

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“FABRICACIÓN DE ESPONJAS DE ALUMINIO PARA SU POSIBLE
APLICACIÓN EN INTERCAMBIO DE CALOR”**

POR

DAISY YVETTE TORRES MARTÍNEZ

**TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

ASESORES

**M.C. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA
DR. CARLOS ALBERTO LEÓN PATIÑO**

MORELIA, MICH.

MAYO DE 2007

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABLAS.....	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
DEDICATORIA.....	x
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	3
3. OBJETIVOS	5
4. ANTECEDENTES.....	7
4.1. Métodos de Producción de Materiales Metálicos Celulares	8
4.1.1. Proceso de Sinterización y Disolución	9
4.2. Aplicación de las Espumas Metálicas.....	11
4.2.1. Consideraciones Generales	12
4.2.2. Aplicaciones Estructurales de Espumas Metálicas.....	14
4.2.2.1. Material Estructural.....	14
4.2.2.2. Absorbedor de Energía por Impactos.....	16
4.2.3. Aplicaciones Funcionales para Metales Celulares	17
4.2.3.1. Intercambiadores de Calor y Enfriadores	17
4.2.3.2. Gran Área Superficial	18
4.2.3.3. Absorción Acústica	18
4.2.3.4. Resistencia a la Corrosión y Ataques Químicos.....	19
4.2.4. Materiales celulares para arte y decoración.....	19
4.3. Manejo Térmico e Intercambio de Calor de Metales Celulares.....	20
4.3.1. Coeficiente de transferencia de calor	23
4.3.2. Flujo de calor	25
4.3.3. Caída de Presión	26
4.4. Métodos para Caracterizar Materiales Celulares.....	27
4.4.1. Difracción de Rayos-X	27
4.4.2. Microscopia Electrónica de Barrido.....	27
4.4.3. Microscopia Óptica	28

4.4.4. Densidad	28
4.4.5. Porosidad	29
4.4.6. Tortuosidad	30
4.4.7. Permeabilidad.....	30
V. METODOLOGÍA	32
5.1. Mezclado de polvos de Al y NaCl.....	33
5.2. Prensado Uniaxial.....	33
5.3. Sinterización	35
5.4. Disolución	37
5.5. Secado	38
5.6. Caracterización Microestructural de los polvos y esponjas de Aluminio	38
5.6.1. Difracción de Rayos-X	38
5.6.2. Microscopia Electrónica de Barrido	39
5.6.3. Microscopía Óptica y Análisis de Imágenes	39
5.6.3.1. Porosidad	41
5.6.3.2. Tamaño de Poros.....	41
5.6.3.3. Forma de los Poros	41
5.7. Caracterización Física de las esponjas de Aluminio	42
5.7.1. Densidad	42
5.7.2. Porosidad	43
5.7.3. Tortuosidad	43
5.7.4. Permeabilidad.....	44
5.7.5. Conductividad Térmica.....	46
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
6.1. Morfología de los polvos precursores de las esponjas de Aluminio	49
6.2. Compactación de mezclas de polvos Al/NaCl.....	50
6.3. Sinterización de compactos	52
6.4. Difracción de Rayos-X.....	54
6.5. Microscopia Electrónica de Barrido	56
6.6. Microscopía Óptica y Análisis de Imágenes.....	59
6.6.1. Porosidad	62
6.6.2. Diámetro de Feret	63

6.6.3. Factor de Forma	65
6.7. Densidad	66
6.8. Tortuosidad.....	68
6.9. Permeabilidad	69
6.10. Conductividad Térmica.....	70
VII. CONCLUSIONES.....	83
VIII. RECOMENDACIONES.....	85
IX. BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE FIGURAS

Fig. 4.1. Dispersión de una fase en dentro de otra. Cada fase puede encontrarse en alguno de los tres estados de la materia.	8
Fig. 4.2. Métodos de producción de materiales metálicos celulares.	9
Fig. 4.3. Esquema del Proceso de Sinterización y Disolución para la fabricación de espumas de aluminio de célula abierta a partir de polvos de Al y NaCl.	10
Fig. 4.4. Imagen SEM: Micrografía de una esponja de Aluminio obtenida por SDP [3].	11
Fig. 4.5. Agrupación de los metales celulares de acuerdo al grado de apertura necesaria y si la aplicación es funcional o estructural.	14
Fig. 4.6. a) Láminas de acero rellenas de espuma de Aluminio y b) Láminas de acero rellenas de espuma y núcleo de Aluminio.	15
Fig. 4.7. Caja de Impacto.	16
Fig. 4.8. Dispersor de Calor Compacto.	18
Fig. 4.9. Discos de espumas de Aluminio para absorción de Sonido.	19
Fig. 4.10. Aplicaciones de las espumas de aluminio en arte y diseño.	20
Fig. 4.11. a) Espuma de célula abierta empacada entre dos placas conductoras. La espuma con alta relación de área superficial-volumen transfiere calor al fluido. b) Esquema idealizado de una espuma de célula abierta.	22
Fig. 5.1. Diagrama del desarrollo experimental.	32
Fig. 5.2. Dado de acero utilizado en la compactación de las mezclas de polvos de NaCl:Al.	34
Fig. 5.3. Horno tubular horizontal Lindberg Blue con atmósfera controlada.	35
Fig. 5.4. Ciclo térmico de sinterización de las esponjas.	36
Fig. 5.5. Técnicas empleadas en la eliminación de sal contenida en los sinterizados: (a) disolución en agua destilada caliente y (b) ultrasonido BRANSON modelo 2510.	37
Fig. 5.6. Mufla Barnstead Thermolyne modelo 1300.	38
Fig. 5.7. Representación descriptiva del diámetro de Feret.	41

Fig. 5.8. Arreglo experimental empleado para obtener la permeabilidad de las esponjas metálicas fabricadas.....	44
Fig. 5.9. Arreglo experimental empleado para obtener la conductividad térmica de las esponjas metálicas fabricadas.....	46
Fig. 5.10. Diagrama esquemático del arreglo experimental empleado para obtener la conductividad térmica de las esponjas a partir de los gradientes de temperatura.....	47
Fig. 5.11. Tipo de ranura hecha en los materiales de referencia y en las esponjas de aluminio.....	48
Fig. 6.1. Imágenes del MEB: Polvos precursores de las esponjas metálicas de aluminio (a) aluminio metálico y (b) sal de mesa.....	49
Fig. 6.2. Compactos obtenidos a presiones de compactación: (a) inferiores a la óptima presión, (b) superiores a la óptima presión y (c) a la óptima presión.....	52
Fig. 6.3. Aspecto de las esponjas metálicas producidas.....	53
Fig. 6.4. Difractograma de rayos-x de los polvos precursores de aluminio.	55
Fig. 6.5. Difractograma de rayos-x de las esponjas de aluminio fabricadas.	55
Fig. 6.6. Micrografías MEB de esponjas de aluminio 65:35 con diferente tamaño de sal precursor. a) 250-419 μm ; b) 420-589 μm ; y c) 590-1000 μm	58
Fig. 6.7. Micrografías MEB de esponjas de aluminio 70:30 con diferente tamaño de sal precursor. a) 250-419 μm ; b) 420-589 μm ; y c) 590-1000 μm	58
Fig. 6.8. Micrografías que muestran la porosidad característica y cuellos formados en las esponjas de aluminio 65:35 obtenidas a partir de diferentes tamaños de sal. a) 250-419 μm ; b) 420-589 μm ; y c) 590-1000 μm	61
Fig. 6.9. Micrografías que muestran la porosidad características y cuellos formados en las esponjas de aluminio 70:30 obtenidas a partir de diferentes tamaños de sal. a) 250-419 μm ; b) 420-589 μm ; y c) 590-1000 μm	61
Fig. 6.10. Gráfica de porosidad del bulto vs. densidad.	68
Fig. 6.11. Gráfica de porosidad del bulto vs. tortuosidad.....	69
Fig. 6.12. Temperaturas de las placas registradas con la tarjeta de adquisición de datos en los diferentes puntos del arreglo experimental hasta alcanzar el equilibrio.....	72

