5], “Manufacturing of open-cell Mg foams by replication process and mechanical properties” [6] y “A replication-casting device for manufacturing open-cell Mg foams” [7], entre otros, donde no solo se estudian las propiedades de las espumas metálicas de aluminio, sino también se han hecho estudios acerca de diversas aleaciones como las base cobre, magnesio, etc. e incluso se ha estudiado la optimización de los equipos para fabricar este tipo de materiales.

Otra de las universidades con grandes aportes en Latinoamérica acerca de los materiales porosos es la Universidad del Norte de Barranquilla Colombia, la cual ha realizado una gran cantidad de trabajos al respecto, en este caso se tomaron algunos elementos de la tesis doctoral titulada “Obtención y caracterización de Ti c.p. poroso para aplicaciones biomédicas” presentada por S.K. Lascano-Farak [8] dicho trabajo explica detalladamente el estudio y caracterización de los poros describiendo cada uno de los parámetros morfológicos que influyen en la determinación del porcentaje de porosidad, área, factor de forma, interconectividad entre los poros, etc. las tablas que explican estos parámetros se presentan en el Anexo 1 y ayudaron a determinar la morfología de los poros debido a la acicularidad y convexidad que estos mostraron al emplear la preforma de sacrificio de NaCl. Estas características son fundamentales para determinar las propiedades mecánicas del material poroso y poder relacionar el comportamiento obtenido con los tamaños de poro empleados, ya que de ello depende su aplicación, actualmente las espumas metálicas han tenido una gran respuesta en el área biomédica y de la construcción; sin embargo, hay otras industrias que también emplean este tipo de materiales debido a sus grandes características, la cuales

pueden mejorar con materiales de refuerzo obteniendo grandes ventajas como una baja densidad y una alta resistencia mecánica.

La caracterización de los materiales porosos empleados como núcleos en los paneles tipo sándwich son de suma importancia ya que son el corazón de estos materiales compuestos cuya finalidad es reforzarlo para proveer al material de propiedades óptimas y emplearlos en diversas aplicaciones como en las industrias aeronáutica, aeroespacial y automotriz, donde la finalidad es reducir el peso de los elementos sin comprometer la alta resistencia y las condiciones de trabajo a temperaturas elevadas, es por ello que es fundamental elegir adecuadamente en tipo de matriz y los materiales de refuerzo, buscando aquellos que sumen a las propiedades mecánicas de las espumas metálicas sin refuerzo. Este es tema se ha desarrollado con gran interés, debido a su gran campo de aplicación y cuyo estudio debe desarrollarse de manera desmenuzada para evaluar cada uno de los componentes de estos paneles tipo sándwich.

La Universidad Politécnica de Valencia en España es de las universidades europeas con mayor conocimiento en el área de los materiales porosos y de los paneles tipo sándwich, desarrollando el tema en diversas áreas de investigación, polímeros, cerámicos, metálicos y compósitos, se han publicado diversos trabajos de investigación así como tesis que muestran los avances obtenidos actualmente, uno de los trabajos que resalta es la tesis de maestría titulada “Caracterización de paneles sándwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio” presentada por J. M. Malavia-Otero [9]. Este trabajo además de introducirnos en un aspecto general de los materiales de paneles tipo sándwich como son algunos de los materiales de refuerzo, materiales de unión, estructuras típicas, etc., adiciona datos de propiedades mecánicas como módulo de elasticidad del núcleo, módulo de cizalladura del núcleo, módulo de elasticidad del refuerzo entre otros, algunos de los métodos de cálculo de esta tesis se basaron en el trabajo mencionado, relacionando los aspectos determinados con los objetivos planteados previamente desarrollando el trabajo de manera clara y concisa.

Cada uno de los trabajos mencionados y referencias citadas contribuyeron al desarrollo de este estudio, analizando y relacionado conocimiento que ayude al análisis de las propiedades mecánicas de las espumas metálicas de aluminio en paneles tipo sándwich sometido a deformaciones lentas y rápidas en los ensayos mecánicos de flexión en tres puntos y de impacto tipo Charpy, respectivamente. Caracterizar los materiales de interés que aportan al estudio de las propiedades mecánicas de los paneles tipo sándwich es base fundamental para este trabajo, ya que se busca relacionar cada uno de los aspectos que influyeron, desde la fabricación hasta el ensamble de los paneles, pasando por las características de cada uno de los materiales que los conforman, así como el aporte de los refuerzos al núcleo, finalmente se busca englobar estas características con la finalidad de encontrar diversas relaciones que ayuden a entender los fenómenos que ocurren en este tipo de materiales.

# **CAPÍTULO 1**

## **MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se encuentran los conceptos fundamentales que ayudan a comprender el presente trabajo y no solo eso, sino que ayuda a comprender porque estos materiales porosos han tenido un gran auge en diversas áreas, siendo grandes objetos de estudio. Se inicia con una breve introducción a los materiales porosos, posteriormente se define que es una espuma metálica de aluminio, sus principales características, propiedades físicas y propiedades mecánicas.

Finalmente, en este capítulo se mencionan las características de las espumas metálicas tipo sándwich, así como los diferentes métodos de adhesión que se emplean en la fabricación de estas, concluyendo con algunas de las aplicaciones más destacadas actualmente.

### **1.1. Introducción a los materiales porosos**

Los materiales porosos se producen de forma natural en la naturaleza, pero actualmente la ciencia e ingeniería de materiales ha sido capaz de fabricar este tipo de materiales con la finalidad de aplicarlos en distintas áreas, es decir, puede ser un material multipropósitos; sin embargo, para ello se deben dominar las distintas técnicas de fabricación y aleaciones específicas.

El análisis de los materiales porosos puede resultar incongruente con base en la mecánica de medios continuos, ya que es evidente que los materiales porosos al estar constituidos de dos o más fases no son continuos. Sin embargo, son medios idealizados en los que no se consideraría, para el modelado de su comportamiento, su estructura atómica o molecular; en consecuencia y habiendo ya estudiado el comportamiento de fluidos y sólidos es ahora factible modelar un medio idealizado como continuo que se encuentra compuesto por un sólido deformable (matriz o esqueleto) y un fluido. De lo anterior, se tiene que, para el modelado de un material poroso, éste se considera constituido de una estructura sólida o matriz (esqueleto sólido deformable) que se puede describir como un sólido elástico, elastoplástico o viscoelástico, y de un fluido que se encuentra en los poros [10]. La deformación y la cinemática de cada uno de los medios continuos que conforman el material poroso no difiere de un continuo considerado monofásico, ya sea sólido o fluido. En términos generales, los materiales porosos se relacionan con materiales tales como rocas, suelos, tejidos vivos, espumas, cerámicos, productos de papel, etc.

## 1.2. Definición de espumas metálicas

Las espumas metálicas son un caso particular de los materiales porosos, conformados por una fase sólida continua con poros dispersos en su estructura, en donde puede estar contenida una fase líquida o una sólida [11]. En la mayoría de los casos, las espumas metálicas contienen en su interior una fase gaseosa que ocupa desde un 50% hasta un 90% del volumen total, por lo que se consiguen densidades muy bajas (de hasta  $0.02-0.3 \text{ g/cm}^3$ ), con propiedades combinadas entre el material del que está hecha la espuma y entre la estructura interna tan peculiar que se consigue [12]. Como resultado, las espumas metálicas son materiales que presentan propiedades de gran interés en aplicaciones de aislamiento acústico y térmico, sistemas de gran resistencia a impacto, sistemas amortiguadores y estructuras ultraligeras.

El término espuma usualmente se refiere a la dispersión de burbujas de gas en un líquido. Si la morfología de una espuma puede conservarse en el momento en que el material base solidifica, se consigue una espuma sólida. Los primeros registros de producción de espumas metálicas datan del año 1948, con la patente de Benjamín Sosnick "Proceso para hacer espuma con masa de metal", desarrollando un proceso de producción que sería el precursor del desarrollo que se tiene hasta la fecha, pudiendo obtener espumas de forma controlada, relativamente sencilla y con una amplia gama de costos [13].

Las características mecánicas, físicas y morfológicas de una espuma metálica dependen directamente del metal base del que está elaborada y de la naturaleza de los poros, aunque normalmente presentan alta conductividad térmica, baja conductividad térmica y comportamiento dúctil. Las espumas metálicas pueden tener sus poros internos interconectados (de celda abierta) o aislados completamente unos de otros por delgadas paredes (de celda cerrada) y esto depende del método por el cual se fabrica la espuma [4] tal como se muestra en la figura 1.1 y 1.2.



Figura 1.1. Espuma metálica de celda cerrada [13].

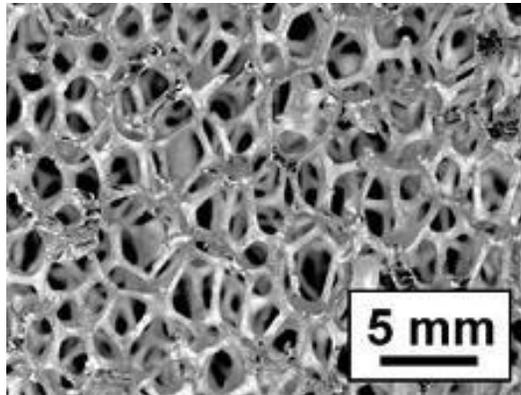


Figura 1.2. Espuma metálica de celda abierta [13].

### 1.3. Características de los materiales porosos

Un medio poroso puede ser estudiado mediante la superposición de dos medios continuos: un esqueleto y un fluido. Cualquier volumen infinitesimal puede ser tratado mediante la superposición de dos partículas que se muestra en la figura 1.3 una es el esqueleto, el cual se compone de la matriz y de la conexión de espacios porosos, y la otra corresponde a las partículas de fluido las cuales llenan los poros [14].

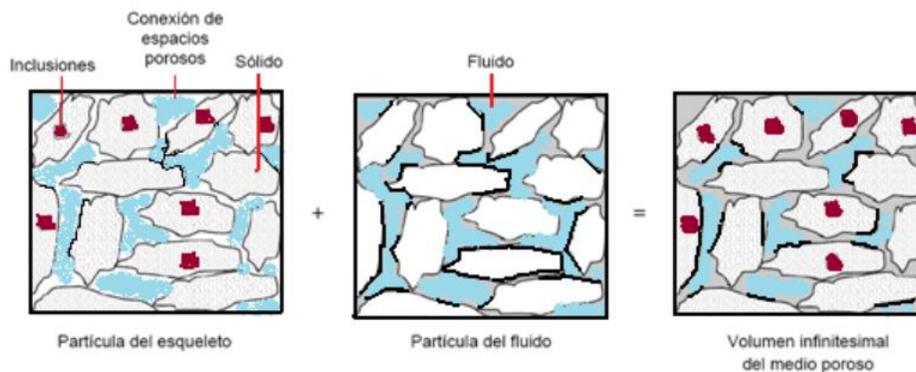


Figura 1.3. medio poroso representado mediante la superposición de dos medios continuos [14].

Al aplicarse cargas externas y variaciones en la presión al fluido, el esqueleto se deforma. La descripción de dicha deformación no difiere de la planteada para un sólido.

Cada uno de los materiales posee una serie de propiedades que lo distinguen de otro material. Tales propiedades que distinguen los materiales entre son:

apariencia, composición, estructura, densidad específica y a granel, densidad, porosidad, etc.

### **1.3.1. Densidad y porosidad**

La densidad es el grado en que un volumen de material se llena con una sustancia, se expresa como un porcentaje de su volumen total.

Los materiales con una densidad del 100% son muy pocos (acero, cuarzo, vidrio); La densidad de la mayoría de los materiales es mucho menor al 100%.

La porosidad es el grado en que el volumen del material se llena de poros. La porosidad también se expresa como un porcentaje del volumen total de este material. Por lo tanto, el porcentaje que expresa la densidad y el porcentaje que expresa la porosidad del material debe sumar 100%. Los poros son células cerradas o interconectadas en un material lleno de aire [15].

La densidad y la porosidad tienen una gran influencia en propiedades tan importantes de los materiales como la resistencia, la absorción de agua, la conductividad térmica, la resistencia a las heladas y, en consecuencia, la durabilidad.

### **1.3.2. Absorción, resistencia a la humedad, permeabilidad**

La absorción de agua está determinada por la capacidad del material para absorber agua. La cantidad de agua absorbida por los poros del material, tomada como un porcentaje del volumen total del material, expresa la absorción de agua. Como resultado, la absorción de agua no puede ser mayor que la porosidad.

La absorción de agua reduce la resistencia del material, reduce su resistencia a las heladas, su conductividad térmica y, como resultado, es una propiedad nociva para los materiales de construcción. Recuperación de humedad la tasa de secado de materiales una propiedad opuesta a la absorción de agua. A medida que el material se seca, la resistencia a las heladas, la resistencia y la conductividad térmica se restauran en él.

La permeabilidad es la capacidad de un material para pasar agua a través de su espesor. El grado de permeabilidad al agua depende de la porosidad del material y del tipo de poro: los poros cerrados no permiten el paso del agua. Cuantos más poros y vacíos en el material, mayor es la permeabilidad al agua. [16]

### **1.3.3. Elasticidad, plasticidad, fragilidad**

La elasticidad es la capacidad de un material para cambiar su forma bajo la influencia de una carga para restaurarlo después de que se elimina esta carga. Un

ejemplo de material elástico es la goma de mascar de un estudiante: dicha goma se puede doblar por la mitad, pero después de soltarla, se enderezará por completo.

La plasticidad es una propiedad opuesta a la elasticidad y radica en la capacidad de un material para retener una forma cambiada bajo la influencia de una carga después de que se elimina esta carga. [16]

La fragilidad es la capacidad de un material para cambiar fácilmente su forma bajo la influencia de incluso una carga pequeña, depende de su baja o nula deformación permanente. El material frágil, a diferencia del plástico, por regla general, no puede tener la forma deseada, ya que dicho material se destruye bajo carga: se aplasta en pedazos o se desmorona. Un ejemplo de material quebradizo es el vidrio.

#### **1.3.4. Resistencia y dureza.**

La resistencia es la capacidad de los materiales para resistir fracturas bajo carga, se manifiesta en la capacidad de un material para resistir la compresión, estiramiento, flexión, torsión, cizallamiento, impacto, etc.

La dureza es la propiedad de un material para resistir la penetración de otro cuerpo en él. La abrasión depende de la dureza de los materiales. [16]

#### **1.4. Comportamiento mecánico de las espumas metálicas.**

Las espumas metálicas son sistemas complejos en relación con su macro y microestructura. Esta última y el comportamiento mecánico son gobernadas por la composición de la aleación, condiciones de espumado y enfriamiento y eventualmente postratamiento térmico. Algunos rasgos macroscópicos de su morfología, tales como el tamaño de poro o curvatura de paredes de celda, junto con la densidad específica,  $\rho^*/\rho_s$ , tienen una marcada influencia sobre la respuesta mecánica. Como todas estas características son inherentemente estadísticas y dependen significativamente de las condiciones de procesamiento, es complicado establecer una base de datos precisa, sencilla y confiable para las espumas metálicas. [16]

Tabla 1.1. Relaciones para estimar comportamiento mecánico de espumas metálicas. [17].

Propiedades mecánicas	Espuma de celda abierta	Espuma de celda cerrada
Módulo de Young, $E$ (GPa)	$E = (0.1 - 4)E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$	$E = (0.1 - 1)E_s \left[ 0.5 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + 0.3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \right]$
Módulo de cortadura, $G$ (GPa)	$G \approx \frac{3}{8}E$	$G \approx \frac{3}{8}E$
Módulo de comp. volumétrica, $K$ (GPa)	$K \approx 1.1E$	$K \approx 1.1E$
Resistencia a compresión, $\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_c = (0.1 - 1)\sigma_{c,s} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}}$	$\sigma_c = (0.1 - 1)\sigma_{c,s} \left[ 0.5 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}} + 0.3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \right]$
Resistencia a tracción, $\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_t \approx (1.1 - 1.4)\sigma_c$	$\sigma_t \approx (1.1 - 1.4)\sigma_c$
Deformación de compactación, $\varepsilon_D$	$\varepsilon_D = (0.9 - 1) \left( 1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s} + 0.4 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3 \right)$	$\varepsilon_D = (0.9 - 1) \left( 1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s} + 0.4 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3 \right)$
Dureza, $H$ (MPa)	$H = \sigma_c \left( 1 + 2 \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)$	$H = \sigma_c \left( 1 + 2 \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)$

Con relación al comportamiento a tracción y compresión cuasi estática de las espumas metálicas, es conveniente saber que usualmente el módulo de Young,  $E$ , a tracción es alrededor de un 10% mayor al que se tiene en compresión. En compresión uniaxial cuasi estática las espumas metálicas comúnmente exhiben una visible y bien definida meseta de tensión,  $\sigma_{pl}$ . El modelo micromecánico involucrado en este comportamiento puede describirse a partir de resultados encontrados en espumas poliméricas, en los que se ha encontrado que la respuesta elástica inicial está relacionada a la flexión de los bordes de celda, en las espumas de celda abierta, y a la flexión de los bordes y alargamiento de las caras, en espumas de celda cerrada [17]. En la medida en que se incrementa la tensión, las celdas comienzan a colapsar a una carga casi constante, mediante pandeo elástico, fluencia o fractura, dependiendo de la naturaleza del material. Una vez que todas las celdas han colapsado, el aumento en la deformación causa presión entre las paredes de celda, incrementando de forma abrupta la tensión a partir de una determinada deformación  $\varepsilon_D$ . Este último régimen se denomina compactación y la deformación a la cual comienza, deformación de compactación ( $\varepsilon_D$ ).

### 1.4.1. Poroplasticidad

La poroplasticidad es la capacidad que un material poroso tiene para deformarse permanentemente, así como para tener cambios permanentes en la porosidad, esto último como consecuencia de un cambio permanente en el contenido de masa de fluido. Estas técnicas se desarrollaron a fines del siglo XIX para el análisis del comportamiento de presas en las que se presentó infiltración de líquido a través de los poros y cuarteaduras formados en la cortina. Estos modelos permiten la representación de una estructura multifásica formada por la roca y el concreto; incorporan, también, el efecto de la presión en los poros formados en la estructura y consideran las condiciones de fractura del material bajo carga [18]. Este tipo de métodos son particularmente apropiados para el análisis del comportamiento de cortinas de gravedad en presas y arcos, así como de túneles profundos. De acuerdo con los conceptos desarrollados, el incremento en el espacio de poros interconectados se considera irreversible. Las principales direcciones de la deformación plástica corresponden con las de agrietamiento. El criterio de fractura de un material está en función de su plasticidad, para lo cual se considera porosidad y esfuerzos. Asimismo, se pueden considerar variaciones anisotrópicas de la permeabilidad del material. Debido al carácter permanente de las deformaciones y de los cambios en la porosidad, la evolución del comportamiento poroplástico es irreversible y a diferencia del comportamiento poroelástico, las deformaciones y la porosidad lagrangiana no bastan para caracterizar la energía en el esqueleto; por ello se deben introducir otras variables para describir el carácter irreversible de la plasticidad. Estas variables internas son la deformación plástica  $p_{ij}$ ,  $\epsilon$  y la porosidad plástica  $p_{\phi}$ .

### 1.5. Métodos de fabricación de espumas metálicas

Dentro de la producción de espumas metálicas existen métodos distintos de fabricación que combinan distintas condiciones de variables como temperatura, presión, tiempo, materiales empleados, composición química y equipo; dónde cada método está enfocado a la obtención de alguna propiedad química, física o mecánica en especial. A continuación, se enlistan y describen los métodos de producción más comunes y generales que existen actualmente:

- Por metalurgia de polvos: se hace uso de partículas metálicas de distintas geometrías y se compactan por medio de la aplicación de una carga uniaxial (en una matriz metálica o cerámica), para después realizar un proceso de sinterización. Esta técnica permite un control preciso de la forma y tamaño del poro, así como también permite controlar la microestructura final de la espuma por medio de la ruta térmica utilizada para el sinterizado [19].
- Deposición de metal: se deposita polvo metálico en moldes hechos con espuma polimérica, que después es retirada para someter el sólido poroso

resultante a un proceso de sinterización. Este método se utiliza para producir espumas metálicas de níquel con grados elevados de porosidad.

- **Fundición:** este proceso consta de agregar agentes espumantes a un baño de metal líquido, donde estos agentes espumantes usualmente son gases. En este proceso debe de controlarse la solidificación para obtener espumas con porosidad homogénea, obteniéndose espumas de celda cerrada o parcialmente abierta.
- **Infiltración de metal líquido:** este es un método derivado de la fundición, en el que se infiltra metal líquido en preformas porosas de sacrificio que soportan temperaturas más altas que la de fusión del metal base. El metal líquido es infiltrado con la ayuda de un gas a alta presión, para después retirar la preforma del interior y obtener la espuma metálica.
- **Solidificación direccionada:** se adiciona hidrógeno en un baño de metal líquido con composición eutéctica, para después direccionar la solidificación con una placa de cobre refrigerada que se encuentra debajo del crisol. El resultado que se obtiene es una expulsión paulatina del hidrógeno, ocasionada por el descenso en la solubilidad del gas en el metal, dejando a su paso una fase porosa con un excelente control de la porosidad. Este método es el que permite el mejor control la porosidad obtenida en las espumas [1].

Los métodos enlistados producen espumas con diferente morfología de los poros, lo cual produce una gama muy variada de productos con diferentes prestaciones y aplicaciones tecnológicas. Cabe destacar que existen más métodos de fabricación de espumas metálicas, utilizando equipo, reactivos o técnicas especiales, pero todos son métodos derivados o mejorados que partieron de los mencionados anteriormente, en la figura 1.4 se pueden apreciar algunos de estos procesos los cuales se describen brevemente en la siguiente sección, destacando los más importantes.

