



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

"ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD A ALTAS PRESIONES DE ESPUMAS DE ALUMINIO"

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

PRESENTA:

MANUEL FARID AZAMAR JÁCOME

TUTOR PRINCIPAL

DR. IGNACIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

COMITÉ TUTOR

DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ REYES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ GALLEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

*"Hay plumajes que cruzan el pantano
y no se manchan... ¡Mi plumaje es de éstos!"*

Salvador Díaz Mirón (1853-1928)

Resumen

Espumas de aluminio de celda abierta fueron producidas en tres tamaños de poro para ser caracterizadas estructural y mecánicamente, así como para determinar su permeabilidad en función de la naturaleza de los poros. Los especímenes se fabricaron a partir de la infiltración de aluminio líquido en una preforma sólida de sacrificio bajo condiciones de atmósfera controlada; la preforma consistió en granos de cloruro de sodio irregulares separados en tres intervalos de tamaño, definidos como poro 1 (0.70 a 1.00 mm), poro 2 (2.00 a 2.38 mm) y poro 3 (3.35 a 4.75 mm). Posteriormente se realizó la caracterización física y estructural de todas las espumas producidas calculando la densidad, el espesor de pared de poro y la porosidad de las probetas por picnometría de helio. Los diagramas esfuerzo-deformación fueron generados mediante ensayos de compresión para determinar el módulo de Young, el esfuerzo de colapso plástico y la capacidad de absorción de energía de los especímenes en diferentes porcentajes de deformación. Finalmente, se realizaron ensayos de permeabilidad a partir de la inyección de aditivo de gasolina en intervalos de presión desde 200 hasta 25,000 psi a temperatura ambiente y 200 °C, generando mediante la ley de Darcy las curvas que describen la permeabilidad de las espumas en función del flujo que estas permiten. Los resultados obtenidos muestran que la densidad y porosidad de las espumas se encuentran en el mismo intervalo de dispersión de datos sin importar el tamaño de los poros, debido a la falta de homogeneidad de forma entre estos, ocurriendo lo mismo en las propiedades mecánicas antes de la densificación del material. Por otro lado, la permeabilidad si varió según el tamaño de los poros, dado que esta depende del flujo condicionado por la interconexión física y el tamaño de los mismos.

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por la formación académica y profesional que recibí durante mis estudios de maestría, siempre será motivo de orgullo para mí haber formado parte de la máxima casa de estudios de la nación.

Agradezco al Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales (PCeIM) por todo el apoyo brindado para culminar exitosamente el programa de posgrado y obtener el grado de Maestro en Ciencia e Ingeniería de Materiales. Asimismo, agradezco al Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) por haberme permitido realizar mis estudios y desarrollar mi proyecto en sus instalaciones.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría y al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN102319 por el financiamiento económico para la realización de mi trabajo de investigación.

Agradezco al Dr. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas por ser mi tutor principal durante la maestría y por permitirme formar parte de su grupo de investigación. Igualmente le agradezco por haberme otorgado en todo momento las herramientas necesarias para la realización y culminación exitosa de mi proyecto, por su paciencia, apoyo, consejos y amistad.

Agradezco al Dr. José Gonzalo González Reyes y al Dr. Miguel Ángel Hernández Gallegos por formar parte de mi comité tutor, y por todo el seguimiento que hicieron de mi avance durante el programa de posgrado.

Agradezco a la Dra. Elsa María de la Calleja Mora por su apoyo y colaboración en el uso de la cámara de alta presión para pruebas de permeabilidad en las espumas, en el marco del proyecto 143927 ORIonEARTH (Oil Reservoir Integration on Earth).

Agradezco al Dr. Gabriel Ángel Lara Rodríguez como miembro del sínodo y por su apoyo en el uso de los equipos en el laboratorio. Asimismo, agradezco al taller de maquinado del IIM por todo el apoyo brindado para la obtención de las probetas para la realización de mi trabajo de investigación.

Agradezco a los miembros del sínodo: el Dr. Abel Camacho Galván, la Dra. Rosaura Aparicio Fernández y la M. en C. Balbina Ojeda Ramírez por su revisión, comentarios y sugerencias a mi trabajo de investigación.

Agradezco al M. en C. Eliezer Hernández por su apoyo en la realización de los ensayos mecánicos de mis espumas, al M. en C. Carlos Ramos por el soporte

técnico en el uso de las bombas mecánicas de vacío y a la M. en C. Francisca García por su apoyo en el uso del dispositivo de fluorescencia de rayos X.

Agradezco al Dr. Luis Enrique Sansores Cuevas como coordinador del PCeIM, y a las secretarías 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. Igualmente agradezco al Dr. Omar Novelo, al Fis. Raúl Reyes, al M. en C. Alberto López Vivas y al Ing. Fernando Silvar por su apoyo y soporte técnico.

Agradezco al Dr. Lauro Bucio, al Dr. Jorge Balmaseda, Dr. José Carvayar, al Dr. Luis Fernández y al M. en C. Edgar Ramírez por sus clases y enseñanzas durante mis estudios de maestría.

Agradezco a mis compañeros de laboratorio: Alma, Amairani, Carmen, Daniela, Iván, Laura, Luisito, Miguel y Oscar por su amistad y por los momentos de diversión. Igualmente agradezco al M. en C. Francisco Sánchez por su valiosa amistad y apoyo.

Agradezco especialmente a Angélica e Ismael como mis mejores amigos en la Ciudad de México, por ser las primeras personas en recibirme y por siempre estar al pendiente de mí, siempre valoraré su amistad y el haber tenido el placer de conocerlos.

Agradezco a mi alma máter, el Instituto Tecnológico de Veracruz, por la formación como Ingeniero Mecánico y por proporcionarme las bases técnicas y académicas para encarar los retos profesionales del día a día.

Finalmente, quiero agradecer y dedicar este trabajo a mi familia por siempre creer en mí, por su infinito amor, apoyo y comprensión, y por siempre impulsarme a ser mejor persona y superarme cada día. A mi hermano Manuel Affid, de quien he aprendido la importancia de la paciencia. A mi hermana Amyra Ali, mi mejor amiga y compañera incondicional durante este viaje y de quien aprendí que siempre debemos aspirar a más, mi sublime ejemplo a seguir. A mi mamá Reyna, las palabras no alcanzan ni alcanzarán para agradecer todo lo que has hecho por mí, para ti han sido y serán siempre mis logros y éxitos. A mi papá Manuel de Jesús, de quien he aprendido el significado de la palabra resiliencia, quien me ha enseñado el valor de la perseverancia y a nunca rendirme y quien siempre me ha apoyado en todos mis proyectos y locuras.

Índice

Introducción	1
Objetivos	3
Capítulo 1. Antecedentes	4
1.1. Materiales porosos	4
1.2. Espumas metálicas	5
1.2.1. Métodos de fabricación	6
1.3. Propiedades físicas y estructurales	7
1.3.1. Porcentaje de porosidad	7
1.3.2. Densidad relativa	8
1.4. Propiedades mecánicas	9
1.4.1. Capacidad de absorción de energía	10
1.5. Espumas de aluminio	12
1.5.1. Propiedades del aluminio	12
1.5.2. Espumas de aluminio Duocel®	14
1.6. Aplicaciones de las espumas	15
1.6.1. Aplicaciones estructurales	15
1.6.2. Filtros y separación de partículas sólidas	16
1.6.3. Disipación de sonido	16
1.6.4. Intercambiadores de calor	17
1.6.5. Electrodo poroso	17
1.7. Permeabilidad	18
1.7.1. Experimento de Darcy	19
1.7.2. Viscosidad	20
Capítulo 2. Desarrollo experimental	22
2.1. Producción de las espumas	22
2.1.1. Materiales	23

2.1.2. Preparación y ensamblado del crisol.....	25
2.1.3. Purga.....	26
2.1.4. Fundición e infiltración.....	27
2.1.5. Obtención de las probetas.....	28
2.2. Caracterización física y estructural.....	29
2.2.1. Porosidad.....	29
2.2.2. Espesor de pared de poro.....	31
2.2.3. Densidad relativa.....	31
2.3. Ensayo de compresión.....	31
2.4. Ensayo de permeabilidad.....	32
Capítulo 3. Resultados y discusión.....	37
3.1. Espumas producidas.....	37
3.2. Propiedades físicas y estructurales.....	39
3.3. Propiedades mecánicas.....	44
3.4. Análisis de permeabilidad.....	50
Conclusiones.....	59
Referencias.....	61
Anexos.....	66
Anexo A. Producción científica.....	66
A1. 15° Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales de la UMSNH.....	66
A2. 7° Simposio Anual de Estudiantes del IIM.....	67
A3. 20th World Congress on Materials Science and Engineering.....	68

Índice de tablas

Tabla 1.1	Propiedades químicas y físicas del Al.....	12
Tabla 1.2	Designación del elemento aleante principal en aleaciones de Al....	13
Tabla 1.3	Composición química del Al 1100.....	13
Tabla 1.4	Propiedades físicas y mecánicas de las espumas de aluminio Duocel®.....	14
Tabla 2.1	Composición química esperada de los lingotes de Al.....	24
Tabla 2.2	Denominación y tamaño de abertura de los tamices empleados para separar los granos de NaCl de acuerdo a la norma ASTM E11-17.....	24
Tabla 2.3	Parámetros de temperatura, tiempo y presión para el proceso de fundición e infiltración en la producción de espumas de Al.....	27
Tabla 3.1	Cantidad de espumas de Al producidas para ensayos de permeabilidad y compresión.....	37
Tabla 3.2	Composición química típica de las espumas de Al producidas.....	38
Tabla 3.3	Masa y volumen de NaCl removido de los especímenes.....	39
Tabla 3.4	Parámetros estructurales de las espumas de Al producidas.....	40
Tabla 3.5	Propiedades mecánicas de las espumas de Al producidas.....	47
Tabla 3.6	Intervalos de presión definidos para inyectar el aditivo de gasolina a las espumas.....	50
Tabla 3.7	Valores de flujo promedio de los tres poros y viscosidad dinámica a ambas condiciones de ensayo empleados para el análisis de permeabilidad.....	53

Índice de figuras

Figura 1.1	Estructura porosa de la epífisis del fémur.....	5
Figura 1.2	Espuma metálica de a) celda abierta, b) celda cerrada.....	5
Figura 1.3	Espuma metálica obtenida por a) metalurgia de polvos, b) espumado por fundición, c) deposición de metal, d) solidificación direccionada.....	7
Figura 1.4	Corte transversal de un material poroso de poro a) grande, b) pequeño.....	8
Figura 1.5	Curva esfuerzo-deformación típica de las espumas metálicas...	9
Figura 1.6	Mecanismo de deformación de las espumas metálicas.....	10
Figura 1.7	Capacidad de absorción de energía en la curva esfuerzo-deformación.....	11
Figura 1.8	Piezas producidas con componentes de espuma de aluminio Duocel® a) intercambiador de calor, b) filtros de ventilación.....	14
Figura 1.9	Espuma metálica en estructura tipo sándwich de autopartes.....	15
Figura 1.10	Panel de espuma de Al empleado para disipación de sonido.....	16
Figura 1.11	Intercambiador de calor de serpentín cubierto de espuma metálica.....	17
Figura 1.12	Variables que intervienen en la ley de Darcy.....	18
Figura 1.13	Permeámetro de Darcy.....	19
Figura 1.14	Permeabilidad con a) poros dendríticos, b) disposición laminar de poros.....	20
Figura 1.15	Correlación entre la viscosidad y la temperatura.....	21
Figura 2.1	Dispositivo de infiltración y equipo empleado.....	23
Figura 2.2	a) Lingote cilíndrico de Al, b) pistola de fluorescencia de rayos X.....	23
Figura 2.3	a) Tamices empleados para separar los granos de NaCl por intervalos de tamaño, b) granos de NaCl separados por intervalos de tamaño para producir los poros P1, P2 y P3.....	25
Figura 2.4	Componentes del crisol recubiertos de BN y con empaques de alta temperatura a) platos, b) cilindro.....	25
Figura 2.5	Cantidad de Al y NaCl necesaria para producir espumas con un diámetro de 6.3 cm y altura de a)7 cm, b) 9cm.....	26
Figura 2.6	Ciclo de purga a) succión para generar vacío, b) entrada de Ar	

	a presión controlada.....	26
Figura 2.7	a) Fundición, b) infiltración, c) solidificación.....	27
Figura 2.8	Crisol retirado del horno a) inmediatamente después, b) 5 minutos después.....	28
Figura 2.9	Dimensiones de las probetas para ensayos de a) permeabilidad, b) compresión.....	28
Figura 2.10	a) Tina de baño ultrasónico, b) parrilla de agitación magnética..	29
Figura 2.11	Picnómetro de He Ultrapyc 1200e.....	30
Figura 2.12	a) Dimensiones de las probetas para análisis de porosidad, b) diagrama del corte en rebanadas de 0.5 cm para análisis de porosidad.....	30
Figura 2.13	Máquina universal de pruebas mecánicas Instron.....	32
Figura 2.14	Poros-permeámetro empleado para realizar los ensayos de permeabilidad.....	32
Figura 2.15	Elementos que conforman el poros-permeámetro.....	33
Figura 2.16	Celda de confinamiento con espuma de Al montada.....	34
Figura 2.17	Llenado de la prensa hidráulica.....	34
Figura 2.18	Inyección del aditivo de gasolina a la celda de confinamiento....	35
Figura 2.19	Apertura de la válvula del gotero para liberar la presión y expulsar el fluido.....	35
Figura 3.1	Espumas de Al producidas para ensayos de compresión a) P1, b) P2, c) P3.....	38
Figura 3.2	Espumas de Al producidas para ensayos de permeabilidad a) P1, b) P2, c) P3.....	38
Figura 3.3	Espécimen producido para ensayo de permeabilidad a) antes de disolver la preforma de NaCl, b) después de disolver la preforma de NaCl.....	39
Figura 3.4	Fotografías de la sección transversal de las espumas para medición del espesor de pared de poro a) P1, b) P2, c) P3.....	41
Figura 3.5	Dispersión en torno a la media aritmética de las mediciones realizadas para determinar el espesor de pared de poro promedio de las espumas.....	41
Figura 3.6	Imágenes procesadas con Image J para medición de porosidad superficial de las espumas a) P1, b) P2, c) P3.....	42
Figura 3.7	Comportamiento de la porosidad volumétrica a lo largo de la longitud de las espumas.....	43
Figura 3.8	Comportamiento de la porosidad superficial a lo largo de la	

	longitud de las espumas.....	43
Figura 3.9	Espumas de Al antes de ser sometidas al ensayo de compresión a) P1, b) P2, c) P3, d) referencia en bulto de Al.....	44
Figura 3.10	Espumas de Al después de ser sometidas al ensayo de compresión a) P1, b) P2, c) P3, d) referencia en bulto de Al.....	44
Figura 3.11	Diagramas esfuerzo-deformación de las espumas de Al ensayadas de P1.....	45
Figura 3.12	Diagramas esfuerzo-deformación de las espumas de Al ensayadas de P2.....	46
Figura 3.13	Diagramas esfuerzo-deformación de las espumas de Al ensayadas de P3.....	46
Figura 3.14	Diagramas esfuerzo-deformación de las espumas de Al ensayadas de los tres tamaños de poro con su referencia en bulto de Al.....	47
Figura 3.15	Mecanismo de compactación de las espumas con los porcentajes de deformación correspondientes a cada etapa.....	48
Figura 3.16	Espumas de Al al 0% deformación a) P1, b) P2, c) P3, d) referencia en bulto de Al.....	48
Figura 3.17	Espumas de Al al 80% deformación a) P1, b) P2, c) P3, d) referencia en bulto de Al al 40% de deformación.....	49
Figura 3.18	Capacidad de absorción de energía de las espumas a diferentes porcentajes de deformación.....	49
Figura 3.19	Esfuerzo necesario para deformar las espumas a diferentes porcentajes de deformación.....	50
Figura 3.20	Flujo promedio alcanzado en cada intervalo a) temperatura ambiente, b) 200 °C.....	51
Figura 3.21	Flujo promedio de todos los intervalos a partir de 200-7,000 psi a) temperatura ambiente, b) 200 °C.....	51
Figura 3.22	Resultados de reología del aditivo de gasolina a diferentes temperaturas.....	52
Figura 3.23	Espuma montada en la celda de confinamiento.....	53
Figura 3.24	Valores de permeabilidad de las espumas a temperatura ambiente.....	54
Figura 3.25	Valores de permeabilidad de las espumas a 200 °C.....	54
Figura 3.26	Valores de permeabilidad de las espumas con flujo promedio a temperatura ambiente y 200 °C.....	55
Figura 3.27	Línea de tendencia de la permeabilidad de las espumas a temperatura ambiente y 200 °C.....	56

Figura 3.28	Diagrama esfuerzo-deformación de la espuma de Al de P3 ensayada a compresión después de haber sido sometida a ensayo de permeabilidad a 200 °C.....	57
Figura 3.29	Espuma de Al de P3 producida para ensayo de permeabilidad a) antes de ser sometida a ensayo de compresión, b) después.....	58

Abreviaturas y símbolos

<i>Al</i>	Aluminio	σ_{PI}	Esfuerzo de Plateau
<i>Al₁₁₀₀</i>	Aluminio 1100	σ	Esfuerzo uniaxial
ASTM	American society for testing and materials	t_{Pared}	Espesor promedio de pared de poro
<i>A_{Al}</i>	Área de aluminio	<i>Sn</i>	Estaño
<i>A_{Pr}</i>	Área de la probeta	ϵ_{PI}	Fin de la región de Plateau
<i>A_C</i>	Área transversal	<i>q</i>	Flujo
<i>Ar</i>	Argón	q_{Pr}	Flujo promedio
<i>Bi</i>	Bismuto	°C	Grado Celsius
<i>Cd</i>	Cadmio	<i>g</i>	Gramo
ΔP	Caída de presión	g/cm^3	Gramo por centímetro cúbico
Δh	Cambio de altura	<i>He</i>	Helio
<i>W</i>	Capacidad de absorción de energía por unidad de volumen	<i>Fe</i>	Hierro
<i>cm</i>	Centímetro	ISO	International standardization organization
cm^3	Centímetro cúbico	ΔP_{Iny}	Intervalo de presión inyectado
<i>Zr</i>	Circonio	kg/cm^2	Kilogramo por centímetro cuadrado
<i>NaCl</i>	Cloruro de sodio	kpsi	Kilolibra por pulgada cuadrada
<i>Co</i>	Cobalto	psi	Libra por pulgada cuadrada
<i>Cu</i>	Cobre	<i>Li</i>	Litio
<i>Cr</i>	Cromo	<i>L</i>	Longitud
ϵ	Deformación	<i>Mg</i>	Magnesio
ρ	Densidad	<i>Mn</i>	Manganeso
ρ_M	Densidad del material base	®	Marca registrada
ρ_P	Densidad del material poroso	±	Más menos
ρ_{Rel}	Densidad relativa	<i>m</i>	Masa
<i>T</i>	Esfuerzo cortante	m_{Al}	Masa de aluminio
σ_{CP}	Esfuerzo de colapso plástico	MPa	Megapascal

μm	Micrómetro	T_f	Punto de fusión
mD	Milidarcy	l/d	Relación longitud entre diámetro
mm	Milímetro		
mmHg	Milímetro de mercurio	SEM	Scanning electron microscopy
E	Módulo de Young	Si	Silicio
Ni	Níquel	γ	Tasa de corte
BN	Nitruro de boro	T	Temperatura
O	Oxígeno	T_{Amb}	Temperatura ambiente
Pa	Pascal	$T_{200\text{ °C}}$	Temperatura de 200 °C
Pa•s	Pascal por segundo	t_f	Tiempo de fundición
κ	Permeabilidad	t_i	Tiempo de infiltración
κ_x	Permeabilidad en dirección x	Ti	Titanio
κ_y	Permeabilidad en dirección y	V	Vanadio
κ_z	Permeabilidad en dirección z	μ	Viscosidad dinámica
Ag	Plata	μ_{Amb}	Viscosidad dinámica a temperatura ambiente
Pb	Plomo		
%	Porcentaje	$\mu_{200\text{ °C}}$	Viscosidad dinámica a 200 °C
P1	Porosidad 1	V	Volumen
P2	Porosidad 2	V_{Al}	Volumen de aluminio
P3	Porosidad 3	V_{Pr}	Volumen de la probeta
Φ	Porosidad	Zn	Zinc
Φ_{Ef}	Porosidad efectiva		
Φ_{Real}	Porosidad real		
Φ_{Sup}	Porosidad superficial		
Φ_{Teo}	Porosidad teórica		
Φ_{Vol}	Porosidad volumétrica		
P_1	Presión de entrada		
P_f	Presión de fundición		
P_i	Presión de infiltración		
P_2	Presión de salida		
in	Pulgada		

Introducción

Este trabajo tiene como objeto de estudio espumas de aluminio de celda abierta producidas en tres tamaños de poro diferentes. Dado que una espuma metálica es un medio poroso, sus propiedades son condicionadas por la naturaleza de los poros que se encuentran dispersos en su estructura, por lo que se parte de la hipótesis de que, espumas con poros grandes serán más permeables en comparación con sus similares de poros más pequeños, debido a la disposición del espacio vacío por el cual circulará el fluido de prueba, esperando que las propiedades físicas y mecánicas, igualmente, mantengan una relación directa con el tamaño y características de los poros. Esta investigación se limita a estudiar el comportamiento de las espumas exclusivamente en función del tamaño de los poros, independientemente de la irregularidad de forma que estos presentan.

Para facilitar la lectura y comprensión del trabajo realizado, este fue dividido en tres capítulos: antecedentes, desarrollo experimental y resultados y discusión, finalizando con la conclusión global y las referencias que fueron consultadas.

El capítulo 1 contiene el marco teórico y aborda los conceptos básicos fundamentales para comprender el desarrollo experimental y los resultados obtenidos. En él se explica que es una espuma metálica, los métodos por los cuales se pueden producir, sus características y ventajas con respecto a su equivalente no poroso, y se ponen en contexto las propiedades del aluminio como metal base y de las espumas de aluminio Duocel[®] producidas comercialmente. Igualmente se describe lo que es la permeabilidad, las variables que condicionan su magnitud y algunos modelos teóricos a partir de los cuales se puede analizar, finalizando esta primera sección con algunas aplicaciones de las espumas metálicas.

En el capítulo 2 se describe con amplitud la metodología seguida y los materiales empleados para producir las espumas; posteriormente se exponen las técnicas utilizadas para realizar la caracterización física y estructural, y los criterios definidos para efectuar el ensayo de compresión. Esta sección culmina con la explicación del ensayo de permeabilidad al cual fueron sometidas las probetas, la descripción del equipo empleado y el análisis aplicado para determinar la permeabilidad de las espumas.

En el capítulo 3 se muestran los especímenes obtenidos con sus respectivos parámetros estructurales en función del tamaño de los poros, así como las propiedades mecánicas determinadas experimentalmente para cada caso. Igualmente se muestran los resultados del análisis de permeabilidad realizado a

partir de la ley de Darcy, en función del flujo que las espumas permitieron cuando se les inyectó aditivo de gasolina en intervalos de alta presión, que van desde 200 hasta 25,000 psi a temperatura ambiente y 200 °C. La discusión de los resultados se efectuó de manera particular para cada variable estudiada y de manera global en las conclusiones del trabajo, contraponiendo los resultados obtenidos con los esperados de acuerdo a la información reportada en la literatura y según el estado del arte actual del estudio realizado.

La importancia de este trabajo radica en la singularidad del equipo con el cual se realizó el ensayo de permeabilidad: por su diseño y tipo de sensores, permite inyectar fluido a una presión de hasta 25,000 psi y medir con gran precisión el flujo permitido por la porosidad interconectada de las espumas y la presión a la entrada y salida de las mismas, además de la posibilidad de realizar el ensayo a una temperatura controlada superior a la del ambiente. Debido a lo anterior, la información reportada sobre este ensayo en espumas metálicas es prácticamente nula y representa la principal motivación del proyecto, que es sentar las bases para proponer este tipo de material como alternativa para aplicaciones en investigación e ingeniería que requieran un medio para conducir fluidos a alta presión sin dañar su integridad estructural, como podría ser el caso de la extracción de petróleo, transporte de fluidos en general, filtros para retener partículas sólidas, etc.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la permeabilidad a alta presión de espumas de aluminio de celda abierta a temperatura ambiente y 200 °C, a partir de la inyección de aditivo de gasolina en intervalos crecientes de presión.

Objetivos particulares

- Producir espumas de aluminio de celda abierta de tres tamaños de poro diferentes.
- Determinar los parámetros físicos y estructurales de las espumas producidas, en función del tamaño de sus poros.
- Determinar las propiedades mecánicas a compresión de las espumas producidas, en función del tamaño de sus poros.
- Determinar la correlación existente entre los parámetros físicos y estructurales, las propiedades mecánicas a compresión y la permeabilidad de las espumas.
- Evaluar la integridad estructural de las espumas producidas cuando estas son sometidas al flujo de aditivo de gasolina a una presión de hasta 25,000 psi, a temperatura ambiente y 200 °C.

Capítulo 1

Antecedentes

En este capítulo se definen los conceptos básicos fundamentales para la comprensión del presente trabajo. La sección inicia explicando que es un material poroso y la importancia de estos tanto en la naturaleza como en la vida del hombre; posteriormente se define que es una espuma metálica, su clasificación, los principales métodos para obtener este tipo de material, así como sus propiedades físicas, estructurales y mecánicas, haciendo hincapié en espumas de aluminio (*Al*) y poniendo en contexto una referencia comercial de estas. Posteriormente se describe el mecanismo de funcionamiento de las espumas metálicas en algunas aplicaciones de investigación e ingeniería.

El capítulo termina definiendo la permeabilidad de forma general y a partir del modelo teórico de Darcy, así como las variables que intervienen en su magnitud y la influencia de la temperatura.

1.1. Materiales porosos

También conocidos como sólidos porosos, son una familia de materiales conformados por una fase sólida continua con huecos (o poros) dispersos en su estructura que pueden contener una fase líquida o gaseosa [1]. Estos se encuentran en la naturaleza desempeñando generalmente funciones estructurales y de soporte, como es el caso de la madera y los huesos; no obstante, también pueden ser producidos artificialmente por el hombre a través de diferentes técnicas para obtener materiales cerámicos, poliméricos y metálicos con estructura porosa, ejemplo de esto son los ladrillos y el cemento para la construcción de edificaciones.