Fig. 6.13. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 65:35 (250-419 μm).....73

Fig. 6.14. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 65:35 (420-589 μm).....73

Fig. 6.15. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 65:35 (590-1000 μm).....74

Fig. 6.16. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 70:30 (250-419 μm).....74

Fig. 6.17. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 70:30 (420-589 μm).....75

Fig. 6.18. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 70:30 (590-1000 μm).....75

Fig. 6.19. Gráfica de Conductividad Térmica de esponjas de Aluminio con diferente densidad relativa a diferentes temperaturas.....79

Fig. 6.20. Gráficas de Conductividad Térmica en función del diámetro de Feret a diferente temperatura.80

Fig. 6.21. Gráficas de Conductividad Térmica en función de la forma de los poros para las diferentes esponjas.81

LISTA DE TABLAS

Tabla.5.2. Número de poros por esponja analizados con el software SigmaScan Pro5.	40
Tabla 6.1. Cargas y presiones aplicadas en la compactación de las mezclas de los polvos precursores de las esponjas metálicas.	51
Tabla. 6.2. Porosidades de las esponjas metálicas.	62
Tabla. 6.3. Diámetro de Feret de los poros de las esponjas de aluminio.....	64
Tabla. 6.4. Factor de forma de los poros de las esponjas de aluminio.	66
Tabla. 6.5. Densidad y Densidad Relativa de las esponjas de Aluminio fabricadas.	67
Tabla 6.6. Permeabilidad de las esponjas de aluminio fabricadas.	70
Tabla 6.7. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio a diferentes temperaturas.	77

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme dado todas las bendiciones y oportunidades que cualquier persona pudiera desear ¡Gracias Dios mío por tanto amor!

Agradezco a mis padres por tantos y tantos sacrificios que han hecho por mí, nunca me cansaré de agradecerles su ejemplo, apoyo, amistad, dedicación y por su puesto su amor incondicional. Gracias por creer en mí, ¡Los amo y admiro muchísimo!

Agradezco a mis hermanos Jenny, María, Beto y Angélica por su cariño, amistad y sobre todo su paciencia en lo que fue esta importante etapa de mi vida, ¡Los amo wemanitos!

Agradezco a mis amigos Alejandra Gandini, Dulce González , Gaby Montes, Laura Saucedo, Miriam Martínez, Pamela Zamudio, Toño González, Armando López, Carlos Quesada, Emerson Barrera, Julián López, Miguel Estrada, Oscar Rangel, Rodrigo Martínez y Quique Méndez que siempre estuvieron ahí para "echarme porras" y me ayudaron a salir adelante, ¡Mil gracias los quiero mucho!

Un agradecimiento especial al M.C. Gabriel Rodríguez Ortíz por todo el apoyo desinteresado que me diste a lo largo de la elaboración de mi tesis y sobre todo muchísimas gracias por tu amistad, ¡Eres una gran persona!

Agradezco a mí amado Fabricio por haberme hecho tan feliz en cada uno de los momentos que compartimos, por haberme apoyado siempre, por haberme tenido tanta paciencia, en fin...Gracias por ser la luz que ilumina mis días, por ser el amor de mi vida y por estar siempre ahí ¡Te amo con todo mi ser Bomboncito!

Agradezco a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana por el apoyo recibido como becario tesista a través del proyecto 1.23 Compósitos base cobre vía metalización y metalurgia de polvos.

Agradezco al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana por permitir el uso de sus espacios, equipos y laboratorios para la realización total de este trabajo de tesis, de manera particular, al Laboratorio de Materiales Compuestos, perteneciente al Cuerpo Académico Consolidado de Ingeniería y Tecnología de Metales, Cerámicos y Aleaciones de la UMSNH.

Un agradecimiento especial al Dr. Carlos Alberto León Patiño por su ayuda, enseñanzas, consejos y amistad.

Agradezco al M.C. José María Ponce Ortega por sus consejos y ayuda; y al Dr. Gerardo Barrera Cardiel por su amable colaboración en este proyecto.

Agradezco a mis maestros por haber sido parte de mi formación profesional y por supuesto a mí muy querida Universidad a la cual le tengo un gran cariño.

DEDICATORIA

A mis Padres:

Sr. Mario Antonio Torres Álvarez

Sra. Alma Leticia Martínez Baltazar

1. RESUMEN

Se fabricaron esponjas de aluminio con diferente contenido de sólidos empleando una técnica convencional de metalurgia de polvos. Para la fabricación de las esponjas se mezclaron homogéneamente polvos metálicos de aluminio y cloruro de sodio (sal de mesa) en relación volumétrica NaCl/Al de 70:30 y 65:35. Tres diferentes granulometrías de sal fueron empleadas con el propósito de obtener seis grados de metales celulares con distintas características morfológicas. Los polvos fueron compactados en frío por prensado uniaxial; los compactos en verde fueron sinterizados por tres horas a 670 °C en un horno tubular horizontal Lindberg Blue bajo atmósfera dinámica de argón. Los sinterizados obtenidos se sometieron a un proceso de disolución en agua destilada caliente con el objeto de remover la sal incluida y obtener finalmente las esponjas metálicas de estructura porosa abierta. Las esponjas de aluminio se caracterizaron física y morfológicamente en términos de densidad, porosidad, tamaño y forma de poros, permeabilidad y tortuosidad de los huecos, empleando técnicas complementarias de difracción de rayos-x, microscopía y análisis de imágenes. Adicionalmente de acuerdo a normas, se determinó la conductividad térmica de las esponjas a través de un arreglo experimental basado en el principio de comparación de conductividades empleando placas calientes.

Se encontró que la porosidad de las esponjas puede ser controlada a partir del contenido de sal precursora, obteniendo esponjas con porosidades de 65 a 70% volumen. Las esponjas son extremadamente ligeras, con densidad relativa de 0.2903 a 0.3439 es decir, menor a una tercera parte la densidad del aluminio metálico. La característica de los poros interconectados permite el paso de fluidos a través de las mismas,

para lo cual se determinaron valores de permeabilidad entre 12.4 y 116.9 darcys. La naturaleza permeable, aunada a valores de conductividad térmica obtenidos entre 25.90 y 149.97 W/mK, indican la posibilidad de implementar las esponjas en aplicaciones de intercambio de calor como disipadores térmicos de dispositivos electrónicos.