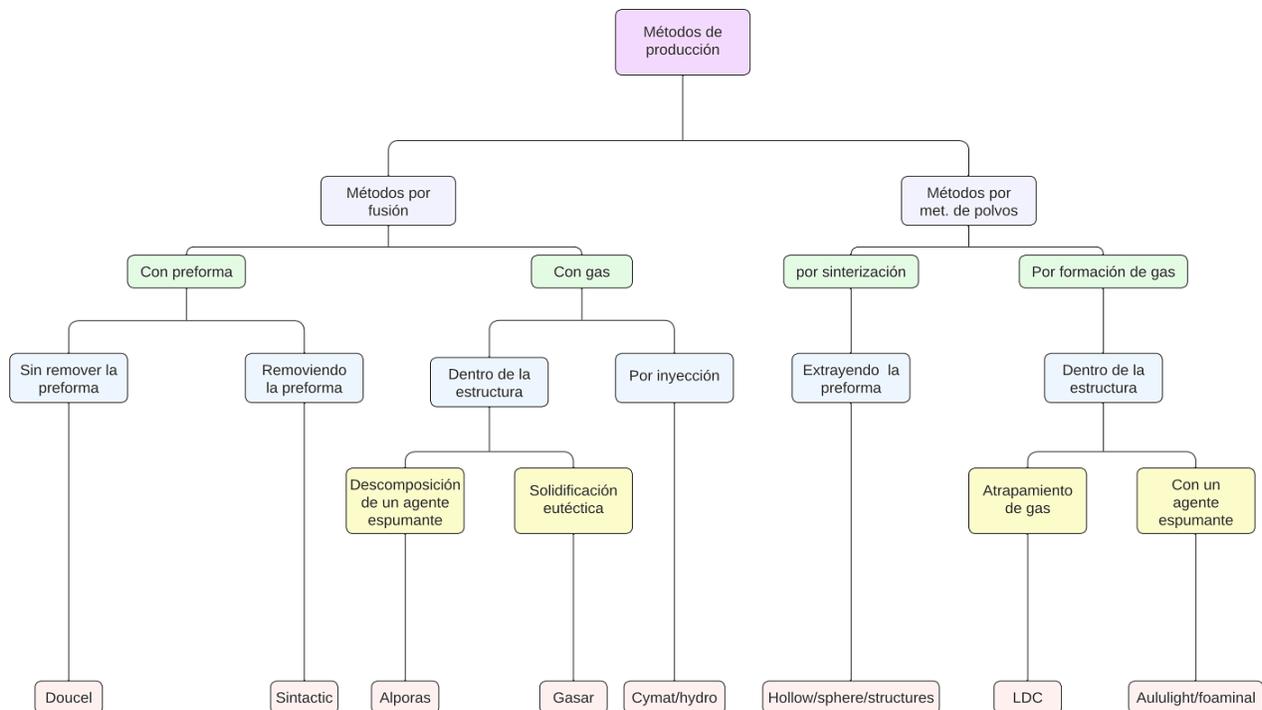


Figura 1.4. Procesos de fabricación de las espumas metálicas [Elaboración propia].

### 1.5.1 Espumado de metales (aluminio)

Las espumas de aluminio son sólidos porosos relativamente isotrópicos con una distribución aleatoria de los poros. Los poros pueden tener diferentes morfologías (esférica, acicular, irregular, etc.), pueden ser abiertos o cerrados, la porosidad puede ir desde 50 a 90% y las propiedades mecánicas dependen fuertemente de la densidad [19].

Gracias a su naturaleza, las espumas de aluminio son materiales muy eficaces en la absorción de sonido, protección electromagnética, absorción de energía de impacto y vibración, aunado a que no son inflamables y son estables a alta temperatura. Estas espumas también presentan propiedades interesantes en el aspecto económico, tales como ser resistentes a la corrosión y tener un bajo punto de fusión, lo que facilita su producción [19].

Como ya se mencionó anteriormente, las espumas de aluminio pueden dividirse en:

- Espumas de celda cerrada: se caracterizan por tener una gran rigidez y excelente aislamiento acústico. Estas pueden obtenerse mediante la inyección de gas en el metal fundido o por el uso de un agente espumante.
- Espumas de celda abierta: este tipo de espumas tienen muy buena conductividad térmica y buena permeabilidad. Estas espumas tienen como principal método de producción la adición de materiales de relleno que luego son eliminados, como el proceso de infiltración o pulvimetalurgia.

Las espumas de aluminio poseen un desempeño notablemente mayor en la absorción de impactos con respecto a las espumas fabricadas con polímeros, además de poseer también la gran ventaja de poder utilizar las espumas de aluminio en un rango de temperatura mucho mayor que las poliméricas, que tienen un límite 5 veces menor (100 °C) [19].

Con relación a las propiedades elásticas de las espumas de aluminio, resulta muy importante que el módulo de Young y de cizallamiento sean grandes con respecto a la densidad, para obtener un valor de rigidez específica alto y poder minimizar el peso de estructuras. El módulo elástico de las espumas de aluminio depende en gran medida de la densidad, donde la dependencia obedece una función exponencial ( $E=cte \cdot e^n$ ) con un exponente que vale, aproximadamente, 1.6. Como es de esperarse, la densidad de la espuma depende de la forma, distribución y tamaño de los poros, también de la presencia de elementos aleantes o aditivos en la espuma y, por lo tanto, del método de fabricación de la espuma.

Otro punto importante por considerar, en las propiedades mecánicas de las espumas de aluminio, es la morfología de los poros, ya que la forma y el tamaño de estos determinarán el modo en que se deformen las paredes internas de la espuma y los mecanismos de falla. De este modo, una espuma metálica con poros esféricos presentará mecanismos de falla y propiedades mecánicas distintas a una espuma con poros aciculares.



*Figura 1.5. Espuma de aluminio de celda semiabierta [19].*

### **1.5.2. Espumas metálicas mediante alporas.**

Consiste en agregar gas al metal fundido mediante un agente espumante, que, al descomponerse a una determinada temperatura, emite un gas que inicia el proceso de espumado. Utilizando un agente de espumado sólido el cual es posible dispersar uniformemente en la masa fundida obteniendo una mejor distribución y uniformidad de ollas burbujas, de este modo se obtienen unos poros mejor distribuidos y con tamaños más pequeños. El proceso requiere aumentar la viscosidad del metal fundido para impedir que las burbujas floten. Esto se logra

mezclando polvos o fibras en el metal fundido. La compañía de alambre Shinko desarrollo el método alporas, mezclando 1.5% de Ca o Mg en una fundición de aluminio a 680°C, para aumentar su viscosidad, proceso que se ilustra en la figura 1.6.

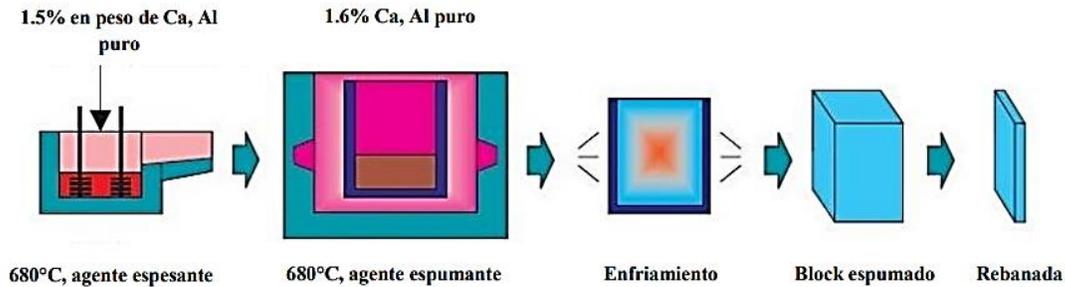


Figura 1.6. Proceso de fabricación de espumas mediante alporas [20].

### 1.5.3. Gasar, solidificación eutéctica de gas sólido

Se aprovecha de algunos metales que en estado líquido forman un sistema eutéctico con el hidrógeno gaseoso. Fundiendo estos metales en una atmósfera presurizada de hidrógeno, se obtiene un baño homogéneo cargado del mismo ( $H_2$ ). Al enfriar se obtiene la espuma. Este método también recibe el nombre de “Gasar”, un acrónimo ruso cuyo significado es “reforzado con gas” [20]. Las espumas metálicas que resultan de este proceso suelen tener poros muy alargados, orientados en la dirección de solidificación, como puede verse en la figura 1.7.

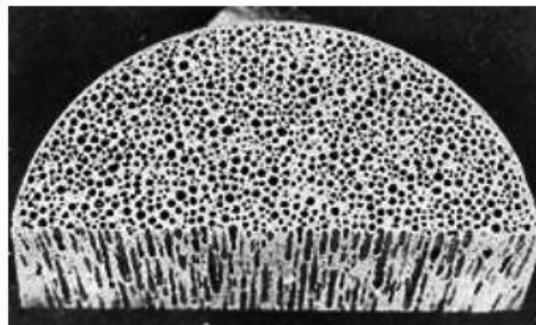


Figura 1.7. Espuma metálica obtenida mediante Gasar [21].

#### 1.5.4. Hydro/Alcan, espumado por inyección de gas

En este proceso el metal se sometió a un aumento de la viscosidad, mediante la adición de partículas (carburo de silicio, alúmina y/o magnesio), dicho metal es espumado por la inyección de gases inertes como son el nitrógeno, argón, etc. con ayuda de impulsores rotatorios o inyectoros de aire que producen una cama uniforme de burbujas de gas en el metal líquido [20], esta mezcla flota en la superficie de éste obteniendo una masa espumable como se observa en la figura 1.8. Este proceso fue desarrollado por Alcan International y CYMAT Corporation de donde se deriva el nombre.

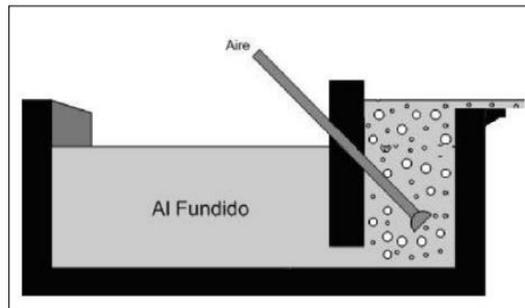


Figura 1.8. Fabricación de espuma de aluminio mediante el proceso Hydro-Alcan [23].

#### 1.5.5. Alulight, espuma metálica mediante metalurgia de polvos

Las espumas metálicas también se pueden producir a partir de polvos metálicos como se mencionó anteriormente. En este proceso se comienza mezclando los polvos con un agente soplante, después de lo cual la mezcla se compacta para dar un producto denso semiacabado, luego se hace un tratamiento de sinterización, de esta forma se descompone el agente soplante y se libera el gas que forma los poros tal como se muestra en el esquema de la figura 1.9. Esta técnica no sirve sólo para el aluminio, sino para otros metales y aleaciones, como el estaño, zinc, plomo, latón y oro también [10].

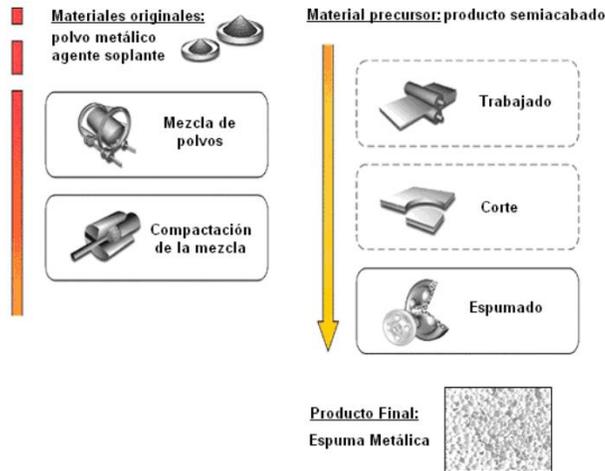


Figura 1.9. Esquema de la técnica de espumado de compactados de polvo [24].

### 1.5.5. Fabricación de espumas de aluminio usando el método de infiltración de metal líquido.

En este método se utiliza una preforma de sacrificio de cloruro de sodio, en forma granulada. Los granos de NaCl utilizados poseen formas aciculares y pueden tener un tamaño de grano muy variado, del cual depende directamente el tamaño y la forma del poro de la espuma resultante [2]. Para elaborar la preforma, basta con agregar los granos de cloruro de sodio, en un tamaño definido y controlado, dentro del crisol, donde también se agregará un lingote de aluminio, del tamaño adecuado para que, al fundirse, logre infiltrar todos los espacios disponibles entre los granos de cloruro de sodio y finalmente la preforma se disuelve para generar el material poroso de celda abierta.

El proceso se basa en los siguientes esquemas mostrados en la figura 1.10 el cual muestra el sistema empleado para el proceso de fusión y el proceso de fabricación para la espuma de aluminio de celda abierta es el mostrado en la figura 1.11.



Figura 1.10. Sistema para el proceso de fabricación de las espumas de aluminio por infiltración, a) crisol, b) sistema de válvulas para la aplicación de vacío e inyección del gas, c) horno eléctrico [25].

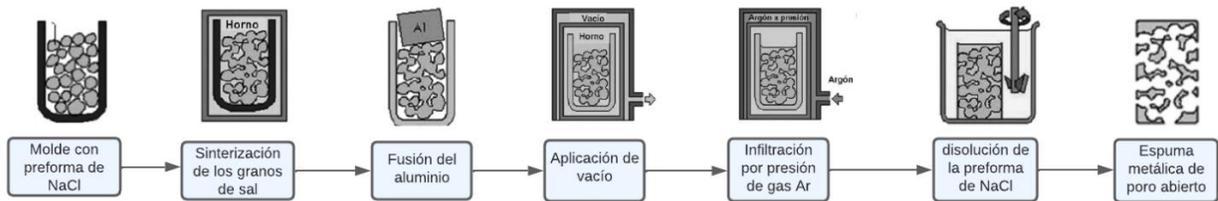


Figura 1.11. Proceso de fabricación empleando el método de infiltración para las espumas de aluminio de poro abierto [Elaboración propia].

## 1.6. Estructuras tipo sándwich

Las estructuras de panel tipo sándwich están compuestas por un núcleo de espuma metálica con dos revestimientos que normalmente son placas de distintos metales o del mismo que la espuma metálica. El resultado de esta unión es un material compuesto con una elevada sus propiedades mecánicas conservando su bajo peso. Como puede apreciarse en la figura 1.12, este tipo de estructuras constan de una placa de espuma, que puede encontrarse unida a los revestimientos por distintos métodos.

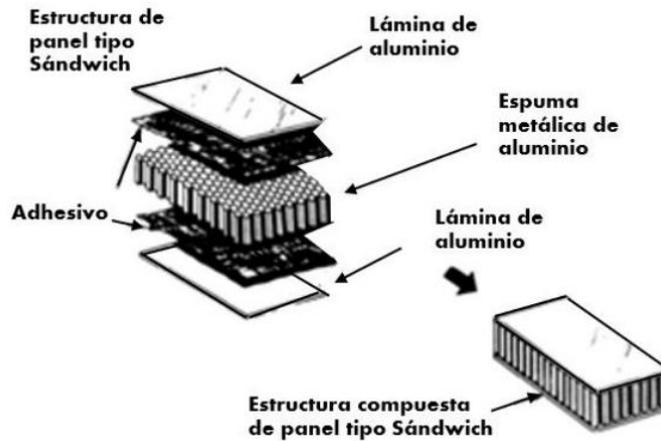


Figura 1.12. Esquema de una estructura de panel tipo sándwich, elaborada con un material poroso.

Debido a la naturaleza de las espumas metálicas, las interconexiones de los poros son delgadas, al sufrir cargas de tensión-compresión considerablemente grandes, pueden resultar ser poco efectivas a la hora de proveer la estabilidad mecánica. En este sentido, se busca mejorar primordialmente las estructuras tipo sándwich sobre las espumas metálicas sin revestimiento, cuya función de esta última es soportar y transmitir uniformemente las cargas que recibe, permitiendo una deformación más generalizada en todo el cuerpo.

Las estructuras tipo sándwich tienen aplicaciones importantes en estructuras resistentes a impactos, utilizadas en vehículos para mejorar la seguridad pasiva, así como la atenuación de ruidos en construcciones.



Figura 1.13. Estructura tipo sándwich con núcleo y revestimiento de aluminio [26].

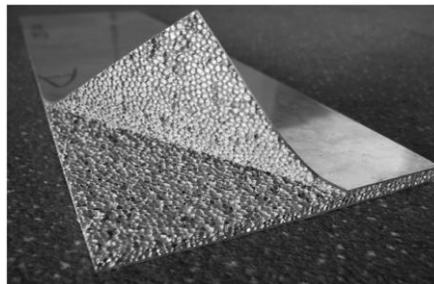
En la fabricación de las estructuras tipo sándwich resulta muy importante la selección de la forma en que va a unirse el revestimiento con el núcleo de espuma, teniéndose a disposición los siguientes métodos:

- **Unión con adhesivos:** es uno de los métodos más comunes, dónde se usa un adhesivo polimérico para unir placas de revestimiento y espuma, ya prefabricadas. Para llevar a cabo este proceso es necesario limpiar las superficies que estarán en contacto con el adhesivo, después se debe aplicar un desbaste grueso y rápido a estas superficies, posteriormente se aplica de forma uniforme el adhesivo seleccionado y finalmente se deja secar (y curar, según sea el caso) el adhesivo a temperatura ambiente o a una temperatura adecuada, por un cierto periodo de tiempo. El uso de adhesivos puede proveer de propiedades valiosas al material, tal como una alta capacidad de damping; sin embargo, también se tienen desventajas como que la unión no se puede desensamblar sin dañar los materiales, que algunos adhesivos son de muy alto costo, que el adhesivo no es estable a altas temperaturas y que las propiedades de algunos adhesivos dependen de la humedad del aire [11].
- **Unión con prensado y metalurgia de polvos:** este método nace del interés por eliminar las desventajas del método de unión con adhesivos. El método consiste en mezclar partículas de un agente espumante con polvo del metal de interés, después se ingresa la mezcla de polvos y las hojas del revestimiento en un molde (con la mezcla de polvos entre las placas) para realizar un prensado en verde a temperatura ambiente, después se realiza un prensado en verde a alta temperatura (esta operación es la que une las placas con el cuerpo de la espuma), después se realiza una operación de sinterizado (esta operación forma la espuma metálica, enlazando las partículas del polvo metálico) en las condiciones adecuadas y finalmente se deja enfriar la espuma para poder remover las partículas del agente espumante. Este proceso elimina la desventaja de la inestabilidad a altas temperaturas, que presentan los adhesivos, pero también tiene desventajas como que el núcleo de espuma tiene una porosidad que no es uniforme (debido a que la porosidad aumenta en la zona de contacto con las placas), se tiene una baja eficiencia de producción, causada por el largo tiempo que dura el prensado en caliente, y que el tamaño reducido de los moldes dónde se preparan estas espumas limita la producción de piezas de gran tamaño [27].
- **Unión con laminado y metalurgia de polvos:** De igual forma que el método anterior, este proceso inicia con la mezcla de un agente espumante en polvo con polvo metálico, después las placas que servirán de revestimiento son limpiadas e insertadas en el molde, posteriormente se inyecta la mezcla de polvos entre las dos placas y se sella el molde. Una vez que se ha sellado el molde, se procede a laminar en caliente el material del interior, con el fin de lograr la unión de los revestimientos con el núcleo.

Cuando ya se ha laminado, se realiza una operación de sinterizado para formar la espuma, se deja enfriar el producto y, finalmente, se retira el agente espumante para obtener la espuma terminada. Este proceso de unión presenta mejoras respecto al de prensado, ya que el núcleo de espuma presenta muy buena uniformidad de los poros, propiciando que la unión entre el núcleo y el revestimiento sea mucho más fuerte [27].

- **Síntesis de unión autopropagada a alta temperatura (SHS, por sus siglas en inglés):** este método trata de eliminar las desventajas de los métodos antes citados, con la ayuda del siguiente proceso: se hace una mezcla de agente espumante con polvo metálico, se llena completamente una matriz de una prensa (hecha en acero inoxidable) con la mezcla, se compacta esta mezcla a una forma cilíndrica, se coloca una mezcla estequiométrica de Al-413 + CuO en la interfase de la espuma y placa, se sitúan las placas del revestimiento en su lugar y se procede a calentar el sistema armado anteriormente a una temperatura adecuada, por debajo del punto de fusión del aluminio. Durante el calentamiento ocurre la reacción SHS ( $3\text{CuO} + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Cu}$ ) en la superficie de la placa y la espuma, la cual es altamente exotérmica y forma la unión de la placa con el núcleo a través de la fusión de la interfase. Finalmente, el material resultante es enfriado a temperatura ambiente y el agente espumante es retirado. El resultado de este proceso son estructuras tipo sándwich que poseen elevados módulos de corte (con respecto a los métodos anteriores) y que pueden aplicarse a un gran rango de temperaturas [27].

Para aplicar alguno de los métodos mencionados anteriormente se deben considerar puntos como costos de materia prima e insumos, infraestructura, dificultad del proceso, viabilidad y reproducibilidad, ya que de estos puntos depende que este tipo de estructuras se puedan fabricar con facilidad y que se lleguen aplicar industrialmente. El método más efectivo de fabricación será aquel que requiera menos pasos, menor costo, un fácil acceso a los insumos y una buena reproducibilidad, ya que de este modo no habrá complicaciones en la fabricación y se tendrá un material con propiedades altamente aplicables a distintas industrias.



*Figura 1.14. Espuma de aluminio producida por el método de unión con laminado y metalurgia de polvos [28].*

Como se mencionó anteriormente, el método de interés de este trabajo involucra el uso de un adhesivo como método de unión mecánica, ya que es simple de implementar, posee un bajo costo y de fácil acceso para cualquier persona que necesite reproducirlo. Para una correcta elección del adhesivo a continuación se enlistan en la Tabla 1.2, los adhesivos utilizados en otras investigaciones para la fabricación de estructuras tipo sándwich. Como se puede observar, el adhesivo más utilizado en la unión de espumas metálicas es el adhesivo epóxico, en sus diferentes variantes y marcas comerciales. Sin embargo, también se emplean adhesivos base metacrilato y cianocrilato, los tres tienen la característica de ser adhesivos de bajo costo, fácil acceso, sencilla manipulación y no tóxicos. Por tal motivo se ensayaron estos cuatro tipos de adhesivos, cuyo manejo se menciona en el capítulo 2.

*Tabla 1.2. Métodos de unión entre el revestimiento y el núcleo de espuma, utilizados en investigaciones [29].*

<b>Método de unión</b>	<b>Materiales base</b>
<b>a) Adhesivo Kafuter K-801 AB (acrilato)</b> <b>b) Adhesivo Kafuter EpoxyGlue con agente de curado (adhesivo epóxico)</b>	Espuma de aluminio sin especificar composición, con placas un material compuesto por láminas intercaladas de fibra de vidrio y láminas de aluminio comercial (no se especifica la composición de la placa de aluminio).
<b>Adhesivo epoxi-poliamídico</b>	Espuma de aluminio sin especificar composición y placas de acero al carbón de bajo carbono.
<b>Duco Cement (nitrocelulosa)</b>	Espuma de aluminio (ALPORAS) y láminas de aluminio (no se especifica composición).
<b>FM 300 Cytac (adhesivo epóxico)</b>	Espuma de aluminio (ALPORAS) y láminas de aluminio clase 6061-T6.
<b>a) Unión por laminado</b> <b>b) Adhesivo epóxico</b>	<b>a) Schunk (AlSi7) en espuma y AlMn1 en láminas</b> <b>b) Alulight (AlSi10) en espuma y Al 99.5% en láminas</b>
<b>Redux 332 Hexcel (adhesivo epóxico)</b>	Espuma de aluminio (ALPORAS) y dos aleaciones para las láminas: 1100-O y 3104-H19.

## 1.7 Aplicaciones de las espumas metálicas

Las espumas metálicas tienen una combinación de propiedades que las hacen atractivas para numerosas aplicaciones ingenieriles. Entre sus aplicaciones se tienen el uso como materiales livianos de construcción, para absorber energía por deformación, para el control térmico y acústico y otras tantas más. A continuación, se describen las aplicaciones actuales y potenciales que poseen las espumas metálicas.