Debido a su naturaleza, presentan una combinación de propiedades físicas y mecánicas interesantes, como lo es una baja densidad con gran resistencia mecánica [2, 5], además de fungir como excelentes disipadores térmicos y de energía según el material del cual están fabricados. En función de la interconexión física entre sus poros, pueden ser de celda abierta cuando estos se encuentran interconectados o de celda cerrada cuando se están aislados [2], variando significativamente las propiedades tanto físicas como mecánicas entre ambos tipos. En la figura 1.1 se muestra la estructura porosa de la epífisis del fémur, donde se observa que la porosidad se encuentra interconectada para facilitar el

paso de los vasos sanguíneos y nervios, cumpliendo también la función de soporte y protección del paquete vasculonervioso [3].

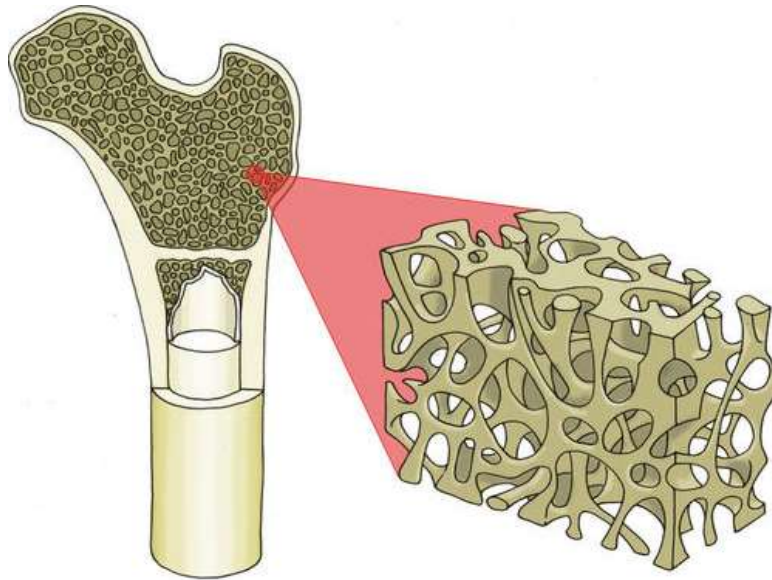


Figura 1.1 Estructura porosa de la epifisis del fémur [3].

1.2. Espumas metálicas

Una espuma metálica es un material poroso formado por una matriz sólida de metal; sus características dependen de la naturaleza de sus poros y del metal base constituyente, aunque típicamente presentan alta conductividad eléctrica, baja conductividad térmica y un comportamiento mecánico dúctil. Al pertenecer a la familia de los sólidos porosos, pueden ser de celda abierta (figura 1.2a) o de celda cerrada (figura 1.2b) en función del método por el cual fue fabricada la espuma.

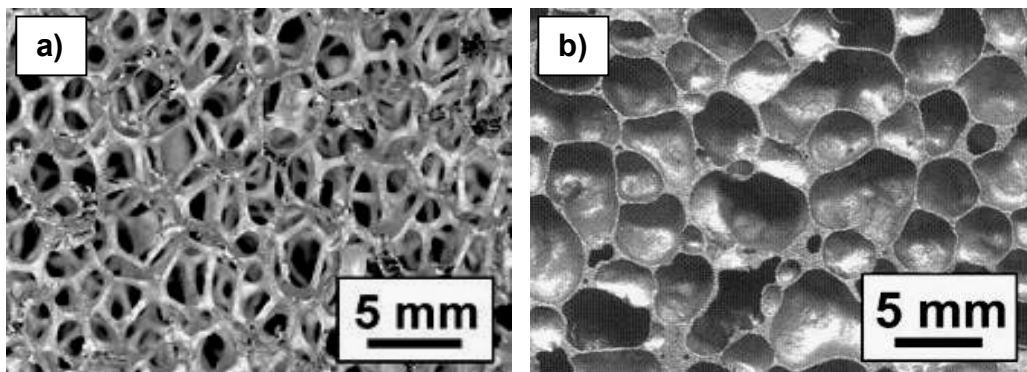


Figura 1.2 Espuma metálica de a) celda abierta, b) celda cerrada [4].

1.2.1. Métodos de fabricación

Las espumas metálicas se pueden obtener por diferentes técnicas que combinan variables tales como presión, tiempo, temperatura, composición química, estado de agregación y tamaño de partícula de los elementos que interactúan entre sí, para producir especímenes con diferentes propiedades físicas y mecánicas. A continuación se describen los métodos más comunes para la fabricación de metales porosos:

- Metalurgia de polvos: se emplean partículas esféricas o con geometrías irregulares de metal o aleación para ser compactadas por la aplicación de una carga uniaxial y posteriormente sinterizadas a una temperatura inferior cercana al punto de fusión del material; esta técnica permite controlar la porosidad y el tamaño de los poros y las espumas producidas por este método presentan una superficie específica elevada, así como resistencia a las fluctuaciones térmicas [5, 6].
- Fundición: en esta categoría entra el espumado por la adición de un agente espumante, generalmente un gas, durante la solidificación controlada del metal; por este método suelen obtenerse espumas de celda cerrada o parcialmente abierta. También se tiene el método de infiltración de metal de una preforma sólida de sacrificio, en el cual metal líquido es infiltrado por los espacios vacíos interconectados de una preforma sólida por la aplicación de presión de gas, obteniendo espumas de celda abierta [5, 7, 8]. Los especímenes producidos por cualquiera de estas dos técnicas presentan propiedades mecánicas superiores con respecto a los obtenidos por metalurgia de polvos.
- Deposición de metal: las piezas se producen por la deposición de polvo metálico en una espuma polimérica, para consecuentemente eliminar esta última y sinterizar las partículas depositadas [2]. Por este método se obtienen piezas altamente porosas y con gran interconexión entre los poros.
- Solidificación direccionada: consiste en la adición de hidrógeno gaseoso a una solución eutéctica líquida, direccionando la solidificación de la aleación con una placa de cobre con sistema de enfriamiento abajo del crisol, a medida que la aleación va solidificando, la solubilidad de esta con el hidrogeno va disminuyendo, de manera que es expulsado paulatinamente, dejando a su paso una fase porosa con acomodamiento ordenado [5, 9]; es el método que permite controlar con mayor precisión la porosidad obtenida mediante la velocidad de solidificación.

En la figura 1.3a se muestra la imagen de SEM de una probeta producida por metalurgia de polvos, en la figura 1.3b se muestra la micrografía de una espuma

metálica producida por el método de infiltración de una preforma sólida de sacrificio. La figura 1.3c corresponde a la imagen de microscopio óptico de un espécimen fabricado por deposición de metal, finalmente en la figura 1.3d se aprecia una fotografía de un sólido poroso producido por solidificación direccional. A simple vista se observan las diferencias estructurales y morfológicas de los poros generados, mismas que repercuten en el comportamiento mecánico de las espumas.

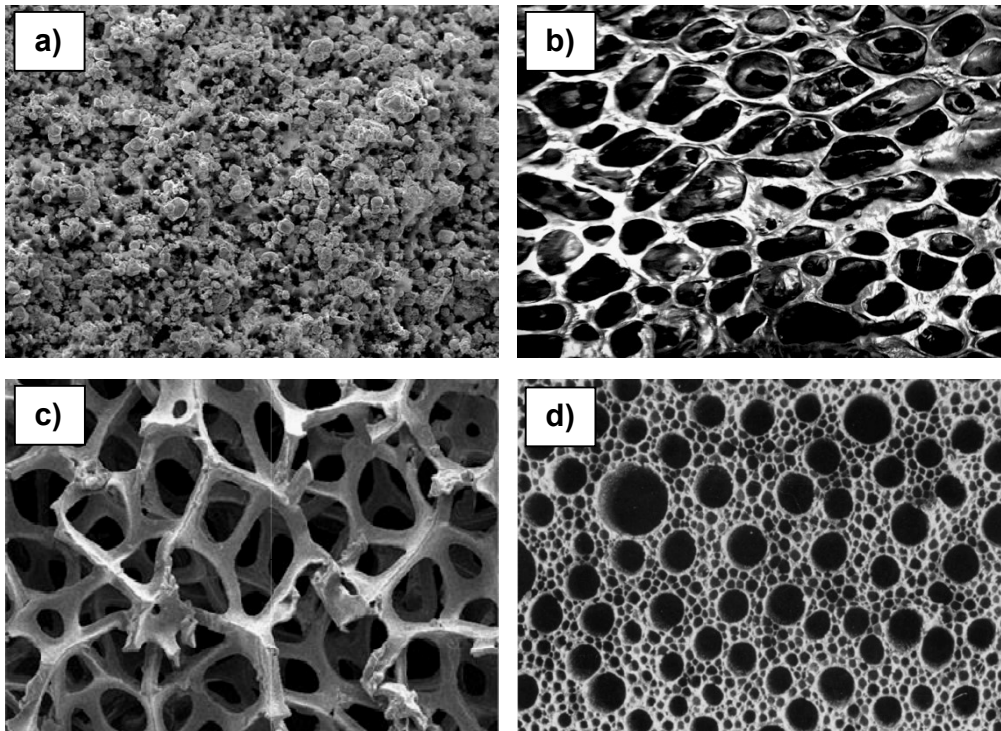


Figura 1.3 Espuma metálica obtenida por a) metalurgia de polvos, b) espumado por fundición, c) deposición de metal, d) solidificación direccional [5-9].

1.3. Propiedades físicas y estructurales

Por su naturaleza porosa, las espumas metálicas son bastante livianas en comparación con su equivalente en bulto. Las propiedades más atractivas de este tipo de material son su alta porosidad y su baja densidad, parámetros que a continuación se describen.

1.3.1. Porcentaje de porosidad

La porosidad (Φ) se define como la fracción del volumen de la probeta que se encuentra vacío u ocupado por los poros, expresada generalmente como un

porcentaje o decimal; representa el parámetro básico determinante de las propiedades físicas de las espumas como son su conductividad térmica y eléctrica y sus posibles aplicaciones ópticas y acústicas.

Su magnitud depende principalmente del tamaño, forma y empaquetamiento de los poros, así como de las implicaciones asociadas al proceso de fabricación de las espumas con sus limitaciones inherentes. Es importante aclarar, que las variables antes mencionadas tienen un efecto importante en la porosidad del medio, sin ser completamente determinantes. En la figura 1.4 se muestra la sección transversal de un material poroso con dos tamaños de poros diferentes, donde la porosidad en ambos es la misma sin importar el tamaño de los poros.

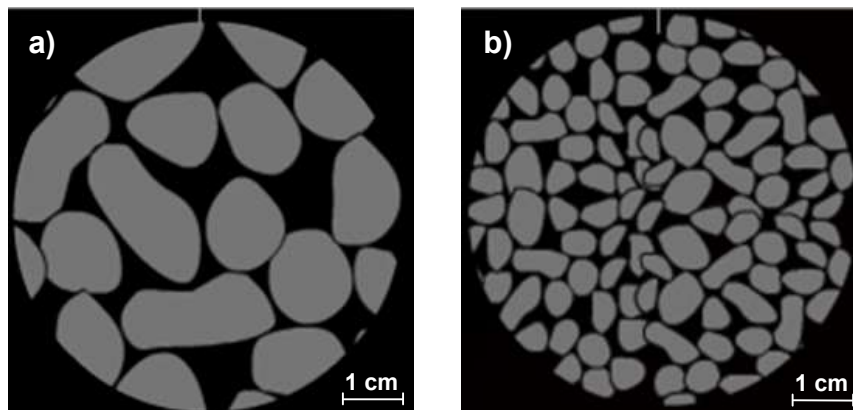


Figura 1.4 Corte transversal de un material poroso de poro a) grande, b) pequeño.

Las espumas son de baja porosidad cuando esta variable es inferior al 50% y de alta porosidad cuando es superior a este valor [1]. Desde un punto de vista funcional, existen la porosidad absoluta que se refiere a la magnitud total de los poros sin importar que estos se encuentren aislados o comunicados entre sí y la porosidad efectiva, que considera únicamente los poros interconectados [10]. De manera general, la porosidad se calcula a partir de la fórmula 1.1, donde V_P es el volumen total de la probeta y V_S es el volumen sólido de la misma.

$$\Phi = \frac{V_P - V_S}{V_P} (100) \quad 1.1$$

1.3.2. Densidad relativa

La densidad es una propiedad intensiva que identifica unívocamente a un material determinado y relaciona la masa con el volumen del mismo. En el estudio de

materiales porosos, resulta importante conocer la proporción entre la densidad de estos con respecto a su material base, propiedad conocida como densidad relativa (ρ_{Rel}). Esta se obtiene por la fórmula 1.2, donde ρ_P es la densidad del material poroso y ρ_M es la densidad del material base.

$$\rho_{Rel} = \frac{\rho_P}{\rho_M} \quad 1.2$$

1.4. Propiedades mecánicas

Estas propiedades describen el comportamiento de un material ante las fuerzas externas de tracción, compresión o torsión que son aplicadas sobre el mismo. El comportamiento mecánico de las espumas depende del metal o aleación base constituyente y de sus parámetros estructurales, tales como el tamaño y espesor de pared de poro y su porosidad.

Para este tipo de material, la caracterización mecánica generalmente se realiza a partir de ensayos de compresión, generando una curva esfuerzo-deformación típica como la que se muestra en la figura 1.5.

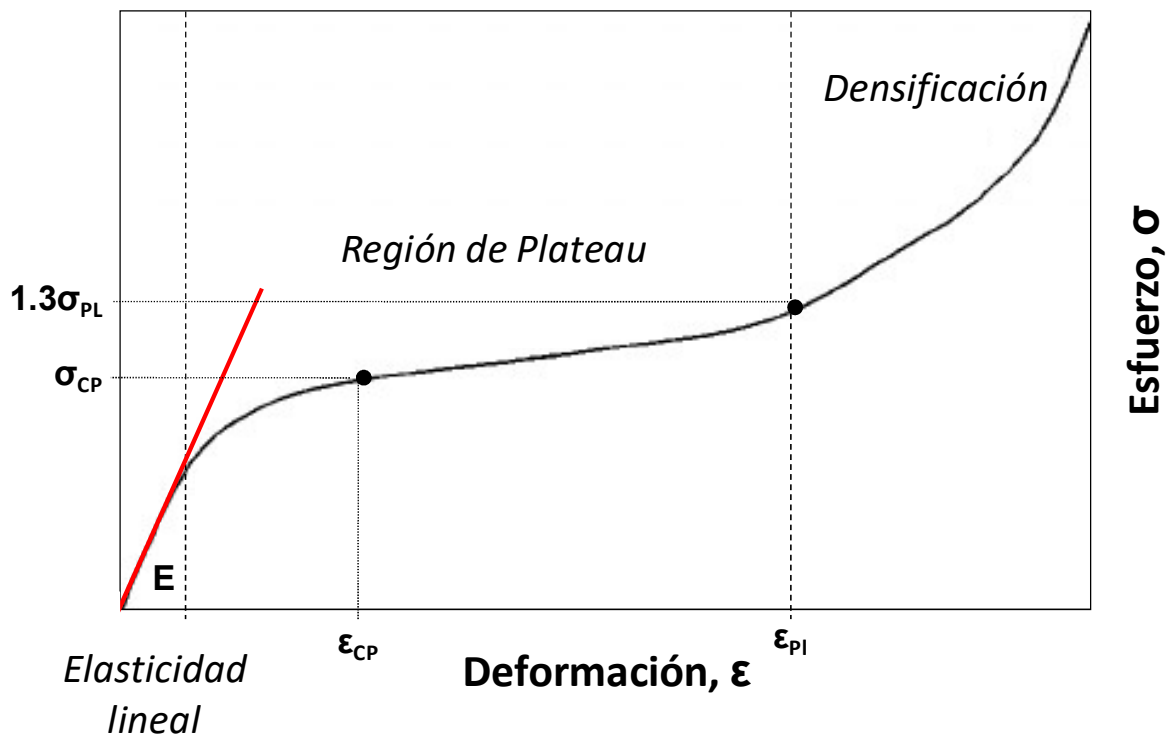


Figura 1.5 Curva esfuerzo-deformación típica de las espumas metálicas.

En este diagrama se observan tres regiones bien definidas, mismas que describen el comportamiento a compresión de los materiales porosos. La primera región corresponde a la elasticidad lineal del material, donde la carga aplicada es proporcional a la deformación producida y se muestra como una línea recta inicial.

La segunda sección del diagrama es la región de Plateau o de deformación cuasilineal; se caracteriza por presentar un comportamiento de este tipo debido a que ocurre gran deformación con poca carga aplicada.

Finalmente se produce la densificación del material, región en la cual la estructura interna de la espuma ha colapsado y es necesario aplicar mucha carga para deformar el material [11]. En la figura 1.6 se muestra el mecanismo de deformación de las espumas metálicas.

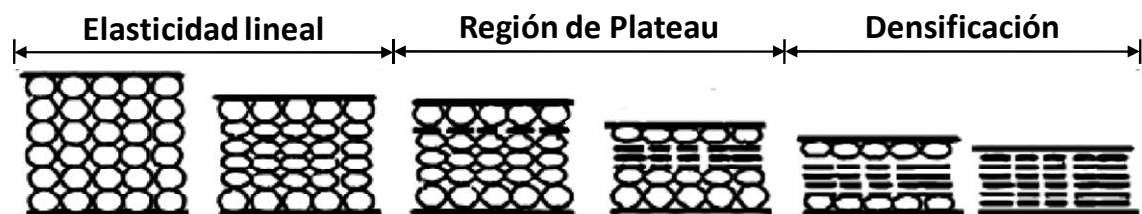


Figura 1.6 Mecanismo de deformación de las espumas metálicas [11].

El módulo de Young (E) es la constante cuya magnitud describe la elasticidad de los materiales y en el caso de las espumas metálicas corresponde a la pendiente de la región de elasticidad lineal. El esfuerzo de colapso plástico (σ_{CP}) es el punto donde comienzan a colapsar las primeras vigas o soportes del material, es decir, donde inicia la deformación plástica de la espuma [12].

El esfuerzo de Plateau (σ_{PI}) corresponde a la media aritmética del esfuerzo aplicado entre el 20% y el 40% de deformación, mientras que el fin de la región de Plateau (ϵ_{PI}) es la deformación correspondiente a 1.3 veces el esfuerzo de Plateau ($1.3\sigma_{PI}$) según la norma ISO 13314 de ensayos de compresión de metales porosos [13].

1.4.1. Capacidad de absorción de energía

Esta propiedad mecánica resulta ser de gran importancia en las espumas metálicas debido a las aplicaciones que estas tienen como disipadores de energía y de vibraciones mecánicas. La energía absorbida por unidad de volumen (W) de un material corresponde al área bajo la curva de su diagrama esfuerzo-deformación en un intervalo de deformación determinado; esta magnitud se obtiene a partir de la integral definida planteada en la fórmula 1.3, donde la

variable dependiente es el esfuerzo aplicado (σ) y la variable independiente es la deformación producida (ϵ).

$$E_v = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

1.3

En la figura 1.7 se muestra la zona ideal y la zona de seguridad o respaldo para absorber energía en el diagrama esfuerzo-deformación de las espumas. La región de Plateau es donde idealmente se debe absorber la energía dado su comportamiento cuasilineal (estable) y debido a que en esta zona las espumas todavía conservan su integridad estructural a pesar de que el material se ha comenzado a deformar plásticamente. A partir de la densificación se tiene la zona de seguridad o respaldo, que se caracteriza por absorber una gran cantidad de energía debido a que la carga necesaria para deformar las espumas incrementa significativamente por la compactación del material.

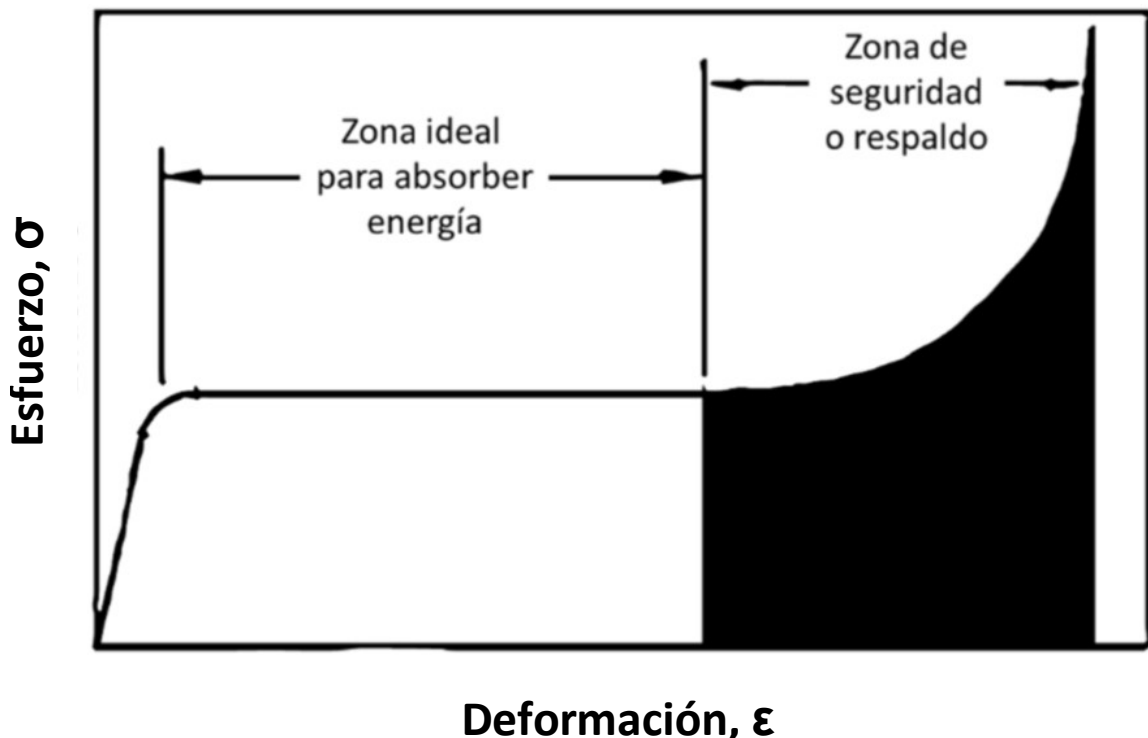


Figura 1.7 Capacidad de absorción de energía en la curva esfuerzo-deformación [14].

1.5. Espumas de aluminio

Las espumas metálicas más ampliamente producidas y utilizadas son las de *Al*, debido a las características de este metal y a su practicidad de uso. Las propiedades mecánicas y físicas dependen fuertemente de sus parámetros estructurales como su densidad y porosidad, que varían en el rango de 0.08 a 1.00 g/cm³ y del 50% al 98%, respectivamente según el método de fabricación. Son reciclables, no contaminantes y ofrecen una combinación de propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas características de un material homogéneo, además de permanecer estables a alta temperatura. Todas estas características hacen que tengan importantes aplicaciones en distintos sectores tales como en la industria automotriz, aeroespacial, naval y en la construcción.

1.5.1. Propiedades del aluminio

El *Al* es el elemento metálico más abundante presente en la corteza terrestre y dentro del grupo de los metales no féreos, es el material más ampliamente utilizado industrialmente. Por su ligereza, resistencia mecánica aleado con otros elementos, alta conductividad térmica y eléctrica y su resistencia a la corrosión, el *Al* es un material conveniente para un sinfín de aplicaciones, desde estructurales hasta decorativas [15, 16]. En la tabla 1.1 se muestran las propiedades químicas y físicas de este metal.

Tabla 1.1 Propiedades químicas y físicas del *Al* [15].

Propiedades químicas		Propiedades físicas	
Símbolo	<i>Al</i>	Punto de fusión	660 °C
Número atómico	13	Punto de ebullición	2450 °C
Masa atómica	26.98 g/mol	Densidad	2.71 g/cm ³
Radio atómico	1.43 Å	Calor específico	0.90 J/g°C
Valencia	3	Conductividad térmica	238 W/m°C
Estado de oxidación	+3	Resistividad eléctrica	2.7 x10 ⁻⁶ Ωcm
Electronegatividad	1, 5		
Estructura cristalina	FCC		

El *Al* puro prácticamente no tiene aplicación, dado que se trata de un material blando y de poca resistencia mecánica, por lo que generalmente se emplea como metal base en aleaciones. Con la adición de otros elementos, se busca modificar las propiedades química, físicas y mecánicas de este metal, utilizando generalmente Cobre (*Cu*), Silicio (*Si*), Magnesio (*Mg*), Zinc (*Zn*) y Manganeso (*Mn*)

como microaleantes. También pueden estar presentes como impurezas en las aleaciones el Hierro (*Fe*), Cromo (*Cr*) y Titanio (*Ti*), así como Níquel (*Ni*), Cobalto (*Co*), Plata (*Ag*), Litio (*Li*), Vanadio (*V*), Circonio (*Zr*), Estaño (*Sn*), Plomo (*Pb*), Cadmio (*Cd*) y Bismuto (*Bi*), para formar otras aleaciones especiales.

Las aleaciones de *Al* se designan con un número de 4 dígitos (YXXX) de acuerdo con el sistema adoptado por la Aluminum Association [17, 18]. El primer dígito (Y) indica el tipo de aleación de acuerdo con el elemento aleante principal y los tres restantes (XXX) indican la aleación específica de aluminio o la pureza de este. En la tabla 1.2 se muestra la designación del primer dígito en función del elemento aleante principal.

Tabla 1.2 Designación del elemento aleante principal en aleaciones de *Al* [17].

Componente principal	Designación
<i>Al</i> sin alear 99%	1
<i>Cu</i>	2
<i>Mn</i>	3
<i>Si</i>	4
<i>Mg</i>	5
<i>Mg, Si</i>	6
<i>Zn</i>	7
Otros	8

El *Al* 1100 (*Al*₁₁₀₀) es la presentación de este metal con mayor pureza comercial, con módulo de Young de 70 GPa y esfuerzo de cedencia de 170 MPa. La composición química de esta serie se muestra en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Composición química del *Al*₁₁₀₀ [17].

Elemento	%Wt
<i>Si</i>	0.95 (<i>Si</i> + <i>Fe</i>)
<i>Fe</i>	
<i>Cu</i>	0.05 - 0.20
<i>Mg</i>	0.05
<i>Zn</i>	0.1
Otros	0.15
<i>Al</i>	Balance

1.5.2. Espumas de aluminio Duocel®

Duocel® es una referencia comercial de espumas de aluminio de celda abierta producidas por ERG Materials and Aerospace, que consiste en una red de vigas o soportes interconectados en un arreglo tridimensional perfectamente periódico. Estas espumas presentan una estructura isotrópica y una baja densidad, son químicamente estables y tienen alta conductividad térmica y eléctrica debido a su alta proporción entre área superficial y volumen [19]. Se encuentran disponibles en aleaciones de Al 1100, 6061, 6101 y 7075.