2. INTRODUCCIÓN

Las espumas y otros materiales altamente porosos de estructura celular son conocidos por presentar interesantes combinaciones de propiedades físicas y mecánicas, por ejemplo, elevada rigidez asociada con un bajo peso específico, o alta permeabilidad en conjunto con un alto valor de conductividad térmica. De manera natural existen diversos materiales celulares con fines estructurales o funcionales (p.ej. madera o huesos). Dentro de los materiales celulares sintéticos, las espumas de polímeros son actualmente las de mayor importancia, con una gran variedad de aplicaciones en diversos sectores de la tecnología. Menos conocido es el hecho de que metales y sus aleaciones pueden ser producidos en forma de materiales celulares o espumas, presentando propiedades tan interesantes que generan gran expectación en aplicaciones que incluyen el intercambio de calor [1].

Las esponjas metálicas son sólidos altamente porosos con canales interconectados con alto grado de reproducibilidad que pueden resultar de técnicas de producción baratas. En particular, las esponjas de aluminio se fabrican comercialmente por dos rutas principales. Primeramente por técnicas basadas en metalurgia de polvos que consisten en mezclas de polvos de aluminio y TiH_2 que espuman al calentar, o bien compactos de polvos metálicos y materiales de sacrificio solubles; por otro lados, los métodos que implican la introducción directa de gas en aluminio líquido para generar espumas.

Las espumas metálicas con estructura de célula abierta poseen características deseables de un buen intercambiador de calor, lo que incluye una elevada área interfacial específica sólido-fluido, una fase sólida térmicamente conductora, excepcional capacidad de

transferencia de calor y un camino de flujo suficientemente tortuoso para promover el mezclado. El calor puede ser proporcionado o removido de un flujo de gas o líquido a través de la esponja, calentando o enfriando la esponja al mismo tiempo. Su rendimiento puede ser maximizado elevando la conductividad térmica del sólido a la vez que se mantenga en un mínimo la resistencia al flujo, características adquiridas por la espuma sólida en el proceso de fabricación.

La demanda de mayor velocidad de procesamiento y miniaturización de los componentes electrónicos deriva en elevados requerimientos de disipación de energía. Entre las diferentes técnicas de enfriamiento de módulos electrónicos se encuentra el enfriamiento forzado con aire, técnica de bajo costo. Recientemente se han estudiado disipadores de calor basados en cobre o aluminio celular con excelente respuesta térmica. Los intercambiadores de calor compacto son una nueva gama de dispositivos de enfriamiento propuestos para disipar el calor de medios electrónicos, principalmente [2].

El presente trabajo propone la obtención de esponjas de aluminio de diferentes características estructurales empleando el proceso de sinterización y disolución [3,4]. Las esponjas de aluminio así obtenidas se caracterizaron física y microestructuralmente con el propósito de conocer sus propiedades en términos de su densidad, porosidad, tortuosidad, permeabilidad, conductividad térmica, naturaleza química y forma y tamaño de poros.

3. OBJETIVOS

- Implementar una técnica de metalurgia de polvos denominada Proceso de Sinterización y Disolución en la fabricación de esponjas metálicas de aluminio con contenidos de poros de 65 a 70% volumen a partir de polvos precursores de aluminio metálico y cloruro de sodio en su forma de sal de mesa.
- Lograr la sinterización de los compactos sin emplear el encapsulado de metal y vidrio, como lo propone el método original de Sinterización y Disolución, implementando para ello una cámara de trabajo que evite la oxidación del metal mediante el flujo continuo de una atmósfera de argón.
- Caracterizar química y microestructuralmente las esponjas de aluminio en términos de su naturaleza química, porosidad total, y tortuosidad, así como tamaño, forma e interconectividad de poros empleando técnicas de análisis por difracción de rayos-x, microscopía óptica y electrónica y análisis de imágenes.
- Estudiar y relacionar propiedades físicas de las esponjas tales como densidad, capacidad al paso de fluidos (permeabilidad) y capacidad de transferencia de calor (conductividad térmica) en la preparación de materiales funcionales de intercambio de calor compacto para posibles aplicaciones de disipación térmica de dispositivos electrónicos.
- Implementar un dispositivo experimental que permita determinar la conductividad térmica de las esponjas de aluminio en función de la temperatura, basado en el principio comparativo

de conductividades empleando placas calientes como materiales de referencia.

4. ANTECEDENTES

Las espumas metálicas son una nueva clase de materiales de baja densidad y novedosas propiedades mecánicas, térmicas, químicas, eléctricas y acústicas, además que su reciclado no genera problemas de contaminación [5]. La estructura de las espumas de célula abierta con porosidad interconectada (esponjas metálicas) confiere propiedades para aplicaciones tales como material estructural ligero de resistencia elevada, absorbedor de impactos, filtros, silenciadores neumáticos, reactores catalíticos, y más recientemente, intercambiadores de calor.

La Figura 4.1 muestra las posibles dispersiones formadas entre dos fases en cualquiera de los tres estados de agregación de la materia. De acuerdo a esta clasificación, las espumas son dispersiones uniformes de un gas en un líquido o sólido. Por tanto, las células son completamente encerradas por la fase líquido o sólido y no se encuentran interconectadas. El término “espuma” en un sentido estricto, se reserva para la dispersión de burbujas de gas en un líquido; sin embargo, en el caso de que ese líquido pueda solidificarse, se obtiene lo que se conoce como una “espuma sólida”. Entonces el término espumas metálicas se refiere a una espuma sólida o sólido celular. Como los sólidos celulares no se obtienen exclusivamente vía estado líquido, el material poroso es capaz de adquirir casi cualquier morfología, como puede ser una estructura abierta conferida por un proceso típico de sinterización de polvos. Tales estructuras de porosidad interconectada se denominan “esponjas metálicas” [1].

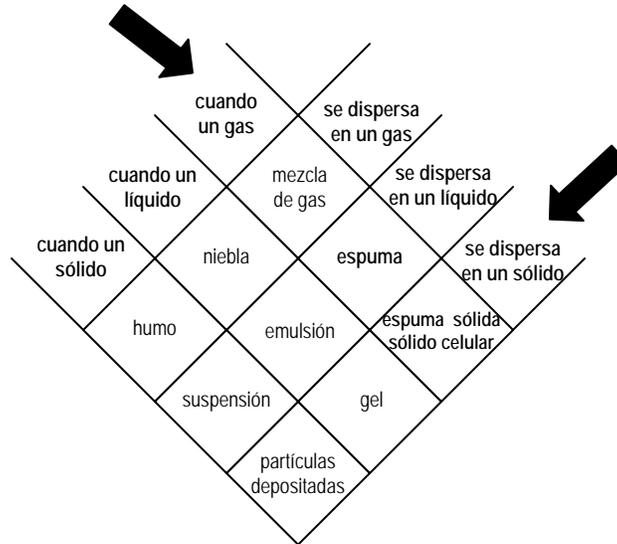


Fig. 4.1. Dispersión de una fase en dentro de otra. Cada fase puede encontrarse en alguno de los tres estados de la materia.

4.1. Métodos de Producción de Materiales Metálicos Celulares

Las espumas metálicas son materiales que tienen procesos de fabricación muy desafiantes debido a la simultánea coexistencia de las fases sólida, líquida y gaseosa a temperaturas variables, además la morfología de la espuma solidificada es bastante compleja [6].

Algunos métodos son similares a técnicas empleadas en la generación de espumas acuosas, mientras que otros son especialmente diseñados considerando las ventajas y propiedades características de los metales, tales como su capacidad de consolidación por aporte térmico (sinterización) o la depositación eléctrica. De acuerdo al estado en que el metal es procesado, las técnicas se clasifican en cuatro grupos principales (Ver Fig.4.2):

- i) a partir de metales líquidos,
- ii) a partir de metales sólidos en forma de polvos,
- iii) a partir de vapores metálicos o vapores de compuestos metálicos,
- iv) a partir de soluciones de iones metálicos [1].