### 1.7.1. Industria automotriz

Las características y propiedades de las espumas metálicas las hacen de utilidad en la fabricación de vehículos. Así, su alta capacidad para absorber energía mecánica por deformación (especialmente de impacto), carácter reciclable, insensibilidad a entallas, protección contra fuego, aislamiento térmico y acústico y resistencia al calor, apropiada relación resistencia/peso y rigidez/peso, hacen que tengan aplicación en paragolpes, soportes para barras anticollisión, rieles, protección interna de ocupantes, capó, paneles laterales y otros [30]. En la figura 1.15 se indican esquemáticamente las aplicaciones que tienen las espumas metálicas en la fabricación de vehículos automotrices, mientras que en la figura 1.16 se pueden ver un par de aplicaciones en la fabricación de soportes de motor.

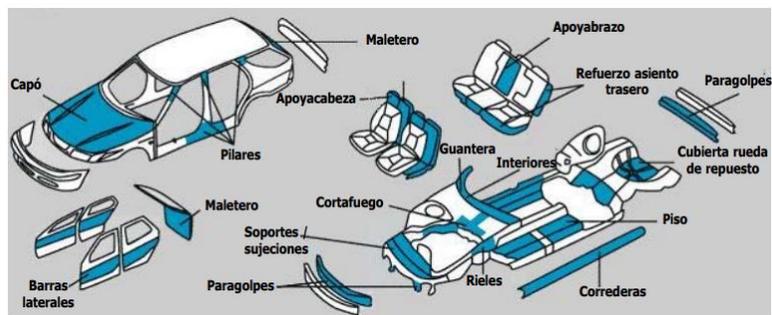


Figura 1.15. Espumas metálicas presentes en los automóviles [12].



Figura 1.16. Prototipo de soportes de motor BMW [12].

### 1.7.2. Seguridad y defensa

La conjugación de propiedades tales como su elevada capacidad para absorber energía de impacto, para amortiguar vibraciones mecánicas, para atenuar ondas de choque y para sofocar llama directa, aunadas a su reducido peso, hace de las espumas metálicas un elemento de sumo interés para las industria militar y de defensa, ya que pueden ser utilizadas en la fabricación de placas de contención

(blast protection), relleno para cascos blindados y blindaje de vehículos, este tipo de materiales debe ser compuesto; es decir, la espuma metálica debe estar reforzada con otro material, como el que puede observarse en la figura 1.17.



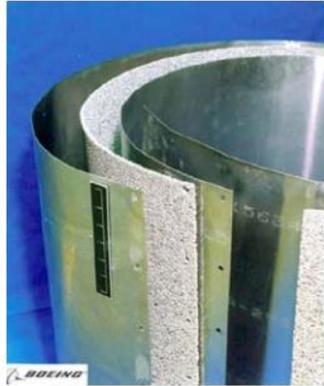
*Figura 1.17. Blindaje híbrido con espuma metálica (aluminum foam) para vehículo militar [31].*

### **1.7.3. Industria biomédica**

La estructura de celda abierta de espumas metálicas biocompatibles, tales como las de titanio, estimulan el crecimiento celular, de modo que pueden favorecer el crecimiento de hueso dentro de los poros de la espuma en prótesis ortopédicas [13].

### **1.7.4. Industria aeroespacial**

En aplicaciones aeroespaciales el reemplazo de grandes cantidades de paneles sándwich de material compuesto, por otros de espuma metálica implica una significativa reducción de costos. En este sentido, grandes fabricantes como Boeing han evaluado el uso de paneles sándwich con espumas de titanio y de aluminio en botalones de cola de helicópteros. La principal ventaja de tales sándwiches es que pueden fabricarse con curvaturas a diferencia de los de material compuesto, tal como se aprecia en la figura 1.18. Otras aplicaciones incluyen relleno de álabes de turbina, elementos anticolidión para soportes de aterrizaje de vehículos espaciales, estructuras resistentes y escudos térmicos en satélites [31].



*Figura 1.18. Panel sándwich de espuma metálica con curvatura [31].*

Las espumas de celda abierta tienen mucha área superficial y alta conductividad térmica (de sus bordes de celda), lo que le otorga cualidades excepcionales para transferir energía en dispositivos tales como bombas o intercambiadores de calor como el que se muestra en la figura 1.19.



*Figura 1.19. Bomba de calor con espuma metálica [32].*

### **1.7.5. Industria de la Construcción**

Su apariencia novedosa y bajo peso, hacen de las espumas un elemento muy útil para el diseño arquitectónico y la decoración de espacios interiores y exteriores. Es por ello por lo que se han utilizado en tabiquería, muebles, pisos, techos, acabados, estantería e iluminación [32].



*Figura 1.20. Emblema fabricado mediante una espuma metálica [32].*



*Figura 1.21. Biombo fabricado mediante una espuma metálica [32].*

## CAPÍTULO 2

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

---

En este capítulo se describen e ilustran a detalle las actividades llevadas a cabo para la elaboración de las espumas de aluminio en panel tipo sándwich, comenzando por la elaboración de las espumas metálicas de Al de celda abierta, las cuales se fabricaron en dos tamaños de poros distintos, posteriormente, se describen los pasos realizados para la elaboración del material compuesto tipo sándwich, haciendo énfasis en la selección del adhesivo, así como en la preparación superficial del material. Finalmente, el capítulo cierra con los ensayos mecánicos realizados al material compuesto tipo sándwich con la finalidad de evaluar su comportamiento mecánico.

#### 2.1. Fabricación de las espumas de aluminio

La fabricación de las espumas de aluminio de celda abierta partió del proceso de infiltración del Al líquido en una preforma de sacrificio, dicha preforma estaba conformada por granos de cloruro de sodio ( $NaCl$ ) bajo condiciones controladas, las cuales se mencionan posteriormente. Se utilizó el equipo que se muestra en la figura 2.1, el cual se describe a continuación:

- I. Crisol. Es de acero inoxidable 316, está conformado por un cilindro y dos platos cuadrados con una hendidura circular donde descansa el cilindro.
- II. Sistema de válvulas con manómetro. Está conformado por mangueras de alta resistencia; por un lado, está acoplado al crisol y por otro al tanque de gas argón ( $Ar$ ), con ayuda del manómetro se regula la presión y el flujo del gas al crisol.
- III. Horno. Es un horno de resistencia de la marca CARBOLITE con un diseño de apertura de puertas vertical y adaptado, el cual permite un manejo adecuado y seguro durante el proceso de fusión e infiltración.
- IV. Tanque de argón. El  $Ar$  es un gas inerte, por tal motivo se empleó en el proceso de infiltración del Al fundido a través de los espacios de la preforma, consistió en incrementar la presión del sistema al inyectar el gas  $Ar$ .
- V. Placa de Cobre. La función de la placa de cobre fue disipar el calor de forma más uniforme, ayudando a la solidificación del material, evitando rechupes en el interior de la espuma metálica.

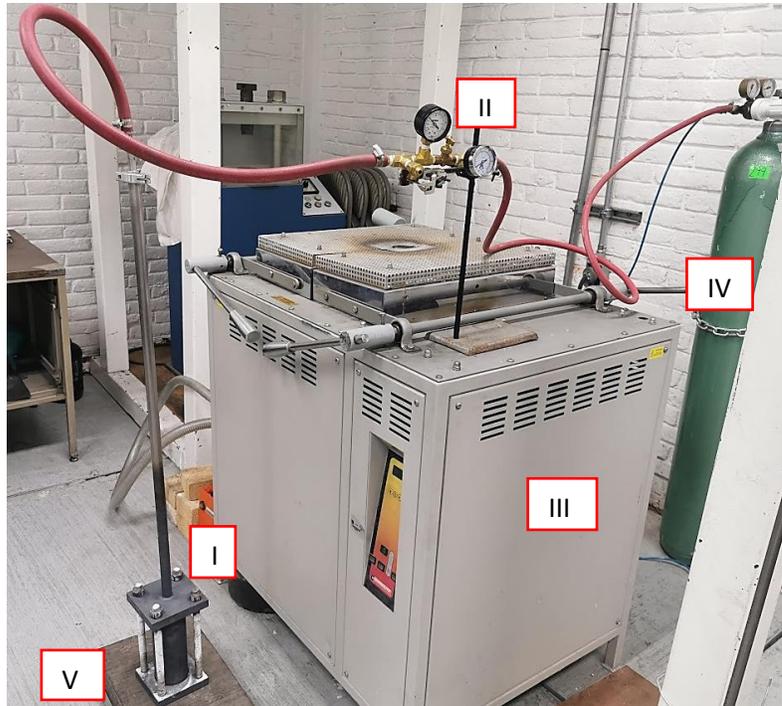


Figura 2.1. Sistema de infiltración y equipo empleado.

### 2.1.1. Materiales

La fabricación de las espumas consistió en obtener lingotes cilíndricos de aluminio 1100 como se observa en la figura 2.2 a, con la composición química que se muestra en la tabla 2.1.



Figura 2.2. a) Lingote cilíndrico de Al 1100, b) Crisol de grafito con Al líquido.

Tabla 2.1. Composición química (% en peso) de los lingotes de aluminio 1100.

<b>Elemento</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Al</b>	97.00	100.00
<b>Fe</b>	0.00	0.95
<b>Cu</b>	0.05	0.20
<b>Zn</b>	0.00	0.10
<b>Si</b>	0.00	0.95

El cloruro de sodio ( $NaCl$ ), se empleó como la preforma de sacrificio dado que su punto de fusión es más alto que el del aluminio ( $T_{f NaCl} = 810\text{ }^{\circ}C > T_{f Al} = 660\text{ }^{\circ}C$ ), su estabilidad química a altas temperaturas y su fácil disolución en agua.

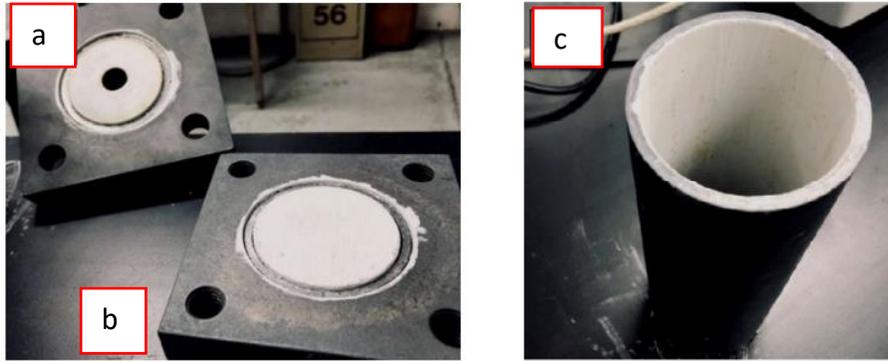
Los granos de  $NaCl$  se caracterizaron de acorde a su tamaño, haciendo uso de tamices y basando dicho proceso en la norma ASTM E11-17 [33]; sin embargo, los granos presentan formas irregulares lo que complica la clasificación del tamaño de grano, haciendo que el proceso se repita un par de veces más para evitar una mala clasificación. En la tabla 2.2 se muestran las aberturas de las mallas y la denominación de los tamices empleados, los tamaños de poro fueron definidos como poro 1 ( $P_1$ ) y poro 2 ( $P_2$ ).

Tabla 2.2. Composición química de los lingotes de aluminio.

<b>Poro</b>	<b>Tamaño de abertura de la malla</b>		<b>Denominación</b>
	mm	ln	
<b><math>P_1</math></b>	3.35	0.1320	6
<b><math>P_2</math></b>	2.36	0.0929	8

### 2.1.2. Preparación y ensamblado del crisol de fusión para las espumas metálicas de $Al$ .

El crisol fue recubierto en las paredes internas con nitruro de boro ( $BN$ ) para facilitar el desmolde de la espuma de  $Al$ . El proceso se repitió de forma similar con los platos, sobre el relieve circular se recubrió con  $BN$  tal como se muestra en la figura 2.3 y posteriormente se dejó secar a  $100\text{ }^{\circ}C$  en el secador durante 8 horas para evitar la presencia de humedad.



*Figura 2.3. Crisol de acero inoxidable recubierto con BN, a) plato superior, b) plato inferior, c) cilindro (cuerpo del crisol).*

En la hendidura de los platos superior e inferior se colocó un empaque de alta temperatura, cuya finalidad es sellar el sistema. El empaque de la parte superior consistió en un círculo de grafito de las dimensiones de la hendidura, mientras que el empaque inferior estaba compuesto de grafito y fibra de vidrio, seccionando el empaque en 8 partes, 4 partes iguales de grafito y 4 partes iguales de fibra de vidrio de 5 mm de longitud de forma equidistante, como se muestra en la figura 2.4. La finalidad de hacer empaque fue permitir la salida del aire que a su vez iba siendo desplazado por gas Ar (purga), sin la necesidad de hacer vacío, simplificando, optimizando y economizando el sistema de infiltración.

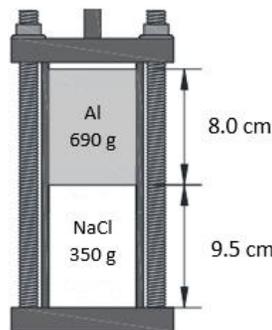


*Figura 2.4. Plato inferior. Con las flechas rojas se señalan los espacios donde se posiciono la fibra de vidrio y la flecha azul señala el grafito.*

Para el armado del crisol, se colocan los espárragos de acero inoxidable en los barrenos de la placa inferior y se asienta el tubo del crisol, haciendo que este selle adecuadamente. Posteriormente en el interior del tubo se coloca la preforma de

NaCl y encima el lingote cilíndrico de *Al*, en la proporción adecuada para que la infiltración sea completa considerando el rechupe que se genera en el proceso de solidificación del material; finalmente, se coloca el plato superior al cilindro, embonado los barrenos superiores con los espárragos colocados previamente y se fija con unas tuercas de acero inoxidable.

Las cantidades de cloruro de sodio y de aluminio que se emplearon para la fabricación de las espumas de diámetro de 6.3 cm y de 7 cm de longitud, se muestran a continuación, cabe mencionar que las cantidades no cambiaron al fabricar los dos tamaños de poro distintos 2.36 y 3.35 mm, respectivamente.



*Figura 2.5. Cantidad necesaria de NaCl y Al para producir las espumas de aluminio de celda abierta con tamaño de poro de 2.36 mm y 3.35 mm [34].*

### **2.1.3. Fundición e infiltración del aluminio.**

En esta etapa el crisol previamente ensamblado se colocó en el interior del horno eléctrico con la finalidad de hacer fundir el lingote de *Al* e infiltrarlo en la preforma de NaCl, se dejó estabilizar la temperatura por alrededor de 15 minutos, a partir de este tiempo se fundió el aluminio por 40 min (tiempo de fusión-  $t_f$ ), al término de este lapso se le aplicó presión con la entrada del gas argón al sistema por única vez y se dejó que el sistema liberara presión de forma natural con ayuda de los canales de fibra de vidrio que se encontraban en el sello, cuando la presión llegó a la mitad el crisol se sacó del horno, este proceso se muestra esquemáticamente en la figura 2.6, donde los procesos llevados a cabo dentro del horno se denotan con un recuadro rojo.

En la tabla 2.2 se muestran los parámetros de tiempo, presión y temperatura determinados para producir las espumas de aluminio en función de los distintos tamaños de poro.

Tabla 2.2. Parámetros determinados para el proceso de fundición e infiltración del aluminio en función del tamaño de poro.

Poros	$T$ (°C)	$P_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$t_f$ (min)	$P_i$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$t_i$ (min)
P1	780	0.8	40	0.98	2
P2	780	0.8	40	1.12	2

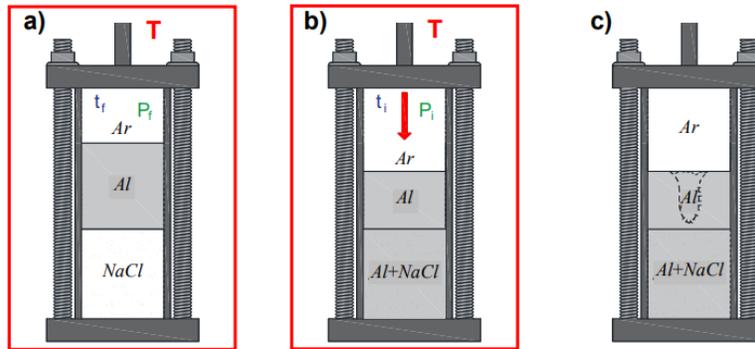


Figura 2.6. Proceso de fundición e infiltración para producir las espumas de aluminio de celda abierta con tamaño de poro de 2.36 mm y 3.35 mm, a) fundición, b) infiltración y c) solidificación. [34]

Como se mencionó anteriormente el crisol se dejó enfriar al aire quieto, comenzando su proceso de solidificación, en la figura 2.7 se muestra cómo se llevó a cabo el enfriamiento, tomando la coloración del crisol como referencia; es decir, al encontrar una coloración rojo brillante a lo largo de todo el crisol es un indicio de una infiltración exitosa, debido, a que se puede inferir que el aluminio líquido llegó hasta la base del crisol llenando cada uno de los huecos que había entre los granos de NaCl.

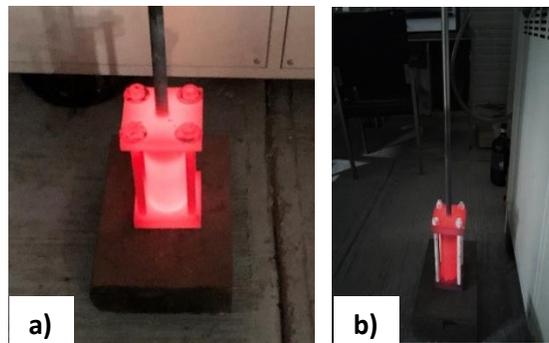


Figura 2.7. Crisol retirado del horno inmediatamente después, coloración uniforme rojo brillante, a) vista frontal, b) vista lateral.

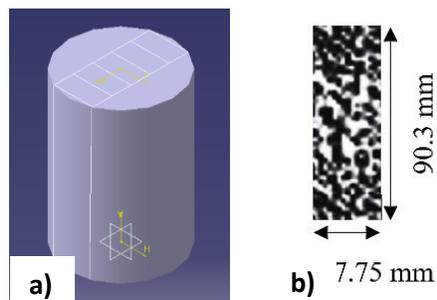
## 2.2. Obtención del núcleo de la espuma metálica de aluminio tipo sándwich.

Para obtener los sándwiches de espuma de aluminio, se desmoldó cuidadosamente la espuma metálica de aluminio obtenida del proceso de fundición e infiltración, como se muestra en la figura 2.8.



*Figura 2.8. Obtención de la espuma metálica de aluminio, a) remanente de la fundición y rechupe, b) infiltración del aluminio (espuma metálica).*

La espuma obtenida es seccionada de tal manera que se puedan obtener 5 prismas rectangulares de aproximadamente 7mm de espesor, en función del largo y ancho de la espuma obtenida, cuidando no llegar a la parte sólida del material y evitando el rechupe generado en el proceso de solidificación, en la figura 2.9 se muestra como fue seccionada y cortada la espuma metálica de aluminio.



*Figura 2.9. Obtención de las secciones de la espuma metálica de aluminio, a) espuma obtenida seccionada en partes iguales, b) secciones obtenidas.*

Como se mencionó anteriormente, se fabricaron espumas de aluminio con tamaño de poro distinto, las cuales se emplearon como núcleo para la fabricación de las

estructuras de panel tipo sándwich que a su vez se utilizaron en los ensayos mecánicos de flexión en 3 puntos y ensayo de impacto tipo Charpy.

### 2.2.1. Preparación superficial (Sandblasting).

Una vez obtenidos los prismas rectangulares, pasaron por un proceso de preparación superficial, con la finalidad de generar una superficie adecuada para admitir un material sobre la superficie tratada. El proceso que se llevó a cabo fue el llamado Sandblasting o arenado, consistió en colocar la pistola de arenado a 90° de la superficie de la muestra con una distancia de 15 cm, la muestra fue impactada con partículas de carburo de silicio de 0.2289 mm (malla 73), haciendo un barrido de manera uniforme por toda la superficie a tratar hasta lograr una rugosidad completa y homogénea tal como se muestra en la figura 2.10, para evaluar la rugosidad de forma cualitativa se empleó el microscopio estereoscópico.

En la tabla 2.3 se muestran las condiciones de arenado para los distintos tamaños de poro, el proceso fue llevado a cabo en la cara frontal y trasera del prisma rectangular.

Tabla 2.3. Parámetros determinados para el proceso de arenado en función del tamaño de poro.

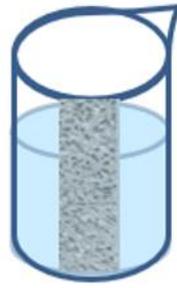
<b>Poro</b>	<b>Distancia (cm)</b>	<b>Tiempo de exposición (min)</b>
<b>P1</b>	<b>15</b>	<b>2</b>
<b>P2</b>	<b>15</b>	<b>1</b>



Figura 2.10. Pieza después del arenado con rugosidad uniforme, poro 2.36 mm.

### 2.2.2. Solubilización del cloruro de sodio.

Una vez realizada la preparación superficial, se solubiliza el cloruro de sodio con agua de grifo, se colocó la pieza dentro de un contenedor y se agregó agua hasta cubrir la pieza tal como se muestra en la figura 2.11, posteriormente se dejó inmersa en el agua durante 12 horas, una vez transcurrido el tiempo, se cambió el agua y se colocó dentro de una tina de baño ultrasónica para solubilizar los granos de sal que hubieran quedado dentro de los poros internos de la pieza.



*Figura 2.11. Solubilización del NaCl de la espuma metálica de aluminio.*

### 2.3. Caracterización física y estructural.

Las espumas metálicas obtenidas fueron caracterizadas física y estructuralmente, determinando el porcentaje de porosidad y el factor de redondez, con el objetivo de establecer una correlación entre estos parámetros y su desempeño mecánico.

#### 2.3.1. Determinación de la porosidad.

Los núcleos obtenidos fueron pesados antes y después de disolver la preforma de sacrificio para determinar la masa y el volumen de NaCl removido. Posteriormente, la porosidad superficial se determinó mediante el porcentaje de área sólida de la cara superior, dicho parámetro se determinó mediante el software Image J, aumentando el contraste de con la finalidad de facilitar dicha determinación.

### 2.4. Ensayo de adhesión a la cizalladura para adhesivos.

Este ensayo se llevó a cabo con la finalidad de evaluar distintos adhesivos cuyas propiedades fueran óptimas para la fabricación<sup>2</sup> de espumas metálicas tipo sándwich, dicho ensayo se basó en la norma ASTM D 4896-01 [35] y la UNE-EN ISO 1465 [22] evaluando el esfuerzo a la cizalladura.