La matriz porosa de estas espumas, además de ser rígida y altamente permeable, es completamente repetible debido a su proceso de fabricación y es homogénea en toda su estructura. En la tabla 1.4 se muestran las propiedades físicas y mecánicas de las espumas de aluminio Duocel®, mientras que en la figura 1.8 se muestran algunas piezas fabricadas con componentes de este material, para disipar calor y fungir como filtros de ventilación.

Tabla 1.4 Propiedades físicas y mecánicas de las espumas de aluminio Duocel®.

Propiedad	Magnitud
Punto de fusión	660 °C
Densidad	0.08 - 0.33 g/cm ³
Calor específico	0.90 J/g°C
Conductividad térmica	5.8 W/m°C
Coefficiente de expansión térmica (0-100 °C)	23.58 x10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Resistividad eléctrica	7.2 x10 ⁻⁵ Ωcm
Esfuerzo de colapso plástico a compresión	2.53 MPa
Módulo de Young a compresión	103.08 MPa

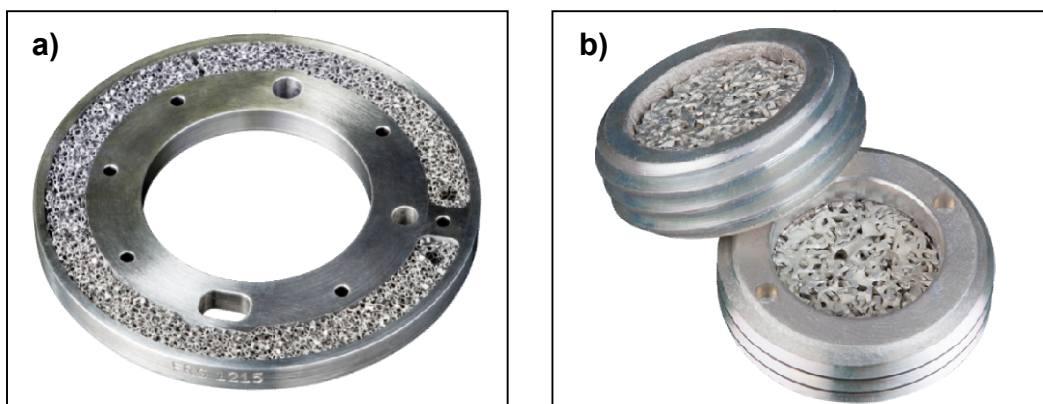


Figura 1.8 Piezas producidas con componentes de espuma de aluminio Duocel® a) intercambiador de calor, b) filtros de ventilación [19].

1.6. Aplicaciones de las espumas

Las espumas metálicas se emplean en aplicaciones funcionales y estructurales, principalmente en aquellas donde es necesario hacer pasar algún fluido a través de un medio poroso para transportarlo, filtrarlo o enfriarlo. A continuación se describen algunas de las aplicaciones en las que estos materiales se emplean actualmente.

1.6.1. Aplicaciones estructurales

Las espumas de *Al* son utilizadas para reducir el peso de piezas automotrices y en estructuras tipo sándwich de los elementos externos de automóviles, como se muestra en la figura 1.9, para disipar la energía transferida durante un choque. También se emplean como componentes de elementos de sujeción en las alas de aeronaves, como paredes de elevadores y para fabricar plataformas de antenas parabólicas [20, 27].

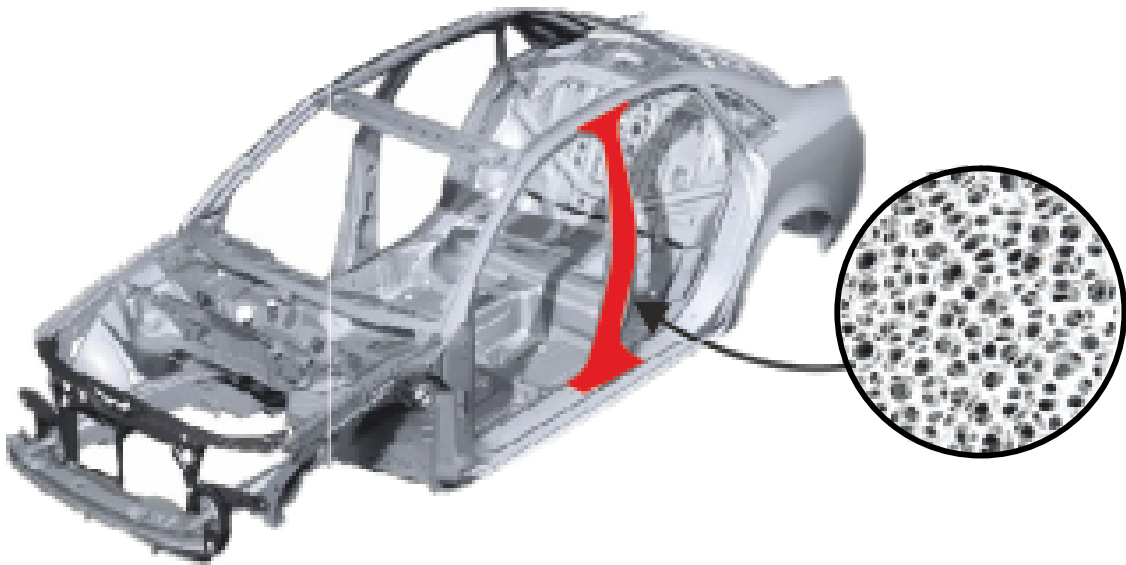


Figura 1.9 Espuma metálica en estructura tipo sándwich de autopartes [20].

Recientemente se han fabricado huesos humanos artificiales de espumas metálicas con poros en un intervalo de tamaño de 150 a 250 μm , manteniendo las propiedades mecánicas deseadas para esta aplicación [21-23]. Igualmente, se ocupan como elemento de refuerzo en columnas de soporte de carga, incrementando la elasticidad y resistencia a la flexión de estos elementos [2].

1.6.2. Filtros y separación de partículas sólidas

Las espumas de celda abierta son empleadas como filtros de partículas sólidas presentes en líquidos o gases. Igualmente, según el metal base de la espuma, se pueden utilizar para separar entre sí fases líquidas o gaseosas a partir de la capilaridad y absorción selectiva de fluidos por parte del medio poroso.

En la industria aeroespacial, son usadas las espumas de acero inoxidable para purificar combustible y aceite en sus respectivas líneas de suministro, mientras que espumas de aceros al carbono se ocupan para separar lodo y arena durante la extracción de petróleo. En la industria química, petroquímica y metalúrgica, se emplean espumas de bronce, *Ni* y acero inoxidable para la distribución y control de fluidos a alta temperatura, debido a la resistencia a la corrosión y estabilidad térmica de estos materiales [2, 24, 28].

1.6.3. Disipación de sonido

Son usados paneles de espumas de *Al* como paredes para reducir la contaminación acústica. Cuando las ondas sonoras entran en contacto con la superficie de la espuma, un porcentaje de estas son reflejadas y el resto se transmiten en la estructura interna del medio. Durante la transmisión de las ondas, la vibración generada induce el movimiento del aire, causando fricción con las paredes de los poros, convirtiendo esta vibración en energía calorífica y disipando así el sonido. La capacidad de absorción de sonido de una espuma metálica se puede manipular modificando su porosidad y el tamaño de los poros, controlando la fricción de las ondas con las paredes mediante la variación del área superficial efectiva y la cantidad de poros por unidad de volumen [2, 25, 29].



Figura 1.10 Panel de espuma de *Al* empleado para disipación de sonido [30].

1.6.4. Intercambiadores de calor

Por su naturaleza metálica, las espumas presentan una elevada conductividad térmica, aunado a su elevada área superficial efectiva, debido a su naturaleza porosa. Se utilizan principalmente espumas de celda abierta de *Cu* y *Al* para intercambiadores de calor y radiadores en torres de condensación, sistemas de enfriamiento de motores y en intercambiadores de calor de máquinas térmicas, tales como refrigeradores y aires acondicionados [25].

Las propiedades térmicas de las espumas se pueden modificar manipulando su área superficial efectiva y el material base del cual están fabricadas. En la figura 1.11 se muestra un intercambiador de calor de serpentín recubierto de espuma metálica.

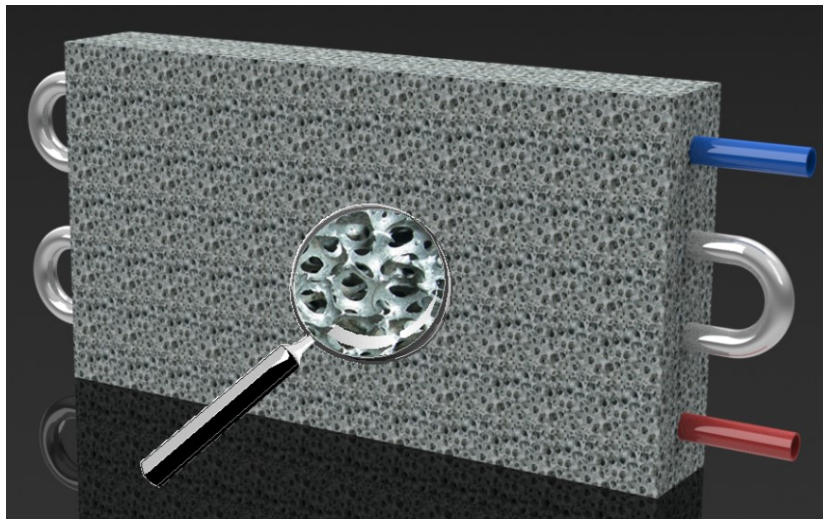


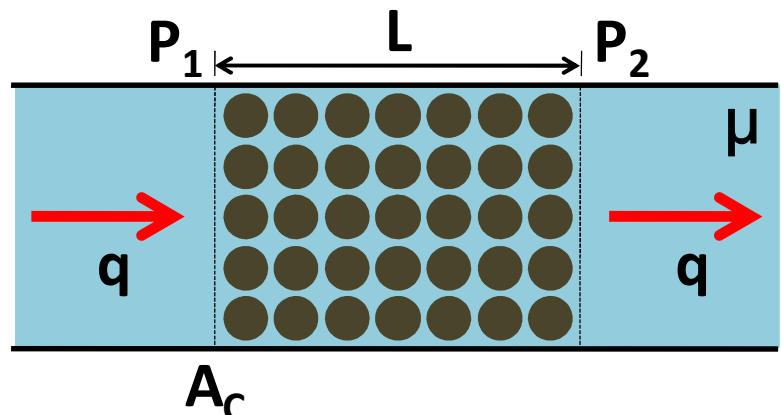
Figura 1.11 Intercambiador de calor de serpentín cubierto de espuma metálica [31].

1.6.5. Electrodo poroso

Por sus propiedades eléctricas, las espumas se utilizan como electrodos, componentes de capacitores y baterías y en celdas solares. Se emplean espumas de *Ni* para electrodos de baterías por su alta eficiencia para ser recargadas y por su coeficiente de difusión eléctrica se utilizan en procesos electroquímicos, como lo es la electrocatálisis para inducir potencial y disociar partículas de compuestos orgánicos. Por otro lado, espumas de *Cu* mejoran el rendimiento en acumuladores en comparación con su equivalente en bulto, debido a su mayor área específica, incrementando la capacidad de estos y permitiendo usar otros elementos activos en su funcionamiento [24].

1.7. Permeabilidad

La permeabilidad (κ) se refiere a la capacidad de un material para permitir el paso de un fluido a través de su volumen poroso [10, 32]. Existen diferentes modelos que buscan explicar esta variable en función de diferentes parámetros, siendo el más aceptado el propuesto por el ingeniero francés Henry Darcy, cuya ley se expresa como se muestra en la fórmula 1.4 y las variables que intervienen en ella se observan en la figura 1.12.

$$\kappa = \frac{q \mu L}{A_c \Delta P} \quad 1.4$$


El diagrama muestra un tubo horizontal con un medio poroso en el centro. El tubo tiene una longitud L y un área transversal A_c . El fluido con viscosidad μ fluye desde una presión P_1 a la izquierda hasta una presión P_2 a la derecha, con un flujo q . El medio poroso está representado por una red de círculos azules.

Figura 1.12 Variables que intervienen en la ley de Darcy.

La ley de Darcy permite obtener la permeabilidad de un material al hacer pasar un fluido con viscosidad conocida (μ) a través de una muestra con área transversal (A_c) y longitud (L) definidas, resultando en una diferencia de presiones ($\Delta P = P_2 - P_1$) y un flujo (q) condicionado por la disposición de los poros en el medio [10, 32]. Este modelo teórico tiene las siguientes consideraciones:

- El fluido no se puede comprimir.
- El medio poroso que atraviesa el fluido es homogéneo.
- El flujo es de carácter lineal.
- El flujo del fluido es isotérmico.
- El fluido no reacciona en ningún momento con el medio poroso que atraviesa.

La magnitud de la permeabilidad de un material depende principalmente del tamaño, forma y distribución de los poros, así como de la comunicación física entre los mismos. No obstante, la naturaleza del fluido de prueba también tiene

efecto en esta propiedad y se tienen dos limitaciones fundamentales de la ley de Darcy para este efecto:

- 1) El hecho de que la constante k no dependa únicamente del medio poroso, ya que su valor también depende del fluido que lo atraviesa.
- 2) La relación no lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico, lo cual pasa si la constante toma un valor muy bajo o si las velocidades son muy elevadas.

Por lo anterior, en la determinación de la permeabilidad de un mismo material con diferentes configuraciones estructurales, idealmente se debe emplear el mismo fluido de prueba y así disminuir la variación en el análisis.

1.7.1. Experimento de Darcy

El ingeniero Henry Darcy trabajó durante muchos años en el abastecimiento de agua de la ciudad francesa de Dijón, para lo cual se utilizaban filtros de arena con el fin de depurar el líquido.

Para estudiar el flujo del agua, Darcy inventó un permeámetro como el que se muestra en la figura 1.13; este dispositivo consiste en un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua conectando a uno de sus extremos un depósito elevado de nivel constante. En el otro extremo se regula el caudal de salida mediante un grifo que en cada experimento mantiene el caudal constante. Finalmente, se mide la altura de la columna de agua en varios puntos [33].

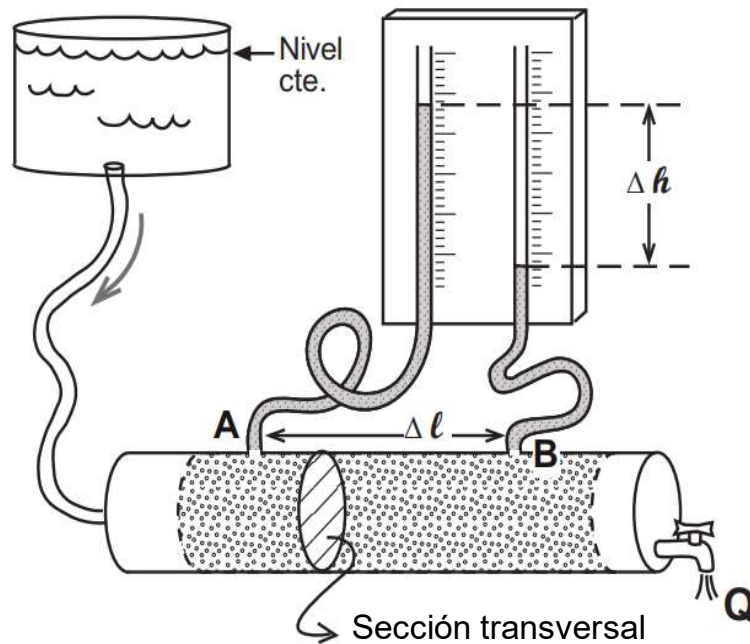


Figura 1.13 Permeámetro de Darcy [33].

Darcy repitió este experimento con varios materiales porosos modificando las variables, deduciendo que el caudal que atravesaba el permeámetro era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico y que la constante de proporcionalidad era característica de cada arena o material que llenaba el dispositivo.

Con frecuencia, la permeabilidad vertical de un medio con poros dendríticos es menor que la permeabilidad horizontal, debido a la forma y disposición de los granos (figura 1.14a) o a la presencia de láminas intercaladas de menor permeabilidad (figura 1.14b). Para una descripción apropiada y completa de la permeabilidad de un material, es necesario valores en las tres direcciones K_x , K_y y K_z .

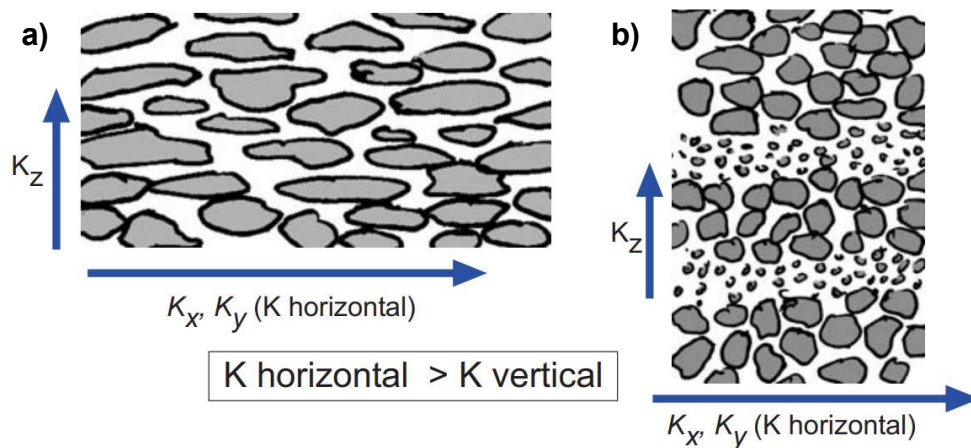


Figura 1.14 Permeabilidad con a) poros dendríticos, b) disposición laminar de poros [33].

1.7.2. Viscosidad

La viscosidad es la oposición o resistencia de un fluido a las deformaciones tangenciales y se debe a las fuerzas de cohesión moleculares. Todos los fluidos poseen cierta viscosidad (excepto los fluidos ideales) debido a las colisiones entre sus partículas que se mueven a diferentes velocidades. Así, cuando el fluido es obligado a moverse, dichas partículas generan resistencia de fricción, retardando o impidiendo el desplazamiento. Esto se debe a que el líquido se compone por varias capas de materia, que tienden a mantenerse juntas entre sí incluso ante presencia de fuerzas externas [34, 35].

La viscosidad dinámica, también llamada viscosidad absoluta, se entiende como la relación entre el gradiente de velocidad (velocidad de movimiento de las partículas) y el esfuerzo cortante aplicado (T).

Las unidades en que se expresa según el sistema internacional son los pascales-segundo (Pa·s). Su magnitud depende de la naturaleza del fluido y de la temperatura: (a mayor temperatura, menor viscosidad) como se muestra en la figura 1.15 y puede medirse empleando un viscosímetro o un reómetro.

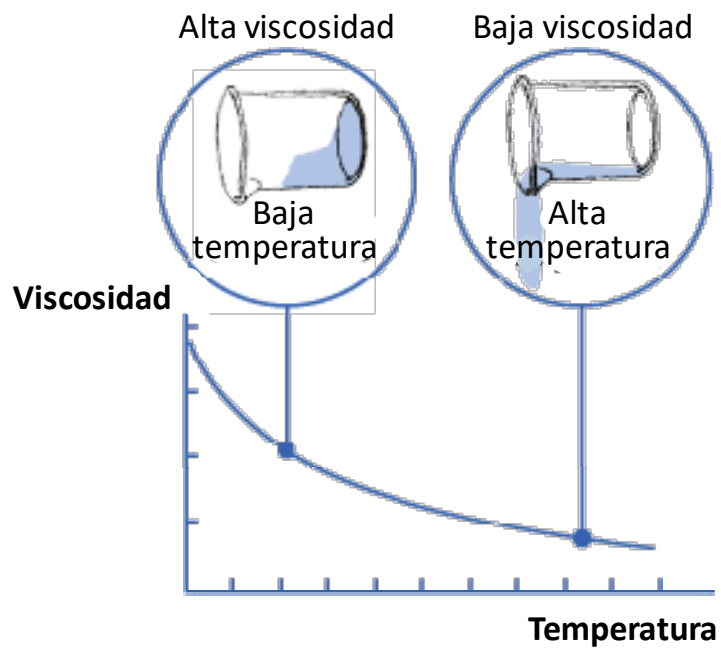


Figura 1.15 Correlación entre la viscosidad y la temperatura [36].

Capítulo 2

Desarrollo experimental

En este capítulo se describe a detalle el equipo empleado, los materiales necesarios y las etapas del proceso para la producción de espumas de *Al* de celda abierta de tres tamaños de poro diferentes, así como los pasos para realizar su caracterización física, estructural y mecánica, finalizando con el procedimiento seguido para efectuar el ensayo de permeabilidad.

2.1. Producción de las espumas

Las espumas fueron producidas a partir de la infiltración de *Al* líquido en una preforma sólida de sacrificio conformada por granos de cloruro de sodio (*NaCl*) bajo condiciones de atmósfera controlada [37-40], para lo cual se utilizó el equipo que se muestra en la figura 2.1, mismo que a continuación se describe:

- A.** Crisol: conformado por un cilindro y dos platos cuadrados de acero inoxidable 316, capaz de soportar una temperatura superior al punto de fusión (T_f) del *Al* y del *NaCl* para realizar el proceso de fundición e infiltración.
- B.** Sistema de válvulas con manómetro: regula la presión y el flujo de gas al interior del crisol; por un lado está acoplado a una bomba mecánica de vacío y por el otro a un tanque de argón (*Ar*), con manómetro al centro para regular la presión del sistema.
- C.** Horno: su diseño de puertas con apertura vertical permite el manejo adecuado y seguro del dispositivo de infiltración durante todas las etapas del proceso.
- D.** Bomba mecánica de vacío: aplica succión durante la purga del crisol a fin de eliminar las impurezas existentes al interior de este que pudieran reaccionar con los elementos involucrados en el proceso o propiciar una infiltración defectuosa; también permite detectar fugas entre las interfaces ensambladas del crisol.
- E.** Tanque de *Ar*: necesario para promover la infiltración del *Al* fundido a través de los espacios vacíos interconectados de la preforma de *NaCl* a partir de un incremento de presión de este gas. Debido a las propiedades químicas del *Ar*, se garantiza una atmósfera inerte al interior del sistema, la cual es controlada mediante el sistema de válvulas con manómetro.
- F.** Placa de *Cu*: su función es direccionar la solidificación del *Al* al interior del crisol e inducir a que el rechupe se forme en la región sólida remanente que no forma parte de la espuma.

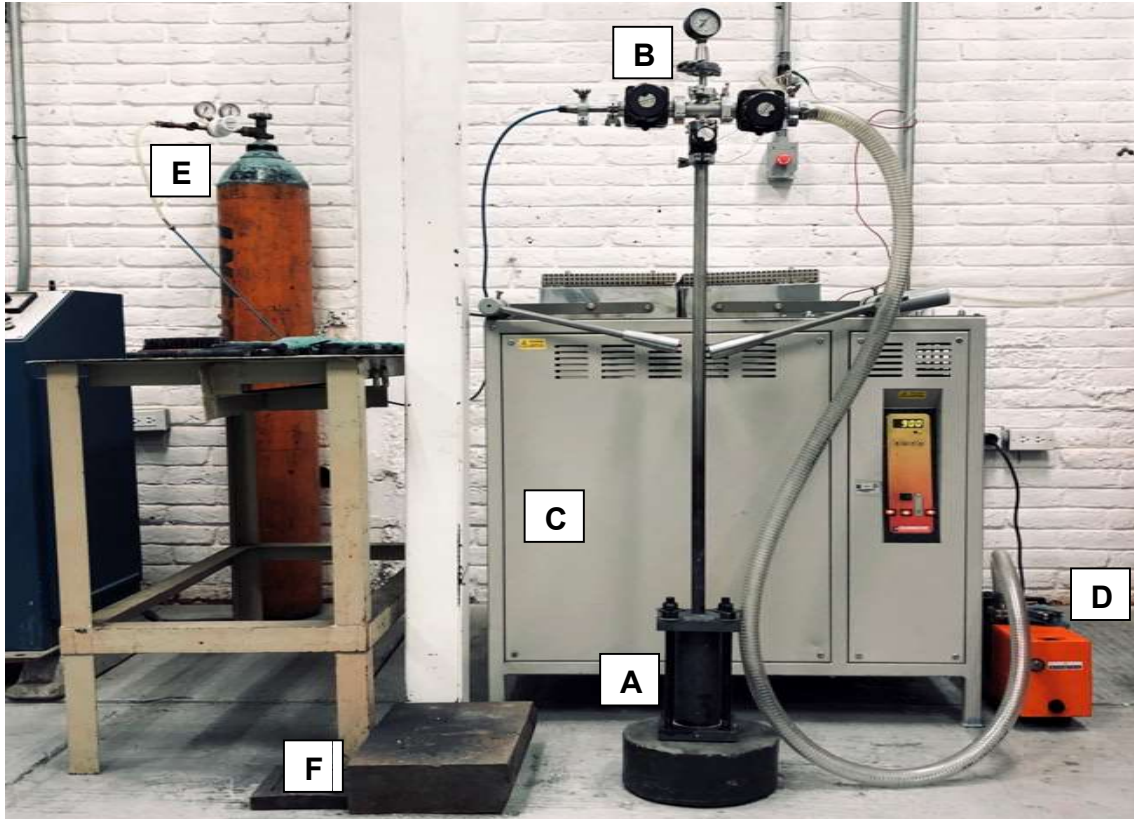


Figura 2.1 Dispositivo de infiltración y equipo empleado.

2.1.1. Materiales

El *Al* utilizado para fabricar las espumas consistió en lingotes cilíndricos de este metal (figura 2.2a), los cuales fueron analizados en un equipo de fluorescencia de rayos X de la marca Bruker modelo Titan S1 (figura 2.2b) para garantizar una pureza no menor al 99%, esperando una composición química como la que se muestra en la tabla 2.1.