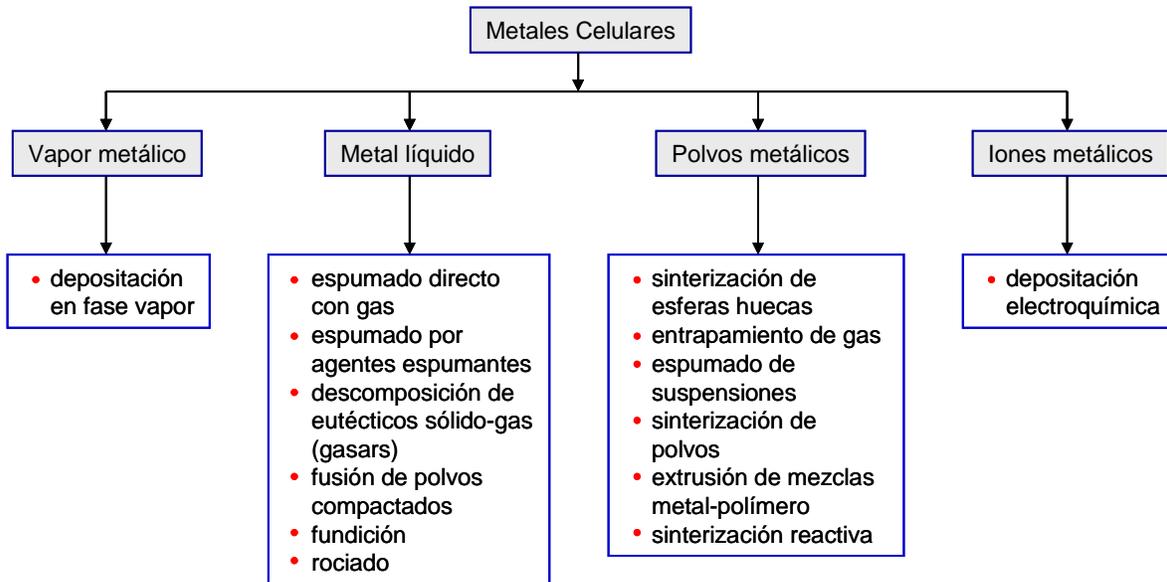


Fig. 4.2. Métodos de producción de materiales metálicos celulares.

Sin embargo, las espumas de aluminio producidas a partir de estos métodos son caras debido a los altos costos de producción o a la poca calidad ocasionada por el bajo control de los poros y porosidad de las espumas. Como consecuencia de ello, las aplicaciones comerciales de las espumas de aluminio siguen siendo limitadas. Con la creciente demanda de espumas de aluminio de buena calidad, se ha incrementado la necesidad de desarrollar nuevos métodos de producción más económicos [3].

4.1.1. *Proceso de Sinterización y Disolución*

El denominado Proceso de Sinterización y Disolución (SDP, *Sintering and Dissolution Process*) ha sido propuesto recientemente en el departamento de Ingeniería de la Universidad de Liverpool, UK [3,4]. Este proceso es empleado en la fabricación de espumas de aluminio de célula abierta (esponjas), controlando su porosidad y tamaño de poros. Las espumas de aluminio fabricadas con este método son considerablemente más baratas que las que son fabricadas empleando alguno de los métodos

incluidos en el diagrama de la Figura 4.2, con los cuales es difícil controlar la porosidad y características de los poros.

El método SDP consiste en las siguientes etapas, mezclado, compactación, sinterización y disolución, las cuales se muestran esquemáticamente en la Figura 4.3. Los materiales precursores de las esponjas son polvos metálicos de aluminio y polvos de sacrificio con características solubles, como es el caso de sales de cloruro de sodio.

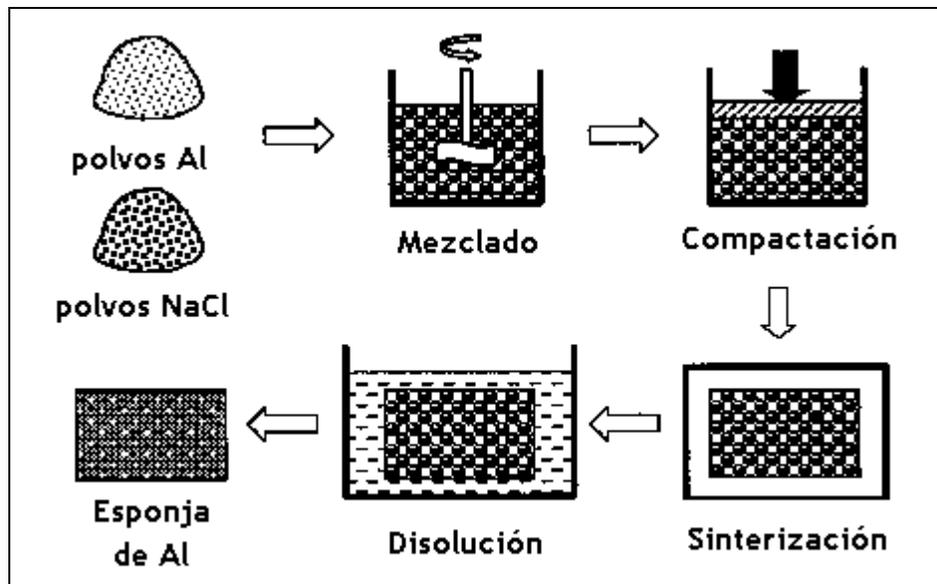


Fig. 4.3. Esquema del Proceso de Sinterización y Disolución para la fabricación de espumas de aluminio de célula abierta a partir de polvos de Al y NaCl.

El método SDP es conveniente para la manufactura de esponjas de aluminio con densidades relativas entre 0.15 y 0.5. Es difícil obtener esponjas con densidades relativas por debajo de 0.15 mediante SDP debido a que las partículas de aluminio dentro del preformado de Al/NaCl estarían prácticamente aisladas, por lo que no sería posible la formación de uniones entre las partículas metálicas. En el caso de densidades relativas superiores a 0.5, las esponjas podrían mantener más del 10% del NaCl inicial, por lo que el excedente corroería la esponja de

Al degradando sus propiedades químicas y mecánicas. El método SDP tiene grandes posibilidades de aplicarse industrialmente [3,4].

La Figura 4.4 muestra una imagen por electrones secundarios de una esponja de aluminio obtenida empleando el Proceso de Sinterización y Disolución reportada por Sun y Zhao [3]. La esponja de aluminio fue obtenida partiendo de una relación NaCl:Al de 80:20; tiene una estructura homogénea con porosidad abierta y tamaños de poros dentro del rango de 300-1000 μm , las cuales representan las características de las partículas de los polvos de sal precursores. Se ha demostrado que cuando se emplea el Proceso de Sinterización y Disolución es posible controlar fácilmente la forma y tamaño de los poros.

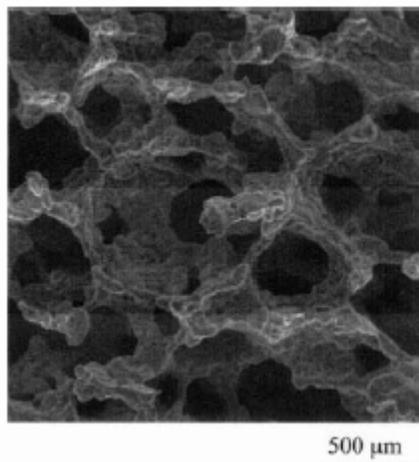


Fig. 4.4. Imagen SEM: Micrografía de una esponja de Aluminio obtenida por SDP [3].