#### 2.4.1. Materiales.

Para llevar a cabo el ensayo se empleó una solera de aluminio aleación 6063 T5 de 0.3175 cm de espesor por 2.54 cm de ancho y 10 cm de largo. Se

seleccionaron cuatro adhesivos distintos, base cianoacrilato, metacrilato y resina epoxi. En la tabla 2.4 se muestran las características de los adhesivos empleados.

*Tabla 2.4. Características de los adhesivos empleados.*

Tipo	Marca comercial	Color	Muestra
Resina epoxi y cianoacrilato Metacrilato	Pegatan Ke	Verde oscuro	A <sub>1</sub>
	Plastic Welder	Lechoso amarillento	A <sub>2</sub>
Resina epoxi	Plasti acero	Gris oscuro	A <sub>3</sub>
Resina epoxi	Klip-Ton	Amarillento	A <sub>4</sub>

#### 2.4.2. Preparación de la probeta.

Como se mencionó, las dimensiones de la probeta se basaron en la norma ASTM D 4896-01, se marcó la zona del ensayo en la probeta tal y como lo indica la norma (2.54 cm de ancho por 2.54 cm de largo) y se procedió a realizar un arenado tal como se muestra en la figura 2.12, la pistola de arenado se colocó a 90° de la pieza a una distancia de 7 cm durante un minuto, este paso se realizó con la finalidad de proveer de rugosidad al material y mejorar la adherencia en la interfase metal-adhesivo.



*Figura 2.12. Arenado de las láminas empleadas para probetas del ensayo de adhesión.*

Una vez que las probetas fueron arenadas, se limpiaron con acetona y se dejaron secar, posteriormente se colocó una capa del adhesivo de aproximadamente 1mm de espesor, cuidando que fuera de manera uniforme sobre el área de ensayo, se empalmaron ambas partes como se observa en la figura 2.12 y finalmente, se dejó

secar el adhesivo tal y como lo indicaba el fabricante, en la tabla 2.5 se observan los tiempos de secado para cada adhesivo.

*Tabla 2.5. Tiempos y temperatura de secado de los adhesivos empleados.*

Tipo	Marca comercial	Tiempo (horas)	Temperatura (°C)
Resina epoxi y cianoacrilato	Pegatan Ke	5	ambiente
Metacrilato	Plastic Welder	14	60
Resina epoxi	Plasti acero	12	ambiente
Resina epoxi	Klip-Ton	24	ambiente

### 2.4.3. Condiciones de operación para el ensayo

El ensayo de adhesión a la cizalladura se realizó bajo las condiciones reportadas en la norma, con la mordaza a  $50 \pm 1$  mm del borde, aumento de la velocidad de forma constante a 0.05 in/ min por un periodo de tiempo de  $65 \pm 20$  segundos. Dichas condiciones se emplearon para realizar el ensayo de adhesión por triplicado en cada uno de los adhesivos empleados.

## 2.5. Fabricación de las espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich.

Se fabricaron dos distintos tipos de espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich empleando los núcleos de tamaño de poro de 3.35 mm y 2.36 mm, la primera estructura se basó en tener un refuerzo únicamente de lámina de aluminio y la segunda, además de poseer el refuerzo de lámina de aluminio, también se reforzó con fibra de Kevlar. A continuación, se describen los pasos realizados para obtener este material compuesto tipo sándwich.

### 2.5.1. Espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich con refuerzo de lámina de aluminio (PSA).

Para realizar este material panel tipo sándwich, se empleó el núcleo obtenido en la sección 2.2.2 el cual estaba libre de NaCl y previamente preparado superficialmente, fabricando 3 piezas con núcleo de tamaño de poro 3.35 mm y 3 piezas con tamaño de poro de 2.36 mm. En la figura 1.13 se muestra un esquema de la estructura que se fabricó. El núcleo de espuma de aluminio se reforzó con lamina de aluminio comercial de 1mm de espesor y se cortó a la medida del núcleo; se preparó superficialmente, empleando el arenado con las condiciones descritas en la tabla 2.6. cuya finalidad fue proveer de rugosidad al material y así mejorar la adherencia del adhesivo, como se muestra en la figura 2.13.

Tabla 2.6. Parámetros determinados para el proceso de arenado de la lámina de aluminio.

<b>Material</b>	<b>Distancia (cm)</b>	<b>Tiempo de exposición (min)</b>
<b>Lamina de aluminio comercial</b>	15	1

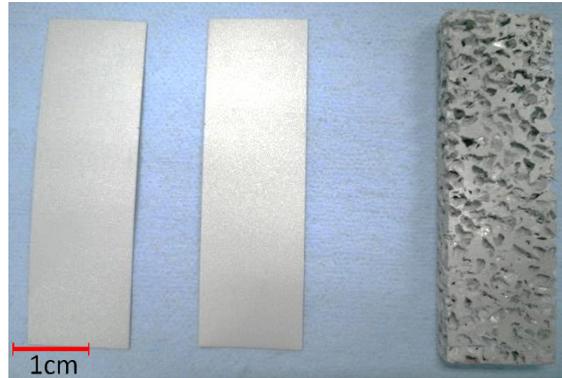


Figura 2.13. Arenado de las láminas empleadas para la fabricación de espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich.

Posteriormente, se colocó una capa uniforme del adhesivo base metacrilato, marca Plastic Welder de aproximadamente 1 mm sobre la lámina de aluminio en la cara interna, la cual hace contacto con el núcleo de espuma de Al, tal como se muestra en la figura 2.14 a, dicho procedimiento se llevó a cabo en la lámina superior e inferior. Finalmente, se colocaron ambas láminas sobre el núcleo de espuma de Al y se dejó secar el adhesivo bajo las condiciones descritas en la tabla 2.5 de la sección 2.4.2, obteniendo la espuma metálica tipo sándwich reforzada con lamina de aluminio que se muestra en la figura 2.14 b.

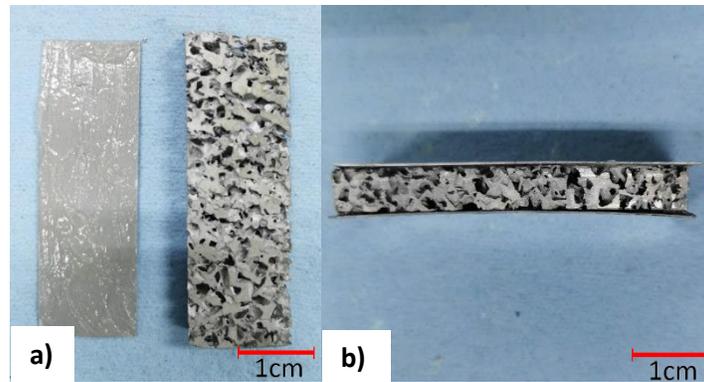


Figura 2.14. Fabricación de las espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich, a) pegado de la lámina de aluminio, b) ensamble y obtención de la espuma metálica tipo sándwich.

### 2.5.2. Espumas metálicas en panel tipo sándwich con refuerzo de lámina de aluminio y Kevlar (PSA-K).

La fabricación de esta espuma metálica compuesta tipo sándwich, al igual que en el caso anterior se empleó el núcleo libre de NaCl y previamente preparado superficialmente, fabricando 3 piezas con núcleo de tamaño de poro 3.35 mm y 3 piezas con tamaño de poro de 2.36 mm. Reforzando el núcleo de espuma de aluminio con lamina de aluminio y fibra de Kevlar, ambos se cortaron a la medida del núcleo y la lámina de aluminio se preparó superficialmente por ambos lados (cara interna y cara externa) empleado el arenado con las condiciones descritas en la tabla 2.6.

Para ensamblar el núcleo con los refuerzos, primero se realizó la unión que se describe en la sección 2.5.1 y una vez transcurrido el tiempo de secado del adhesivo, se procedió a aplicar una capa uniforme de aproximadamente 1 mm de espesor del adhesivo empleado sobre la lámina de Al, posteriormente se colocó la fibra de Kevlar por ambos lados como se muestra en la figura 2.15 y se dejó secar durante 14 horas como lo indica el fabricante.

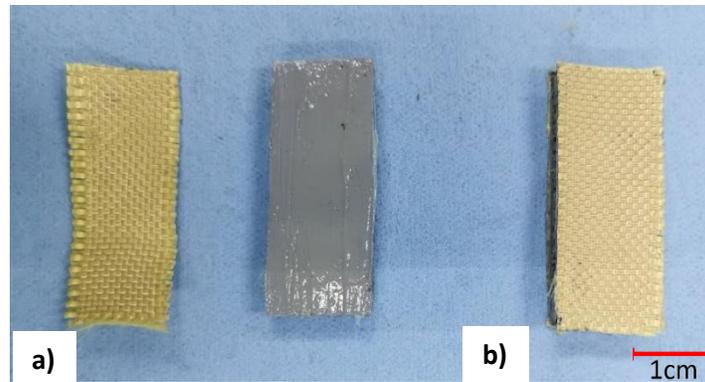


Figura 2.15. Fabricación de las espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich con refuerzo de lámina de Al y Kevlar, a) pegado de la fibra de Kevlar sobre la lámina de Al, b) ensamble y obtención de la espuma metálica tipo sándwich.

## 2.6. Ensayo de flexión en 3 puntos.

El ensayo de flexión en tres puntos se realizó con la finalidad de analizar y comparar el comportamiento mecánico de cada uno de los materiales ensayados, determinando algunas de las ventajas que posee un material poroso sobre un material sólido. Se ensayaron por triplicado y con los distintos tamaños de poro empleados las espumas metálicas en panel tipo sándwich reforzadas con lamina de Al, las reforzadas con láminas de Al- Kevlar; de igual forma, se ensayó la espuma metálica sin refuerzo y una barra de Al solido de la misma composición.

Las dimensiones de las probetas ensayadas se muestran en la figura 2.16.

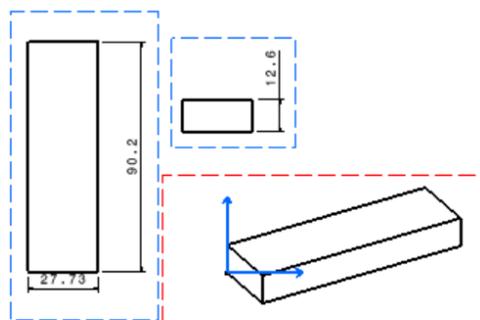
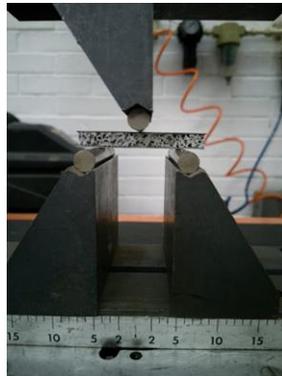


Figura 2.16. Dimensiones en milímetros de las probetas empleadas para el ensayo de flexión en 3 puntos.

### 2.6.1. Equipo y condiciones de operación para el ensayo de flexión en 3 puntos.

El ensayo de flexión en tres puntos se basó en la norma ASTM D790 y la norma ISO 178 [36], se llevó a cabo en la máquina universal INSTRON 5500R, colocando la probeta sobre los rodillos inferiores con una distancia de 10 cm entre los rodillos, el rodillo superior se colocó a la mitad de esta distancia; es decir, a 5 cm de cada rodillo, en la figura 2.17 se muestra la posición de la probeta.



*Figura 2.17. Posición de la probeta para el ensayo de flexión en 3 puntos.*

Las condiciones de operación constaron de una velocidad de cruceta de 1.00 mm/min, el tiempo de ensayo fue determinado por la resistencia del material; es decir, el ensayo finalizó hasta que la espuma metálica llegara al esfuerzo de rotura o fallara el adhesivo de unión como se observa en la figura 2.18 y 2.19, respectivamente.



*Figura 2.18. Falla de la espuma de Al con tamaño de poro de 2.36 mm en el ensayo de flexión en 3 puntos.*

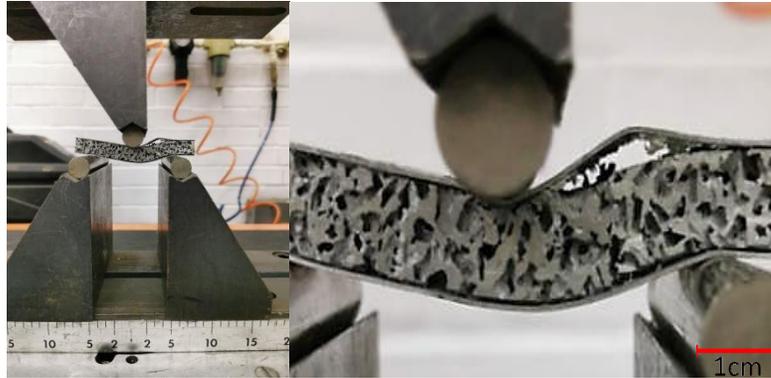


Figura 2.19. Falla del adhesivo (base metacrilato marca Plastic Welder) en el ensayo de flexión en 3 puntos.

## 2.7. Determinación de propiedades mecánicas mediante cálculos teóricos.

La determinación de diversas propiedades ayuda al estudio del comportamiento mecánico de un material, en este caso se determinaron tres factores de suma importancia que ayudan a explicar el comportamiento mecánico de las espumas metálicas de aluminio en paneles tipo sándwich, tomando en cuenta variables como la porosidad, factor de forma y propiedades de los materiales de refuerzo empleados; a continuación, se presentan las ecuaciones empleadas.

### 2.7.1. Cálculo del módulo de elasticidad mediante la relación de Nielsen

Con las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de flexión en 3 puntos se determinó el módulo de elasticidad mediante la curva esfuerzo-deformación y se comparó con el módulo obtenido mediante el cálculo de la relación de Nielsen [38] aplicada a las espumas metálicas en panel tipo sándwich reforzadas con lamina de aluminio y lamina de aluminio-Kevlar, empleando la ecuación 2.1.

$$E_{Nielsen} = E_{Al} \frac{\left(1 - \frac{P}{100}\right)^2}{1 + \left(\frac{1}{F_f} - 1\right) \frac{P}{100}} \quad (2.1)$$

Donde:

$E_{Al}$  Es el módulo de elasticidad del sólido

P Es el porcentaje de porosidad

$F_f$  Es el factor de forma (1/redondez)

### 2.7.2. Módulo elástico del refuerzo $E_f$ .

El cálculo que ayuda a determinar el módulo elástico del refuerzo toma en consideración la pendiente de las curvas obtenidas en el ensayo de flexión en tres puntos, además del espesor del refuerzo, lo cual contribuye a una determinación más fidedigna tan como se muestra en la ecuación 2.2 [39], ayudando a comprender el comportamiento de la espuma metálica compuesta tipo sándwich y a comparar los valores obtenidos cuando al refuerzo de lámina de aluminio se le adiciona la fibra de Kevlar.

$$E_f = \frac{l^3}{24 \cdot k_l \cdot t_f \cdot h^2} \quad (2.2)$$

Donde:

$l^3$  Es la longitud de la muestra (mm)

$k_l$  Es la pendiente que relaciona la deformación total con el valor de la carga aplicada por el área de la muestra (MPa)

$h$  Es el espesor de la espuma metálica compuesta tipo sándwich (mm)

$t_f$  Es el espesor del refuerzo (mm)

### 2.7.3. Módulo de cizalladura del núcleo $G_c$ .

El módulo de cizalladura del núcleo se calculó para las espumas metálicas en panel tipo sándwich con refuerzo de lámina de aluminio y con refuerzo de lámina de aluminio y Kevlar, ayudando a comprender la influencia de los materiales de refuerzo, en la sección de resultados de presentan los valores obtenidos empleando la ecuación 2.3 [39].

$$G_c = \frac{l}{4 \cdot k_s \cdot h} \quad (2.3)$$

Donde:

$K_s$  Es una constante y para el ensayo de flexión en tres puntos tiene un valor de  $l/4$

$l$  Es la longitud de la muestra

$h$  Es el espesor de la espuma metálica compuesta tipo sándwich

## 2.8 Ensayo de impacto tipo Charpy.

El ensayo de impacto se basó en la norma ASMT E 23 [41]; sin embargo, al ser un material poroso compuesto se realizaron algunas adecuaciones como son el tamaño de la probeta la cual se muestra en la figura 2.20 y se omitió la muesca. La finalidad de dicho ensayo fue determinar la resiliencia de los materiales

porosos compuestos mediante la energía absorbida durante el impacto. Se ensayaron las PSA y PSA-K por triplicado y con los distintos tamaños de poro empleados.

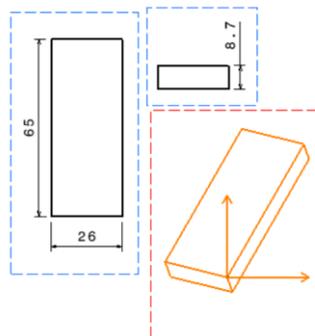


Figura 2.20. Dimensiones en milímetros de las probetas de impacto.

### 2.8.1. Equipo y condiciones de operación para el ensayo de impacto tipo Charpy.

Para el desarrollo del ensayo se empleó una máquina de impacto tipo Charpy marca SHIMADZU, tipo OH, modelo 80368 con capacidad de 30 kg. La probeta se colocó en el porta muestras, alineando el eje neutro con el péndulo tal como se muestra en la figura 2.21 b.

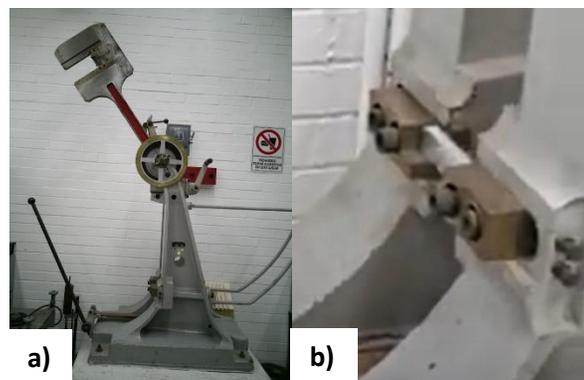


Figura 2.21. Ensayo de impacto tipo Charpy, a) equipo empleado, b) posición de la probeta de impacto para el ensayo de impacto tipo Charpy.

El ensayo se realizó con las siguientes condiciones, un péndulo de 26 Kg y la fricción del aire igual a 142° a temperatura ambiente.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos siguiendo la metodología descrita en la sección anterior. Iniciando con las espumas de *Al* obtenidas, posteriormente se reportan las propiedades físicas y estructurales de estas, siguiendo con los resultados del ensayo de adhesión a la cizalladura de los adhesivos; finalmente, se muestra el comportamiento mecánico de las espumas metálicas de aluminio en panel tipo sándwich en el ensayo de flexión en tres puntos y del ensayo de impacto, discutiendo de manera específica y global los resultados obtenidos.

#### 3.1 Espumas fabricadas por infiltración.

En la tabla 3.1 se muestra la cantidad de espumas infiltradas y núcleos obtenidos para la elaboración de paneles tipo sándwich que a su vez se emplearán para los ensayos mecánicos. Cabe

*Tabla 3.1. Relación de infiltraciones y núcleos obtenidos para ensayos mecánicos.*

<b>Poros</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Espumas infiltradas</b>	<b>Total de núcleos obtenidos</b>
<b>P<sub>1</sub></b>	Flexión en 3 puntos	2	20
	Impacto	2	
<b>P<sub>2</sub></b>	Flexión en 3 puntos	2	20
	Impacto	2	

En la figura 3.1 y 3.2 se muestran las espumas de *Al* obtenidas; así, como los núcleos de cada una de estas. El método de fabricación empleado fue el indicado para este tamaño de poro, ya que la infiltración ocurrió adecuadamente llenando cada uno de huecos de la preforma de NaCl.

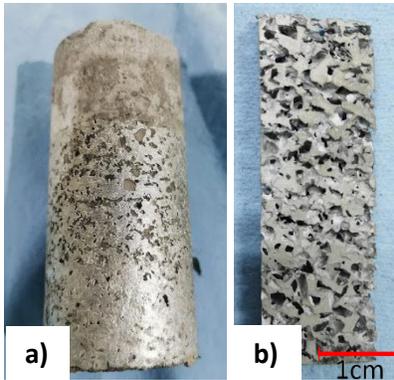


Figura 3.1. Espuma metálica de Al tamaño de poro de 3.35 mm, a) espuma obtenida de fundición, b) núcleo obtenido de seccionar la espuma de Al.



Figura 3.2. Espuma metálica de Al tamaño de poro de 2.36 mm, a) espuma obtenida de fundición, b) núcleo obtenido de seccionar la espuma de Al.

### 3.2 Resultados de la caracterización física y estructural.

Los núcleos fueron pesados antes y después de disolver la preforma de sacrificio para determinar la masa y el volumen del NaCl removido, obteniendo valores promedio que se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Cantidad de NaCl removido del núcleo.

Poros	m		NaCl removido	
	C/NaCl	S/NaCl	m (g)	v (cm <sup>3</sup> )
P <sub>1</sub>	35.141	26.777	8.364	4.41
P <sub>2</sub>	34.935	25.991	8.944	4.59

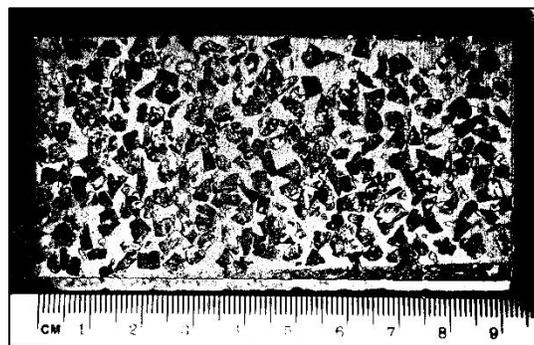
\*C= Con

\*S= Sin

Los resultados obtenidos en la tabla anterior muestran que la cantidad de NaCl removido tanto en peso como en volumen es similar para los tamaños de poro 1 y 2, lo que significa que el empaquetamiento de la preforma de sacrificio es similar para ambos casos, esto debido a la forma de los granos de NaCl, generando que las propiedades físicas asociadas al volumen no varíen significativamente, tal es el caso de la densidad.

En la literatura se han encontrado datos donde se relaciona la densidad con la porosidad del material, comparando 3 diferentes tamaños de poro, sin encontrar una variación en la densidad relativa de estos materiales, descubriendo que el tamaño de partícula del NaCl no es una condicionante para esta propiedad. Debido a las características de la preforma de sacrificio dado que su geometría es acicular, no influye significativamente en el empaquetamiento y distribución de las partículas, ya que estas tienen un acomodo con menor número de huecos lo cual no está ligado al tamaño de partícula si no a la cantidad de NaCl empleado para producir las espumas metálicas; por tal motivo, se podría decir que la densidad relativa y la porosidad del material “no cambian”. Caso contrario ocurre con las partículas esféricas, las cuales tienen un acomodo o empaquetamiento preferencial debido a su geometría dejando huecos de mayor tamaño debido a la redondez de la partícula la cual depende de su diámetro y por consecuencia se refleja en la densidad y porosidad del material [42].