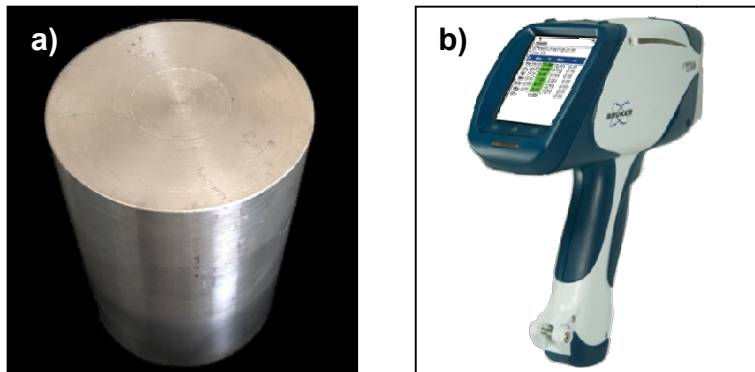


Figura 2.2 a) Lingote cilíndrico de *Al*, b) pistola de fluorescencia de rayos X.

Tabla 2.1 Composición química esperada de los lingotes de Al.

Elemento	Mínimo	Máximo
Al	97.00	100.00
Fe	0.00	0.95
Cu	0.05	0.20
Zn	0.00	0.10
Ti	-	-
Cr	-	-
Ni	-	-
Si	0.00	0.95

La preforma seleccionada consistió en granos de *NaCl* dado que su punto de fusión ($T_f=801\text{ }^\circ\text{C}$) es superior al del *Al* ($T_f=660\text{ }^\circ\text{C}$), condición indispensable para la correcta ejecución del método, además de su estabilidad química en contacto con el metal fundido y su facilidad de disolución en medio acuoso.

Los granos de *NaCl* presentaron geometrías irregulares y fueron separados por intervalos de tamaño haciendo uso de tamices, tomando como referencia la norma ASTM E11-17 [41] que estandariza el tamaño de abertura de las mallas. Este control dimensional es importante debido a que los poros se obtienen por el lixiviado de la preforma de *NaCl*.

En la tabla 2.2 se muestra la denominación de los tamices empleados (figura 2.3a) para separar los granos de *NaCl* utilizados para la preforma (figura 2.3b), según la norma ASTM E11-17. Los intervalos de tamaño de poro fueron definidos como poro 1 (P1), 2 (P2) y 3 (P3) en orden ascendente de tamaño, de manera que se tiene un poro pequeño, mediano y grande.

Tabla 2.2 Denominación y tamaño de abertura de los tamices empleados para separar los granos de *NaCl* de acuerdo a la norma ASTM E11-17.

Poro	Tamaño de abertura		Denominación
	mm	in	
P1	0.71	0.0278	25
	1.00	0.0394	18
P2	2.00	0.0787	10
	2.38	0.0937	8
P3	3.35	0.1320	6
	4.75	0.1870	4

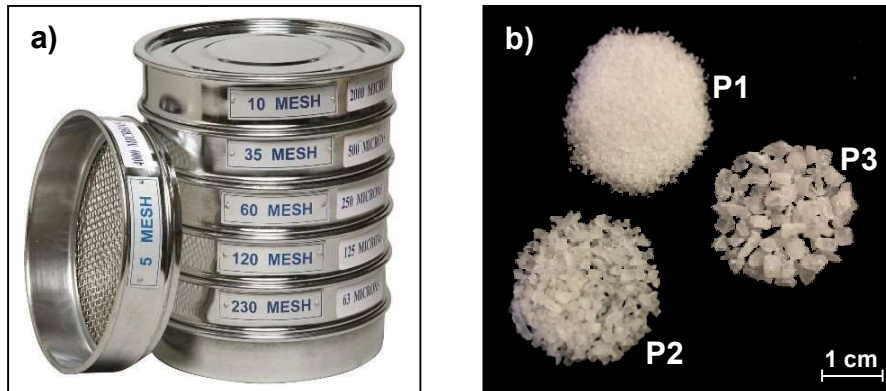


Figura 2.3 a) Tamices empleados para separar los granos de $NaCl$ por intervalos de tamaño, b) granos de $NaCl$ separados por intervalos de tamaño para producir los poros P1, P2 y P3.

2.1.2. Preparación y ensamblado del crisol

Las paredes internas del crisol son recubiertas de nitruro de boro (BN) para evitar la adherencia del metal fundido y facilitar la extracción de la espuma una vez solidificado el Al , así como para proteger el crisol de la corrosión por picadura generada por el $NaCl$ a alta temperatura. Sobre los canales de los platos se colocaron empaques de alta temperatura para sellar el sistema, evitando así variaciones de presión y el derrame de material cuando el crisol es extraído del horno. En la figura 2.4 se muestran los componentes del crisol listos para ser ensamblados.

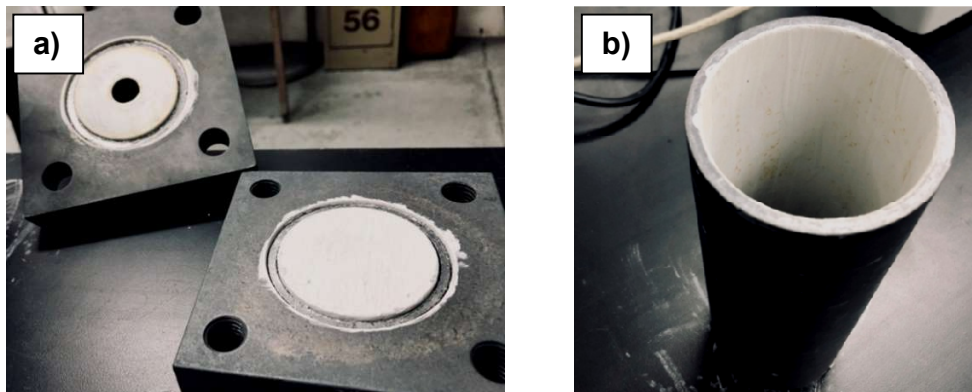


Figura 2.4 Componentes del crisol recubiertos de BN y con empaques de alta temperatura a) platos, b) cilindro.

Una vez que el crisol ha sido preparado, en su interior se coloca la preforma de $NaCl$ y encima el lingote de Al , en proporción adecuada para que la infiltración sea completa y tomando en consideración el rechupe inherente al proceso de solidificación del metal. En la figura 2.5a se observa la cantidad de $NaCl$ y Al

necesaria para producir una espuma cilíndrica con diámetro de 6.3 cm y longitud de 7 cm, mientras que en la figura 2.5b se observa la proporción para una espuma con el mismo diámetro pero longitud de 9 cm. Subsecuentemente, los platos son unidos al cilindro a partir de varillas roscadas con tuercas.

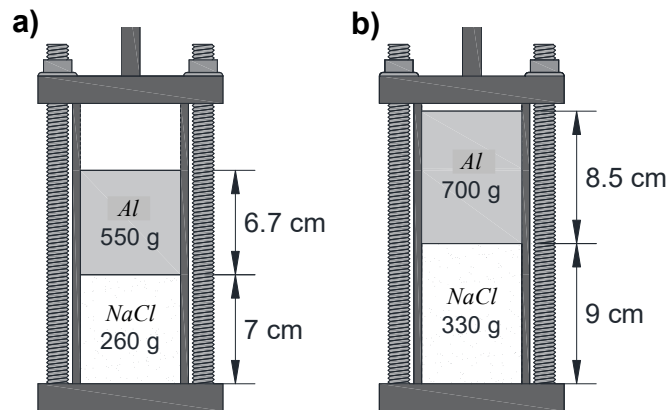


Figura 2.5 Cantidad de *Al* y *NaCl* necesaria para producir espumas con un diámetro de 6.3 cm y altura de a) 7 cm, b) 9cm.

2.1.3. Purga

El sistema de válvulas con manómetro es acoplado al crisol para realizar la purga del sistema; este proceso consiste en aplicar succión para generar vacío (figura 2.6a) buscando eliminar el oxígeno (*O*) y las impurezas presentes, posteriormente se introduce *Ar* (figura 2.6b) a una presión controlada, repitiendo este ciclo tres veces para garantizar una atmósfera inerte al interior del crisol. El manómetro opera desde una presión de vacío de 1 kg/cm² hasta una presión manométrica de 2 kg/cm².

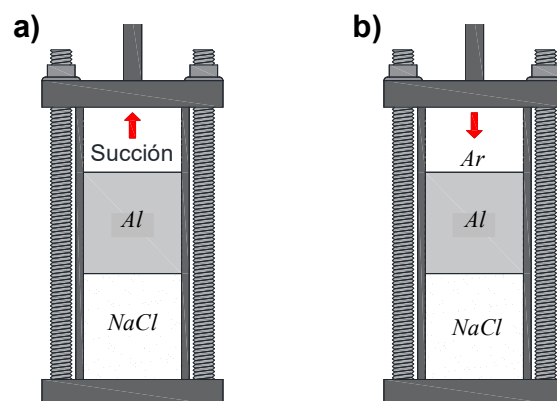


Figura 2.6 Ciclo de purga a) succión para generar vacío, b) entrada de *Ar* a presión controlada.

2.1.4. Fundición e infiltración

En esta etapa, el crisol ensamblado se coloca al interior del horno para que el lingote de *Al* se funda (figura 2.7a) e infiltre la preforma de *NaCl* (figura 2.7b); las variables que intervienen en este proceso son las siguientes:

- Temperatura (T): debe ser mayor al punto de fusión del *Al* pero inferior al del *NaCl*.
- Presión de fundición (P_f): presión de la atmósfera controlada durante la fundición del *Al*.
- Tiempo de fundición (t_f): intervalo de tiempo necesario para que el lingote de *Al* se funda completamente.
- Presión de infiltración (P_i): presión de *Ar* requerida para empujar el *Al* líquido y promover su infiltración a través del volumen vacío existente entre los granos de *NaCl*.
- Tiempo de infiltración (t_i): intervalo de tiempo durante el cual el *Al* debe infiltrar totalmente la preforma de *NaCl*.

En la tabla 2.3 se observan los parámetros de tiempo, presión y temperatura determinados para producir las espumas en función del tamaño de los poros.

Tabla 2.3 Parámetros de temperatura, tiempo y presión para el proceso de fundición e infiltración en la producción de espumas de *Al*.

Poro	T (°C)	P_f (kg/cm ²)	t_f (min)	P_i (kg/cm ²)	t_i (min)
P1	780	0.50	70	2.00	30
P2	780	0.50	70	1.65	25
P3	770	0.50	60	1.25	20

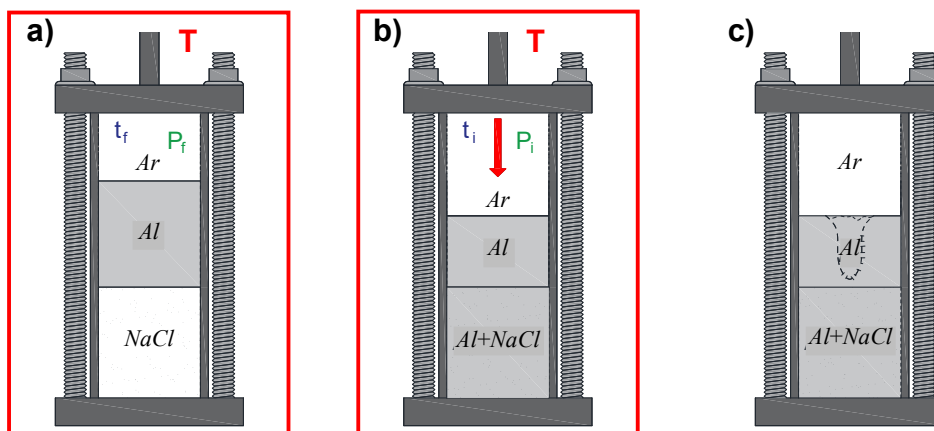


Figura 2.7 a) Fundición, b) infiltración, c) solidificación.

Cuando el crisol es extraído del horno, el *Al* comienza su proceso de solidificación (figura 2.7c); en la figura 2.8a se muestra el crisol inmediatamente después de que es retirado del horno, mientras que la figura 2.8b muestra el mismo crisol 5 minutos después, donde la región superior de color naranja es el *Al* remanente y la inferior con coloración más oscura es el *NaCl* infiltrado totalmente por el *Al*.

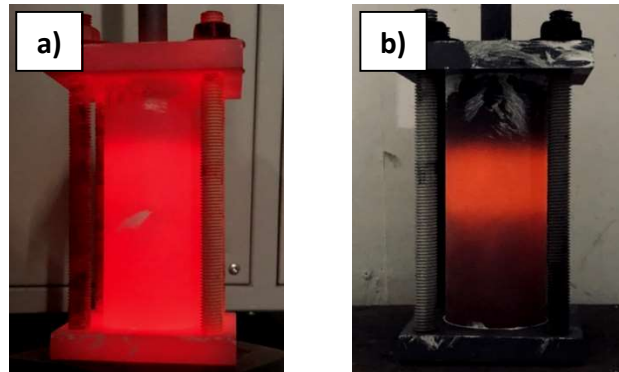


Figura 2.8 Crisol retirado del horno a) inmediatamente después, b) 5 minutos después.

2.1.5. Obtención de las probetas

Una vez que el crisol alcanza temperatura ambiente, este es desmontado y se procede a retirar el material resultante para su maquinado en un torno mecánico. Los especímenes para ensayos de compresión deben mantener una relación longitud/diámetro (l/d) de 0.8, 1.5 o 2 [42] para evitar efecto de pandeo, por lo que las dimensiones definidas fueron 2.54 cm de diámetro y 2.00 cm de longitud (figura 2.9a). Por su parte, el tamaño de las probetas para ensayos de permeabilidad es condicionado solamente por el tamaño de la camisa donde se montan las piezas al equipo, cuyas dimensiones son 3.81 cm de diámetro y 5.00 cm de longitud (figura 2.9b).

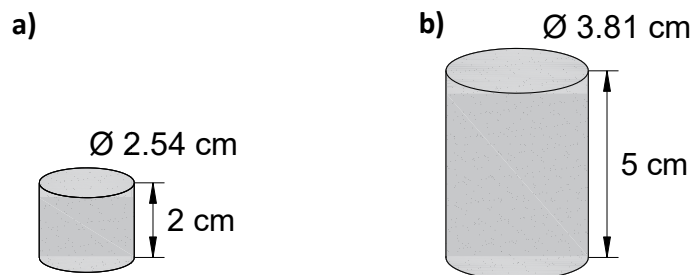


Figura 2.9 Dimensiones de las probetas para ensayos de a) compresión, b) permeabilidad.

Finalmente, las probetas son colocadas en un recipiente con agua destilada para lixiviar el $NaCl$, ocupando una tina de baño ultrasónico (figura 2.10a) y una parrilla de agitación magnética (figura 2.10b) por intervalos de tiempo de 60 minutos cada uno, permaneciendo únicamente el Al con porosidad interconectada.

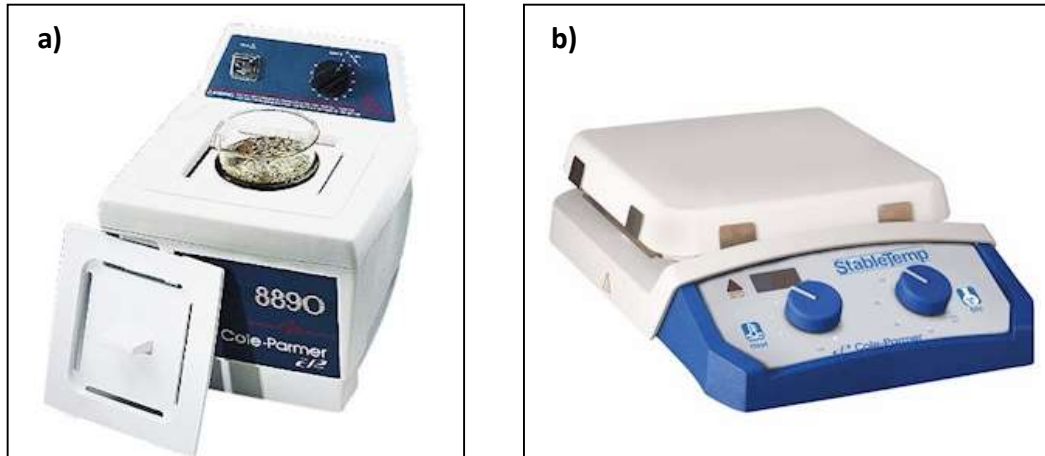


Figura 2.10 a) Tina de baño ultrasónico, b) parrilla de agitación magnética.

2.2. Caracterización física y estructural

Todas las probetas producidas para desarrollar esta investigación fueron caracterizadas física y estructuralmente, con el objeto de establecer una correlación entre estos parámetros y el desempeño mecánico de las espumas; asimismo, a partir de los resultados obtenidos de esta caracterización fueron sentadas las bases para el análisis de permeabilidad.

2.2.1. Porosidad

Este parámetro se obtuvo por dos métodos, el primero de ellos consistió en pesar en una báscula las espumas para conocer su masa (m) y calcular el volumen (V) a partir de la fórmula de densidad ($\rho=m/V$), donde el valor de ρ corresponde a la densidad del Al_{100} ($\rho=2.71 \text{ g/cm}^3$); asumiendo que todo el $NaCl$ ha sido removido, V es el volumen de Al (V_{Al}) presente en la probeta, determinando la porosidad efectiva (Φ_{Ef}) mediante la fórmula 2.1, donde V_{Pr} es el volumen de la probeta según corresponda y expresando el valor resultante en porcentaje (%).

$$\Phi_{Ef} = \frac{V_{Pr} - V_{Al}}{V_{Pr}} \quad (100) \quad 2.1$$

En el segundo método V_{Al} se obtuvo usando un picnómetro de helio (*He*) Ultrapyc 1200e como el que se aprecia en figura 2.11, equipo con el cual se mide el volumen de piezas con geometría irregular. Su funcionamiento consiste en medir el volumen de gas desplazado y el cambio de presión asociado a partir del principio de Arquímedes y la ley de Boyle [43] cuando un cuerpo sólido es introducido en una celda de ensayo, tomando como referencia una segunda celda con el mismo volumen. Para lograr una mayor precisión en las mediciones, el picnómetro fue calibrado a una presión de 19 psi cada vez que fue utilizado. Con el V_{Al} obtenido, Φ_{Ef} fue determinada de la misma forma que en el método anterior.



Figura 2.11 Picnómetro de *He* Ultrapyc 1200e.

Con el fin de determinar el comportamiento de la porosidad a lo largo de la longitud de las espumas, para cada poro fue preparada una probeta de 5 cm de diámetro y 7.5 cm de longitud (figura 2.12a). De estas probetas se obtuvieron ocho rebanadas de 0.5 cm de espesor (figura 2.12b), calculando la porosidad volumétrica y superficial de cada una de estas.

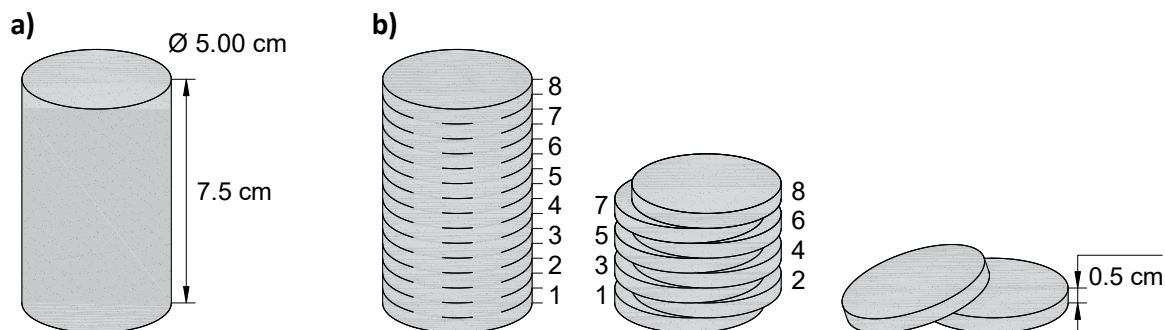


Figura 2.12 a) Dimensiones de las probetas para análisis de porosidad, b) diagrama del corte en rebanadas de 0.5 cm para análisis de porosidad.

La porosidad volumétrica (Φ_{Vol}) de las rebanadas fue calculada con la fórmula 2.1 a partir del primer método mencionado. Para determinar la porosidad superficial (Φ_{Sup}) la cara superior de los discos fue pintada con aerosol negro para oscurecer los poros y posteriormente pulida con lijas, para descubrir la superficie metálica (A_{Al}) con el fin incrementar el contraste. Después se midió el área de esta última con el software Image J y la porosidad superficial se calculó a partir de la fórmula 2.2, donde A_{Pr} es el área total de la superficie plana de las rebanadas.

$$\Phi_{Sup} = \frac{A_{Pr} - A_{Al}}{A_{Pr}} (100) \quad 2.2$$

2.2.2. Espesor de pared de poro

Este parámetro (t_{Pared}) se obtuvo midiendo con el software Image J el espesor de la pared existente entre dos poros, repitiendo aleatoriamente este procedimiento diez veces por cada superficie plana de las probetas y calculando el promedio aritmético de las veinte mediciones realizadas por espuma, expresando el valor resultante en unidades de longitud (mm). Para lograr una mayor precisión, las superficies fueron pulidas con material abrasivo para eliminar irregularidades y definir claramente los bordes de los poros.

2.2.3. Densidad relativa

Para el cálculo de este parámetro, primero se obtuvo la densidad de las espumas mediante la fórmula 2.3, pesando las probetas en una báscula para conocer su masa asumiendo que todo el $NaCl$ ha sido removido y permanece exclusivamente el Al . El valor resultante fue expresado en unidades de masa sobre volumen (g/cm^3). La densidad relativa se determinó dividiendo los valores obtenidos entre la densidad del Al ($\rho=2.71 g/cm^3$), expresándola como una variable adimensional.

$$\rho_{Esp} = \frac{m_{Al}}{V_{Pr}} \quad 2.3$$

2.3. Ensayo de compresión

Para generar los diagramas esfuerzo-deformación de las espumas, se realizaron ensayos de compresión en una máquina universal de pruebas mecánicas marca Instron (figura 2.13), tomando como referencia la norma ASTM E9 89a de métodos de prueba estándar para ensayos de compresión de materiales metálicos [42].



Figura 2.13 Máquina universal de pruebas mecánicas Instron.

A partir de los gráficos generados se determinó el módulo de Young (E), el esfuerzo de colapso plástico (σ_{CP}) y la capacidad de absorción de energía (W) de las espumas en diferentes porcentajes de deformación, ensayando tres probetas de cada poro a temperatura ambiente para obtener una estadística y evaluar la reproducibilidad de las espumas; asimismo fueron ensayadas tres probetas de *Al* sólido como referencia.

2.4. Ensayo de permeabilidad

Este ensayo consistió en inyectar aditivo de gasolina a las espumas en intervalos de presión que van desde 200 psi hasta 25 kpsi, para lo cual se usó el poro-permeámetro que se observa en la figura 2.14.



Figura 2.14 Poro-permeámetro empleado para realizar los ensayos de permeabilidad.

En la figura 2.15 se muestra el diagrama que explica el funcionamiento del poro-permeámetro y los elementos que lo conforman, mismos que a continuación se describen:

- A.** Tanque de almacenamiento de fluido de prueba: en cuyo interior se coloca el aditivo de gasolina.
- B.** Bomba mecánica: su función es promover la circulación del aditivo de gasolina desde el tanque de almacenamiento hasta la prensa hidráulica.
- C.** Prensa hidráulica: su función es inyectar el aditivo de gasolina a la celda de confinamiento en intervalos de presión definidos.
- D.** Celda de confinamiento: en su interior se monta la espuma para ser sometida a la inyección del aditivo de gasolina.
- E.** Gotero: recipiente en el cual se expulsa el aditivo de gasolina para liberar la presión una vez que el ensayo ha sido realizado.

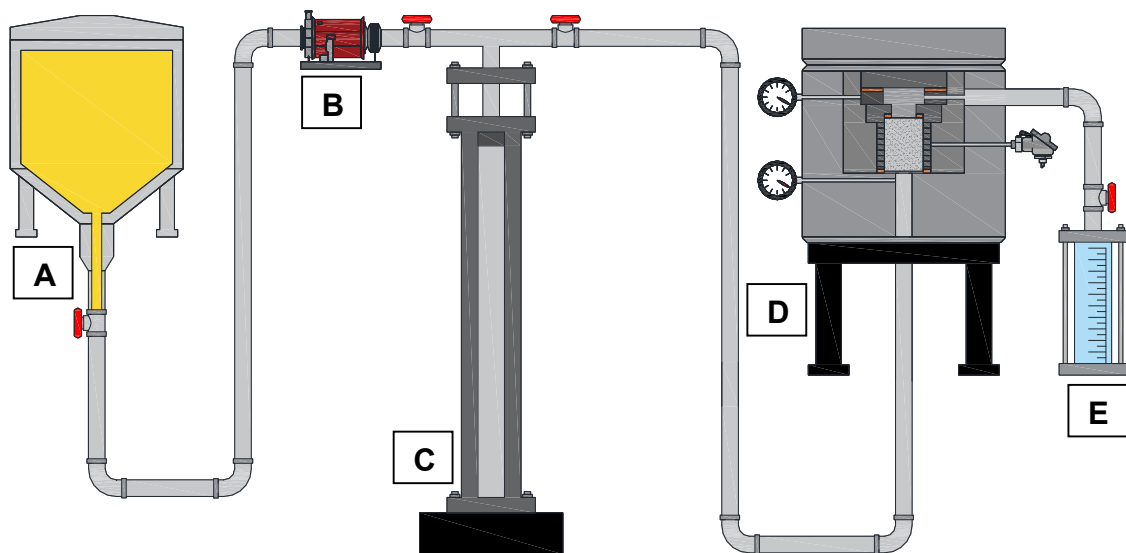


Figura 2.15 Elementos que conforman el poro-permeámetro.

Para ejecutar la prueba, lo primero que se debe hacer es montar la espuma en la celda de confinamiento, tal como se observa en la figura 2.16; partiendo de que la dirección del flujo en la celda es vertical en sentido ascendente (de abajo hacia arriba), la celda cuenta con los siguientes componentes:

- A.** Medidor de presión de entrada: mide la presión a la cual circula el aditivo antes de ser inyectado a la espuma.
- B.** Medidor de presión de salida: mide la presión del aditivo una vez que ha atravesado la espuma.
- C.** Termopar: mide la temperatura al interior de la celda.

- D. Camisa: pieza de acero en cuyo interior se coloca la espuma para ser confinada; se colocan empaques de teflón en ambos extremos de la camisa para asegurar el correcto sellado del sistema.