4.2. Aplicación de las Espumas Metálicas

En los últimos años, las excepcionales propiedades mecánicas, térmicas, acústicas, eléctricas y químicas que poseen las espumas de aluminio han sido muy reconocidas. Esto ha dado lugar a una gran variedad de aplicaciones potenciales en la industria para éste relativamente nuevo tipo de material, particularmente en las áreas de absorción de energía,

manejo térmico y acústico, así como en estructuras ligeras para transporte y arquitectura [7].

Ninguna de las propiedades de las espumas de aluminio es extraordinaria, la mayoría de sus propiedades están disponibles de manera separada en otros materiales. Lo que las hace extraordinarias es el hecho de que en ellas se combinan propiedades que no lo hacen en otros materiales [8].

4.2.1. Consideraciones Generales

Los materiales metálicos celulares tienen una gran variedad de aplicaciones. El que se pueda encontrar un metal poroso o una espuma metálica adecuada para resolver un problema en particular depende de varias condiciones que se resumen a continuación en las siguientes palabras clave:

- **Morfología:** Tipo de porosidad (abierta o cerrada), cantidad de porosidad necesaria, tamaño deseado de poros, área superficial interna total requerida;
- **Metalurgia:** Estado metálico, aleación o microestructural requerido;
- **Procesamiento:** Las posibilidades para darle forma a la espuma o sólido celular o para la elaboración de compósitos entre la espuma y láminas convencionales ó perfiles;
- **Economía:** Costos, adaptabilidad para grandes volúmenes de producción.

El primer punto mencionado es decisivo en cualquier evaluación de las aplicaciones de un material metálico celular. En muchas aplicaciones es necesario que el medio, ya sea líquido o gaseoso, sea capaz de pasar a

través del material celular. Los materiales metálico celulares pueden requerirse con diferentes grados de “apertura”, yendo desde “muy abiertos” para elevados flujos de fluidos hasta “completamente cerrados” para aplicaciones estructurales de apoyo de carga. Por tanto los materiales que satisfagan adecuadamente estas condiciones deben ser seleccionados. La Figura 4.5 muestra que tipo de porosidades requieren los diferentes campos de aplicación de los metales celulares. Generalmente, la diferencia se hace dependiendo si su aplicación es funcional o estructural.

Es importante considerar cuales metales ó aleaciones deben ser utilizadas en la elaboración de los metales celulares. Estructuralmente, los componentes del soporte de carga deben ser ligeros debido a que de otra manera serían elaborados de metales o aleaciones convencionales. Es por ello, que las espumas de aluminio, magnesio o titanio son elegidas para tales aplicaciones. Para aplicaciones médicas, el titanio es utilizado debido a su compatibilidad con los tejidos. El acero inoxidable o el titanio son usados para aplicaciones en donde se involucran medios agresivos o altas temperaturas.

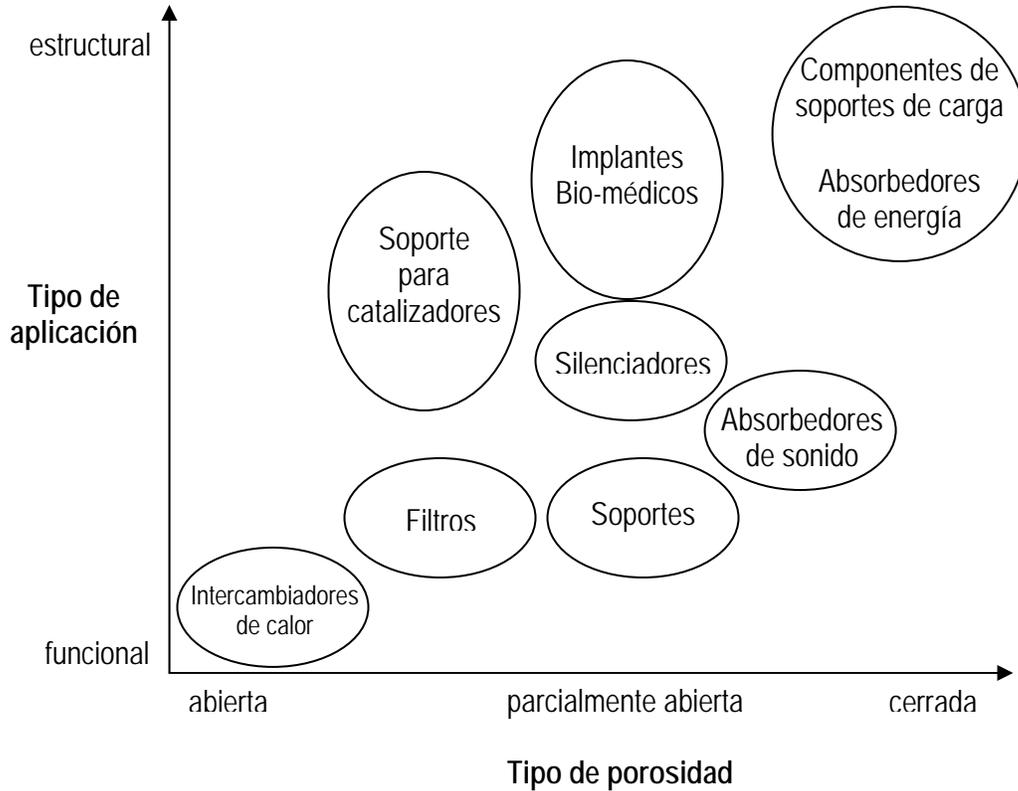


Fig. 4.5. Agrupación de los metales celulares de acuerdo al grado de apertura necesaria y si la aplicación es funcional o estructural.

Finalmente, el procesamiento y los costos deben de ser también considerados. La tecnología debe ser viable para la producción del material metálico celular seleccionado, es decir que al momento de producirse éste se pueda incorporar a un proceso preferiblemente continuo y eficiente. La tecnología para la elaboración del metal celular será inútil si el componente requerido no puede ser elaborado con un precio razonable [1,9].

4.2.2. Aplicaciones Estructurales de Espumas Metálicas

4.2.2.1. Material Estructural

Las espumas de aluminio combinan exclusivamente una relativa alta rigidez con baja densidad comparándolas con el material del que

proviene. Es importante hacer notar que si sólo se considera su rigidez, éstas tendrán un mal desempeño si se comparan con la rigidez del mismo peso del material sólido del que provienen. La ventaja que tienen las espumas sobre su material sólido precursor se vuelve aparente cuando los esfuerzos de flexión se consideran en función del peso. La distribución de masa de las estructuras celulares se incrementa en conjunto en el momento de inactividad del material, dándoles mucha más rigidez y resistencia que al mismo peso del material sólido del que provienen. Lo anterior hace que las espumas sean útiles como componentes altamente resistentes, ligeros y apoyos de carga en automóviles y en aplicaciones aeroespaciales. Actualmente, la industria automotriz y la industria aeroespacial utilizan láminas de acero rellenas de espuma de aluminio (Fig. 4.6.a); la primera en la construcción de vehículos y la segunda en sustitución de las costosas estructuras de paneles, teniendo en ambas aplicaciones muy buenos resultados. Comparándolas con su material sólido precursor, las láminas de acero rellenas de espuma y núcleo de aluminio (Fig. 4.6.b) han mostrado ser ligeras y ofrecen un aumento notable en cuanto a rigidez estructural [1,8, 10].