En la figura 3.3 y 3.4 se muestran las imágenes procesadas, donde las zonas blancas corresponden a la superficie del aluminio y las zonas oscuras a los poros.



*Figura 3.3. Determinación de la porosidad de la espuma metálica de Al con tamaño de poro de 3.35 mm, obtenida mediante Image J.*

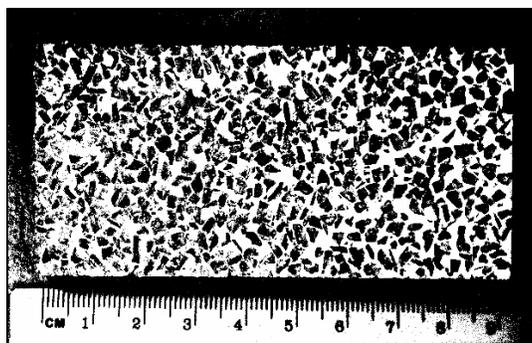


Figura 3.4. Determinación de la porosidad de la espuma metálica de Al con tamaño de poro de 2.36 mm, obtenida mediante Image J.

En la tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos de las determinaciones empleadas mediante el software Image J, el porcentaje de porosidad aumenta un 4.17% para el tamaño de  $P_2$  con respecto al tamaño de  $P_1$ , lo cual reafirma lo obtenido en trabajos anteriores donde el porcentaje de porosidad para materiales con poros de 0.71 mm a 4.75 mm oscila entre el 60 y 65%, encontrando una variación del 5%, asemejándose a lo obtenido. Otro factor que considerar es el área de poros, en  $P_1$  el área de la superficie sólida fue mayor, lo que indica un menor número de interconexiones y una menor porosidad lo cual es fundamental para la adherencia de los materiales de refuerzo, ya que existe una mayor superficie de contacto.

Tabla 3.3. Determinación del porcentaje de porosidad mediante el área superficial total y el área de los poros.

Porosidad	Área superficial total ( $mm^2$ )	Área de poros ( $mm^2$ )	Porcentaje de porosidad (%)
$P_1$	4419.86	2313.52	60.56
$P_2$	4361.46	2820.57	64.67

El factor de redondez y esfericidad se determinó mediante el software Image J siguiendo los parámetros morfológicos del anexo 2. Al igual que en el caso anterior, se emplearon las figuras 3.3 y 3.4, arrojando una distribución de la forma de las partículas que componen al material. Los resultados se observan en la tabla 3.4 y en las figuras 3.5 y 3.6, donde el factor de redondez y de esfericidad promedio son mayores para el tamaño de poro 1, presentando una alta correlación positiva y una mayor cantidad de partículas entre el 0.6 y 0.8 de esfericidad. Esto probablemente se debe a que posee un mayor tamaño de partícula, la cual probablemente casi no se fragmentó a la hora del tamizado, o el tamizado sirvió

para redondear los pequeños picos del grano de NaCl que se empleó como preforma; sin embargo, ocurrió lo contrario con el tamaño de poro 2 donde hay una baja correlación positiva presentando una mayor concentración de partículas alrededor de una esfericidad de 0.5, al ser una partícula más pequeña probablemente es producto de la fragmentación de una partícula de NaCl de mayor tamaño, lo cual genera una gran cantidad de partículas dispersas.

El estudio de estos factores es de suma importancia en un material poroso ya que ayuda a determinar parámetros como el módulo de elasticidad mediante la relación de Nielsen [38], el cual se va a determinar más adelante y a comparar con el calculado mediante la curva esfuerzo-deformación obtenida en el ensayo de flexión en tres puntos.

Tabla 3.4. Determinación del factor de redondez y circularidad.

<b>Poro</b>	<b>Partículas cuantificadas</b>	<b>Partículas representativas</b>	<b>Factor de redondez promedio</b>	<b>Factor de esfericidad promedio</b>
<b><math>P_1</math></b>	145	91	0.814	0.823
<b><math>P_2</math></b>	336	163	0.466	0.565

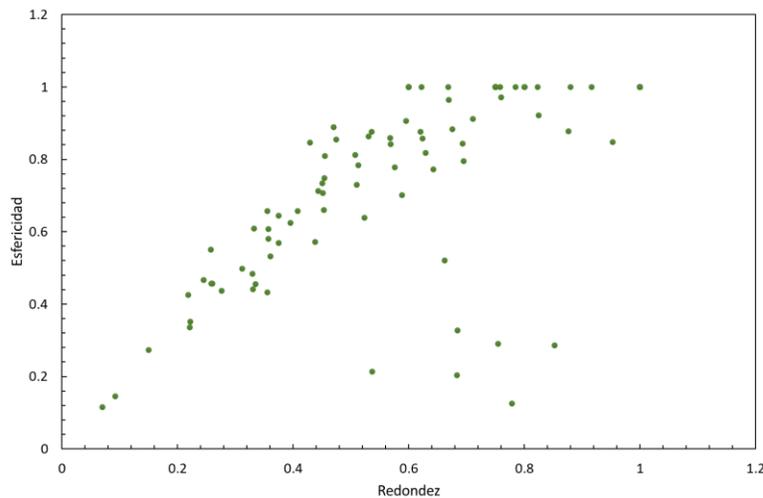


Figura 3.5. Distribución de la redondez y esfericidad de la espuma metálica de Al para el tamaño de  $P_1$ , con alta correlación positiva.

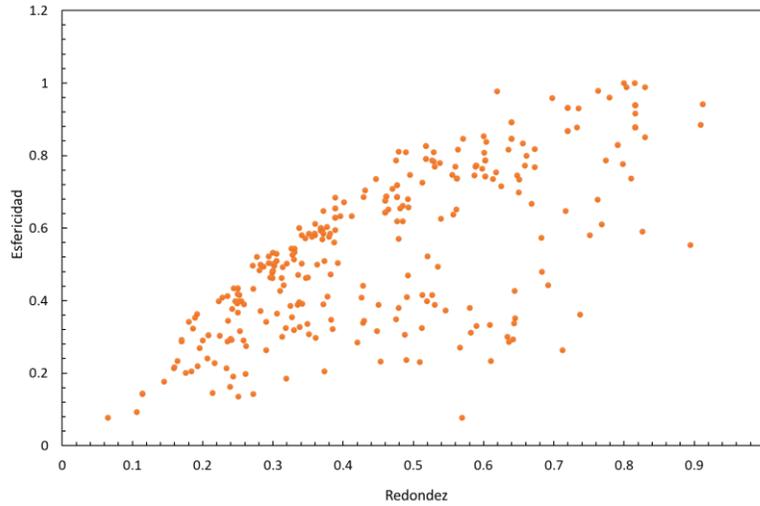


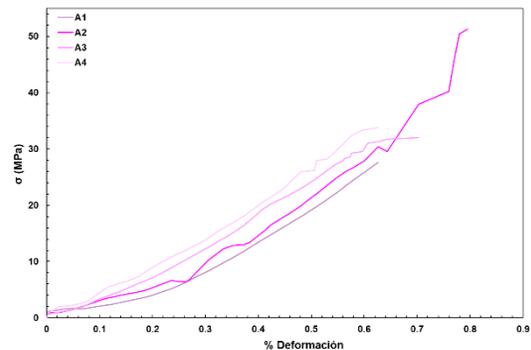
Figura 3.6. Distribución de la redondez y esfericidad de la espuma metálica de Al para el tamaño de  $P_2$  con baja correlación positiva.

### 3.3. Propiedades mecánicas de los adhesivos.

A partir del ensayo de adhesión a la cizalladura, se determinó el adhesivo óptimo para la fabricación de las espumas metálicas en panel tipo sándwich. En la tabla 3.5 se muestran las propiedades obtenidas de los adhesivos empleados.

Tabla 3.5. Tabla de esfuerzos máximos de adhesivos ensayados y grafica esfuerzo Vs deformación.

Adhesivo	Tensión normal promedio (MPa)	Esfuerzo cortante promedio (MPa)
A <sub>1</sub>	27.5	29
A <sub>2</sub>	51.3	73.6
A <sub>3</sub>	32.5	42.3
A <sub>4</sub>	33.7	37.1



De los resultados obtenidos se recalca que el adhesivo con las mejores propiedades fue el A<sub>2</sub> presentando un comportamiento creciente, ya que la tensión normal y el esfuerzo cortante promedio son los más elevados, dando lugar a un mayor porcentaje de deformación de acorde con el gráfico de la tabla 3.5, dicha

zona se presenta a partir del 0.2% hasta el 0.66% del porcentaje de deformación. Lo cual podría presentar un mejor desempeño del adhesivo en presencia de esfuerzos combinados, propiedad que lo destaca y lo hace elegible para la fabricación de las espumas metálicas en paneles tipo sándwich.

Al aplicar los adhesivos en el núcleo de espuma metálica, el tratamiento superficial de arenado tuvo gran influencia en la adherencia superficial, ya que generó la rugosidad adecuada para poder colocar el adhesivo de forma óptima y evitar el desprendimiento del material de refuerzo antes de los ensayos mecánicos.

### **3.4. Ensayo de flexión en tres puntos en diferentes materiales.**

En esta sección se hace una comparativa de los resultados obtenidos en el ensayo de flexión en tres puntos, la finalidad es comparar el comportamiento mecánico de diferentes materiales, barra rectangular sólida de aluminio, espumas metálicas de aluminio sin refuerzo, las PSA y PSA-K, considerando en estos últimos  $P_1$  y  $P_2$ . La finalidad es estudiar como influyen las variables como el núcleo, materiales de refuerzo, resistencia de los adhesivos sobre los siguientes módulos: módulo elástico del núcleo, módulo elástico del refuerzo ( $E_f$ ) y módulo de cizalladura del núcleo ( $G_c$ ), entre otros.

#### **3.4.1. Ensayo de flexión en tres puntos aplicado en una barra rectangular de aluminio sólido.**

En la figura 3.7 se muestran los resultados al ensayar las barras de Al 1100 por triplicado, en las cuales se observa un comportamiento típico de la curva esfuerzo-deformación; sin embargo, al analizar la muestra 2 y 3 se nota un empalme en la zona lineal; es decir, en el módulo de elasticidad, en cuanto al esfuerzo máximo las curvas de las muestras 1 y 2 son similares entre sí. En la tabla 3.6, se observan las propiedades ya mencionadas, analizando que el módulo de elasticidad tiene una pequeña variación respecto al valor teórico, de acuerdo con la literatura el módulo de elasticidad para la aleación de aluminio 1100 es de 69000 MPa [40], siendo las muestras 2 y 3 las que se acercan más a este valor.

Este ensayo proporciona información acerca del comportamiento mecánico de un material sometido a esfuerzos combinados (tensión, compresión y cizalladura), por lo cual da un acercamiento bastante real al módulo de elasticidad, el cual posteriormente se analiza y compara con el obtenido en los materiales porosos, los cuales se analizaron con y sin refuerzo.

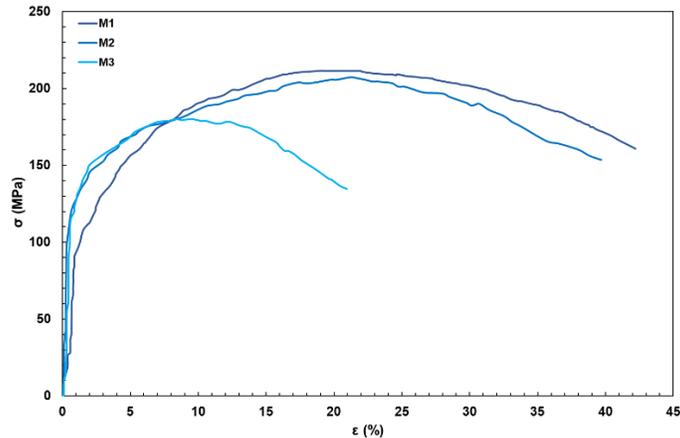


Figura 3.7. Diagrama esfuerzo-deformación de una barra rectangular de aluminio sólido, ensayando 3 muestras del mismo tipo.

Tabla 3.6. Propiedades mecánicas de la barra de Al sólido.

<b>Muestra</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Porcentaje de variación de E con respecto al valor teórico</b>
<b>M1</b>	68720	211.56	3.22
<b>M2</b>	70980	207.29	0.03
<b>M3</b>	70220	178.50	1.1

### 3.4.2. Ensayo de flexión en tres puntos aplicado a las espumas metálicas de Al sin refuerzo para los tamaños de P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub>.

Los resultados obtenidos del ensayo de flexión en tres puntos aplicado en las espumas metálicas de Al sin refuerzo (núcleos) se muestran en esta sección, analizando cada una de las propiedades mecánicas obtenidas y la influencia del tamaño de poro, así como del porcentaje de porosidad. Por simplicidad la espuma metálica sin refuerzo con tamaño de P<sub>1</sub> (3.35 mm) y P<sub>2</sub> (2.36 mm), se denotarán como Núcleo 1 y 2 (N1 y N2), respectivamente, agregando los subíndices A, B y C para referir a las muestras en ambos casos.

En la figura 3.8 se observa el comportamiento para N1 donde las muestras ensayadas tienen un comportamiento similar y cuya variación entre las curvas obtenidas no rebasa el 30%. Al analizar la muestra N1<sub>B</sub> y N1<sub>C</sub> se obtiene que, en la parte lineal (zona elástica) de ambas curvas hay puntos de empalme; sin embargo, al analizar la zona plástica o la curva del gráfico hay una ligera variación, la cual probablemente se debe a la distribución, orientación e irregularidad de los poros que conforman el material, dichos factores también se

ven reflejados en el comportamiento de la muestra N1<sub>A</sub>, la cual tiene un mayor porcentaje de variación entre las muestras ensayadas y es la que posee un menor porcentaje de deformación; es decir, la zona plástica de esta muestra es considerablemente menor con respecto a las muestras N1<sub>B</sub> y N1<sub>C</sub>.

En la tabla 3.7 se obtuvieron las propiedades como el esfuerzo máximo de flexión, módulo de cizalladura y módulo de elasticidad experimental y teórico, este último se calculó mediante la ecuación 2.1 empleando la ecuación de Nielsen, los datos tomados para este cálculo son los mostrados en las tablas 3.4 y 3.6. Al comparar los resultados experimentales y teóricos, salta a la vista que existe una variación entre los módulos de elasticidad cuyo valor obtenido discrepa entre un 1.32% a 35%, si bien los valores no son muy alejados entre sí, la diferencia que existe se debe, a que el cálculo teórico se basó en 2 dimensiones; es decir, la porosidad tomada fue en cuanto al área de la muestra y no en cuanto al volumen de la misma, lo cual se refleja en una variación del comportamiento del material ya que al realizar un ensayo de flexión en tres puntos es importante tomar en cuenta variables como el espesor de la pieza y el tipo de estructura que conforma al mismo (tamaño, forma y distribución de los poros e interconexiones).

En cuanto al módulo de cizalladura y al esfuerzo máximo de flexión son semejantes con los reportados en la literatura y en algunas bases de datos como MatWeb [41] ya que la variación de estas propiedades no va más allá del 15%; sin embargo, esta pequeña variación se debe al factor de forma ya que en algunos casos no se reporta dicho dato y en otros la variación de este es de alrededor del 20%.

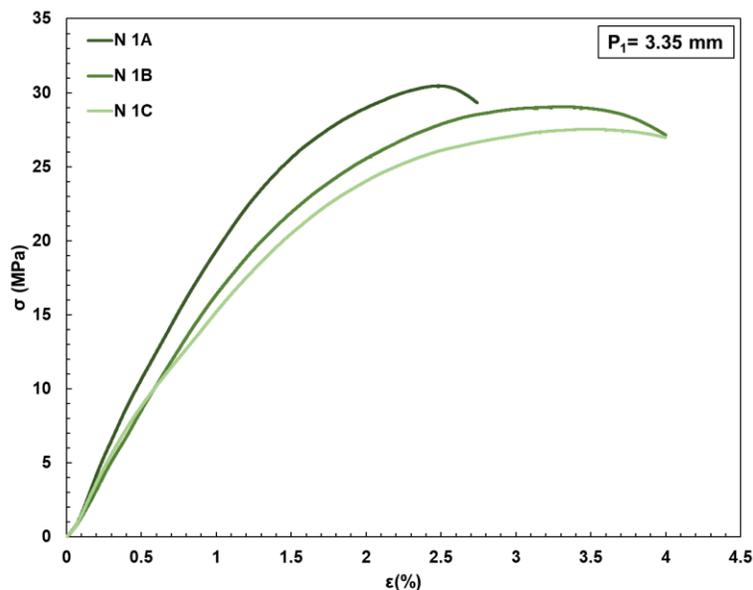


Figura 3.8. Diagrama esfuerzo-deformación de la espuma metálica de Al sin refuerzo con tamaño de poro de 3.35 mm (N 1), ensayando 3 muestras del mismo tipo.

Tabla 3.7. Propiedades mecánicas, módulo de elasticidad experimental y teórico de la espuma metálica de Al N1.

<b>Muestra</b>	<b>Esfuerzo máximo de flexión (MPa)</b>	<b>Módulo de cizalladura (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad Nielsen (MPa)</b>
<b>N 1<sub>A</sub></b>	30.45	6222	16592	12261
<b>N 1<sub>B</sub></b>	29.04	4538	12101	
<b>N 1<sub>C</sub></b>	27.50	4243	11315	

Los resultados obtenidos al ensayar la espuma metálica N2 sirvieron para construir las curvas esfuerzo-deformación de las tres muestras ensayadas, las cuales se presentan en la figura 3.9 destacando que la muestra N 2<sub>A</sub> posee un mayor porcentaje de deformación, así como un esfuerzo máximo de flexión con respecto a las muestras N 2<sub>B</sub> y N 2<sub>C</sub>. Al analizar la parte lineal de dicha curva, la cual corresponde a la zona elástica y con la cual se determina el módulo de elasticidad se observa una similitud entre las tres muestras; sin embargo, el valor de N 2<sub>A</sub> se asemeja más al valor teórico calculado mediante la ecuación de Nielsen, teniendo una discrepancia entre el valor experimental y el teórico de 66%, en el caso de N 2<sub>B</sub> y N 2<sub>C</sub> esta discrepancia es mucho mayor.

En la tabla 3.7 se muestran las propiedades mecánicas obtenidas para N 2, al comparar el esfuerzo máximo de flexión con respecto al del caso anterior N 1, se observa que N 1<sub>A</sub> aumentó 31.59%, N 1<sub>B</sub> aumentó 20.07% y N 1<sub>C</sub> aumentó 42.14%; en las tres muestras se observa que el esfuerzo máximo aumento significativamente generando una mayor resistencia ante esfuerzos combinados; sin embargo, ocurrió lo contrario con el módulo de cizalladura los cuales disminuyeron para este caso, N 1<sub>1</sub> mostró una disminución del 412%, N 1<sub>2</sub> 347% y finalmente N 1<sub>C</sub> disminuyó 410% esto se puede deber a los defectos presentes en las interconexiones de los poros, al tener mayor cantidad de esfuerzos internos es un punto para generar una falla en el material.

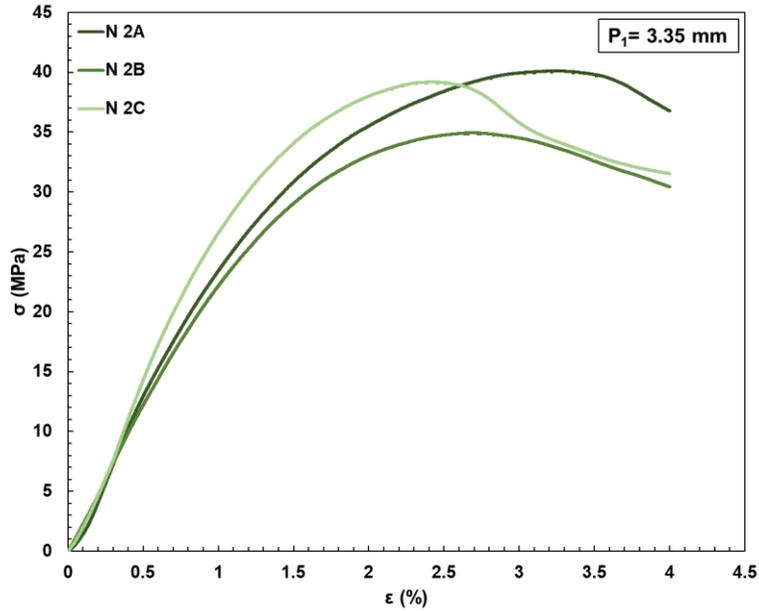


Figura 3.9. Diagrama esfuerzo-deformación de la espuma metálica de Al sin refuerzo (N 2) con tamaño de poro  $P_2$  sin refuerzo, ensayando 3 muestras del mismo tipo.

Tabla 3.7. Propiedades mecánicas, módulo de elasticidad experimental y teórico de la espuma metálica de Al sin refuerzo con tamaño de poro  $P_2$ .

<b>Muestra</b>	<b>Esfuerzo máximo de flexión (MPa)</b>	<b>Módulo de cizalladura (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad Nielsen (MPa)</b>
<b>N 2<sub>A</sub></b>	40.07	1214	3238	5383
<b>N 2<sub>B</sub></b>	34.87	1013	2701	
<b>N 2<sub>C</sub></b>	39.09	831	2215	

En general las propiedades de las espumas metálicas de aluminio dependen fundamentalmente de su densidad relativa, estructura de la forma de los poros y el área en la cual se distribuyen los esfuerzos. Dicho comportamiento se ve reflejado en los casos estudiados, para N 1 el módulo de cizalladura es mayor con respecto a N 2, el cual posee una mayor cantidad de segmentos de área de menor tamaño; es decir, existe una mayor cantidad de poros en un volumen unitario, aumentando la cantidad de interconexiones entre los poro los cuales se ven con longitud disminuida y forma irregular, debido a la morfología de los poros (acicularidad) tienen grandes puntos de concentración de esfuerzos, generando una disminución en el módulo de cizalladura además de afectar parcialmente la capacidad de amortiguamiento del material, pues se esperaría que dichas propiedades aumentarían al tener una mayor cantidad de interconexiones.

Al analizar la relación entre el tamaño de poro y el comportamiento mecánico de la espuma metálica de aluminio sin refuerzo, se encontró que el módulo elástico presenta variaciones durante la deformación elástica y alta sensibilidad a los defectos morfológicos en la estructura de la espuma metálica, mientras que la capacidad de deformación plástica está directamente asociada con la absorción de energía estática y dinámica [41] es decir, está asociada con la variación del tamaño de poro, habiéndose observado que el micromecanismo de deformación de las espumas de poro abierto es el colapso local de las interconexiones de los poros mostrando una variación en las propiedades. Los datos analizados y reportados en esta sección servirán para la evaluación de las PSA y PSA-K, evaluando el comportamiento del material óptimo.