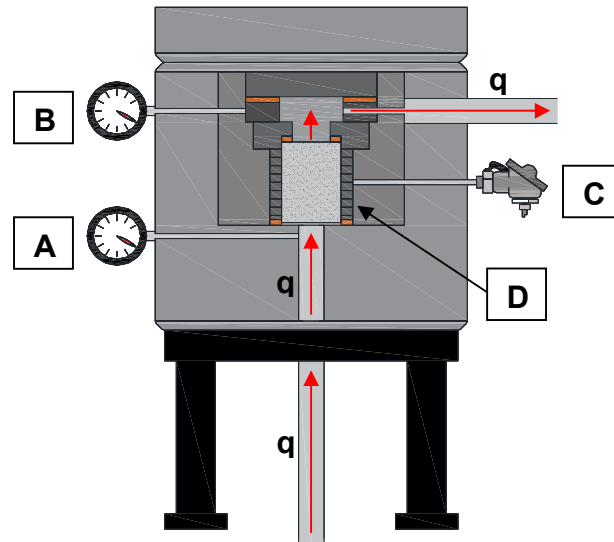


Figura 2.16 Celda de confinamiento con espuma de Al montada.

Posteriormente, la prensa hidráulica se llena con aditivo de gasolina mediante una bomba mecánica, como se aprecia en la figura 2.17. La columna de la prensa tiene una longitud efectiva de 490 mm, misma que la computadora del equipo mide en cada ensayo para determinar la cantidad de fluido desplazado.

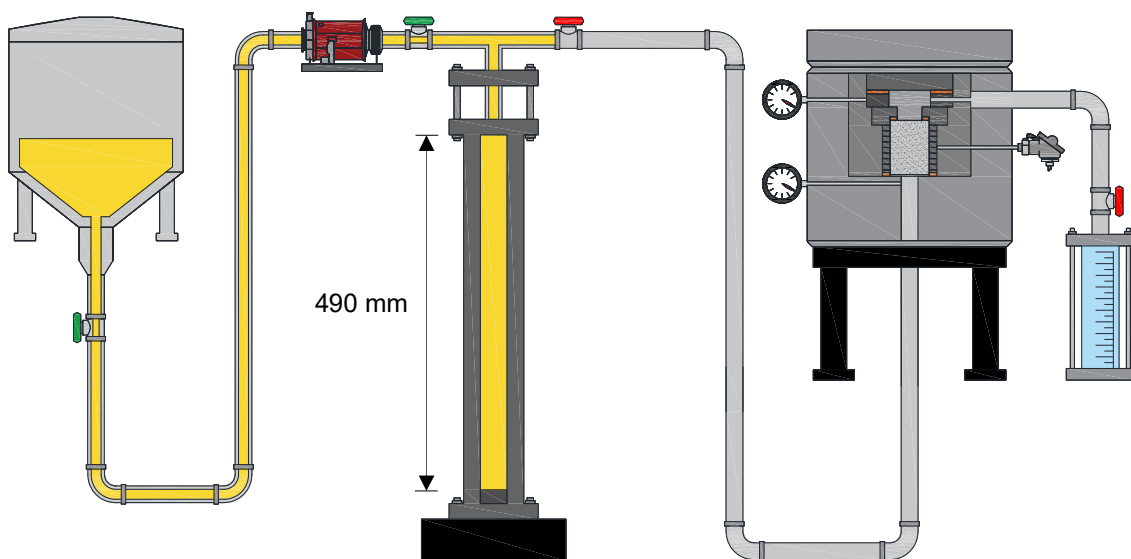


Figura 2.17 Llenado de la prensa hidráulica.

A continuación, la prensa inyecta a la celda de confinamiento el aditivo de gasolina (figura 2.18), midiendo la presión a la entrada (P_1) y salida (P_2) de la muestra, así como el flujo (q) de fluido que circula. De entrada se sabe que las espumas son altamente permeables debido a la naturaleza de sus poros, por lo que el sistema permanece cerrado mientras el pistón inyecta el aditivo hasta alcanzar el límite superior definido para el intervalo de presión; una vez que se alcanza este valor, la válvula del gotero es abierta, liberando la presión y expulsando el fluido en este recipiente (figura 2.19).

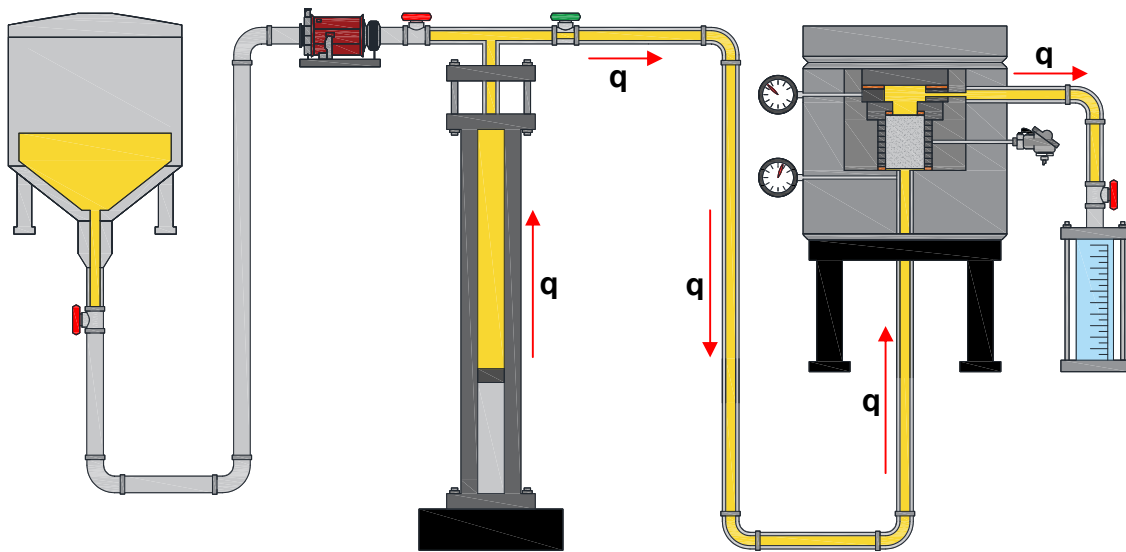


Figura 2.18 Inyección del aditivo de gasolina a la celda de confinamiento.

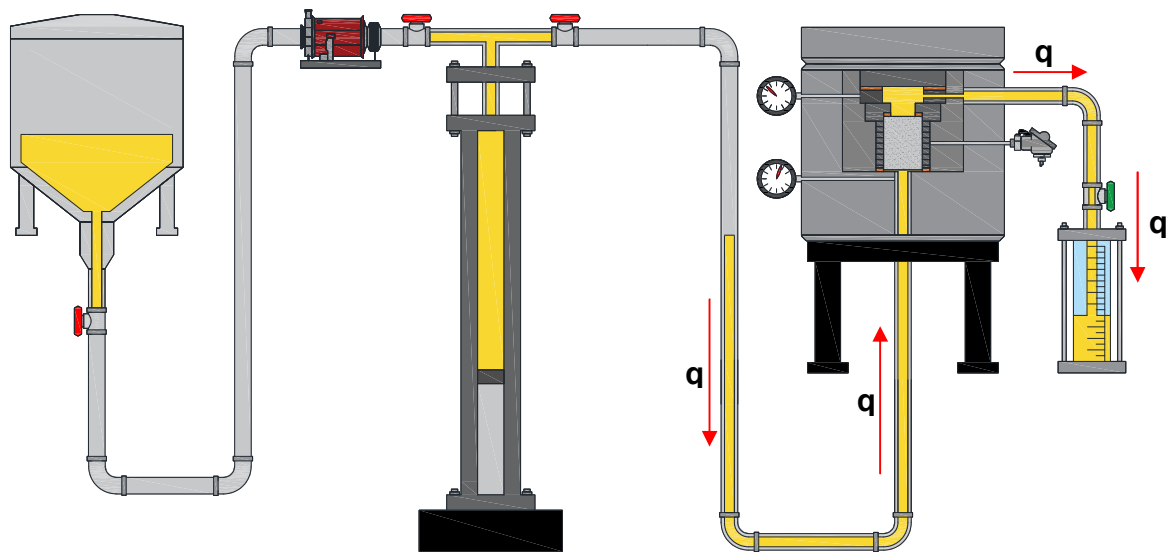


Figura 2.19 Apertura de la válvula del gotero para liberar la presión y expulsar el fluido.

A partir de los valores medidos de P_1 , P_2 y q , el análisis de permeabilidad fue realizado a partir de la ley de Darcy, que se muestra en la fórmula 2.4, donde ΔP es la diferencia entre P_1 y P_2 , L y A_c la longitud y área transversal de la probeta, y μ es la viscosidad dinámica del aditivo de gasolina determinada experimentalmente con un reómetro, expresando la permeabilidad en milidarcys (mD). Se eligió la ley de Darcy para analizar los resultados debido a que es el modelo teórico más ampliamente empleado para calcular la permeabilidad en medio poroso [44], sin tener consideraciones geométricas y distributivas ideales de los poros.

$$\kappa = \frac{q \mu L}{A_c \Delta P} \quad 2.4$$

Con los resultados obtenidos, se generaron las curvas de permeabilidad de las espumas, ensayando una muestra de cada poro a temperatura ambiente (T_{Amb}) y 200 °C (T_{200}), para determinar la influencia del tamaño de los poros y de la temperatura en la permeabilidad e integridad estructural de las espumas.

Capítulo 3

Resultados y discusión

Este capítulo inicia presentando las espumas producidas siguiendo la metodología descrita en la sección anterior. Posteriormente se reportan las propiedades físicas, estructurales y mecánicas determinadas experimentalmente y el análisis de permeabilidad realizado, discutiendo de manera específica y global los resultados obtenidos.

3.1. Espumas producidas

En la tabla 3.1 se muestra la cantidad de espumas producidas para las pruebas de compresión y permeabilidad con su respectiva temperatura de ensayo; todas estas espumas fueron caracterizadas física y estructuralmente.

Tabla 3.1 Cantidad de espumas de *AI* producidas para ensayos de permeabilidad y compresión.

Porosidad	Ensayo	T (°C)	Espumas producidas	Total de espumas
P1	Compresión	T _{Amb}	3	5
	Permeabilidad	T _{Amb}	1	
		T ₂₀₀	1	
P2	Compresión	T _{Amb}	3	5
	Permeabilidad	T _{Amb}	1	
		T ₂₀₀	1	
P3	Compresión	T _{Amb}	3	5
	Permeabilidad	T _{Amb}	1	
		T ₂₀₀	1	

En la figura 3.1 se muestran las espumas de los tres tamaños de porosidad producidas para los ensayos de compresión; las dimensiones de estas cumplen los requisitos dimensionales señalados por la norma ASTM E9 89a, manteniendo una relación l/d de 0.8 para evitar el pandeo de los especímenes durante la prueba. En la figura 3.2 se muestran las espumas producidas para los ensayos de permeabilidad; estas encajaron perfectamente en la camisa de la celda donde fueron montadas

para realizar la prueba, asegurando así su adecuado confinamiento. Todas las espumas producidas fueron analizadas por fluorescencia de rayos X, obteniendo una composición química típica como la que se aprecia en la tabla 3.2.

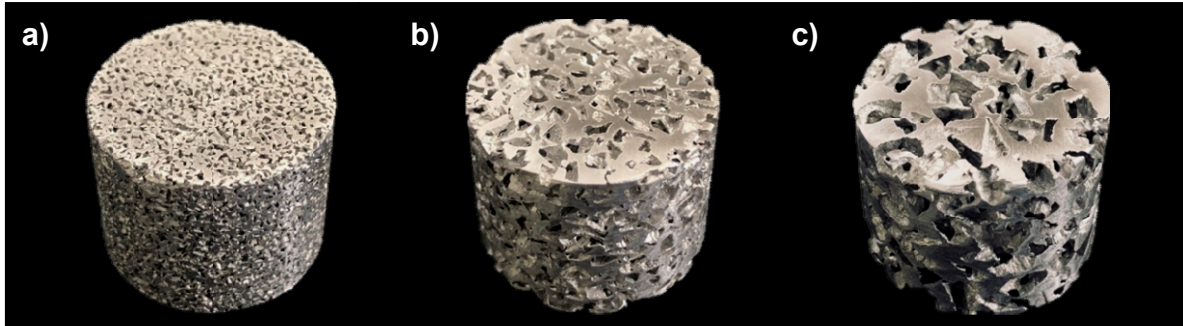


Figura 3.1 Espumas de *Al* producidas para ensayos de compresión a) P1, b) P2, c) P3.

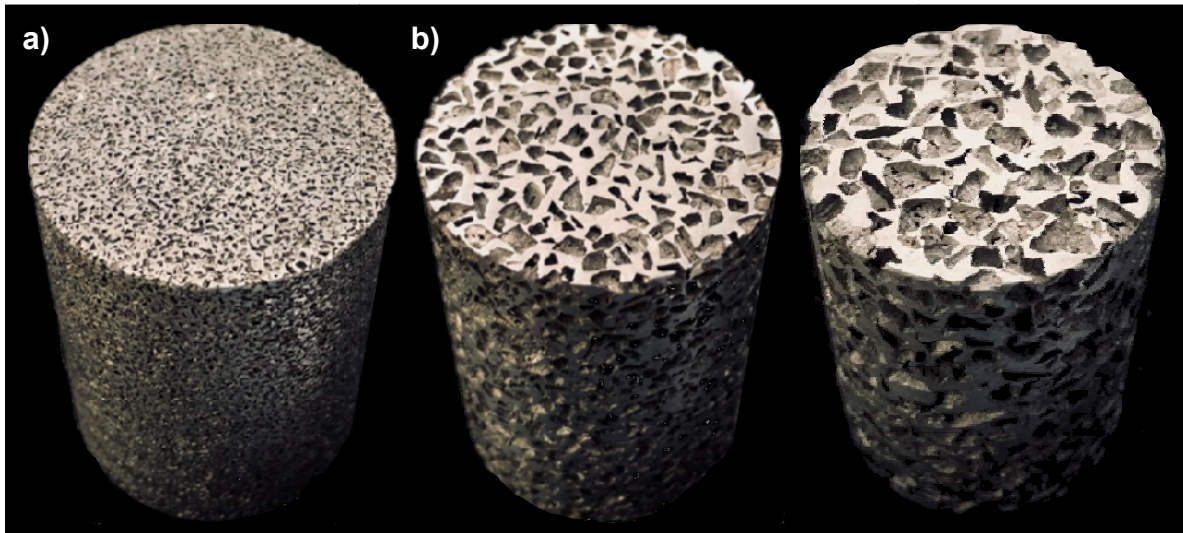


Figura 3.2 Espumas de *Al* producidas para ensayos de permeabilidad a) P1, b) P2, c) P3.

Tabla 3.2 Composición química típica de las espumas de *Al* producidas.

Elemento	Mínimo	%	Máximo	± [*2]
Al	97.00	98.52	100.00	0.27
Fe	0.00	0.46	0.95	0.02
Cu	0.05	0.09	0.20	0.01
Zn	0.00	0.08	0.10	0.00
Ti	-	0.04	-	0.00
Cr	-	0.02	-	0.01
Ni	-	0.02	-	0.00
Si	0.00	0.75	0.95	0.06

3.2. Propiedades físicas y estructurales

Los especímenes producidos fueron pesados antes y después de disolver la preforma de sacrificio (figura 3.3a y 3.3b) para determinar la masa y el volumen de *NaCl* removido, obteniendo los valores promedio que se muestran en la tabla 3.3 con una dispersión de datos máxima del $\pm 4\%$ para las probetas del mismo volumen y poro.

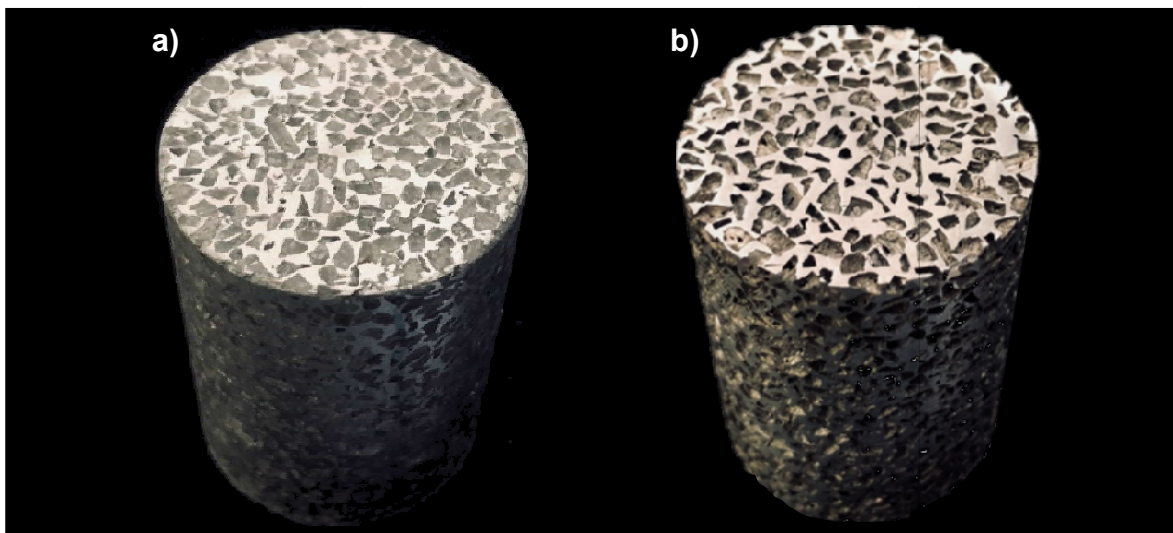


Figura 3.3 Especimen producido para ensayo de permeabilidad a) antes de disolver la preforma de *NaCl*, b) después de disolver la preforma de *NaCl*.

Tabla 3.3 Masa y volumen de *NaCl* removido de los especímenes.

Probeta	V_{Pr} (cm ³)	Poro	m (g)		<i>NaCl</i> removido	
			c/ <i>NaCl</i>	s/ <i>NaCl</i>	m (g)	V (cm ³)
Compresión	10.13	P1	22.20	10.00	12.20	6.44
		P2	22.50	9.80	12.70	6.52
		P3	21.90	9.90	12.00	6.48
Permeabilidad	57.00	P1	128.50	59.60	68.90	35.01
		P2	128.20	58.90	69.30	35.27
		P3	126.80	59.30	67.50	35.12

Se observa que para el mismo tipo de probeta entre espumas de diferentes poros, la masa antes y después de disolver la preforma de sacrificio es similar, lo que sugiere que las propiedades físicas y estructurales asociados al volumen de *NaCl* removido no diferirán significativamente entre espumas de diferentes poros.

En la tabla 3.4 se muestran los parámetros físicos y estructurales determinados experimentalmente. La densidad y la porosidad teórica (Φ_{Teo}) se obtuvieron a partir de la masa y el volumen de las probetas, la densidad relativa corresponde a la relación entre la densidad de las espumas y la del *Al*, mientras que la porosidad real (Φ_{Real}) se calculó por la medición del volumen sólido de las espumas con un picnómetro de helio. El espesor de pared de poro es la media aritmética de las cien mediciones realizadas por cada poro mediante procesamiento de imágenes con el software Image J.

Tabla 3.4 Parámetros estructurales de las espumas de *Al* producidas.

Poro	ρ (g/cm³)	ρ_{Rel}	Φ_{Teo} (%)	Φ_{Real} (%)	t_{Pared} (mm)
P1	1.01	0.37	63	63	0.57
P2	0.99	0.37	63	64	1.12
P3	0.99	0.37	63	63	1.78

Se observa que la densidad y ambos valores de porosidad exhiben una dispersión de datos menor al 2% entre los tres poros y que se obtuvo el mismo valor de densidad relativa para todos los casos, por lo que es correcto afirmar que el tamaño de estos no es condicionante de estas variables. Lo anterior se justifica en las características de la preforma sólida de sacrificio, dado que la irregularidad de forma de los granos de *NaCl* empleados para producir los poros, no condiciona el empaquetamiento y distribución de los mismos, por lo que la densidad relativa y la porosidad dependen de la cantidad de *NaCl* ocupada para producir las espumas, contrario a lo ocurrido cuando se tiene control de forma de los poros, donde el tamaño de estos cuando son esféricos si tiene efecto en el empaquetamiento, y por consecuencia directa, en la densidad y porosidad de las espumas [40, 45].

En el caso específico de la porosidad tanto teórica como real, el valor mínimo obtenido fue 60% y el máximo 65%, por lo que es correcto establecer un valor medio del 63% con una dispersión del $\pm 3\%$. El hecho de que ambas porosidades sean similares entre sí para un mismo espécimen sugiere que la preforma de *NaCl* fue completamente disuelta y permanece únicamente el *Al*, ya que el cálculo de la porosidad teórica se realiza a partir de la densidad de este último y la presencia de *NaCl* produciría una variación con respecto a la porosidad real.

El espesor de pared de poro es el parámetro estructural que más variación presenta entre espumas de diferente tamaño de poro, dado que la cantidad de poros por unidad de superficie es mayor en espumas con poros pequeños en comparación con aquellas de poros grandes y por consecuencia el espesor de

pared promedio obtenido es menor en el primer caso, lo que nos dice que el tamaño de los poros si condiciona este parámetro. En la figura 3.4 se muestran las fotografías tomadas con cámara fotográfica para determinar el espesor de pared de poro, mientras que en las figura 3.5 se aprecian todas las mediciones realizadas para determinar el espesor de pared promedio de las espumas en torno a la media aritmética para cada caso. Se observa que la dispersión de datos tiende a incrementar a medida que el poro es más grande, lo que nos dice que este parámetro es más homogéneo a medida que el tamaño de poro es menor.

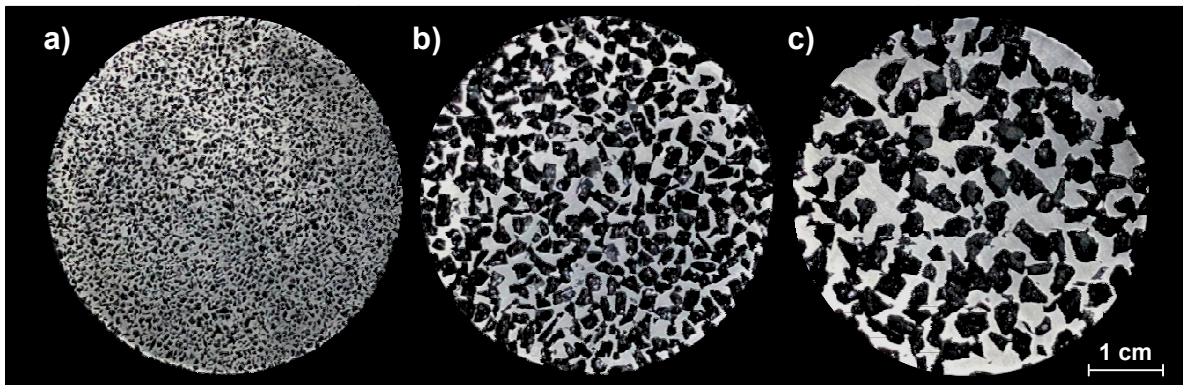


Figura 3.4 Fotografías de la sección transversal de las espumas para medición del espesor de pared de poro a) P1, b) P2, c) P3.

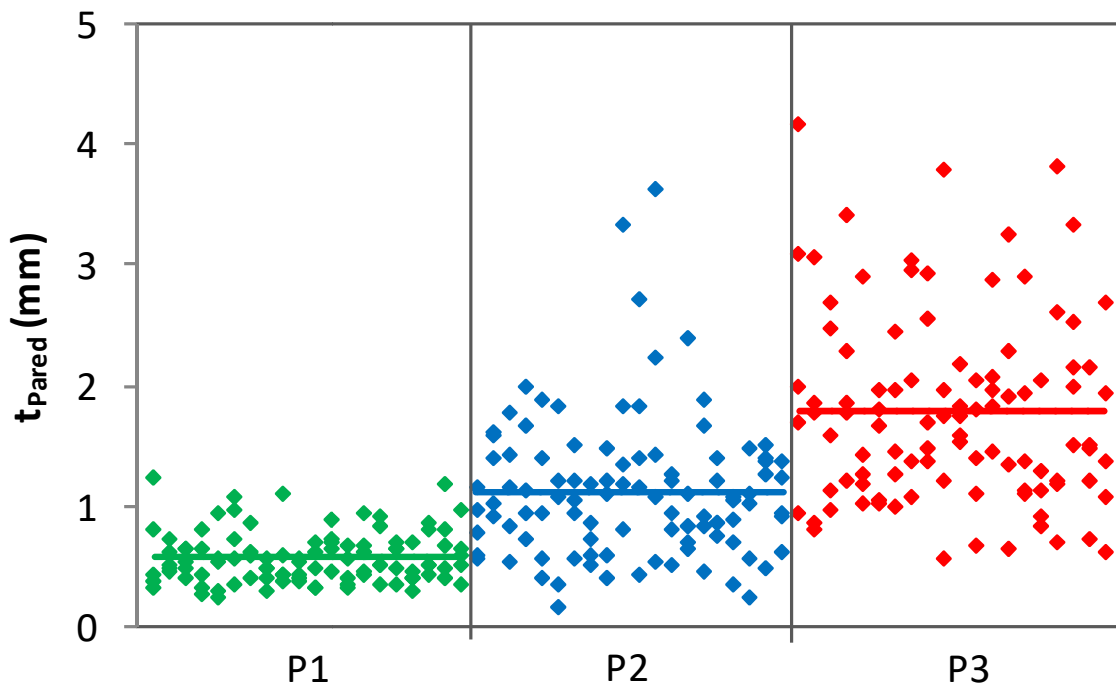


Figura 3.5 Dispersión en torno a la media aritmética de las mediciones realizadas para determinar el espesor de pared de poro promedio de las espumas.

Con el objetivo de determinar el comportamiento de la porosidad a lo largo de la longitud de las espumas, fue preparado un espécimen de cada poro para ser cortado en ocho rebanadas (Reb) y medir la porosidad volumétrica (Φ_{Vol}) y superficial (Φ_{Sup}) de cada pieza. La porosidad superficial fue determinada midiendo el área sólida de la cara superior de cada una de las rebanadas mediante el software Image J. Para esto las fotografías que se muestran en la figura 3.4 fueron procesadas para incrementar el contraste con respecto al área porosa y definir los bordes para facilitar la medición, donde el color negro corresponde a la superficie de *Al* y el blanco a los poros, obteniendo las imágenes que se aprecian en la figura 3.6.