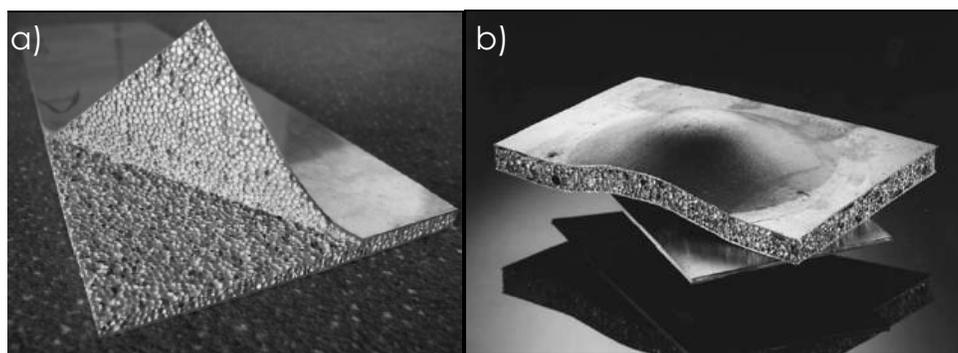


Fig. 4.6. a) Láminas de acero rellenas de espuma de Aluminio y b) Láminas de acero rellenas de espuma y núcleo de Aluminio.

4.2.2.2. Absorbedor de Energía por Impactos

Una de los campos de aplicación más grandes que tienen las espumas metálicas se centra en la absorción de energía por impactos. En la compresión, las espumas muestran solamente una pequeña deformación elástica antes de que empiecen a colapsar plásticamente. En la mayoría de la espumas, este colapso involucra una gran deformación plástica de las paredes de las celdas en una zona localizada de celdas afectadas, la cual se propaga gradual y lentamente a través del material. El movimiento de dislocación en el metal significa que una gran cantidad de energía puede ser absorbida sin provocar esfuerzos críticos. Debido a la estructura isotrópica de las espumas y a su deformación uniforme, éstas tienen un buen desempeño en este ramo al ser comprimidas en cualquier dirección. Se aplican entonces como materiales ligeros, económicos y amortiguadores de impactos al frente de vehículos o trenes para proteger a los pasajeros en caso de colisiones; esta es un área en la que las espumas de aluminio están siendo usadas comercialmente bajo el nombre de “crashboxes” o bien cajas de impacto, como la ilustrada en la Figura 4.7 [8].

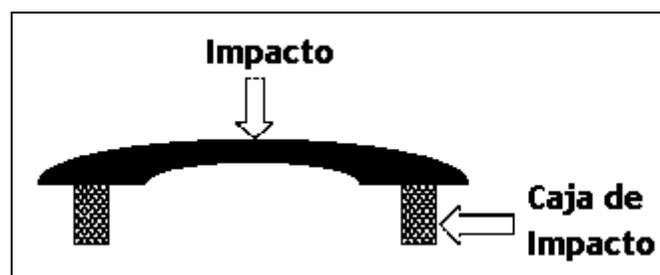


Fig. 4.7. Caja de Impacto.

4.2.3. Aplicaciones Funcionales para Metales Celulares

4.2.3.1. Intercambiadores de Calor y Enfriadores

La resistencia a la corrosión, combinada con la gran área superficial y la alta conductividad térmica de las paredes de las celdas de las espumas metálicas, las convierte en excelentes candidatas el uso como materiales de intercambio de calor, especialmente las de cobre y aluminio. Las espumas metálicas empleadas deben ser de célula abierta [8].

En este caso, el calor puede ser removido o transmitido a los gases o líquidos haciéndolos fluir a través de la espuma mientras ésta se calienta o se enfría a la vez. Gracias a la porosidad abierta de las espumas la caída de presión puede ser minimizada. Un ejemplo de tales aplicaciones son los disipadores de calor compactos para el enfriamiento de dispositivos electrónicos de alto poder de dispersión, tales como los microcircuitos de computadoras. Actualmente, los arreglos con disipadores de agujas son una solución estándar. Las espumas metálicas pueden tener un mejor desempeño si éstas son seleccionadas de tal forma que su conductividad térmica sea mantenida lo más alta posible y que su resistencia al flujo se mantenga lo más baja posible [1].

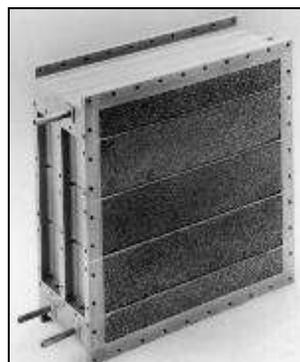


Fig. 4.8. Dispersor de Calor Compacto.

Otro campo de aplicación para materiales de célula abierta es en enfriamiento. La alta área superficial que poseen las espumas de célula abierta, su baja resistividad al flujo y su buena conductividad térmica son algunas de las características que las convierten en prometedoras candidatas para tales propósitos [1].

De manera contraria, las espumas de célula cerrada poseen una baja conductividad térmica intrínseca debido a su estructura celular, con la ventaja de tener alta resistencia al fuego comparada con su material sólido precursor como consecuencia de la formación de una extensa red de óxido [8].

4.2.3.2. Gran Área Superficial

Las esponjas metálicas tienen un área superficial muy grande, lo cual las hace apropiadas para ser utilizadas como intercambiadores de calor, soportes para catalizadores y electrodos [1].

4.2.3.3. Absorción Acústica

Las espumas metálicas también han sido utilizadas como materiales aislantes de sonido. Dentro de las estructuras porosas de las esponjas, el sonido es atenuado por las pérdidas de vibración y fricción como flujos de gas entre las celdas durante la propagación. El reflejo dentro de las celdas de la estructura de las esponjas ocasiona largos y tortuosos caminos en donde es posible la completa absorción [8].

Las propiedades acústicas de las espumas metálicas las hacen aptas en lugares donde la absorción de sonido es fundamental, un ejemplo de ello

son los estudios de grabación. La Figura 4.9 muestra un ejemplo de los discos de espumas de aluminio que se utilizan en la absorción de sonido.

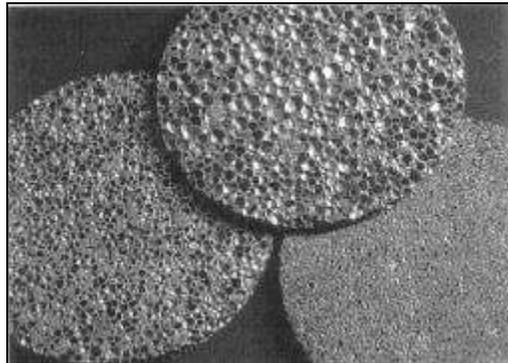


Fig. 4.9. Discos de espumas de Aluminio para absorción de Sonido.

4.2.3.4. Resistencia a la Corrosión y Ataques Químicos

Es bien sabido que el aluminio tiene una buena resistencia a la corrosión y a varias formas de ataque químico. Es por ello, que las esponjas de aluminio con pequeños tamaños de poros pueden ser usadas como materiales de relleno resistentes a altas temperaturas [8].