### **3.4.3. Ensayo de flexión en tres puntos aplicado a las PSA para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ .**

En esta sección se analizan y comparan los resultados obtenidos de las PSA para los tamaños de poro  $P_1$  y  $P_2$ , las cuales se denotarán como PSA 1 y PSA 2, respectivamente, agregando los subíndices A, B, C para cada una de las muestras.

En la figura 3.10 se observa el gráfico esfuerzo-deformación obtenido en el ensayo de flexión en tres puntos al ensayar la PSA 1. A simple vista la muestra PSA 1<sub>B</sub> posee un mejor comportamiento mecánico con respecto a las muestras PSA 1<sub>A</sub> y PSA 1<sub>C</sub>, analizando la zona lineal correspondiente al módulo de elasticidad relacionando el esfuerzo y la deformación lineal. La recta de dicho gráfico indica la proporcionalidad entre ambas magnitudes, lo cual indica que la deformación aumenta proporcionalmente y este comportamiento obedece la ley de Hooke.

El límite elástico en las tres muestras analizadas sufre una drástica variación en ningún caso coinciden por tal motivo se decidió realizar un análisis de forma individual para cada muestra en lugar de un promedio ya que se alejaría considerablemente de la realidad. La PSA 1<sub>B</sub> posee el límite elástico más alto de las tres muestras, con un valor de 57.71 MPa, PSA 1<sub>A</sub> tiene un valor de 26.48 MPa y PSA 1<sub>C</sub> de 43.08 MPa, de igual forma se encuentra una discrepancia en el esfuerzo máximo de flexión siendo PSA 1<sub>B</sub> quien posee mejor respuesta antes los esfuerzos combinados a los que ha sido sometido el material y cuyo valor de esfuerzo máximo de flexión es igual a 91.43 MPa, PSA 1<sub>C</sub> se encuentra en medio del valor más alto y más bajo con 54.41 MPa, observando una discontinuidad en la zona plástica de la curva, lo que puede indicar que ocurrió alguna falla en la espuma de panel tipo sándwich y el comportamiento del material en conjunto ya es ilegible, en la PSA 1<sub>C</sub> el esfuerzo máximo de flexión que alcanzó es de 36.24 MPa siendo el menor de las tres muestras ensayadas, ocurriendo un comportamiento similar al de la curva anterior, mostrando un esfuerzo máximo y posterior a este ocurre un pequeño decaimiento continuando con un

comportamiento casi constante. Al analizar la zona plástica se observa que de igual forma las muestras se comportan de formas diferentes y habiendo un escaso porcentaje de deformación sobre todo en PSA 1<sub>C</sub>.

El comportamiento de las muestras se puede explicar ya que al ensayar las muestras ocurrieron fallos en las espumas metálicas de panel tipo sándwich, en algunos casos como el de PSA 1<sub>A</sub> y PSA 1<sub>C</sub> el adhesivo fallo como se muestra en la figura 2.19 y como se menciona en la parte experimental el ensayo se detuvo, ya que el comportamiento no representaría a la espuma metálica compuesta tipo sándwich sino a la espuma empleada como núcleo y no habría una coherencia en analizar dichos datos. Lo que indicaría que PSA 1<sub>B</sub> es quién representa el comportamiento mecánico de las PSA 1.

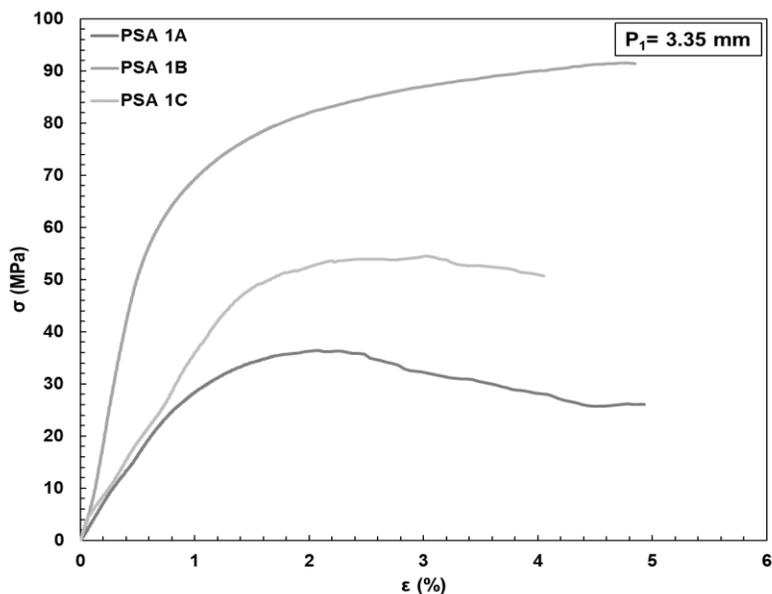
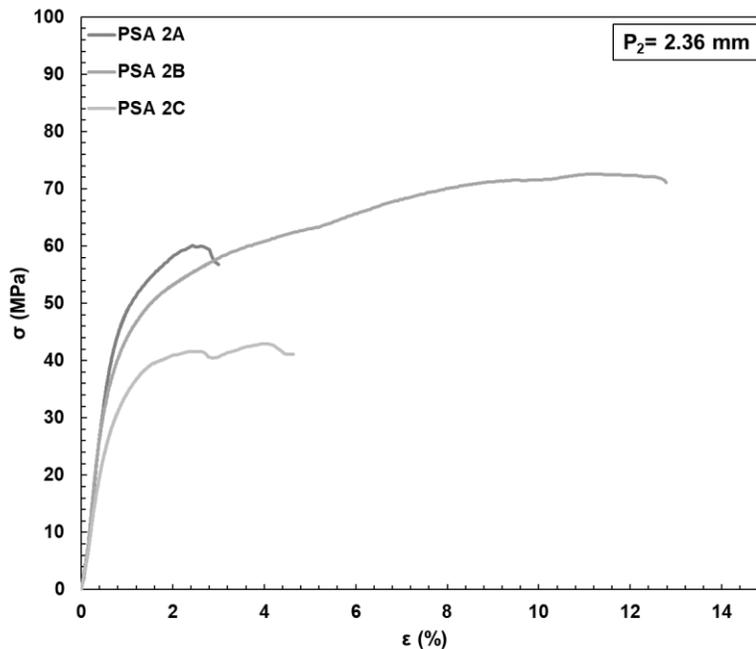


Figura 3.10. Diagrama esfuerzo-deformación de los PSA 1, ensayando 3 muestras del mismo tipo.

La figura 3.11 el diagrama que se muestra es el obtenido con los datos del ensayo de flexión en tres puntos para las PSA 2, de igual forma que en el caso anterior, se observa una discrepancia en los valores obtenidos de la curva esfuerzo-deformación. Analizando cada una de las muestras, PSA 2<sub>B</sub> presenta un comportamiento mecánico óptimo, lo cual se ve reflejado tanto en la zona elástica como en la zona plástica y el porcentaje de deformación; mientras, que PSA 2<sub>A</sub> y PSA 2<sub>C</sub> en la zona elástica muestran cierta similitud; sin embargo, no siguen este comportamiento en la zona plástica, lo cual indica que el esfuerzo aplicado con respecto al porcentaje de deformación no ocurre de manera proporcional y esto afecta al límite elástico, generando una disminución. En PSA 2<sub>A</sub> el límite elástico

es de 48.21 MPa, para PSA 2<sub>B</sub> es igual a 45.03 MPa y PSA 2<sub>C</sub> el valor es de 33.84 MPa de las tres muestras ensayadas PSA 2<sub>A</sub> es quien tiene el mayor límite elástico; sin embargo, al analizar la zona plástica es quien sufre menos deformación antes de la rotura del material alcanzando un esfuerzo máximo de flexión de 59.86 MPa, PSA 2<sub>B</sub> tuvo un mejor desempeño obteniendo un esfuerzo máximo 72.53 MPa y finalmente M3 tuvo una escasa resistencia a la flexión con apenas 42.92 MPa mostrando un comportamiento bastante interesante ya que en la gráfica se muestra la zona lineal, la zona de fluencia la cual tiene un ligero decaimiento y vuelve a subir el esfuerzo hasta llegar al esfuerzo máximo de flexión, finalmente llegando a la rotura, la ruta de este comportamiento muestra que el material tuvo una ligera recuperación antes de llegar al esfuerzo máximo mostrando la influencia de los materiales de refuerzo en las espumas metálicas de aluminio en paneles tipo sándwich.



*Figura 3.11. Diagrama esfuerzo-deformación de los PSA 2, ensayando 3 muestras del mismo tipo.*

En las figuras 3.10 y 3.11 se ve claramente la influencia del refuerzo en la espuma metálica compuesta tipo sándwich, si bien se evaluaron los adhesivos para escoger el óptimo y se preparó la superficie de adhesividad adecuadamente, no se estuvo exento de fallos a la hora del ensayo, los cuales afectaron los resultados obtenidos, fallos como el desprendimiento de la lámina generaron que el material no tuviera la respuesta esperada, factores como la porosidad superficial del material jugaron un papel muy importante ya que a mayor porcentaje de porosidad

hay menor superficie de contacto afectando la adhesión de la lámina de aluminio en la superficie de la espuma metálica, mostrando que el material con menor porcentaje de porosidad fue el óptimo.

El material de refuerzo cumplió con su objetivo aumentando la resistencia del material a los esfuerzos combinados, si bien la interconexión de la espuma metálica empleada como núcleo falló por esfuerzo cortante, la lámina de aluminio fue capaz de amortiguar la carga, dicho fenómeno se observa en la figura 3.12, donde la espuma falló justamente en la zona entre tensión (rodillo lateral izquierdo) y compresión (rodillo central). Si bien, los materiales de refuerzo ayudan a mejorar el comportamiento mecánico de los materiales, se deben considerar varios factores a la hora de la selección considerando la rigidez del material de refuerzo ya que si bien puede sumar a su comportamiento mecánico, de igual forma puede restar.



*Figura 3.12. Falla por cizalladura en el ensayo de flexión en tres puntos aplicado en el PSA 2.*

#### **3.4.4. Ensayo de flexión en tres puntos aplicado a los PSA-K para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ .**

Esta sección analiza los datos obtenidos en el ensayo de flexión en tres puntos para los PSA-K, realizando un análisis del efecto que tiene la adición del refuerzo de Kevlar sobre las propiedades mecánicas de dicho material con respecto a los tamaños de poros empleados  $P_1$  y  $P_2$ , denotándolos como PSA-K 1 y PSA-K 2, respectivamente. Al igual que en los casos anteriores las muestras se representaron con los subíndices A, B y C.

La figura 3.13 muestra el diagrama esfuerzo-deformación obtenido del ensayo de flexión sobre PSA-K 1, donde PSA-K 1<sub>A</sub> y PSA-K 1<sub>B</sub> poseen un comportamiento similar en la parte lineal del diagrama; sin embargo, comienza a haber una discrepancia a partir del límite elástico el valor para PSA-K 1<sub>A</sub> es de 41.11 MPa, para PSA-K 1<sub>B</sub> es de 40.18 MPa cuyos límites son bastantes cercanos entre sí, mientras que para PSA-K 1<sub>C</sub> su límite elástico es de 75.72 MPa. Siguiendo con el

análisis, PSA-K 1<sub>C</sub> muestra el menor porcentaje de deformación, pero el mayor esfuerzo a la flexión con un valor de 87.63 MPa, PSA-K 1<sub>B</sub> muestra un porcentaje de deformación medio entre PSA-K 1<sub>A</sub> y PSA-K 1<sub>C</sub> con el menor esfuerzo de flexión el cual es igual a 47.10 MPa, mientras que PSA-K 1<sub>A</sub> tiene el mayor porcentaje de deformación, pero el esfuerzo de flexión medio entre PSA-K 1<sub>B</sub> y PSA-K 1<sub>C</sub> con 60.06 MPa.

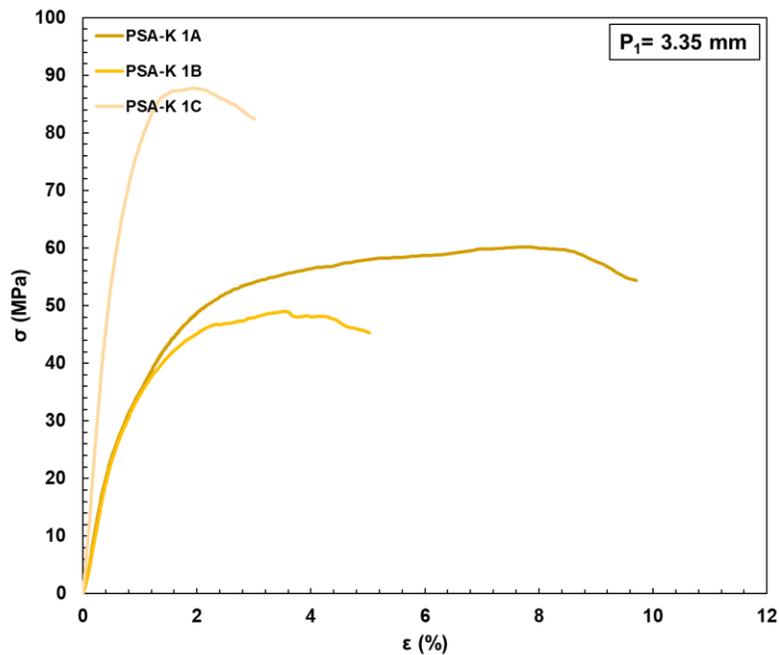


Figura 3.13. Diagrama esfuerzo-deformación de los PSA-K 1, ensayando 3 muestras del mismo tipo.

En la figura 3.14 se muestran los resultados obtenidos de los PSA-K 2, las tres muestras discrepan en la parte lineal de la curva esfuerzo deformación, aunque PSA-K 2<sub>B</sub> y PSA-K 2<sub>C</sub> muestran una pequeña intersección los valores de la pendiente, los valores obtenidos indican que la carga aplicada es proporcional con respecto a la deformación. Los límites de elasticidad obtenidos son, para PSA-K 2<sub>A</sub> es de 52.19 MPa, el de PSA-K 2<sub>B</sub> es de 47.27 MPa y finalmente el de PSA-K 2<sub>C</sub> es de 39.10 MPa; en cuanto a los esfuerzos máximos de flexión, el de PSA-K 2<sub>A</sub> es de 73.14 MPa, PSA-K 2<sub>B</sub> con 68.87 MPa y PSA-K 2<sub>C</sub> 48.29 MPa, siendo este último el más bajo y con el menor desempeño ya que el porcentaje de deformación que presenta es el menor.

Al comparar las propiedades mecánicas de PSA-K 1 y PSA-K 2 se encuentra que en PSA-K 2 hubo un aumento del límite elástico del 17.64% al 26.95%, otra propiedad que también mejoro fue el esfuerzo máximo de flexión con un aumento

entre el 0.36% y el 21.77 %. En ambos casos se descartó la muestra C ya que los valores obtenidos no son representativos.

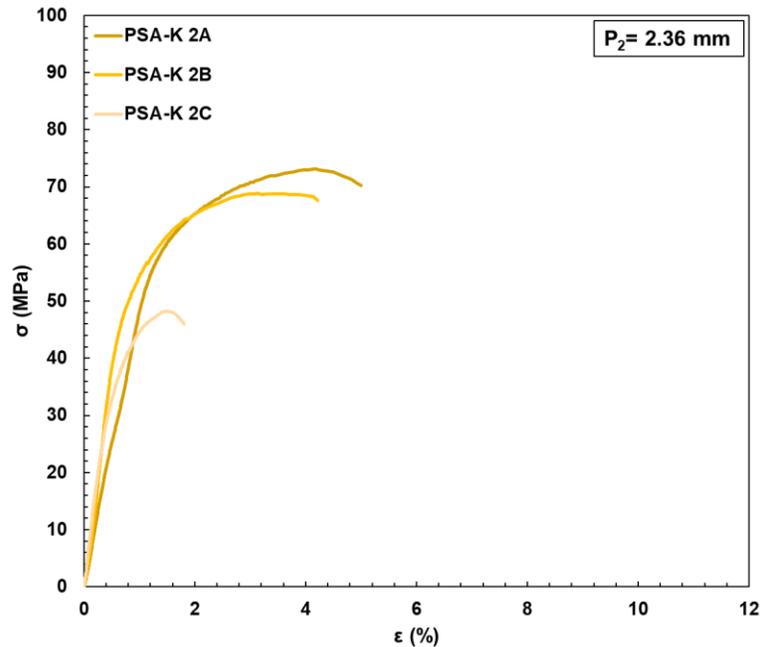


Figura 3.14. Diagrama esfuerzo-deformación de los PSA-K 2, ensayando 3 muestras del mismo tipo.

Las probetas ensayadas de PSA-K 1 no sufrieron un desprendimiento del material de refuerzo como se muestra en la figura 3.15 a; sin embargo, las probetas de PSA-K 2 mostraron un desprendimiento del material de refuerzo, pero el núcleo sufrió una menor deformación y no se observan indicios de fractura como se muestra en la figura 3.15 b, por lo que al añadirle un material de refuerzo más flexible ayudo al amortiguamiento de la espuma metálica de panel tipo sándwich, generando una respuesta positiva en cuanto al esfuerzo máximo de flexión. El comportamiento de las muestras ensayadas varia considerablemente entre sí; no obstante, se ve un ligero aumento en las propiedades mecánicas con respecto a los PSA.

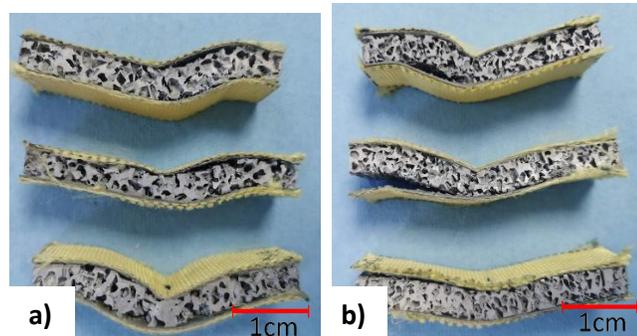


Figura 3.15. Falla por cizalladura en el ensayo de flexión en tres puntos aplicado en los PSA-K 1 y PSA-K 2.

### 3.4.5. Ensayo de flexión en tres puntos comparando las propiedades mecánicas de los núcleos con los PSA y PSA-K para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ .

En este apartado se realiza un análisis de los resultados del ensayo de flexión en tres puntos, comparando el comportamiento de los núcleos con los PSA y los PSA-K, el objetivo principal es estudiar cada caso y ver la influencia del material de refuerzo en las propiedades mecánicas, los datos que se presentan fueron segmentados en grupos, todas las muestras A con el mismo tamaño de poro se compararon, siguiendo este proceso para las muestras B y C. Esto se realizó con la finalidad de visualizar de una forma más sencilla los comparativos sin saturar los gráficos.

La figura 3.16 a, muestra el diagrama obtenido del ensayo de flexión en tres puntos de las muestras N 1<sub>A</sub>, PSA 1<sub>A</sub> y PSA-K 1<sub>A</sub>, mientras que la figura 3.16 b se pueden observar las muestras N 2<sub>A</sub>, PSA 2<sub>A</sub> y PSA-K 2<sub>A</sub>. Al analizar el comportamiento de cada uno de los materiales ensayados, destaca el PSA-K en ambos casos, ya que la curva esfuerzo-deformación tiene una zona elástica bastante prolongada al igual que la zona plástica, siendo esta muestra la que posee un mayor porcentaje de deformación, así como un esfuerzo máximo de flexión; sin embargo, para PSA-K 2<sub>A</sub> el porcentaje de deformación es menor, esto se puede deber a que el núcleo posee un módulo de elasticidad menor, afectando el comportamiento de la espuma metálica de panel tipo sándwich.

En cuanto a las propiedades mecánicas que se observan en la figura 3.17 a y b, se puede notar que el módulo de cizalladura de N 2 es menor y que el refuerzo que posee mayores propiedades es el de lámina de Al y Kevlar en ambos casos, en el anexo 2 se pueden observar las tablas que explican esta tendencia y de las cuales provienen los gráficos de barras. En este caso el material de refuerzo marcó una contribución significativa, aumentando las propiedades mecánicas de N2 a tal grado que es el material que más destaca y cuyas propiedades mecánicas reafirman la hipótesis que se planteó al inicio de este trabajo.

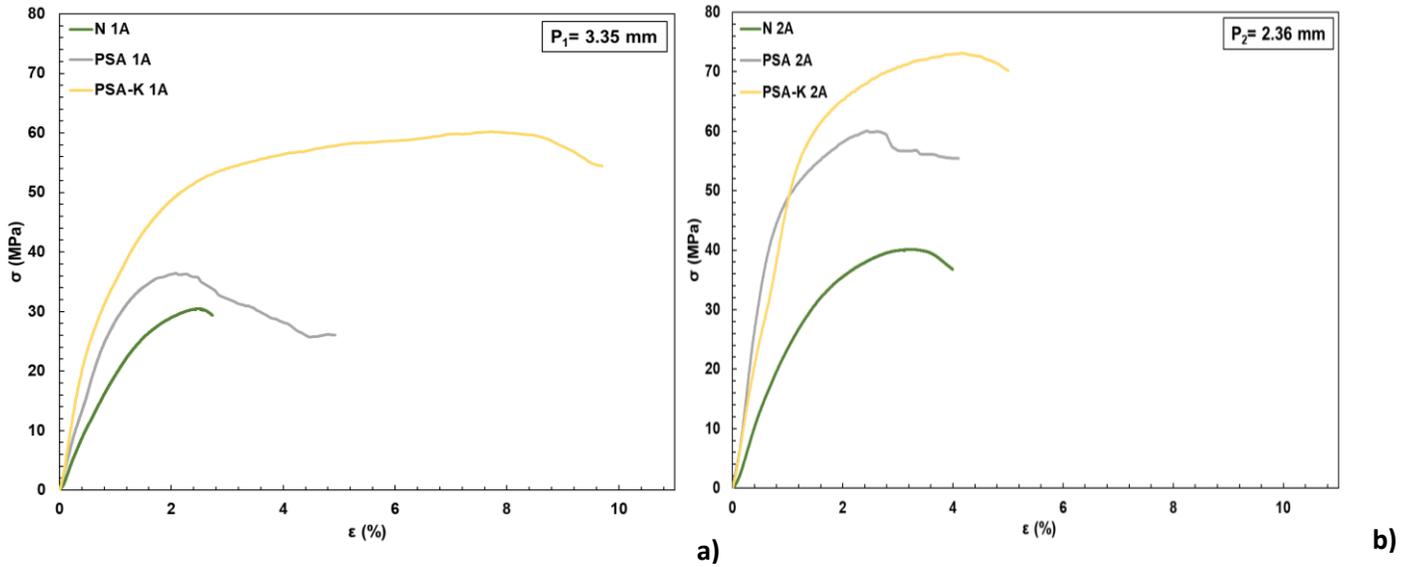


Figura 3.16. Diagrama esfuerzo-deformación comparativo de las muestras A, a) tamaño de poro  $P_1$ , b) tamaño de poro  $P_2$ .