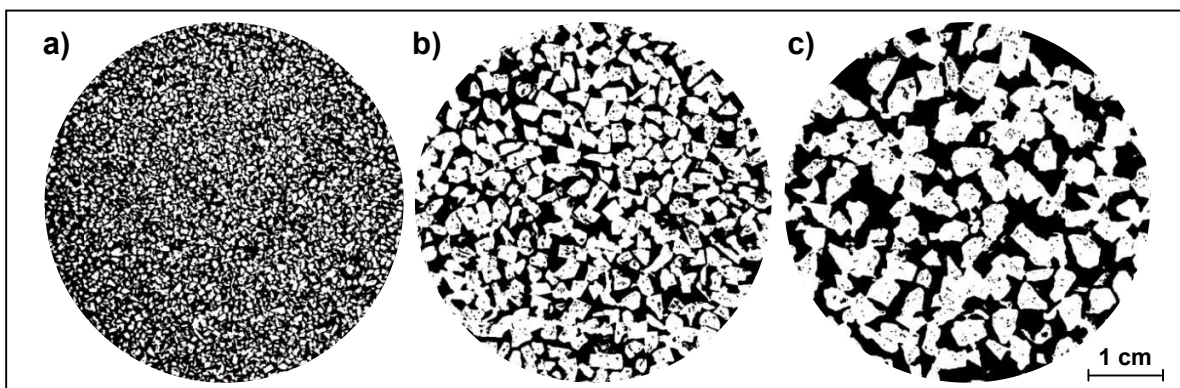


Figura 3.6 Imágenes procesadas con Image J para medición de porosidad superficial de las espumas a) P1, b) P2, c) P3.

En la figura 3.7 se muestran los resultados de la porosidad volumétrica en función del cambio de altura (Δh). Se observa que esta oscila entre un 60% y 65% en los tres poros, y que no existe una tendencia clara a incrementar o disminuir sobre la longitud de las espumas, lo que indica que no existe un gradiente de porosidad y sugiere que la espumas son homogéneas. También ratifica los valores de porosidad reportados anteriormente dado que todas las rebanadas están en un $63\% \pm 3\%$ y que estos corresponden a porosidad efectiva al observar que la infiltración de las espumas fue adecuada por la ausencia de defectos como cavidades y que el lixiviado de la preforma de sacrificio fue correcto al no visualizarse partículas de *NaCl*.

En la figura 3.8 se muestran los resultados de la porosidad superficial en función del cambio de altura; de la misma manera que en la porosidad volumétrica, se observa que este parámetro no varía significativamente con respecto a la longitud de las espumas. No obstante, en el segundo caso es claramente notorio que P1 presenta consistentemente en todas las rebanadas una porosidad superficial menor con respecto a P2 y P3, a pesar de que los tres poros se encuentran en el

mismo intervalo de valores de porosidad volumétrica; por consecuencia, se establece que ambas porosidades son independientes entre sí y es correcto afirmar que el tamaño de los poros condiciona la porosidad superficial.

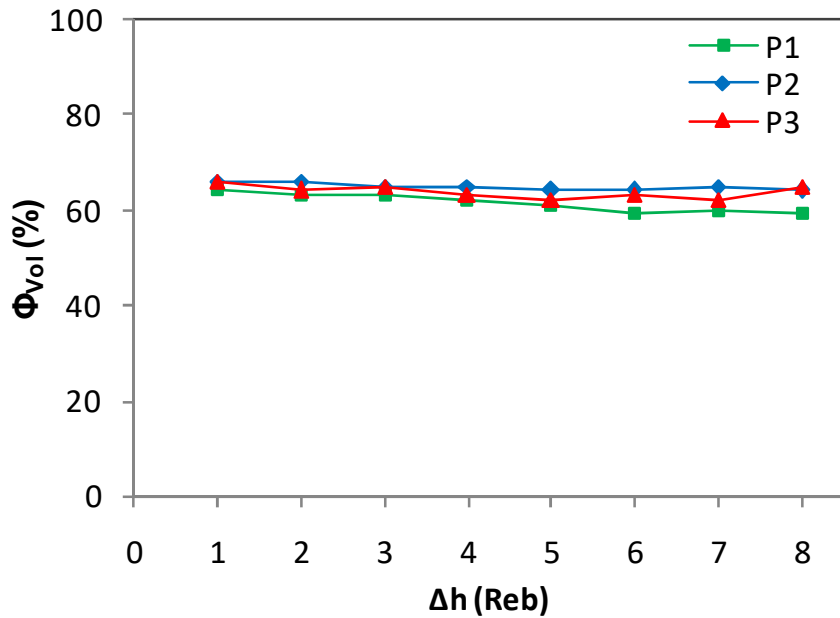


Figura 3.7 Comportamiento de la porosidad volumétrica a lo largo de la longitud de las espumas.

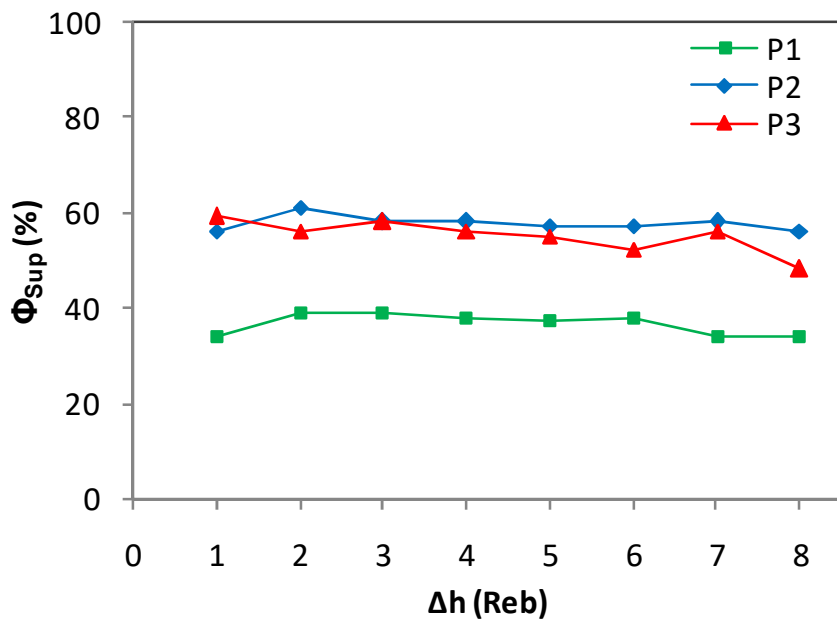


Figura 3.8 Comportamiento de la porosidad superficial a lo largo de la longitud de las espumas.

3.3. Propiedades mecánicas

A partir de ensayos de compresión se generaron los diagramas esfuerzo-deformación de las espumas con el fin de obtener el módulo de Young (E), el esfuerzo de colapso plástico (σ_{CP}) y la capacidad de absorción de energía (W) a diferentes porcentajes de deformación. En la figura 3.9 se muestran las probetas producidas para este fin con su referencia en bulto de *Al*, mientras que en la figura 3.10 se aprecian las mismas después de haber sido ensayadas.

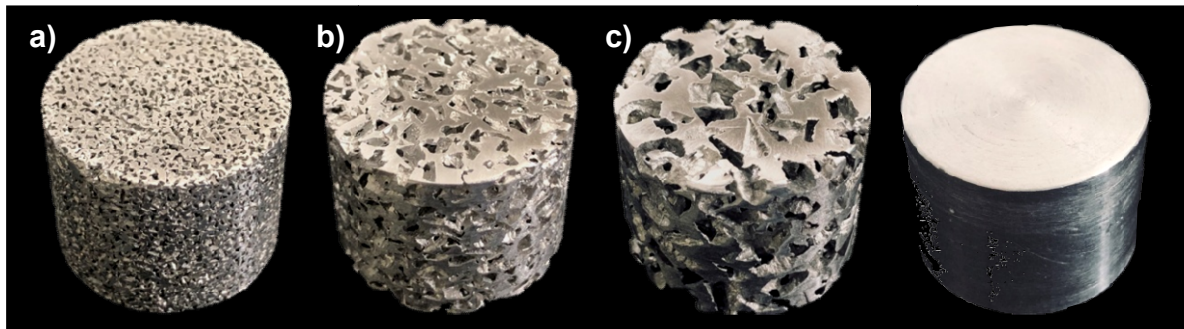


Figura 3.9 Espumas de *Al* antes de ser sometidas al ensayo de compresión a) P1, b) P2, c) P3, d) referencia en bulto de *Al*.

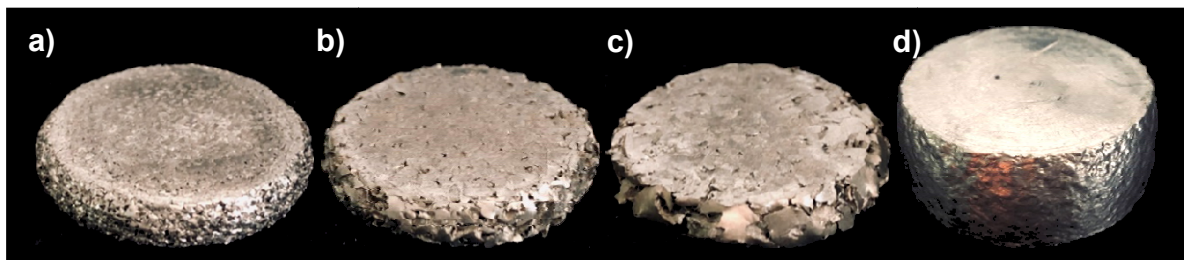


Figura 3.10 Espumas de *Al* después de ser sometidas al ensayo de compresión a) P1, b) P2, c) P3, d) referencia en bulto de *Al*.

Como resultado de la prueba, se observa que la referencia en bulto de *Al* se deformó hasta el 40% en torno a su eje axial y presenta el efecto de abarrilamiento debido a la naturaleza dúctil de este metal [38], mientras que las espumas fueron completamente compactadas y deformadas al 80%, difiriendo visualmente entre ellas por la forma en que están dispuestos las vigas o soportes deformados que conforman su estructura interna en torno a la circunferencia de las probetas.

En las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 se muestran los diagramas esfuerzo-deformación de las tres probetas ensayadas por cada poro. Todas las curvas generadas exhibieron el comportamiento típico de este tipo de material frente a ensayos de compresión [13, 46], que consiste en una región inicial de elasticidad lineal cuya pendiente corresponde al módulo de Young de la espuma y el punto donde esta

cambia corresponde al esfuerzo de colapso plástico, seguida de una región cuasilínea donde ocurre una gran deformación con poca carga también conocida como región de Plateau, finalizando con la densificación del material donde la carga necesaria para deformar las espumas incrementa significativamente con respecto a las dos regiones anteriores.

La desviación estándar hasta antes del 40% de deformación es menor a 1 MPa en todos los casos, el valor máximo de esta ocurre al 80% con 8.279, 5.078 y 7.429 MPa para P1, P2 y P3 respectivamente. El fin de la región de Plateau y el inicio de la densificación se presenta entre el 30% y el 60% de deformación donde la dispersión de datos es menor al 10%.

El hecho de que todas las espumas ensayadas del mismo poro hayan presentado un comportamiento similar y que la dispersión de datos sea baja sugiere una alta reproducibilidad de especímenes a partir de su proceso de producción, lo cual es de destacar dado que no se tiene un control de forma de los poros que están dispersos en la estructura del material, por lo que estos son muy irregulares y según la geometría de estos, pueden actuar como concentradores de esfuerzos y al aplicar carga colapsar prematuramente la probeta.

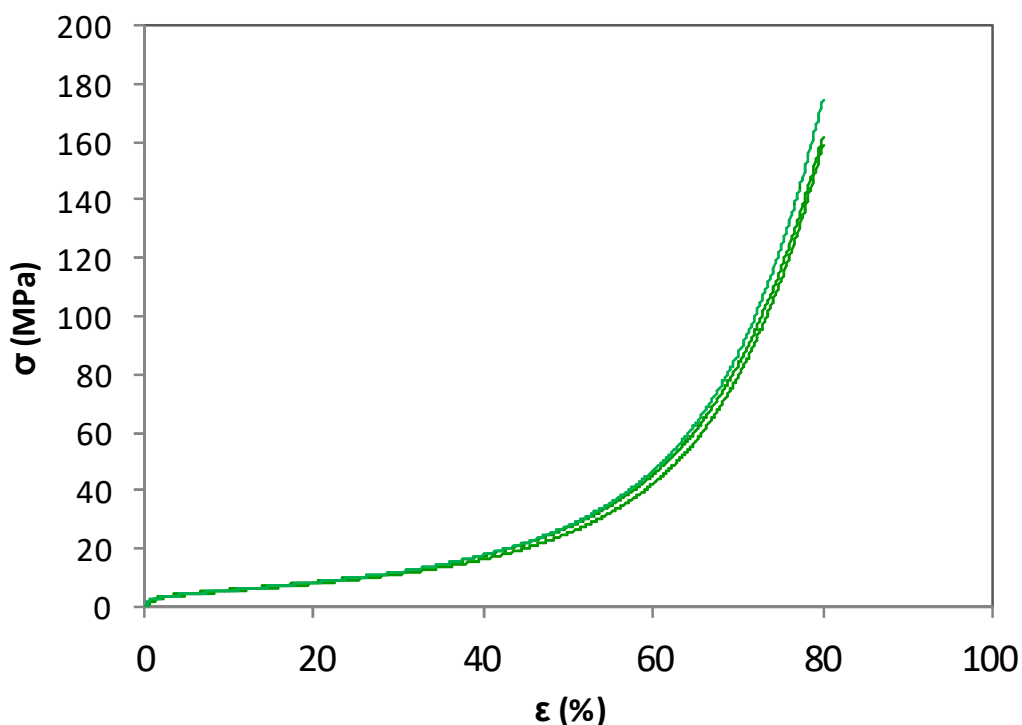


Figura 3.11 Diagramas esfuerzo-deformación de las espumas de Al ensayadas de P1.

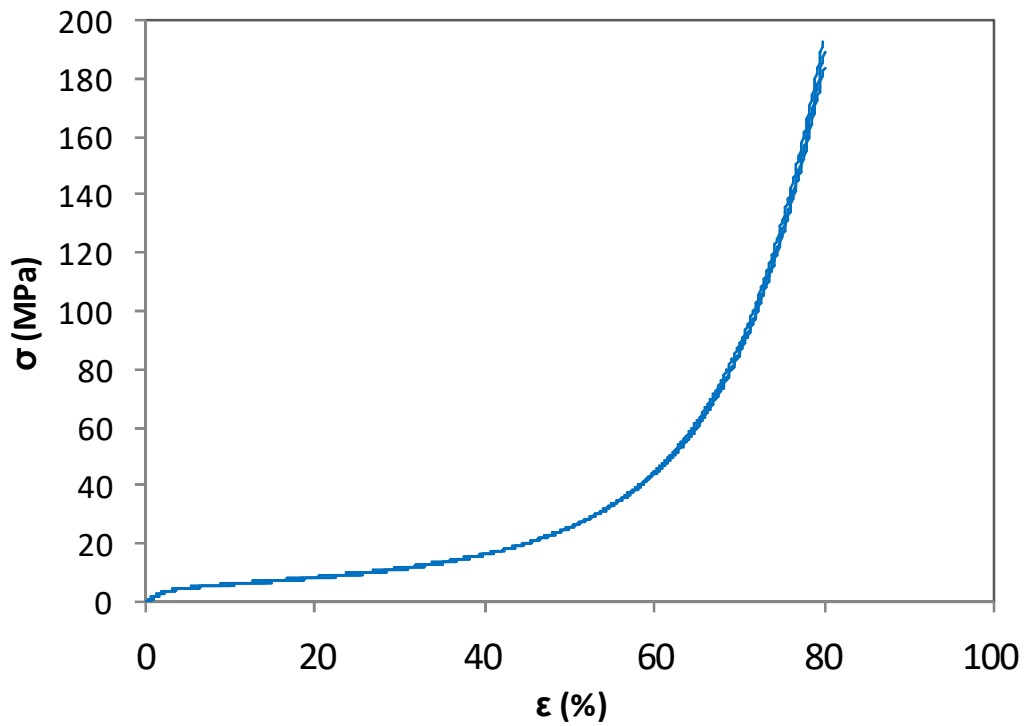


Figura 3.12 Diagramas esfuerzo-deformación de las espumas de *Al* ensayadas de P2.

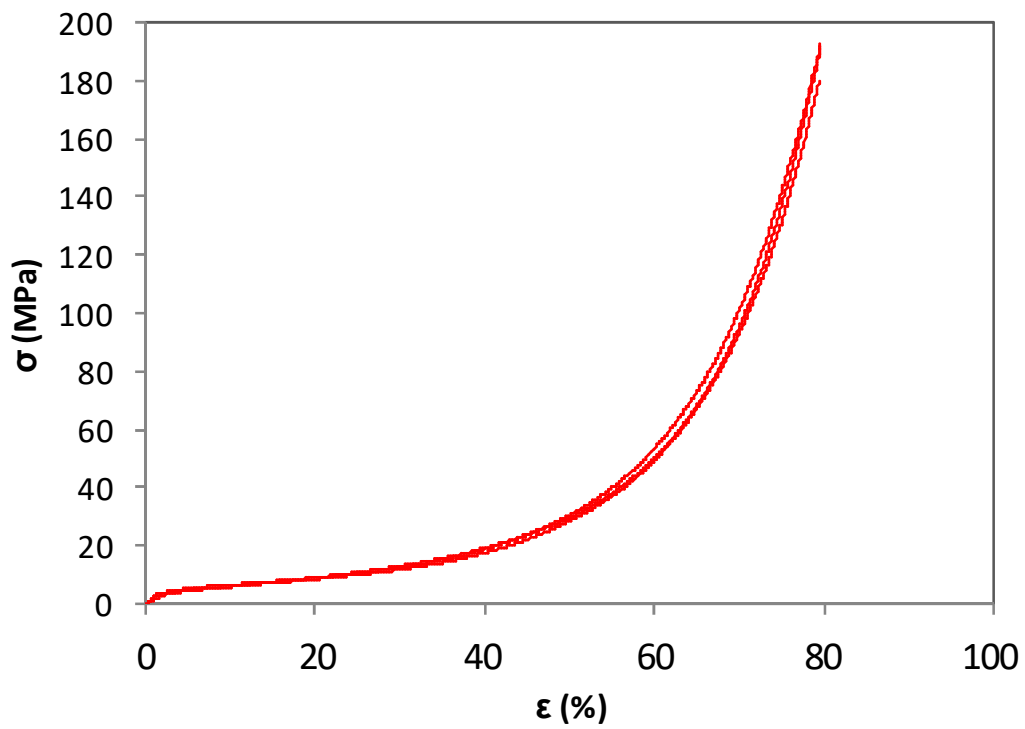


Figura 3.13 Diagramas esfuerzo-deformación de las espumas de *Al* ensayadas de P3.

En la figura 3.14 se muestran los diagramas esfuerzo-deformación promedio de los tres poros con su referencia en bulto de *Al*. A partir de estas curvas se determinaron las propiedades mecánicas que se muestran en la tabla 3.5 tomando como referencia la norma ISO 13314 de ensayos de compresión en metales porosos [13], donde el esfuerzo de Plateau (σ_{PI}) corresponde al promedio aritmético del esfuerzo entre el 20% y el 40% de deformación y el fin de la región de Plateau (ϵ_{PI}) es la deformación correspondiente a 1.3 veces el esfuerzo de Plateau ($1.3\sigma_{PI}$).

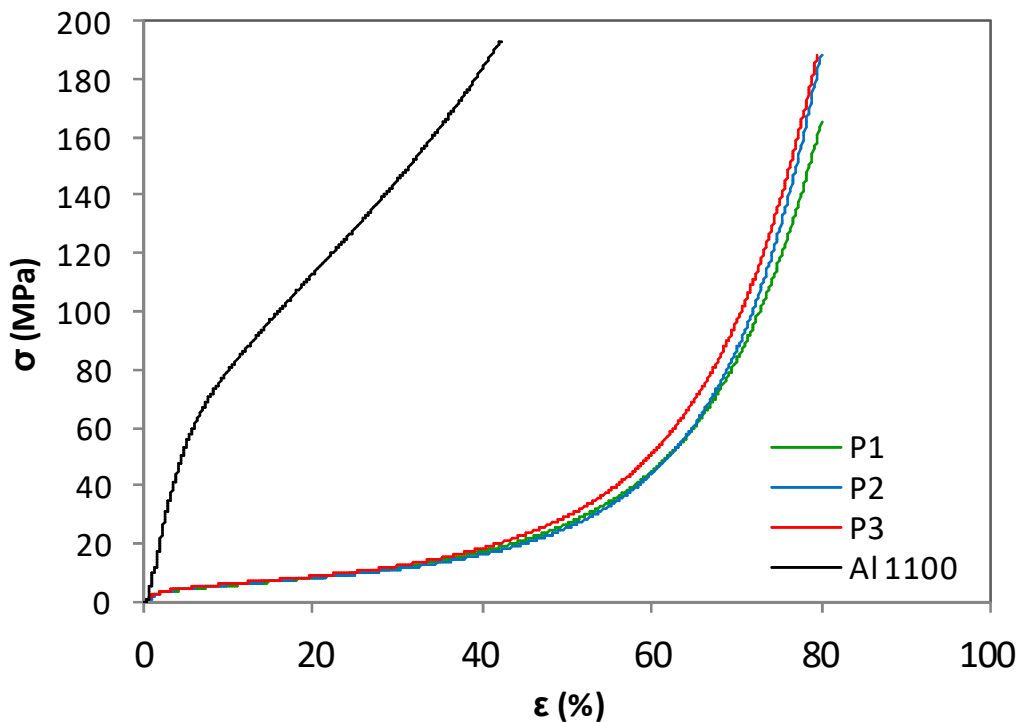


Figura 3.14 Diagramas esfuerzo-deformación de las espumas de *Al* ensayadas de los tres tamaños de poro con su referencia en bulto de *Al*.

Tabla 3.5 Propiedades mecánicas de las espumas de *Al* producidas.

Poros	E (Mpa)	σ_{CP} (Mpa)	σ_{PI} (Mpa)	$1.3\sigma_{PI}$ (Mpa)	ϵ_{PI} (%)
P1	284.70	2.27	12.12	15.75	38
P2	222.93	2.47	11.53	14.99	38
P3	270.93	2.52	12.85	16.71	38

El módulo de Young se calculó antes del 0.2% de deformación y para todas las espumas se encuentra entre 200 y 300 MPa, presentándose el mayor valor en P1

y el menor en P2. Cuando las espumas son producidas con poros homogéneamente esféricos, el tamaño de estos si repercute directamente en las propiedades mecánicas [40], por lo que la inexistencia de una tendencia entre el módulo y el tamaño de los poros se justifica en la irregularidad de forma de estos últimos. Cabe destacar que todas las espumas ensayadas presentaron porosidad similar y se tiene reportado que las propiedades mecánicas tienden a incrementar cuando la porosidad disminuye [47-49]. En lo que se refiere al esfuerzo de colapso plástico, se observa una ligera tendencia a incrementar con el tamaño de los poros, encontrándose todos estos valores para los tres poros entre 2.20 y 2.60 MPa. Las espumas de *Al* comercializadas de la marca Duocel® tienen un módulo de Young de 103.08 MPa y un esfuerzo de colapso plástico de 2.53 MPa [19]; a partir de esta referencia se afirma que las propiedades mecánicas de las espumas producidas se encuentran en el intervalo de valores esperados.

El fin de la región de Plateau resultó ser consistentemente del 38% para todas las espumas a pesar de que el esfuerzo de Plateau no es el mismo entre los especímenes, por lo cual se establece que a partir de este porcentaje de deformación comienza la densificación del material. En la figura 3.15 se muestra el mecanismo de compactación de las espumas con los porcentajes de deformación correspondientes a cada etapa. En la figura 3.16 se muestran las espumas y su referencia en bulto de *Al* al 0% de deformación, mientras que en la figura 3.17 se aprecian estas probetas al 80% y 40% de deformación respectivamente.

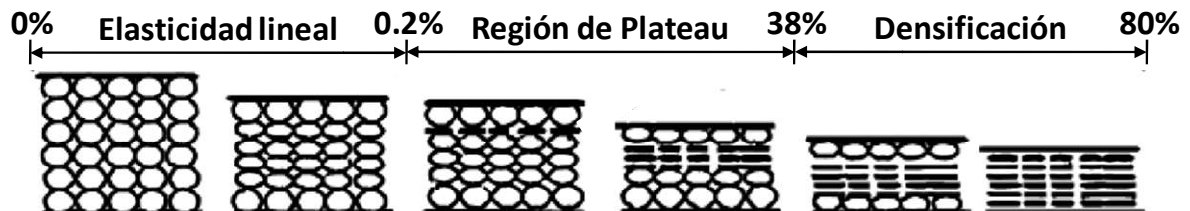


Figura 3.15 Mecanismo de compactación de las espumas con los porcentajes de deformación correspondientes a cada etapa [Mod. de 11].

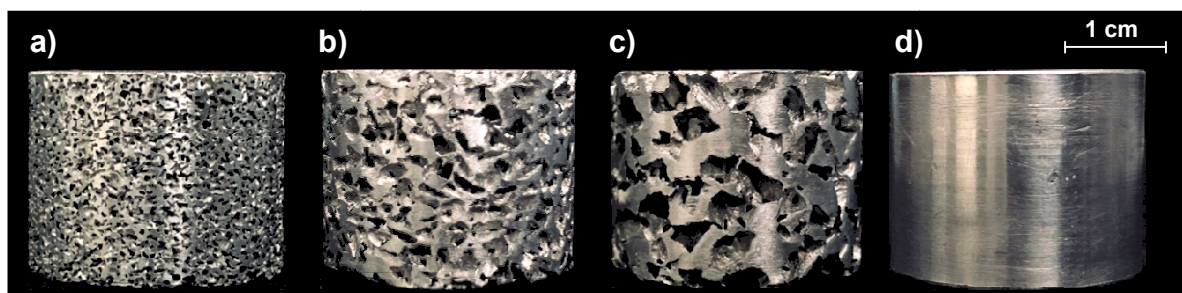


Figura 3.16 Espumas de *Al* al 0% deformación a) P1, b) P2, c) P3, d) referencia en bulto de *Al*.

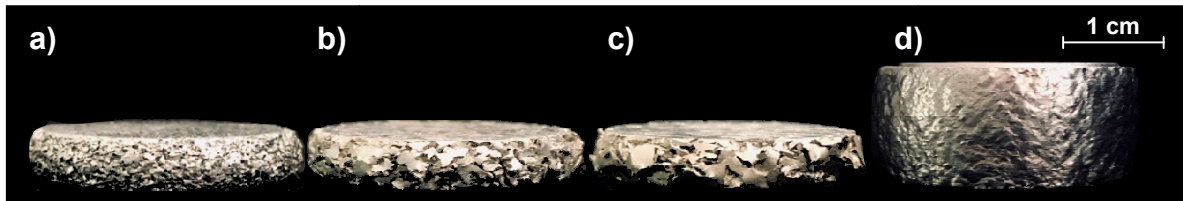


Figura 3.17 Espumas de *Al* al 80% deformación a) P1, b) P2, c) P3, d) referencia en bulto de *Al* al 40% de deformación.