4.2.4. Materiales celulares para arte y decoración

Desde que las espumas metálicas se dieron a conocer causaron un gran interés en los artistas y diseñadores. La Figura 4.10 muestra algunas de las aplicaciones de las espumas metálicas en este sector; el principal objeto de las aplicaciones artísticas y decorativas es el de crear algo visiblemente diferente comparado con aquello elaborado con materiales convencionales. Las espumas de aluminio han sido empleadas en la construcción de extravagantes muebles, relojes, lámparas, etc. Cuando las sillas o mesas son fabricadas con espumas de aluminio su desempeño mecánico es ciertamente superior, aunque en muchas otras aplicaciones las propiedades físicas y mecánicas son de menor importancia. Los costosos sistemas de altavoz han sido hechos de espumas de aluminio, en los cuales la espuma no sólo provee una alta

rigidez y amortiguamiento mecánico moderado, sino que también provee una imagen altamente tecnológica que resulta mucho más atractiva que con materiales convencionales [1].

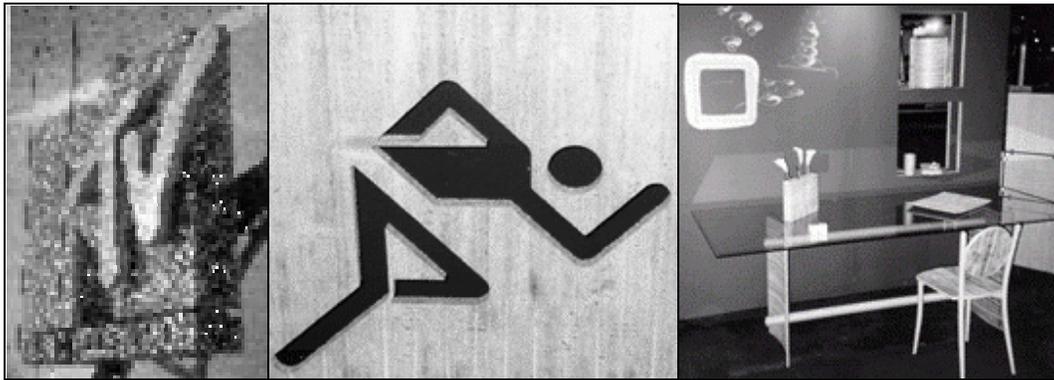


Fig. 4.10. Aplicaciones de las espumas de aluminio en arte y diseño.

4.3. Manejo Térmico e Intercambio de Calor de Metales Celulares

La conductividad térmica es la capacidad de los materiales para dejar pasar el calor a través de ellos. En otras palabras, la conductividad térmica es la capacidad de los elementos de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otros elementos cercanos.

Cuando se calienta la materia varía el comportamiento de su estado molecular, incrementándose su movimiento. Es decir, las moléculas salen de su estado de inercia o reposo y adquieren un movimiento cinético provocado por el aumento de temperatura. Si a un elemento o cuerpo se le incrementa la temperatura por cualquier medio, decimos que la materia se calienta, este calor se desplaza desde la zona más caliente hasta el punto más alejado del foco calórico, variando su temperatura en la distancia de desplazamiento del calor y en el tiempo que transcurre en recorrer desde el punto más caliente hasta el lugar más frío [5].

Las conductividades térmicas de las espumas metálicas son por lo menos en orden de magnitud mucho mayor que sus contrapartes no metálicas. Las conductividades térmicas de las espumas metálicas de célula cerrada son, sin embargo, menores que las conductividades térmicas del metal totalmente denso del que provienen, esto las hace ofrecer un alto grado de protección contra incendios. Las espumas metálicas de célula abierta pueden ser utilizadas para incrementar la transferencia de calor en aplicaciones como disipador compacto en dispositivos electrónicos.

Las características de transferencia de calor en espumas metálicas de célula abierta (esponjas metálicas) se resumen a continuación [11]. La Figura 4.11 ilustra una configuración prototipo de transferencia de calor. Las fuentes de calor están constituidas por delgados sustratos conductores ensamblados a una capa de esponja de espesor b y longitud L . El fluido es bombeado a una velocidad V_f a través de la espuma, entrando a una temperatura T_o y saliendo a una temperatura T_e . Una idealización de la estructura porosa es presentada adjunto (Fig. 4.11 b). Su densidad relativa se define como $\rho_r = \rho / \rho_s$, donde ρ y ρ_s son las densidades de la espuma y sólido precursor, respectivamente, y d es el diámetro del cuello de la celda. El coeficiente de transferencia local en la superficie de los cuellos es h .

En base a lo anterior se definen tres principios de diseño:

1. Se requieren cuellos (ligamentos) de alta conductividad para transferir el calor rápidamente al medio (la preferencia son metales como Al y Cu).
2. Se prefiere un fluido turbulento que facilite una alta transferencia de calor local de la superficie sólida al fluido.

3. Se requiere una caída de presión baja entre la entrada y salida del fluido de tal manera que éste pueda ser forzado a través del medio empleando un sistema de bombeo con requerimientos moderados de energía y que el fluido sea de baja viscosidad.

La transferencia de calor al fluido incrementa conforme el diámetro de ligamento d es menor y con el incremento de la densidad relativa ρ/ρ_s , puesto que el área superficial interna es inversamente proporcional a d y la sección transversal de conducción de calor incrementa con ρ/ρ_s . En respuesta a ello, se presenta un incremento en la caída de presión resultante para forzar al fluido a través de la espuma conforme aumenta la relación área superficial-volumen [11].

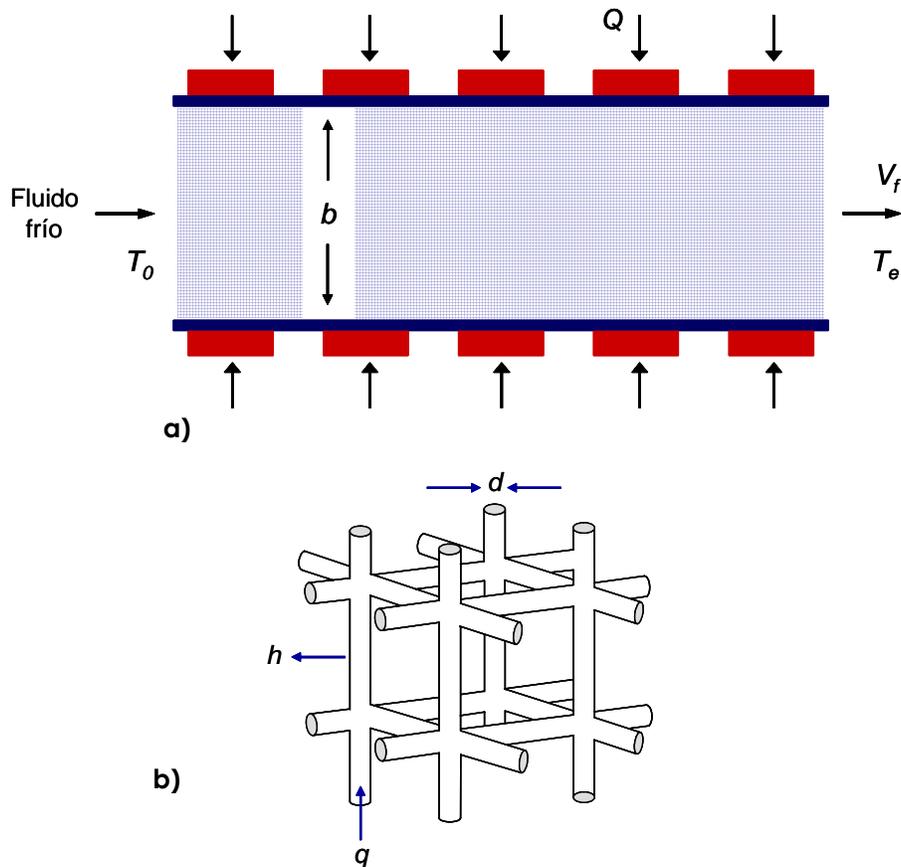


Fig. 4.11. a) Espuma de célula abierta empaquetada entre dos placas conductoras. La espuma con alta relación de área superficial-volumen transfiere calor al fluido. b) Esquema idealizado de una espuma de célula abierta.