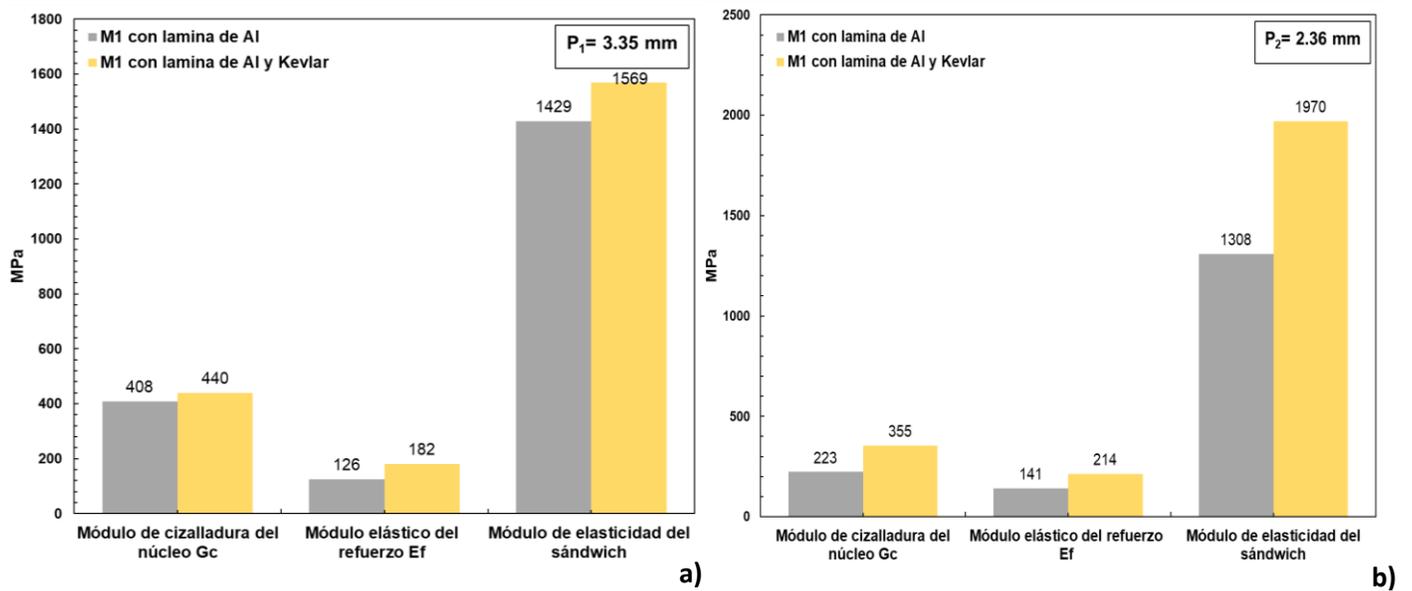


Figura 3.17. Gráfico de las propiedades mecánicas de las muestras A de los PSA y PSA-K, a) tamaño de poro  $P_1$ , b) tamaño de poro  $P_2$ .

En la figura 3.18 a, se observa que el comportamiento mecánico de las muestras  $1_B$ , siendo PSA  $1_B$  quién destaca debido a que tiene el mejor comportamiento mecánico con respecto a N  $1_B$  y PSA-K  $1_B$ , esta última posee menores propiedades comparando con el caso anterior, al analizar la muestra se encontró que la capa de adhesivo era más gruesa y migro hacia el interior de los poros que hacen contacto con el refuerzo, lo cual pudo haber influido, debido a que el

material tuvo dos aportes, uno como medio de adhesión y otro como refuerzo; es decir, al ser un material con baja viscosidad este entro en los poros del núcleo cercanos a la superficie, recubriendo las interconexiones y rellenando parcialmente los poros, al ser un material de origen polimérico sus propiedades se sumaron a las del refuerzo, por ello es de suma importancia controlar la cantidad de adhesivo depositado, así como la distribución del mismo. Las propiedades mecánicas obtenidas reafirman la hipótesis anterior, ya que PSA 1<sub>B</sub> tiene un mayor módulo elástico del refuerzo como se observa en el gráfico de la figura 3.19, el cual solo estaba conformado con lamina de Al y adhesivo, el módulo de elasticidad para el refuerzo presenta valores similares, manteniendo el módulo de cizalladura del núcleo casi constante; así mismo, la contribución de estas propiedades se refleja en el módulo de elasticidad del sándwich y en el esfuerzo máximo de flexión.

En el caso de la figura 3.18 b, el comportamiento de PSA-K 2<sub>B</sub> sigue la misma tendencia de PSA-K 1<sub>A</sub> y PSA-K 2<sub>A</sub>, teniendo un crecimiento del 25% con respecto a PSA-K 1<sub>B</sub>. Al analizar estas muestras se puede decir que se encontró la tendencia esperada, independientemente del tamaño de poro las propiedades mecánicas de los PSA-K aumentan con respecto a los PSA; sin embargo, las propiedades mecánicas de PSA-K 2 son mayores con respecto a los PSA-K 1.

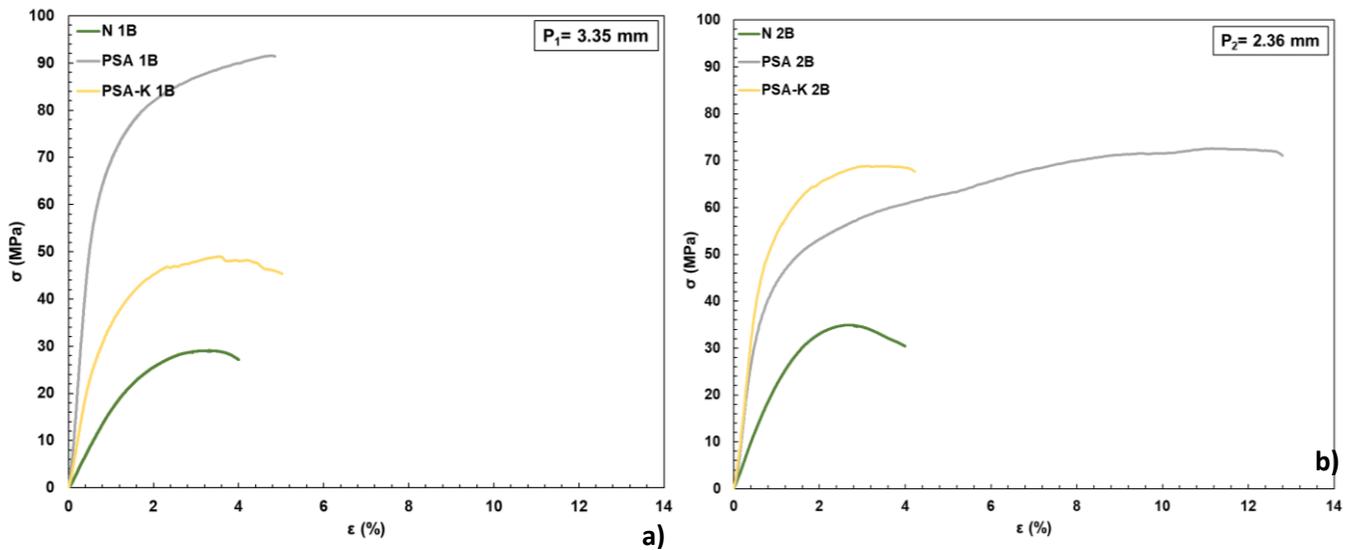


Figura 3.18. Diagrama esfuerzo-deformación comparativo de las muestras B a) tamaño de poro  $P_1$ , b) tamaño de poro  $P_2$ .

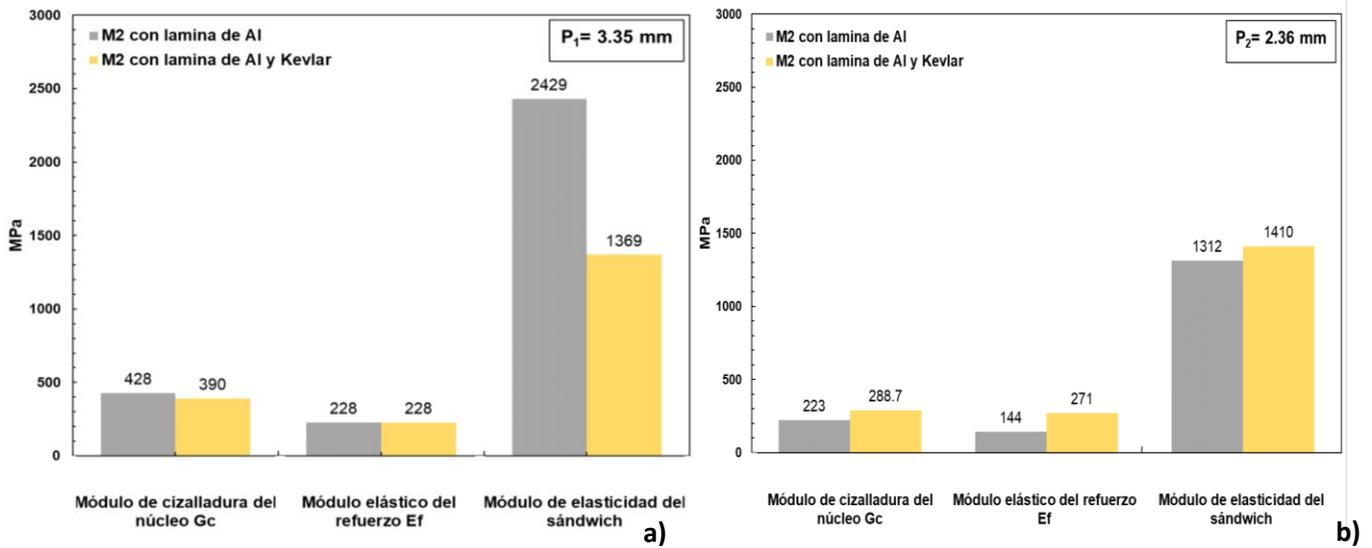


Figura 3.19. Gráfico de las propiedades mecánicas de las muestras B de los PSA y PSA-K, a) tamaño de poro  $P_1$ , b) tamaño de poro  $P_2$ .

En la figura 3.20 se muestra el comparativo del comportamiento mecánico de las muestras C con tamaño  $P_1$  y  $P_2$ , al analizar PSA-K 2<sub>c</sub> muestra un comportamiento disminuido, con respecto a los casos anteriores de las muestras PSA-K, el comportamiento de PSA 1<sub>c</sub> y PSA 2<sub>c</sub> es similar, sin importar el tamaño de poro. Las propiedades mecánicas mostradas en la figura 3.21 son semejantes con las obtenidas anteriormente, no hay variación significativa con respecto a las muestras anteriores.

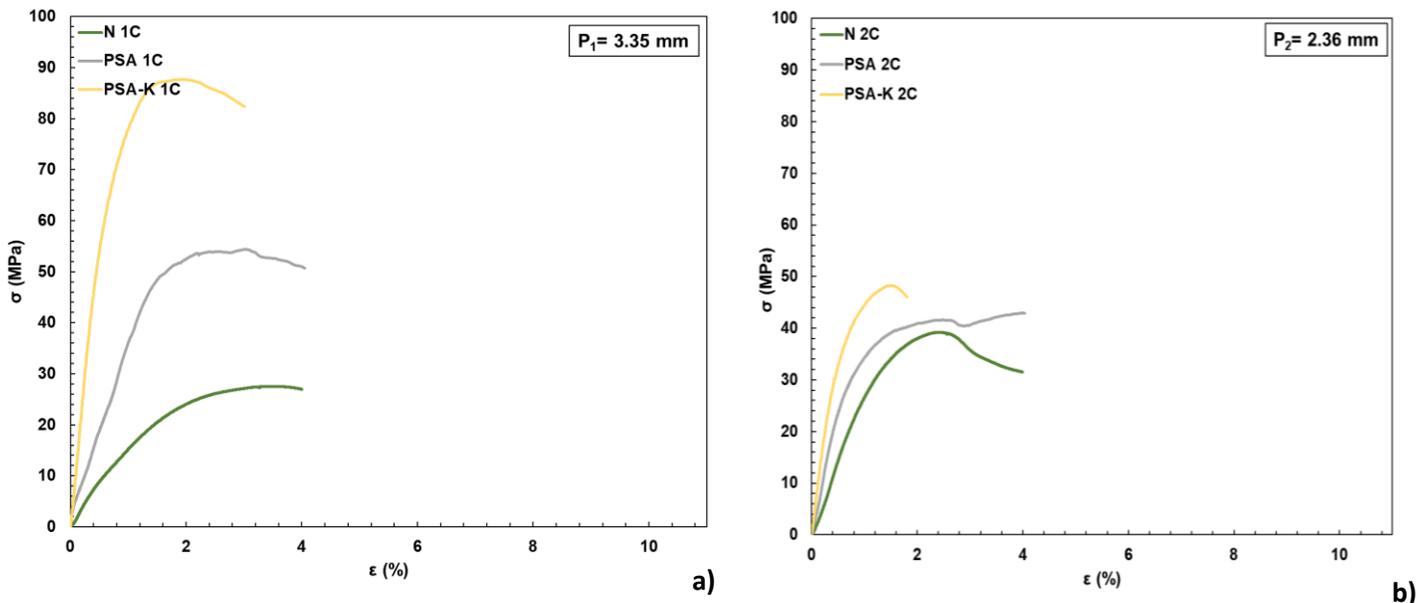


Figura 3.20. Diagrama esfuerzo-deformación comparativo de las muestras C, a) tamaño de poro  $P_1$ , b) tamaño de poro  $P_2$ .

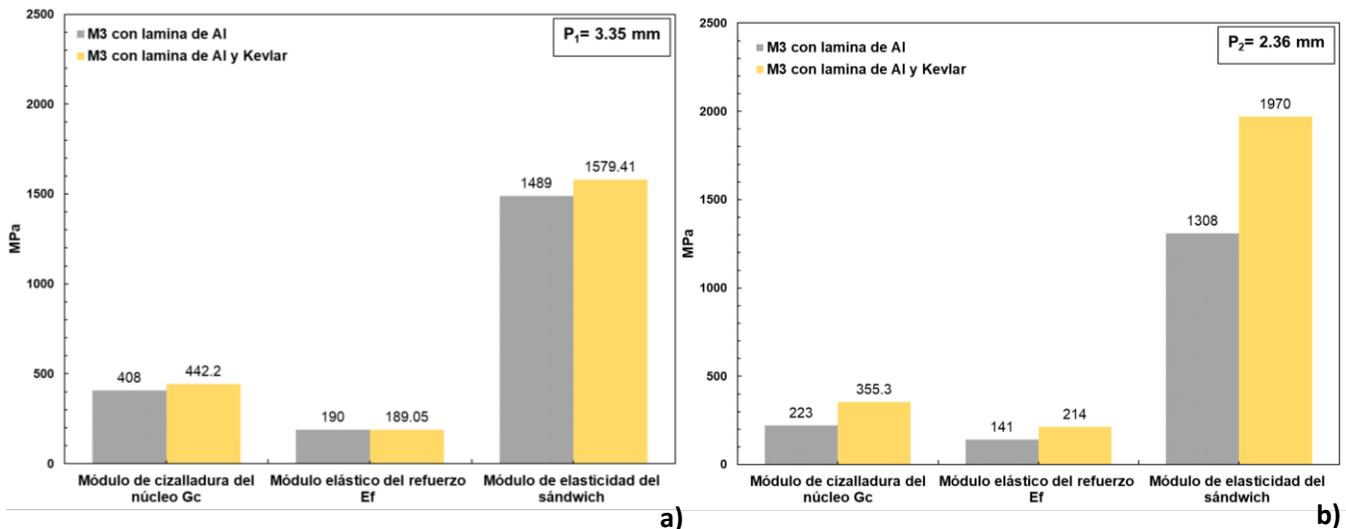


Figura 3.21. Gráfico de las propiedades mecánicas de las muestras C de los PSA y PSA-K, a) tamaño de poro  $P_1$ , b) tamaño de poro  $P_2$ .

En general dos de las tres muestras indican que la adición de Kevlar conlleva a efectos positivos en el comportamiento mecánico de la espuma metálica compuesta con tamaño de poro  $P_1$ , caso similar ocurre para  $P_2$  donde las muestras mejoraron su comportamiento ante este refuerzo. En ambos casos las muestras ensayadas confirman esta tendencia, “a menor tamaño de poro las propiedades mecánicas aumentan”, ya que el comportamiento promedio arroja que las espumas metálicas con tamaño de poro  $P_2$  poseen un mayor esfuerzo máximo de flexión promedio y un porcentaje de deformación mayor el cual puede ser debido a la cantidad de interconexiones y área de estos, permitiendo una mayor deformación. El comportamiento de PSA 1 y PSA 2 es similar en cuanto al esfuerzo máximo de flexión y porcentaje de deformación, aumentando el comportamiento mecánico de N1 y N2, la diferencia se le atribuye a las propiedades mecánicas del refuerzo, ya que aumenta propiedades como fluencia, resistencia mecánica, elasticidad y plasticidad, etc., al ser materiales compuestos cada una de sus refuerzos tiene propiedades diferentes que al unirlos proveen a los paneles tipo sándwich características específicas dependiendo de la naturaleza de este.

### 3.5. Ensayo de impacto tipo Charpy aplicado a PSA y PSA-K para los tamaños de $P_1$ y $P_2$ .

En esta sección se analiza el comportamiento de los PSA y PSA-K, siendo estos últimos quienes han destacado en cuanto a su comportamiento mecánico para el tamaño de poro  $P_2$ . Se ha encontrado que las espumas de aluminio presentan alta eficiencia absorbiendo energía dinámica, ya que su velocidad de deformación es casi constante para un amplio rango de velocidades de aplicación de carga [42].

Los ensayos de alta velocidad de deformación se pueden realizar mediante la caída de pesos, impacto con barra Hopkinson o mediante ensayos balísticos; sin embargo, en este caso se empleó el ensayo tipo Charpy cuya finalidad es analizar la respuesta del material ante una deformación de alta velocidad.

La tabla 3.8 muestra los resultados obtenidos del ensayo tipo Charpy, se aprecia que la energía absorbida de los PSA-K por unidad de área para el tamaño de poro  $P_1$ , es de casi el doble incrementando un 75% con respecto a los PSA. En el caso del tamaño de poro  $P_2$  la tendencia es la misma, exceptuando M2 ya que está por debajo de los rangos, la energía absorbida promedio de las muestras PSA-K es 26% mayor con respecto a las muestras de los PSA, en este caso al ser un ensayo a altas velocidades influye como se disipa la energía en el material, la lámina de aluminio es capaz de disipar la energía de manera más rápida y homogénea a lo largo de su superficie al tener una baja rugosidad, en el caso del Kevlar a ser una fibra entre cruzada la disipación ocurre de manera más lenta y dispersa por lo que el amortiguamiento a altas velocidades es mayor. Otro factor de suma importancia es la superficie de de las interconexiones ya que es el área de impacto propia de la espuma metálica, al tener un área mayor, la energía absorbida se disipará en cantidades más pequeñas y en diferentes direcciones donde se debe considerar la forma y tamaño de poro (anisotropía del material).

Durante el impacto los poros se colapsan y actúan de amortiguador, disipando la energía de choque [43]. En los ensayos de choque la deformación produce una onda plana de tamaño similar al tamaño del poro donde la espuma se fragmenta en pequeñas partículas rompiendo las interconexiones [44].

*Tabla 3.8. Resultados del ensayo de impacto tipo Charpy aplicado a los PSA y PSA-K, con tamaño de poro  $P_1$  y  $P_2$ .*

Tamaño de poro (mm)	Tipo de refuerzo de la espuma metálica compuesta	Muestras	Área (mm <sup>2</sup> )	Energía absorbida J	Energía absorbida J/mm <sup>2</sup>
<b><math>P_1</math></b> <b>3.35</b>	PSA	1	<b>668.73</b>	<b>28.87</b>	<b>0.0431</b>
		2	<b>681.21</b>	<b>41.38</b>	<b>0.0607</b>
		3	<b>684.86</b>	<b>23.92</b>	<b>0.0349</b>
	PSA-K	1	670.81	68.98	0.1028
		2	676.52	48.98	0.0710
		3	652.53	44.28	0.0689
<b><math>P_2</math></b> <b>2.36</b>	PSA	1	<b>657.92</b>	<b>44.28</b>	<b>0.0673</b>
		2	<b>677.04</b>	<b>34.42</b>	<b>0.0508</b>
		3	<b>654.33</b>	<b>45.96</b>	<b>0.0702</b>

	PSA-K	1	681.73	66.09	0.0969
		2	680.16	21.67	0.0318*
		3	695.37	54.67	0.0786

Las figuras 3.22 y 3.23 buscan encontrar una relación entre la resiliencia y el módulo de elasticidad, lo esperado sería tener valores similares del módulo de elasticidad para las 3 muestras y un aumento en la resiliencia el cual coincidiera en los tres puntos. Al analizar la figura 3.22 correspondiente al tamaño  $P_1$  se encuentran que dos de los tres valores obtenidos presentan una discrepancia significativa tanto en el módulo de elasticidad como en la resiliencia, aunado a esto el error crece entre estos, al ser tres muestras se descartan aquellas que están más alejadas entre los valores medios, encontrando que hay un incremento tanto en el módulo de elasticidad como en la resiliencia para los PSA-K, la cual se podría decir que es directamente proporcional, dicha tendencia se repite para el tamaño  $P_2$  donde el comportamiento se ve de forma más clara, lo ideal es que los valores de las tres muestras coincidan para que el error tienda a cero, similar al caso de los PSA con tamaño de poro  $P_2$  que se muestra en la figura 3.23.

Los resultados del ensayo de impacto tipo Charpy indican que el tamaño de poro  $P_2$  de los PSA-K es el óptimo para deformaciones a alta velocidad debido a que el amortiguamiento es mayor, el factor estructural que se toma en cuenta para este comportamiento es la redondez del poro, área y longitud de las interconexiones, encontrando que a menor longitud el amortiguamiento mecánico es mayor.

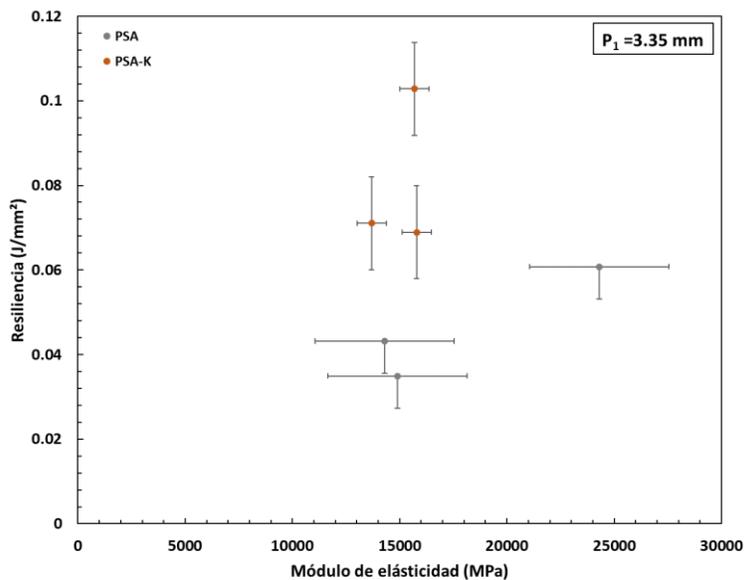


Figura 3.22. Energía absorbida Vs módulo de elasticidad para el tamaño de poro  $P_1$ .