En las figuras 3.18 y 3.19 se muestra la capacidad de absorción de energía y el esfuerzo necesario para deformar las espumas en función del porcentaje de deformación. Hasta antes de la densificación del material, los tres poros presentan un comportamiento similar; sin embargo, después del 38% de deformación, estos parámetros exhiben una tendencia a incrementar con el tamaño de los poros, debido a que el espesor de pared es mayor, siendo más evidente esto en el P3 para ambos casos. Esta tendencia no es clara entre los P1 y P2 sino hasta el 80%, es decir, una vez que el material se ha densificado por completo. Por lo anterior y considerando que las espumas conservan sus propiedades estructurales hasta antes de la densificación del material, es correcto afirmar que el tamaño de los poros no condiciona significativamente las propiedades mecánicas de las espumas después del colapso plástico y antes de la densificación.

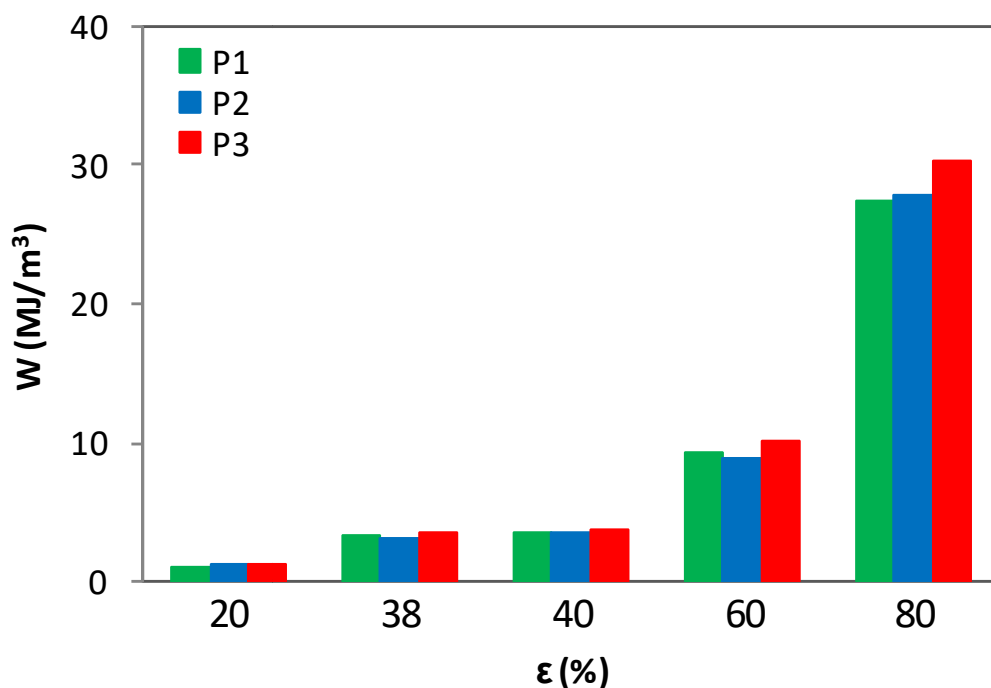


Figura 3.18 Capacidad de absorción de energía de las espumas a diferentes porcentajes de deformación.

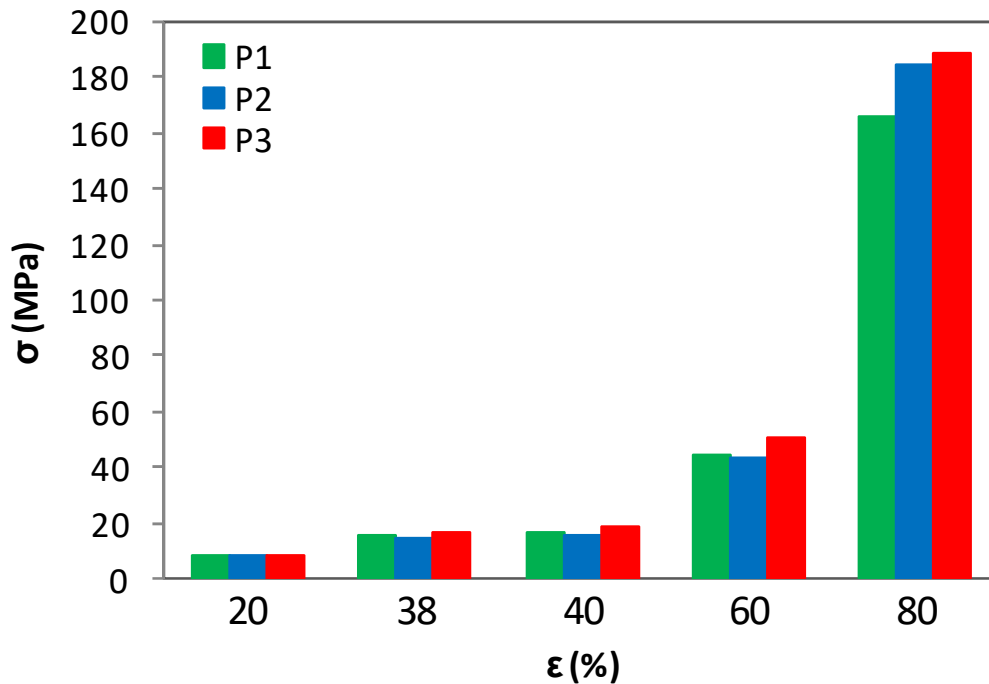


Figura 3.19 Esfuerzo necesario para deformar las espumas a diferentes porcentajes de deformación.

3.4. Análisis de permeabilidad

El ensayo se realizó por medio de la inyección de aditivo de gasolina a las espumas en intervalos crecientes de presión (ΔP_{iny}) que van desde 200 hasta 25,000 psi. Partiendo de la ley de Darcy, la permeabilidad de las espumas fue analizada en función del flujo que estas permitieron cuando se les inyectó el fluido en los intervalos de presión definidos, mismos que se muestran numerados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Intervalos de presión definidos para inyectar el aditivo de gasolina a las espumas.

Intervalo	ΔP_{iny} (psi)	Intervalo	ΔP_{iny} (psi)	Intervalo	ΔP_{iny} (psi)
1	200-1,000	7	200-7,000	13	200-13,000
2	200-2,000	8	200-8,000	14	200-14,000
3	200-3,000	9	200-9,000	15	200-15,000
4	200-4,000	10	200-10,000	16	200-17,000
5	200-5,000	11	200-11,000	17	200-20,000
6	200-6,000	12	200-12,000	18	200-25,000

En la figura 3.20 se muestra el flujo promedio alcanzado en cada intervalo, mientras que en la figura 3.21 se muestra el promedio de todos los intervalos a partir del intervalo 7 (200-7,000 psi), en ambos casos a temperatura ambiente y 200 °C.

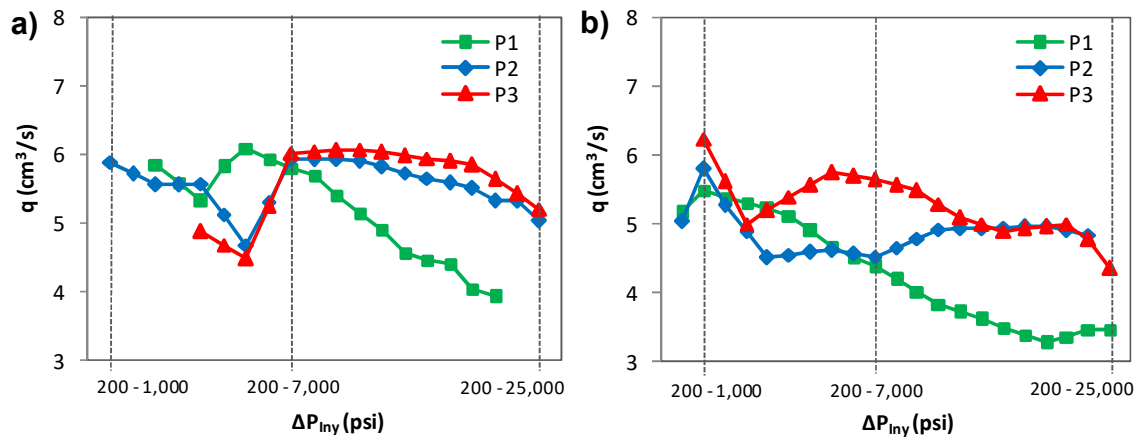


Figura 3.20 Flujo promedio alcanzado en cada intervalo a) temperatura ambiente, b) 200 °C.

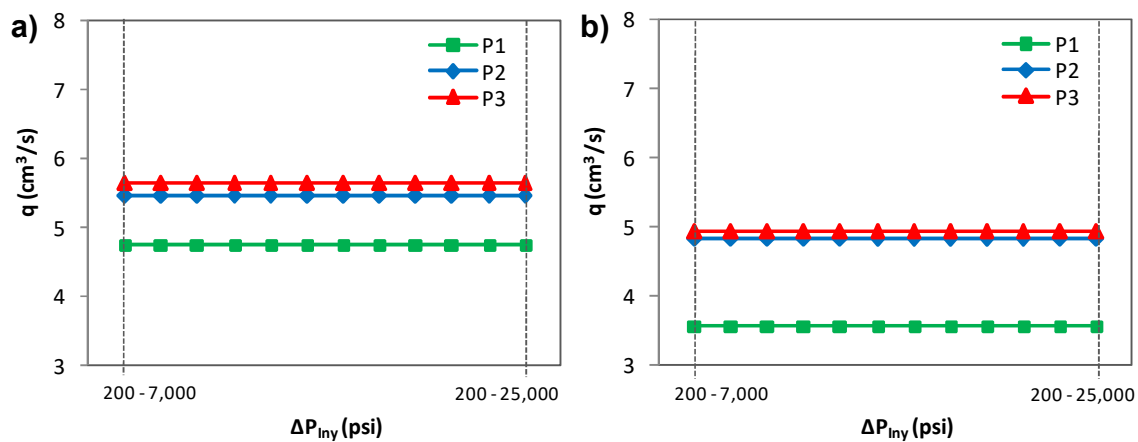


Figura 3.21 Flujo promedio de todos los intervalos a partir de 200-7,000 psi a) temperatura ambiente, b) 200 °C.

Se observa que el flujo tiende a disminuir a medida que la presión incrementa y que el tamaño de los poros es menor [32], tanto a temperatura ambiente como a 200 °C, siendo esto más evidente a partir del intervalo 7; debido a que poros más grandes permiten fluir con mayor facilidad el aditivo en comparación con poros más pequeños. También se observa la influencia de la temperatura en el flujo, donde el promedio de este es menor a 200 °C en comparación con los valores

obtenidos a temperatura ambiente, presentándose este fenómeno de manera consistente en los tres poros.

La viscosidad dinámica (μ) es una de las variables presentes en la ley de Darcy, por lo que la magnitud de esta en el fluido de prueba se determinó experimentalmente en un reómetro. En la figura 3.22 se observan los resultados de reología del aditivo de gasolina a diferentes temperaturas, donde se muestra la viscosidad dinámica en función de las diferentes tasas de corte (γ) a las que opera el equipo. Se aprecia que la viscosidad dinámica del fluido mantiene una relación directa con la temperatura [34], a mayor temperatura la viscosidad tiende a disminuir, observando este comportamiento consistentemente en todas las curvas generadas.

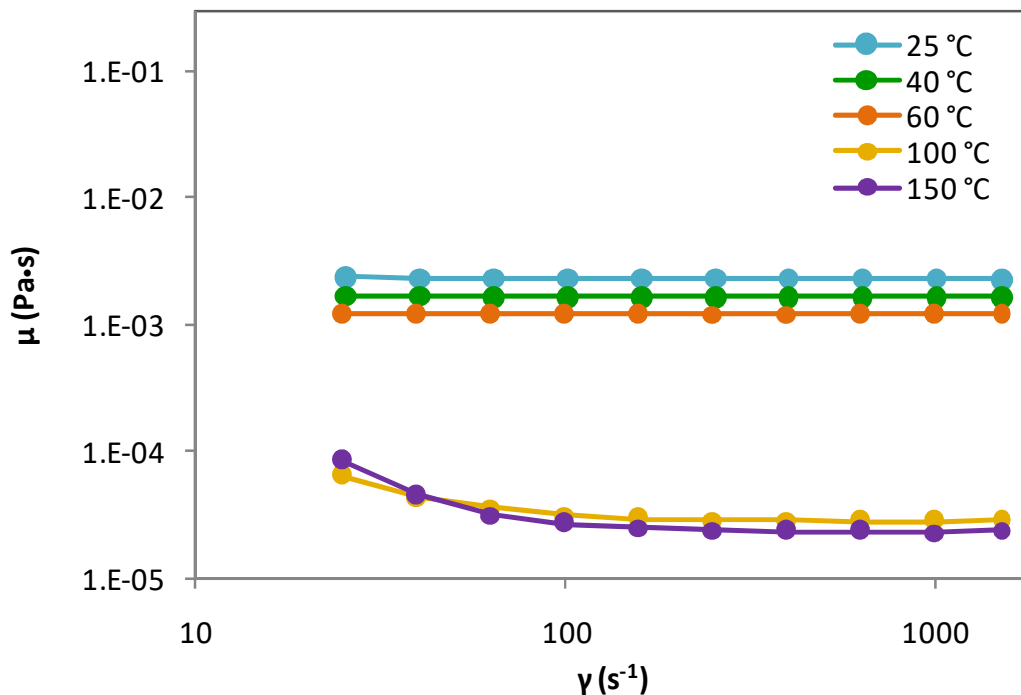


Figura 3.22 Resultados de reología del aditivo de gasolina a diferentes temperaturas.

La viscosidad dinámica del aditivo de gasolina a 200 °C no se pudo determinar debido a que el fluido comenzó a evaporarse a una temperatura cercana a 160 °C, por lo que para los ensayos realizados a 200 °C se ocupó el valor obtenido a la máxima temperatura alcanzada en la que el aditivo permaneció estable, es decir 150 °C. Es importante mencionar que 200 °C es la temperatura que alcanzó la celda de confinamiento, no necesariamente el fluido de prueba debido a la naturaleza dinámica del ensayo.

En la tabla 3.7 se muestran los valores de flujo promedio para cada poro desde el intervalo 7 hasta el intervalo 18 a temperatura ambiente y 200 °C. También se muestran los valores de viscosidad dinámica empleados para realizar el análisis de permeabilidad a ambas condiciones de temperatura.

Tabla 3.7 Valores de flujo promedio de los tres poros y viscosidad dinámica a ambas condiciones de ensayo empleados para el análisis de permeabilidad.

Poro	q_{Pr} (cm ³ /s)		μ (Pa·s)	
	T_{Amb}	$T_{200\text{ °C}}$	T_{Amb}	$T_{200\text{ °C}}$
P1	4.75	3.57		
P2	5.46	4.82	2.E-03	3.E-05
P3	5.64	4.94		

En la figura 3.23 se muestra una espuma de P2 montada en la celda de confinamiento para ser ensayada. En las figuras 3.24 y 3.25 se muestran los valores de permeabilidad obtenidos mediante la ley de Darcy en función de la caída de presión (ΔP) ocasionada por la estructura interna de las espumas, a temperatura ambiente y 200 °C, respectivamente, tomando los valores de viscosidad dinámica contenidos en la tabla 3.7 para cada condición. Estas gráficas se generaron a partir de los valores de presión y flujo medidos por el poro-permeámetro; la dispersión de datos observada se debe a las fluctuaciones del flujo inyectado por el equipo generadas por la irregularidad del medio poroso.



Figura 3.23 Espuma montada en la celda de confinamiento.

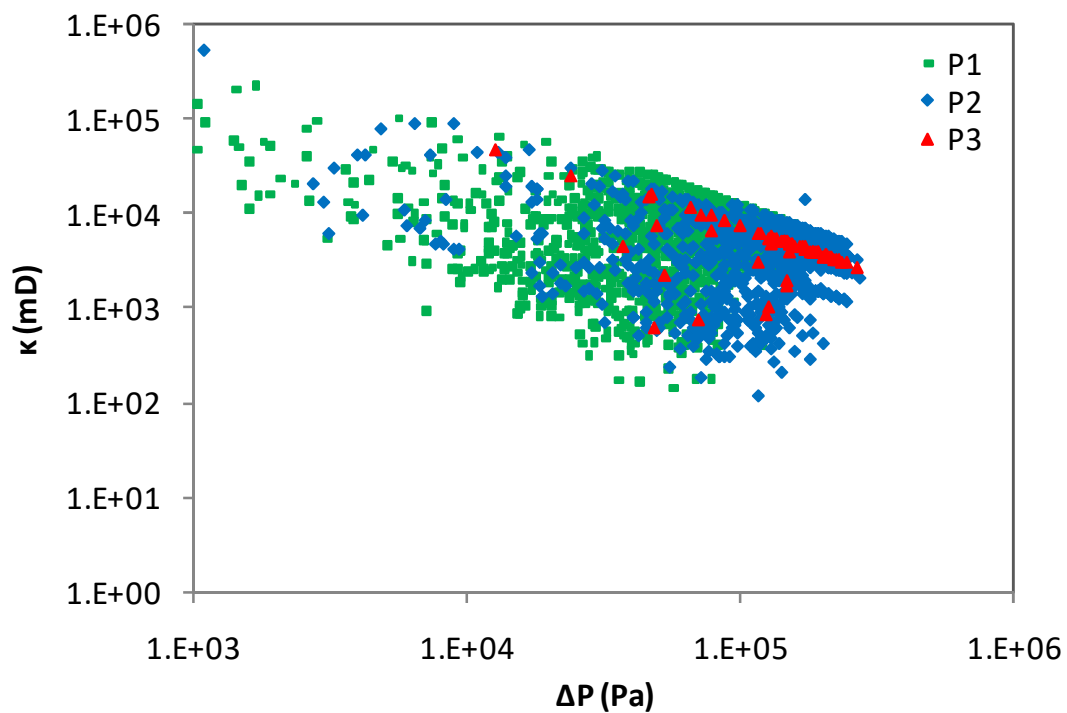


Figura 3.24 Valores de permeabilidad de las espumas a temperatura ambiente.

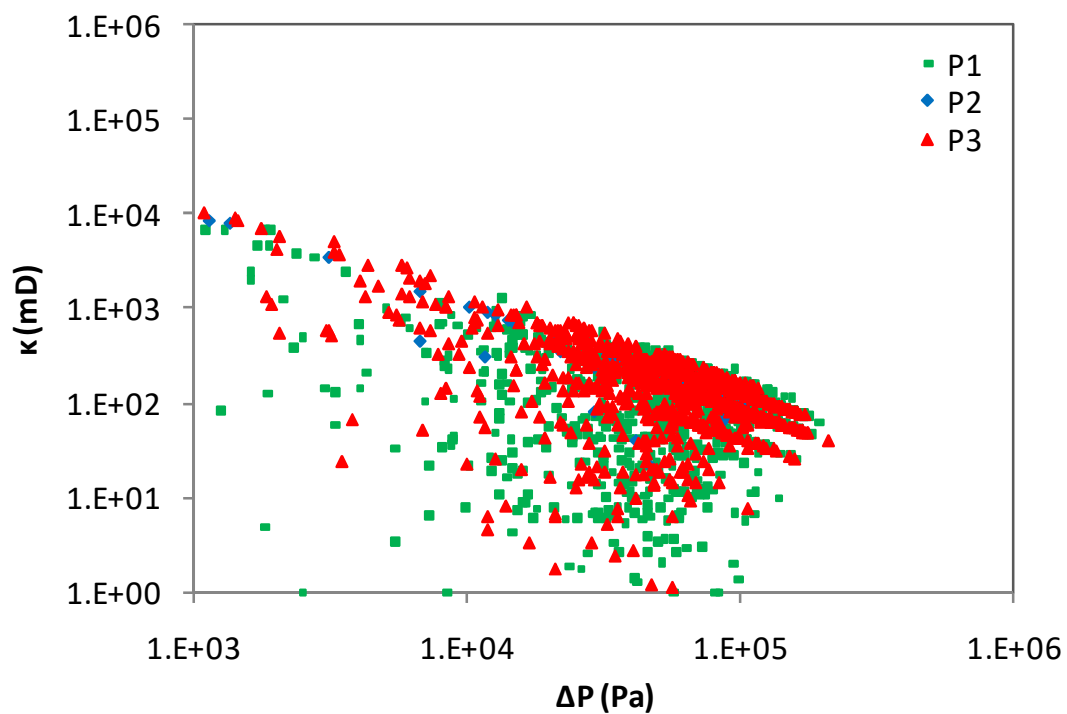


Figura 3.25 Valores de permeabilidad de las espumas a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la figura 3.26 se muestran los valores de permeabilidad de las espumas en función de ΔP , calculados a partir del flujo promedio y viscosidad dinámica contenidos en la tabla 3.7, para cada poro y temperatura de ensayo respectivamente.

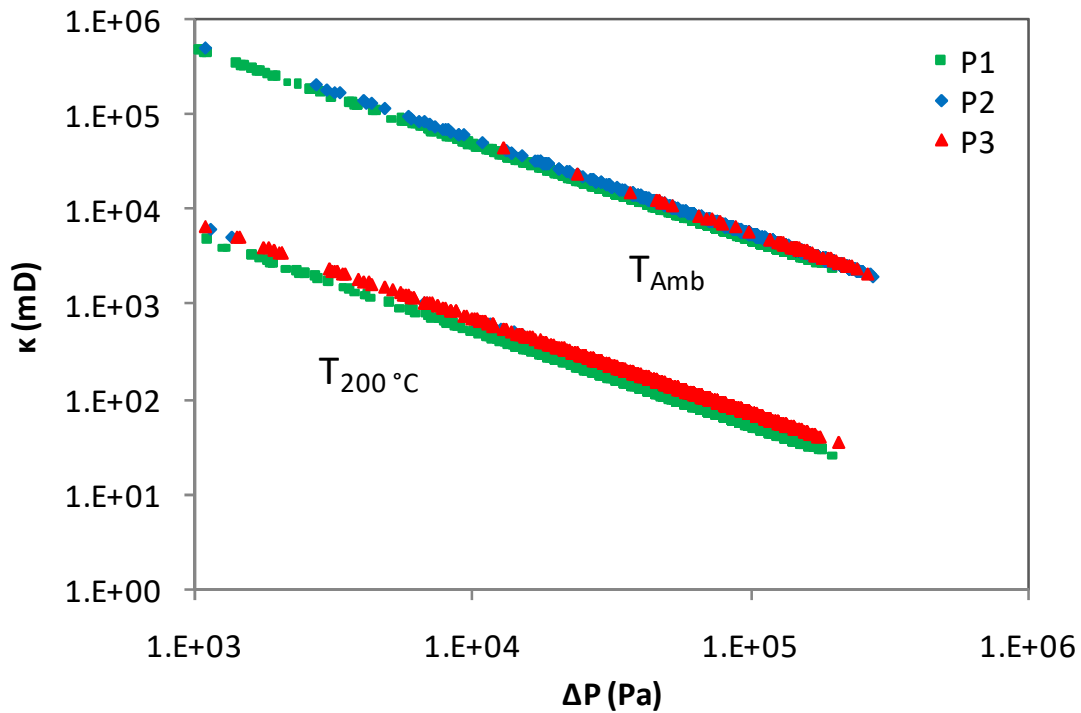


Figura 3.26 Valores de permeabilidad de las espumas con flujo promedio a temperatura ambiente y 200 °C.

En la figura 3.27 se muestran las líneas de tendencia de permeabilidad de las espumas, generadas a partir de los puntos contenidos en la figura 3.26. Esto se hizo con el fin de generar las curvas que describan la permeabilidad de las espumas en función del tamaño de sus poros y la temperatura de ensayo. Se observa que P3 presenta el mayor coeficiente de permeabilidad (κ) en comparación con P1 en un mismo ΔP , con P2 en un valor intermedio muy cercano a P3, presentándose esta tendencia tanto a temperatura ambiente como a 200 °C. Este resultado era el esperado dada la correlación existente entre el tamaño de los poros y el coeficiente de permeabilidad, debido a que la superficie específica de las espumas incrementa cuando el tamaño de los poros disminuye, por lo que la fricción entre el material y el fluido es mayor [32, 50, 51], además de que la cantidad de poros presentes sobre la longitud de las probetas es inversamente proporcional al tamaño de los mismos, por lo que poros más grandes representan

una menor cantidad de obstáculos que restringen el flujo en comparación con poros más pequeños.

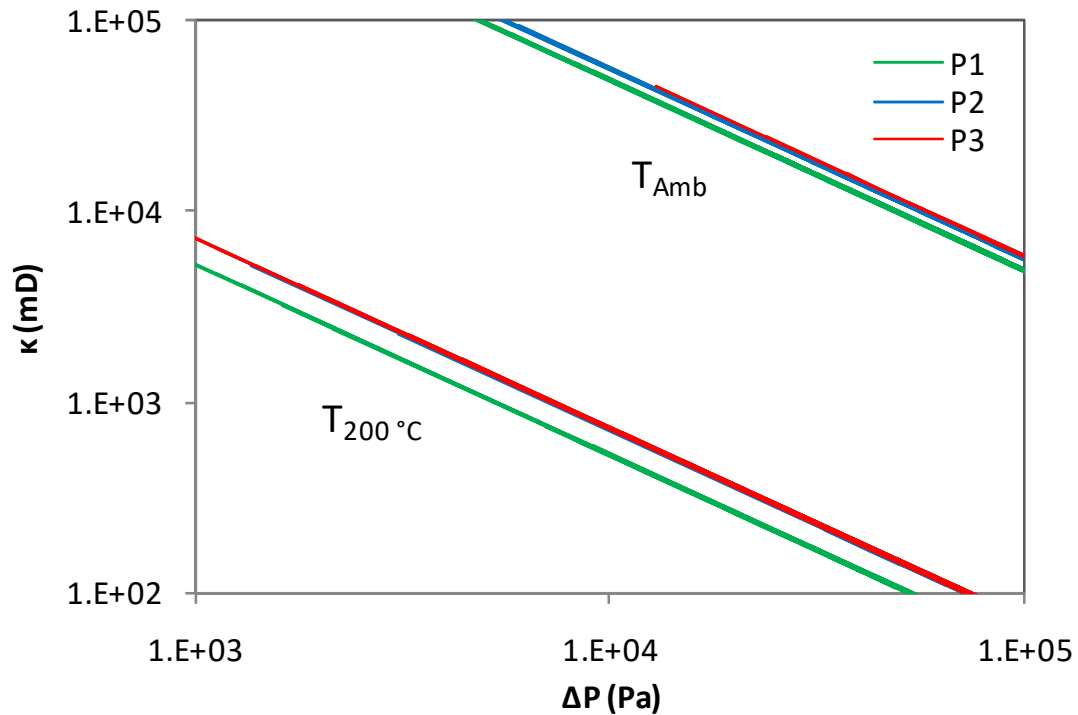


Figura 3.27 Línea de tendencia de la permeabilidad de las espumas a temperatura ambiente y 200 °C.

Es de destacar la influencia directa que tiene la temperatura en la permeabilidad de las espumas, donde la relación entre ambas variables es inversamente proporcional. Este comportamiento se le puede atribuir primeramente a la disminución de la viscosidad dinámica del aditivo de gasolina debido al incremento de temperatura ($\mu_{Amb} = 2E^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\mu_{200^\circ\text{C}} = 3E^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$), lo que repercute directamente en la magnitud de la permeabilidad. Asimismo, se debe considerar la expansión de la fase sólida interna de las espumas consecuencia de la dilatación del Al a 200 °C, manifestándose como una reducción del volumen poroso y por consecuencia del espacio para fluir. En base a lo anterior, es posible replantear la ley de Darcy con la relación heurística que se muestra en la fórmula 3.1, donde se hace presente la influencia de la temperatura en este modelo.

$$\kappa (T) = \frac{q (T) \mu (T) L}{A_c \Delta P} \tag{3.1}$$

Finalmente, para evaluar la integridad estructural de las espumas, posterior a la inyección del aditivo a alta presión y temperatura, uno de los especímenes sometidos al ensayo de permeabilidad a 25,000 psi y 200 °C fue ensayado a compresión para generar su diagrama esfuerzo-deformación y observar el comportamiento del mismo. La espuma ensayada fue de P3 y en la figura 3.28 se muestra la curva obtenida con su referencia sin ensayo de permeabilidad. El diagrama de la probeta ensayada queda ligeramente por debajo de la referencia, lo cual se puede atribuir a que la referencia guardó una relación l/d de 0.8 mientras que la ensayada mantuvo una relación de 1.3, no obstante, es importante destacar que la curva de la espuma ensayada no colapsó prematuramente y exhibió un comportamiento muy similar al de la espuma de referencia, además de que el fluido inyectado mantuvo un flujo sostenido, lo que sugiere que no hubo daño estructural interno a consecuencia del ensayo de permeabilidad.

Para establecer una medida cuantitativa de la integridad estructural, se determinó la capacidad de absorción de energía de la probeta ensayada hasta antes de la densificación del material, es decir, hasta el 38% de deformación, obteniendo 3.41 MJ/m³, el cual coincide con el valor medido en la referencia. A partir de este resultado, es correcto afirmar que las espumas producidas tienen la capacidad de soportar presiones de hasta 25,000 psi sin dañar su estructura interna.

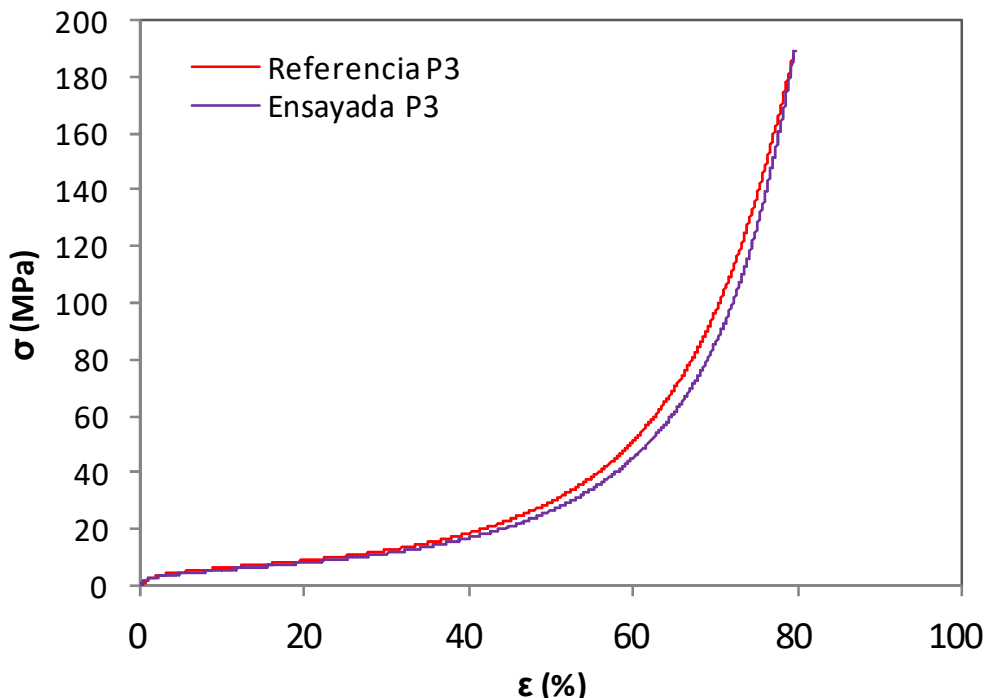


Figura 3.28 Diagrama esfuerzo-deformación de la espuma de Al de P3 ensayada a compresión después de haber sido sometida a ensayo de permeabilidad a 200 °C.

En la figura 3.29 se muestra la espuma de permeabilidad antes y después del ensayo de compresión; cuando el espécimen ha sido deformado al 80% y se encuentra completamente densificado. Visualmente se aprecian los soportes internos colapsados en torno a la circunferencia de la probeta, tal como se esperaba en base a la referencia de compresión.

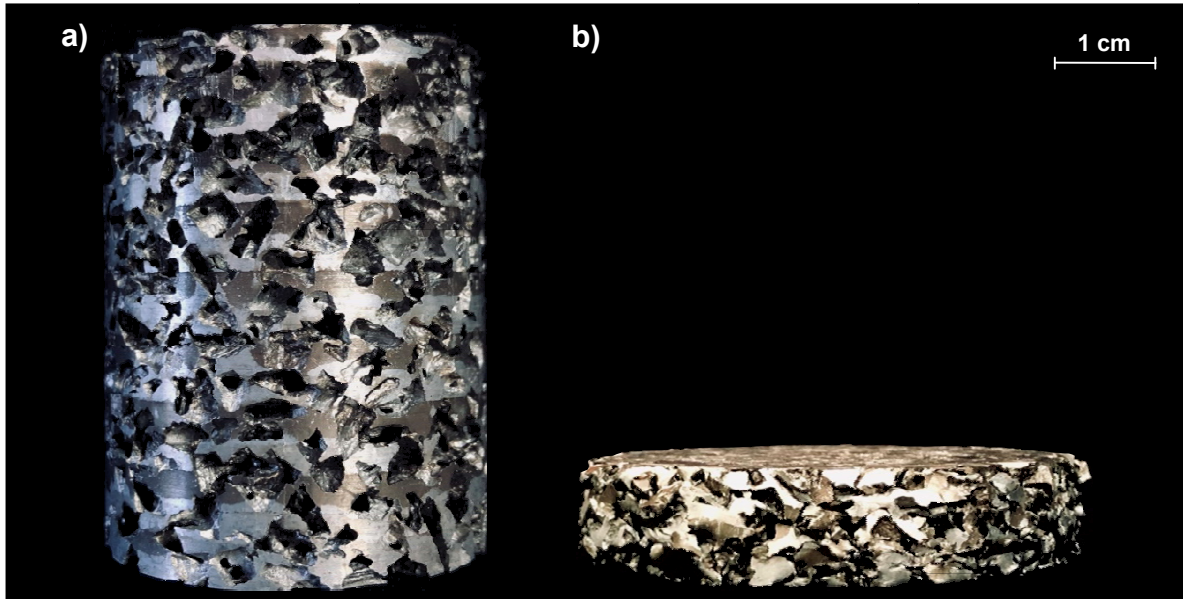


Figura 3.29 Espuma de *Al* de P3 producida para ensayo de permeabilidad a) antes de ser sometida a ensayo de compresión, b) después.

Conclusiones

Las espumas de *Al* de celda abierta fueron producidas satisfactoriamente en los tres intervalos de tamaño de poro definidos, a partir de los parámetros de tiempo, presión y temperatura determinados experimentalmente, así como con la proporción en masa de *Al* y *NaCl* necesaria para fabricar probetas sin defectos por infiltración inadecuada o por cantidad de material insuficiente.

Las espumas producidas exhibieron gran reproducibilidad de parámetros físicos y estructurales asociados al volumen poroso y no presentaron una relación directa entre estas variables con el tamaño de los poros, considerando la irregularidad de forma de los mismos, dado que todas las probetas tuvieron una densidad relativa con respecto al *Al* de 0.37 y una porosidad del 63% ± 3 . Asimismo se determinó que la porosidad es homogénea y no presenta variación a lo largo del eje axial de las espumas.

El espesor de pared de poro presentó una tendencia a incrementar con el tamaño de los poros, lo que era de esperarse dado que poros más grandes suponen una menor concentración superficial de estos, dando como resultado una mayor distancia entre los mismos. Igualmente este fue el parámetro estructural que exhibió la mayor dispersión de datos entre espumas del mismo poro, siendo esto más significativo cuando los poros tienden a ser más grandes.

Las propiedades mecánicas de las espumas obtenidas a partir de ensayos de compresión son altamente reproducibles entre especímenes del mismo poro, debido a la baja desviación estándar de los datos obtenidos, mismos que fueron empleados para generar las curvas esfuerzo-deformación de las espumas. Estas curvas presentaron el comportamiento típico esperado en este tipo de material con sus tres regiones características, y a partir de ellas se determinó el módulo de Young, el esfuerzo de colapso plástico y de Plateau, obteniendo valores en los intervalos de 200 a 300 MPa, 2 a 2.5 MPa y 11.5 a 12.9 MPa, respectivamente. Asimismo, se encontró que el fin de la región de Plateau y el inicio de la densificación ocurre al 38% de deformación para todas las espumas ensayadas, por lo que se concluye que no existe una relación directa entre el tamaño de los poros y estas propiedades mecánicas.

La capacidad de absorción de energía y el esfuerzo necesario para deformar las espumas es muy similar entre todas las espumas de los tres poros hasta antes del fin de la región de Plateau. Sin embargo, a partir de la densificación del material, se presenta una tendencia a incrementar con el tamaño de los poros en ambas propiedades, debido a que las espumas con poros más grandes tienen paredes

más gruesas, y es necesario aplicar mayor carga para deformarlas durante la densificación.

La permeabilidad de las espumas mantiene una relación directa con el tamaño de los poros y la temperatura de ensayo. Esta variable fue estudiada en función del flujo que las espumas permitieron cuando se les inyectó aditivo de gasolina en intervalos de presión, que van desde 200 hasta 25,000 psi, a temperatura ambiente y 200 °C. El mayor flujo ocurrió en la espuma del poro 3 cuando el ensayo se realizó a temperatura ambiente y el menor en la espuma del poro 1 a 200 °C; por lo que se determinó que la permeabilidad de las espumas es inversamente proporcional a la temperatura de ensayo y directamente proporcional al tamaño de los poros. Esto se debe a que en una misma longitud, habrán menos poros cuando estos son más grandes y por lo tanto la cantidad de obstáculos que impiden el flujo de aditivo será menor; asimismo, la interfase que comunica a los poros es mayor a medida que estos son más grandes, lo cual también facilita el flujo. El efecto de la temperatura en la permeabilidad de las espumas se justifica en la correlación entre la viscosidad dinámica del aditivo de gasolina y la temperatura de ensayo. Experimentalmente se determinó que la viscosidad dinámica del fluido tiende a disminuir a medida que la temperatura incrementa, con lo cual se justifica que a 200 °C la permeabilidad fuera menor con respecto a los valores obtenidos a temperatura ambiente.

El resultado anterior es importante porque todas las espumas sometidas a ensayos de permeabilidad presentaron una porosidad del 63% \pm 3, por lo que se concluye que a una misma temperatura de ensayo, la permeabilidad depende del tamaño de los poros y no de la porosidad.

Finalmente se encontró que las espumas son estructuralmente resistentes al flujo a alta presión y temperatura, dado que estas son capaces de absorber la misma cantidad de energía hasta antes de la densificación del material y la curva esfuerzo-deformación generada no colapsó prematuramente a pesar del ensayo de permeabilidad.

Referencias

- [1] Gibson, L.J. and M.F. Ashby, *Cellular Solids Structure and Properties*. 2nd ed. 1999: Cambridge University Press.
- [2] Liu, P.S. and G.F. Chen, *Porous Materials Processing and Applications*. 1st ed. 2014: Tsinghua University Press.
- [3] Wilkin, D. and J. Brainard, *Conceptos de Biología Estructura de los Huesos*. 2015: CK-12.
- [4] Foard Panel Structural Insulated Panels. *Open vs Closed Cell Foams*. Recuperado de <https://www.foardpanel.com/open-vs-closed-cell-foams/>.
- [5] Banhart, J., *Manufacturing Routes for Metallic Foams*. JOM, 2000. 52 (12): p. 22-27.
- [6] Selcuk, C., S. Bond and P. Woollin, *Joining Processes for Powder Metallurgy Parts: a Review*. Powder Metallurgy, 2010. 53 (1): p. 7-11.
- [7] Shi, T., X. Chen, Y. Cheng and Y. Li, *Foaming Process and Properties of 6063 Aluminum Foams by Melt Foaming Method*. Materials Transactions, 2017. 58: p. 243-248.
- [8] Elizondo-Luna, E.M., F. Barari, R. Woolley and R. Goodall, *Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect on Porosity*.
- [9] Yuan, L., X. Chen, Z. Huawei and L. Yanxiang, *Directional Solidification of Metal Gas Eutectic and Fabrication of Regular Porous Metals*. China Foundry, 2005. 2(3): 184-187.
- [10] Tiab, Djebbar and E.C. Donaldson, *Petrophysics, Theory and Practice of Measuring Reservoir Rocks and Fluid Transport Properties*. 3rd ed. 2012: Gulf Professional Publishing.
- [11] Yilong, L., Q. Guibao, Y. Yang, L. Xuewei and B. Chenguang, *Preparations and Compressive Properties of Magnesium Foams*. Rare Metal Materials and Engineering, 2016. 45 (10): p. 2498-2502.

- [12] Amsterdam, E. (2008). *Structural Performance and Failure Analysis of Aluminium Foams* (Tesis de Doctorado). University of Groningen, Groningen, Países Bajos.
- [13] ISO International, 2011. *ISO 13314 Mechanical Testing of Metals-Ductility Testing-Compression Test for Porous and Cellular Metals*. ISO International, Estados Unidos.
- [14] Valencia-Giraldo, A., *Las Espumas Metálicas Metal Foams*. Revista Cintex, 2013. 18: p. 101-152.
- [15] Totten, G.E. and D.S. MacKenzie, *Handbook of Aluminum Volume 1 Physical Metallurgy and Processes*. 2003: Marcel Dekker, Inc.
- [16] Lyman, T., *Metals Handbook Volume 1 Properties and Selection of Metals*. 8th ed. 1961: ASM.
- [17] Ingemecánica Ingeniería, Consultoría y Construcción. *Propiedades Mecánico-Químicas del Aluminio*. Recuperado de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>.
- [18] MIPSAs Expertos Procesando Metales. *Clasificación del Aluminio*. Recuperado de <https://mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Clasificacion-de-aluminio>.
- [19] ERG Materials and Aerospace. *Duocel® Aluminum Foam*. Recuperado de <http://ergaerospace.com/materials/duocel-aluminum-foam/>.
- [20] García-Moreno, F., *Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production*. Materials, 2016. 9 (2), 85.
- [21] Nguyen, T.L., G.J. Dias, M.P. Staiger and T.B. Woodfield, *A Novel Manufacturing Route for Fabrication of Topologically-Ordered Porous Magnesium Scaffolds*. Advanced Engineering Materials, 2011. 13(9): p. 872-881.
- [22] Trinidad, J., et al, *Processing of Magnesium Porous Structures by Infiltration Casting for Biomedical Applications*. Advanced Engineering Materials, 2014. 16 (2): p. 241-247.
- [23] Wen, C.E., et al, *Processing of Biocompatible Porous Ti and Mg*. Scripta Materialia, 2001. 45: p. 1147-1153.

- [24] Banhart, J., *Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams*. Progress in Materials Science, 2001. 46: p. 559-632.
- [25] Lefebvre, L.P., J. Banhart and D.C. Dunand, *Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments*. Advanced Engineering Materials, 2008. 10 (9): p. 775-787.
- [26] Mehdy, A.N., A. Nasser and N.M. Al-Zurf, *High-Porosity Metal Foams: Potentials, Applications, and Formulations*. IntechOpen, 2017.
- [27] Singh, S. and N. Bhatnagar, *A Survey of Fabrication and Application of Metallic Foams (1925–2017)*. Journal of Porous Materials, 2017. 25 (2): p. 537-554.
- [28] Degischer, H.P. and B. Kriszt, *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*. 2002: Wiley-VCH.
- [29] Clyne, T.W. and F. Simancik, *Metal Matrix Composite and Metallic Foams*. 2000: Wiley.
- [30] The Aluminum Specialist. *Highway Wall Acoustic Foam Panels*. Recuperado de <https://www.alumking.com/Highway-Wall-Acoustic-Aluminum-Foam-Panels-pd6349669.html>.
- [31] Fraunhofer IFAM. *Services and Methods*. Recuperado de https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Profile/Locations/Dresden/Energy_and_thermal_management/leistungen_und_methoden.html.
- [32] Despois, J.F. and A. Mortensen, *Permeability of Open-Pore Microcellular Materials*. Acta Materialia, 2005. 53: p. 1381-1388.
- [33] Sánchez-San Román, F.J., Universidad de Salamanca, España. *Ley de Darcy Conductividad Hidráulica*. Recuperado de http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf.
- [34] Civan, F., *Porous Media Transport Phenomena*. 1st ed. 2011: Wiley.
- [35] Ingham, D.B. and I. Pop, *Transport Phenomena in Porous Media*. 1st ed. 1998: Pergamon.
- [36] ATAGO. *Acerca de los Viscosímetros*. Recuperado de https://www.atago.net/es/databook-viscosity_principle.php.

- [37] Velasco-Castro, M., 2017. *Espumas de Magnesio Puro con Porosidad Interconectada como Captadores Químicos Estructurales de CO₂* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- [38] Cristóbal-Granados, M., 2018. *Producción y Caracterización de Espumas Metálicas de Al y Mg de Poro Abierto* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- [39] Molina-Ramírez, O.D., 2015. *Caracterización Microestructural y Mecánica de Espumas Metálicas de Aluminio Fabricadas por un Nuevo Proceso de Infiltración* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- [40] Osorio-Hernández, J.O., et al, *Manufacturing of Open-Cell Mg Foams by Replication Process and Mechanical Properties*. Materials and Design, 2014. 64: p. 136-141.
- [41] ASTM International, 2004.*E11-04 Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes*, ASTM International, Estados Unidos.
- [42] ASTM International, 2009.*E9-89a Standard Test Methods for Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*, ASTM International, Estados Unidos.
- [43] Quantachrome Instruments. *Gas Pycnometers True Density Analysis of Powders, Foams and Bulk Solids*. Recuperado de http://www.quantachrome.com/pdf_brochures/07171_Gas_Pyc.pdf.
- [44] Pal, L., P.D. Fleming and M. Joyce, *A Simple Method for Calculation of the Permeability Coefficient of Porous Media*. Tappi Journal, 2006. 5(9).
- [45] Goodall, R., A. Marmottant, L. Salvo and A. Mortensen, *Spherical Pore Replicated Microcellular Aluminum: Processing and Influence on Properties*. Materials Science and Engineering, 2007. 465 (1-2): p. 124-135.
- [46] Gibson, L.J., *Mechanical Behavior of Metallic Foams*. Annual Review Materials Science, 2000. 30: p. 191-227.

- [47] Xu, W., B. Zhang, X. Lu and C. Liu, *Effects of Porosity on Mechanical Properties and Corrosion Resistances of PM-Fabricated Porous Ti-10Mo Alloy*. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2018. 8(3): p. 188-200.
- [48] Despois, J.F., A. Marmottant, L. Salvo and A. Mortensen, Influence of the Infiltration Pressure on the Structure and Properties of Replicated Aluminium Foams. Materials Science and Engineering, 2007. 462: p. 68-75.
- [49] Wen, C.E., et al, *Compressibility of Porous Magnesium Foam: Dependency on Porosity and Pore Size*. Materials Letters, 2004. 58: p. 357-360.
- [50] Fernández-Morales, P., C. Cano-Montoya, J. Pérez-Mesa and M. Navacerrada, *Thermal and Permeability Properties of Metal Aluminum Foams for Functional Applications*. Ingeniería y Universidad, 2017. 21(1): p. 115-130.
- [51] Boomsma, K. and D. Poulikakos, *The Effects of Compression and Pore Size Variations on the Liquid Flow Characteristics in Metal Foams*. Journal of Fluids Engineering, 2002. 124 (1): 263-272.

Anexo A. Producción científica

En esta sección se describen los eventos en los cuales fueron presentados los resultados de la investigación, así como la modalidad de participación y reconocimientos obtenidos.

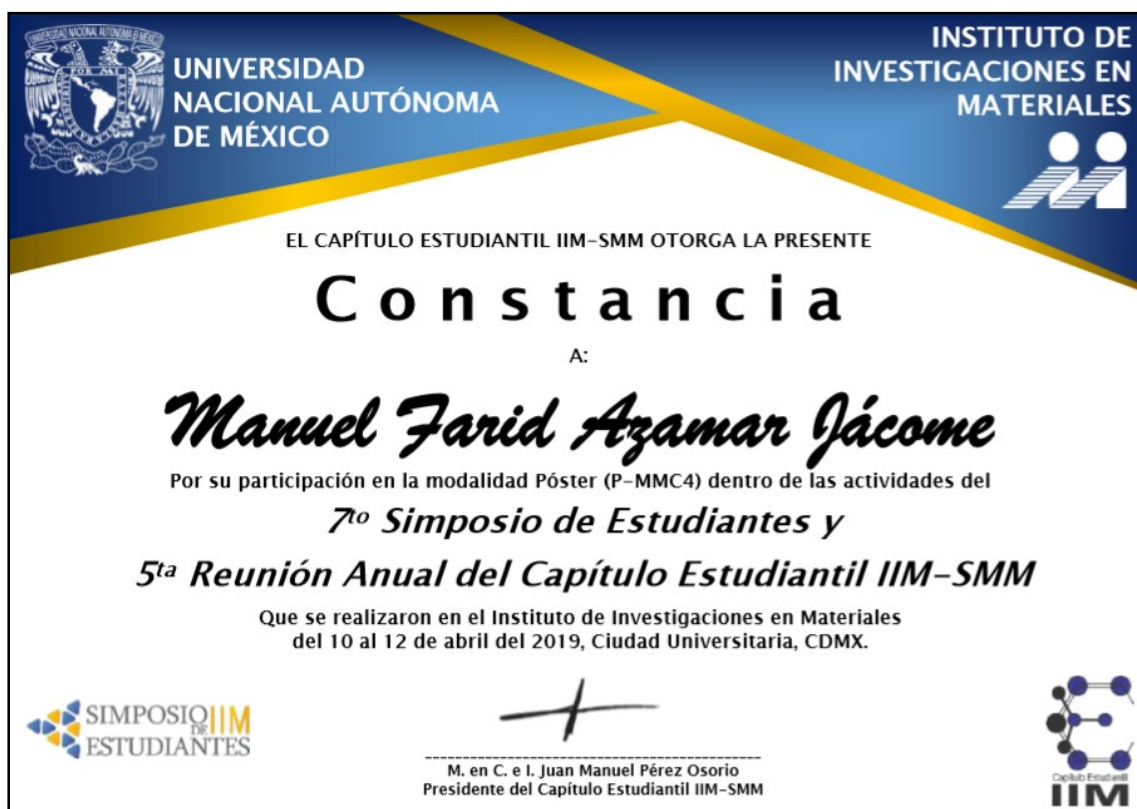
A1. 15° Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales de la UMSNH

Evento realizado en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) en la ciudad de Morelia, Michoacán del 14 al 16 de Noviembre de 2018. Participación en la modalidad de cartel con el trabajo titulado "Estudio de la permeabilidad a altas presiones de espumas de aluminio", obteniendo el tercer lugar.




A2. 7º Simposio Anual de Estudiantes del IIM

Evento realizado en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM en la Ciudad de México del 10 al 12 de Abril de 2019. Participación en la modalidad de póster con el trabajo titulado "Estudio de la permeabilidad y propiedades mecánicas de espumas de aluminio".



The certificate is framed with a blue and yellow border. At the top left is the UNAM logo and text. At the top right is the IIM logo and text. The center contains the title 'Constancia' and the recipient's name 'Manuel Farid Azamar Jácome' in a cursive font. Below the name, it details the event: '7º Simposio de Estudiantes y 5ta Reunión Anual del Capítulo Estudiantil IIM-SMM'. At the bottom center is a signature and the name of the president, Juan Manuel Pérez Osorio. Logos for the symposium and the student chapter are at the bottom corners.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

EL CAPÍTULO ESTUDIANTIL IIM-SMM OTORGA LA PRESENTE

Constancia

A:


Manuel Farid Azamar Jácome

Por su participación en la modalidad Póster (P-MMC4) dentro de las actividades del


7º Simposio de Estudiantes y

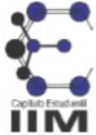
5ta Reunión Anual del Capítulo Estudiantil IIM-SMM

Que se realizaron en el Instituto de Investigaciones en Materiales del 10 al 12 de abril del 2019, Ciudad Universitaria, CDMX.



M. en C. e I. Juan Manuel Pérez Osorio
Presidente del Capítulo Estudiantil IIM-SMM

 SIMPOSIO DE IIM ESTUDIANTES

 Capítulo Estudiantil IIM

A3. 20th World Congress on Materials Science and Engineering

Evento realizado en la ciudad de Viena, Austria del 24 al 26 de Junio de 2019. Participación en la modalidad de poster con el trabajo titulado "Permeability behavior of aluminum foams and its correlation with mechanical properties and structural parameters".