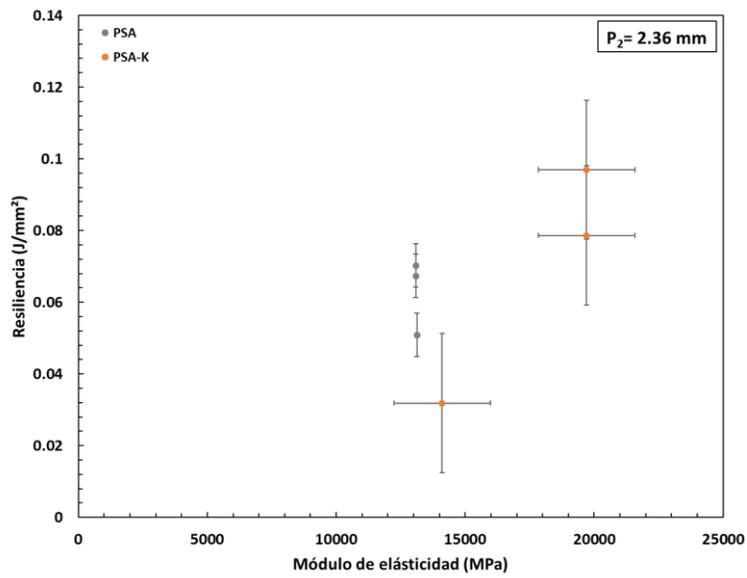


Figura 3.23. Energía absorbida Vs módulo de elasticidad para el tamaño de poro  $P_2$ .

## CONCLUSIONES

---

- Se fabricaron espumas metálicas de aluminio de poro abierto con alta calidad, aplicando una variante del método de infiltración, asegurando la reproducibilidad de las espumas metálicas de aluminio para tamaños de poro de hasta 2.36 mm.
- Los parámetros estructurales que influyen en el comportamiento mecánico de los núcleos que conforman a los PSA y PSA-K son el tamaño y forma de los poros, así como el área y la cantidad de interconexiones.
- El adhesivo base metacrilato fue el óptimo debido a sus propiedades mecánicas, ya que su esfuerzo cortante promedio fue 153% mayor con respecto al adhesivo que presentó el esfuerzo cortante promedio más bajo, por tal motivo se empleó para la fabricación de los PSA y PSA-K.
- El comportamiento mecánico del núcleo N1 muestra que su módulo de cizalladura es 389% mayor con respecto a N2, mientras que N2 muestra un esfuerzo máximo de flexión 31.26% mayor con respecto a N1.
- Los PSA-K tuvieron un mejor comportamiento mecánico al estar sometidos a esfuerzos combinados y energía de absorción a altas velocidades, con respecto a los PSA.
- Los PSA-K con tamaño de poro P2, tuvieron un mejor comportamiento mecánico con respecto a los PSA-K con tamaño de poro P1 al estar sometidos a esfuerzos combinados y energía de absorción a altas velocidades.

## REFERENCIAS

---

- [1] Molina-Ramírez, O.D., “Caracterización Microestructural y Mecánica de Espumas Metálicas de Aluminio Fabricadas por un Nuevo Proceso de Infiltración”, 2015. UNAM, P.p. 8-38
- [2] B. Sosnick, Patente EE. UU. No. 2,434,775, 1948.
- [3] W.O. Soboyejo y T.S. Srivatsan, “Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization, and Applications”, Ed. CRC Press, New Jersey, EE. UU., 2007. Pp. 103-120.
- [4] Azamar, M.F. “Estudio de la permeabilidad a altas presiones de espumas de aluminio”. 2019, UNAM. P.p. 4-17, 22-28.
- [5] M.A. Suárez, I.A. Figueroa, G. González, G.A. Lara-Rodríguez, O. Novelo-Peralta, I.Alfonso, I.J.Calvo, “Production of Al-Cu metallic foams without foaming agents or space holders, Journal of alloys and compounds”, Vol. 585, 2014. P.p. 318-324.
- [6] J.O. Osorio-Hernández, M.A. Suarez, R. Goodall, G.A. Lara-Rodriguez, I. Alonso, I.A. Figueroa, “Manufacturing of open-cel Mg foams by replication process and mechanical properties, Materials and design”, Vol. 64, 2014. P.P 136-141.
- [7] G.A. Lara-Rodríguez, I.A. Figueroa, M.A. Suarez, O. Novelo-Peralta, I.Alonso, R. Goodall, “A replication-casting device for manufacturing open-cell Mg foams, Revista de tecnología de procesamiento de materiales”, Vol. 243, 2017. P.p. 15-22.
- [8] S. K. Lascano, “Obtención y caracterización de Ti c.p. poroso para aplicaciones biomédicas”. Universidad del norte, 2012. P.p. 180-183.
- [9] J. M. Malavia Otero, “Caracterización de paneles sándwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio”. Master, Universidad politécnica de Valencia, 2017. P.p. 13-30.
- [10] Gutiérrez-Vázquez, J.A. y Oñoro, J., “Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones”. Revista de Metalurgia, 2008. 44(5). P.p. 457-476.
- [11] Banhart, J. “Manufacturing Routes for Metallic Foams”. JOM, 2000. 52(12). P.p. 22-27.
- [12] Anónimo “Fabricación, propiedades y aplicaciones”. Revista de Metalurgia, 2008, P.p.459.
- [13] Gutiérrez-Vázquez, J.A. y Oñoro, J. “Espumas de aluminio”. Memorias del XI Congreso Internacional Anual SOMIM, IV Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica, Morelia, México, 2005. P.p. 1-6
- [14] Selcuck, C., Bond S. y Woolin P. Jonining, “Processes for Powder Metallurgy Parts: a Review”, Powder Metallurgy, 2010. 53(1). P.p. 7-11.

- [15] Dukhan, N., "Metal Foams. Fundamentals and Applications". DEStech Publications, 2013. P.p. 1-27, 363-377.
- [16] D. Stauffer y A. Aharony, Introduction to Percolation Theory, 2<sup>nd</sup> ed., Taylor & Francis, 1992. P.p. 181-194.
- [17] Peroni, P., Avallè, M. y Peroni, M., "The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions". International Journal of Impact Engineering, 2008. 35. P.p. 644-658.
- [18] Gibson, L.J., "Mechanical Behaviour of Metallic Foams", Annu. Rev. Mater. Sci. 2000. (30). P.p. 191-227.
- [19] Arbabi, S. y Sahimi, M. Phys. Rev. Lett. 65, 1990. P.p. 725-733.
- [20] K. Chou y M.A. Song, Scr. Mater. 46 (2002) 379-382.
- [21] Romero, M.L., "Estudio del comportamiento estructural de paneles sándwich empleados en el carenado de aviones comerciales". Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, 2010. P.p. 10-18
- [22] Banhart, J. y Seeliger H.W. "Aluminium Foam Sandwich Panels: Metallurgy", Manufacture and Applications. Advanced Engineering Materials, 2008. P.p. 3-6.
- [23] G.A. Lara-Rodríguez, I.A. Figueroa, M.A. Suarez, O. Novelo-Peralta, I. Alonso, R. Goodall, "A replication-casting device for manufacturing open-cell Mg foams", Revista de tecnología de procesamiento de materiales, Vol. 243, 2017. P.p. 17.
- [24] Qingxian, H., Sawei, Q., y Yuebo, H., "Development on Preparation Technology of Aluminum Foam Sandwich Panels". Rare Metal Materials and Engineering, 2015. 44(3), P.p. 548–552.
- [25] Wang, N., Chen, X., Li, A., Li, Y., Zhang H. y Liu, Y. "Three-point bending performance of a new aluminium foam composite structure", Transactions of Nonferrous Metals Society of China. China, 26, 2016. P.p. 359-368.
- [26] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson y H.G.N. Wadley, "Metal Foams: a design guide, Butterworth-Heinemann", Oxford, Inglaterra, 2000. P.p. 263-278.
- [27] F. Simancik, H. P. Degischer y H. Wörz, "Foamed Aluminium- Light Structural and Insulation Material", Euromat, Venice/Padua, Italia, Assoziacione Italiana di Metallurgica, Milan, Italia, 1995. P.p.191-196
- [28] W. Pabst and E. Gregorová, "New relation for the porosity dependence of the effective tensile modulus of brittle materials," Journal of Materials Science, vol. 39, 2004. P.p. 3501.
- [29] D.D. Radford, V.S. Deshpande y N.A. Fleck, Int. J. Impact Eng. 31, 2005. Pp.152-171.
- [30] Romero, M.L. "Estudio del comportamiento estructural de paneles sándwich empleados en el carenado de aviones comerciales". Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, 2010. P.p. 21-48.

- [31] ASTM International, E 11-17 “Standard Specification For Woven Wire Test Sieve Cloth And Test Sieves, ASTM International”, 1997.
- [32] Azamar, M.F. “Estudio de la permeabilidad a altas presiones de espumas de aluminio”. 2019, UNAM. P.p. 4-17, P.p.30-40.
- [33] ASTM International, D 4896, “Use of adhesive-bonded single lap-joint specimen test results”, ASTM International, 1997.
- [34] UNE-EN ISO 1465, “Adhesivos. Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas pegadas de substratos rígidos”, 1996.
- [35] ASTM International, D2990, “Tensile compressive and flexural creep and creep-rupture of plastics”, ASTM International. Estados Unidos, 1996.
- [36] L.F. Nielsen. “Elasticity and damping of porous materials and impregnated”. J. Am. Ceram. 1983. Soc. 67 93–98.
- [37] S. K. Lascano, “Obtención y caracterización de Ti c.p. poroso para aplicaciones biomédicas”. Universidad del norte 2012. P.p. 218-241.
- [38] J. M. Malavia Otero, “Caracterización de paneles sándwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio”. Master, Universidad politécnica de Valencia, 2017.
- [39] <https://www.matweb.com/>
- [40] ASTM International, ASMT E 23, “Notched bar impact testing of metallic materials”, 1998.
- [41] Y. Torres, J.J. Pavón, J.A. Rodríguez. “Processing and characterization of porous titanium for implants by using NaCl as space holder”, Journal of Materials Processing Technology 212, 2012. P.p. 1061-1069
- [42] H.W. Seeliger, “Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams”, Banhart J. Eifert H. (Eds.), MIT Press-Verlag Stanton, EE. UU., Bremen, Alemania, 1997. P.p. 79-95.
- [43] K. Zhu, et al., "Measurement of the dynamic Young's modulus of porous titanium and Ti6Al4V," Journal of Materials Science, vol. 42, 2007. P.p. 7348-7353.
- [44] MIL STD 401B., “Sandwich Constructions and Core Materials”; General Test Methods. USA 1997.
- [45] J.K Paika, A.K. Thayamballib, G.S. Kima, “The strength characteristics of aluminium honeycomb sandwich panels”, Thin-Walled Structures 35, 1999. P.p. 205–231
- [46] Donald V. Rosato, David P. DiMattia, Dominick V. Rosato, “Designing with plastics and composites”, Van Nostrand Reinhold, New York 1991.
- [47] Shackelford, James F. (2006), “Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros”, México, 6ª Ed., Editorial Pentice-Hall, 2006.

- [48] Nammi S.K., Myler P. y Edwards G., "Finite element analysis of closed cell aluminium foam under quasi-static loading". Mater Des. 2003 (2). P.p. 712-722.
- [49] F. París, J. Cañas, J.C. Marín, A. Barroso, "Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos", 2008.
- [50] ASHBY, M. F. Metal Foams - A Design Guide, 2000.
- [51] J. M. Malavia Otero., "Caracterización de paneles sándwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio". Master, Universidad politécnica de Valencia, 2007.
- [52] T. Imwinkelried, "Mechanical properties of open-pore titanium foam," Journal of Biomedical Materials Research-Part A, vol. 81, 2007. P.p. 964-970.
- [53] S. Hyun, et al., "Anisotropic mechanical properties pf porous copper fabricated by unidirectional solidification," Materials Science and Engineering: A, vol. 299, 2001. Pp. 241-248.
- [54] R. Haynes, "Effect of porosity content on the tensile strength of porous materials," Powder Metallurgy, vol. 14, 1971. P.p. 64-70, 1971.
- [55] <http://www.cymat.com> (18 de Julio 2007).
- [56] J. Banhart, M. F. Ashby y N. A. Fleck (Eds.), Proc. MetFoam 2001, International Conf. Cellular Metals and Metal Foaming Technology, MIT-Verlag, Bremen, Alemania, 2001. P.p. 18-20
- [57] FUNDACIÓN OPTI, Vigilancia Tecnológica 17, 2004. P.p. 8-9.
- [58] I. Jeon y T. Asahina, Acta Mater. 53 2005. P.p. 3.415-3.423.
- [59] E. Markaki y T.W. Clyne, Mater. Sci. Eng. A323, 2002. P.p.260-269.

## ANEXO 1

Parámetros morfológicos de los poros con base en el software de análisis de imagen Image J.

Tabla 5.1. Parámetros morfológicos de los poros determinados mediante el análisis de imagen.

Parámetro	Descripción	Ecuación
El factor de forma ( $F_f$ )	Representa una medida de la redondez de los poros y toma valores desde cero, en poros con máxima irregularidad, hasta uno, en poros esféricos (Figura 3-29).	$F_f = \frac{1}{W}$ Donde $W$ : es la redondez
La convexidad ( $R$ )	Cuantifica el nivel de tortuosidad (hendiduras) en los bordes de un poro, correspondiendo el valor de uno (1) al caso de un círculo perfecto[10]. Ver Figura 3-30.	$R = \frac{PC}{PE}$
Diámetro equivalente ( $D_{eq}$ )	Tomado como el valor del diámetro principal.	Ver Figura 3-28
Densidad de poros ( $D_p$ )	Cociente entre el número de poros en la imagen y la superficie total de la micrografía	$D_p = \frac{N^\circ \text{ de poros}}{A_{\text{micrografía}}}$
Interconectividad entre poros ( $C_{poro}$ )	Mide la probabilidad de encontrar cadenas largas de poros conectados. Cuando $C_{poro} = 1$ no existen intercaras poro/matriz, y cuando $C_{poro} = 0$ los poros están completamente aislados	$C_{poro} = \frac{2 \cdot N_{poro/poro}}{2 \cdot N_{poro/poro} + N_{poro/matriz}}$ Donde, $N_{poro/poro}$ y $N_{poro/matriz}$ representan el número de intercaras poro/poro y poro/matriz, respectivamente, interceptadas por unidad de longitud de línea sobre una micrografía.
Distancia media entre poros ( $\lambda$ )	Denominada también como camino libre medio de matriz o tamaño medio de los cuellos entre poros [11]	$\lambda = \frac{1}{1 - C_{poro}} \cdot \frac{100 - P}{P} \cdot D_{eq}$

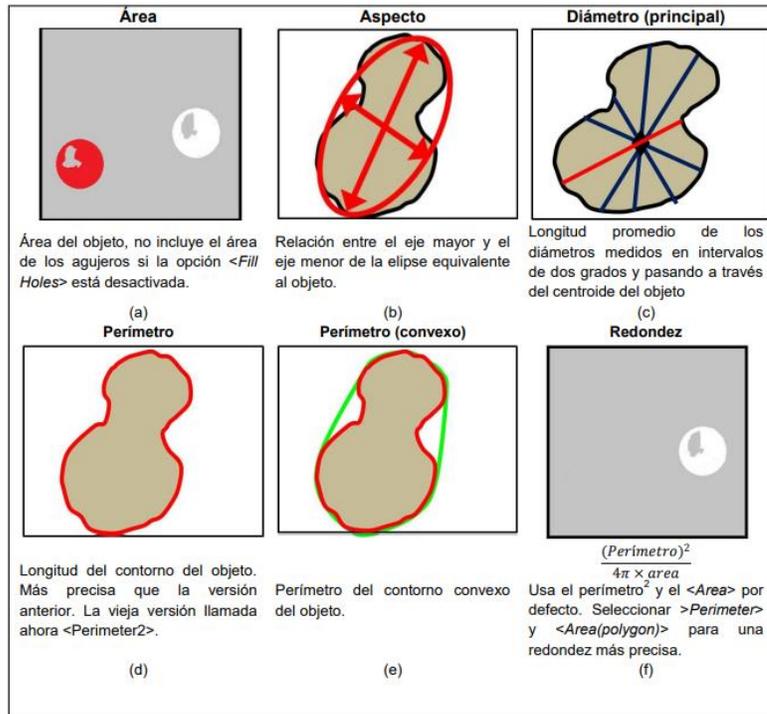


Figura 5.1. Parámetros obtenidos para el estudio en el programa Image J a) área, b) aspecto, c) diámetro principal, d) perímetro, e) perímetro convexo, f) redondez.

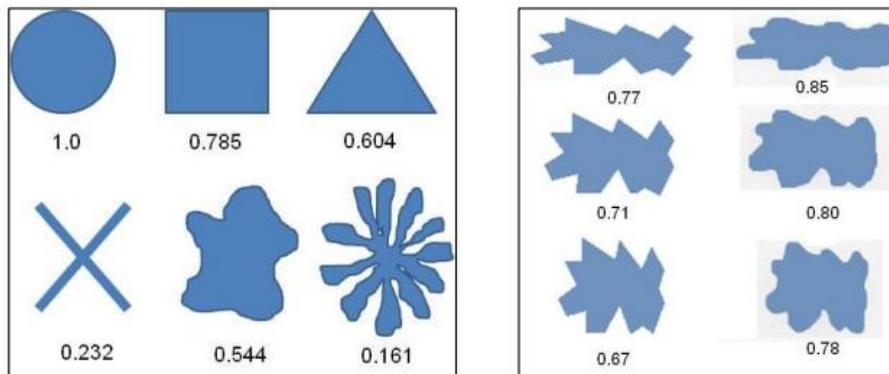


Figura 5.2. Factor de forma y convexidad de algunas geometrías de los poros.

## ANEXO 2

Este anexo muestra las propiedades mecánicas de las espumas de aluminio en paneles tipo sándwich, en las tablas que se muestran a continuación se puede observar el aporte de propiedades de los refuerzos empleados los cuales se ven reflejados en el módulo de elasticidad del panel tipo sándwich dichas tablas fueron cruciales para presentar los datos en forma de gráficos de barras que se muestran en el capítulo 3.

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas de las muestras A, tamaño de poro  $P_1$ .

<b>Muestra</b>	<b>Espesor del refuerzo <math>t_f</math> (mm)</b>	<b>Espesor de la espuma tipo sándwich <math>h</math> (mm)</b>	<b>Módulo de cizalladura del núcleo <math>G_c</math> (MPa)</b>	<b>Módulo elástico del refuerzo <math>E_f</math> (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad del sándwich (MPa)</b>
<b>N 1<sub>A</sub></b>	0	0	500	-	-
<b>PSA 1<sub>A</sub></b>	1	11	408	126	1429
<b>PSA-K 1<sub>A</sub></b>	1.8	11.8	440	182	1569

Tabla 5.3. Propiedades mecánicas de las muestras A, tamaño de poro  $P_2$ .

<b>Muestra</b>	<b>Espesor del refuerzo <math>t_f</math> (mm)</b>	<b>Espesor de la espuma tipo sándwich <math>h</math> (mm)</b>	<b>Módulo de cizalladura del núcleo <math>G_c</math> (MPa)</b>	<b>Módulo elástico del refuerzo <math>E_f</math> (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad del sándwich (MPa)</b>
<b>N 2<sub>A</sub></b>	0	0	101	-	-
<b>PSA 2<sub>A</sub></b>	1	11	223	141	1308
<b>PSA-K 2<sub>A</sub></b>	1.85	11.85	355	214	1970

Tabla 5.4. Propiedades mecánicas de las muestras B, tamaño de poro P<sub>1</sub>.

<b>Muestra</b>	<b>Espesor del refuerzo t<sub>f</sub> (mm)</b>	<b>Espesor de la espuma tipo sándwich h (mm)</b>	<b>Módulo de cizalladura del núcleo G<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>Módulo elástico del refuerzo E<sub>r</sub> (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad del sándwich (MPa)</b>
<b>N 1<sub>B</sub></b>	0	0	500	-	-
<b>PSA 1<sub>B</sub></b>	1.5	11.5	428	228	2429
<b>PSA-K 1<sub>B</sub></b>	1.9	11.9	390	228	1369

Tabla 5.5. Propiedades mecánicas de las muestras B, tamaño de poro P<sub>2</sub>.

<b>Muestra</b>	<b>Espesor del refuerzo t<sub>f</sub> (mm)</b>	<b>Espesor de la espuma tipo sándwich h (mm)</b>	<b>Módulo de cizalladura del núcleo G<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>Módulo elástico del refuerzo E<sub>r</sub> (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad del sándwich (MPa)</b>
<b>N 2<sub>B</sub></b>	0	0	101	-	-
<b>PSA 2<sub>B</sub></b>	1	11	223	144	1312
<b>PSA-K 2<sub>B</sub></b>	1.5	11.5	288.70	271	1410

Tabla 5.6. Propiedades mecánicas de las muestras C, tamaño de poro P<sub>1</sub>.

<b>Muestra</b>	<b>Espesor del refuerzo t<sub>f</sub> (mm)</b>	<b>Espesor de la espuma tipo sándwich h (mm)</b>	<b>Módulo de cizalladura del núcleo G<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>Módulo elástico del refuerzo E<sub>r</sub> (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad del sándwich (MPa)</b>
<b>N 1<sub>c</sub></b>	0	0	500	-	-
<b>PSA 1<sub>c</sub></b>	1	11	408	190	1489
<b>PSA-K 1<sub>c</sub></b>	1.904	11.904	442.2	189.05	1579.41

Tabla 5.7. Propiedades mecánicas de las muestras C, tamaño de poro P<sub>2</sub>.

<b>Muestra</b>	<b>Espesor del refuerzo <math>t_f</math> (mm)</b>	<b>Espesor de la espuma tipo sándwich <math>h</math> (mm)</b>	<b>Módulo de cizalladura del núcleo <math>G_c</math> (MPa)</b>	<b>Módulo elástico del refuerzo <math>E_f</math> (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad del sándwich (MPa)</b>
<b>N 2<sub>c</sub></b>	0	0	101	-	-
<b>PSA 2<sub>c</sub></b>	1	11	223	141	1308
<b>PSA-K 2<sub>c</sub></b>	1.85	11.85	355.30	214	1970