4.3.1. Coeficiente de transferencia de calor

El metal celular está concebido como un sistema que transfiere calor de una superficie caliente al fluido. La respuesta térmica se caracteriza por un coeficiente de transferencia de calor efectivo, H_c , el cual se relaciona con el flujo de calor por unidad de área, q , de la manera estándar:

$$q = H_c \Delta T \quad (4.1)$$

donde ΔT es el gradiente de temperatura, aproximadamente igual a la diferencia de temperatura entre la superficie caliente y el fluido entrante. El objetivo es desarrollar un sistema celular con un valor grande de H_c , aceptable caída de presión y volumen pequeño (compacto). La determinación del coeficiente de calor H_c puede aproximarse de diferentes maneras. Una de ellas es considerar idealmente al metal celular como un arreglo geométrico de cilindros orientado en la normal del flujo de fluido; la aproximación comprende coeficientes de proporcionalidad que reflejan las diferencias geométricas entre la espuma y el cilindro. Dicho modelo ha sido validado experimentalmente y calibrados los coeficientes desconocidos. De esta manera, el coeficiente de transferencia de calor del metal celular se expresa:

$$H_c = \frac{2\rho_r}{d} k_{eff} \sqrt{Bi_{eff}} \tanh\left[\frac{2b}{d} \sqrt{Bi_{eff}}\right] \quad (4.2)$$

donde, $\rho_r \equiv \rho/\rho_s$, k_{eff} es la conductividad térmica efectiva relacionada a la conductividad térmica del constituyente metálico, k_s , por la expresión:

$$k_{eff} = 0.28 k_s \quad (4.3)$$

y b es el espesor del medio, como se indica en la Figura 4.11. El coeficiente fraccionado a 0.28 ha sido determinado por calibración experimental empleando imágenes de infrarrojo del medio celular. La transferencia de calor que ocurre de los ligamentos metálicos al fluido se

expresa a través de una cantidad no-dimensional referida como número de Biot:

$$Bi = \frac{h}{dk_s} \quad (4.4)$$

donde h es el coeficiente de calor local. El número de Biot está gobernado por la dinámica del flujo del fluido en el medio celular. Las soluciones establecidas para un banco de cilindros son:

$$Bi = 0.91P_r^{0.36} Re^{0.4} (k_a / k_s) \quad (Re \leq 40) \quad (4.5)$$

$$Bi = 0.62P_r^{0.36} Re^{0.5} (k_a / k_s) \quad (Re > 40)$$

donde Re , es el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V_f d}{\nu_a} \quad (4.6)$$

siendo V_f la velocidad libre del fluido, ν_a su viscosidad cinemática, k_a su conductividad térmica y P_r el número de Prandtl. Para el metal celular, Bi difiere de la ecuación 4.5 por un coeficiente de proporcionalidad (análogo al de conductividad térmica) resultando en un valor efectivo:

$$Bi_{eff} = 1.2Bi \quad (4.7)$$

donde el coeficiente 1.2 ha sido determinado de manera experimental.

Este conjunto de ecuaciones provee una completa caracterización del coeficiente de transferencia de calor. Para realizar cálculos es necesario introducir las propiedades de la espuma (d , ρ/ρ_s , k_s), su espesor b , y las propiedades del fluido (ν_a , k_a , P_r), así como su velocidad V_f . La limitante es que las constantes de proporcionalidad de las ecuaciones 4.3 y 4.7 han sido calibradas para un solo tipo de espumas de célula abierta consistente en el rango de materiales comerciales DUOCEL. Es de esperarse que espumas de célula abierta de diferente morfología presenten diferentes coeficientes. Aun si ρ/ρ_s y d son muy diferentes de los valores empleados en la calibración, se pueden presentar nuevos

dominios en la dinámica del fluido, resultando en desviación de las predicciones [11].

4.3.2. Flujo de calor

El calor, Q , transferido al fluido a través del medio celular por unidad de área transversal se relaciona con el coeficiente de transferencia de calor de la siguiente manera:

$$Q = LH_c \Delta T_{lm} \quad (4.8)$$

donde L es la longitud de la espuma, como se muestra en la Figura 4.11. En este caso ΔT_{lm} es la temperatura media logarítmica, la cual se relaciona con la temperatura de la fuente caliente T_1 y las temperaturas del fluido a la entrada, T_o , y salida T_e por la ecuación:

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_e - T_o}{\ln[(T_1 - T_o)/(T_1 - T_e)]} \quad (4.9)$$

Normalmente, T_1 y T_o son especificadas por la aplicación. De esta manera, T_e debe ser obtenida en orden de determinar Q . Para estimaciones preliminares, se emplea la aproximación:

$$\Delta T_{lm} \approx T_1 - T_o \quad (4.10)$$

Determinaciones más exactas requieren de mediciones experimentales o bien, la aplicación de expresiones que gobiernen el flujo de fluidos como las siguientes:

La temperatura en el fluido a lo largo de la dirección- x varía:

$$T_f = T_1 - (T_1 - T_o) \exp(-x/l) \quad (4.11)$$

donde l es la longitud de transferencia gobernada por las propiedades del metal celular, el fluido y el substrato. En la ausencia de resistencia térmica en las juntas, esta longitud se define:

$$l = \frac{\rho_a c_p b V_f}{2\eta k_{eff} \sqrt{Bi_{eff}}} \left[1 + \frac{\rho_r}{1.5\eta} \tanh \frac{2b}{d} \sqrt{Bi_{eff}} \right]^{-1} \quad (4.12)$$

donde c_P es el calor específico del fluido, ρ_a su densidad, y $\eta = 1 - 0.22(\rho/\rho_s)$. La temperatura de salida es determinada introduciendo el valor de l de la ecuación 4.12 en la ecuación 4.11, estableciendo $x = L$, mientras que $T_f \equiv T_e$.

La conducta esperada de flujo de calor, Q (W/m^2), disipado por el material celular puede anticiparse empleando las ecuaciones mostradas. Típicamente esto se hace usando parámetros no-dimensionales con aire como fluido. La característica principal es el incremento sustancial en la disipación de calor que puede lograrse disminuyendo el diámetro de cuello de las celdas, d , o bien incrementando la densidad relativa, ρ/ρ_s . Eventualmente se alcanza un límite que depende de la capacidad calorífica del fluido de enfriamiento [11].

4.3.3. Caída de Presión

Conforme incrementa el coeficiente de transferencia de calor, también aumenta la caída de presión a través del medio. Esto último constituye el factor limitante para ciertas aplicaciones, debido a la capacidad de bombeo de las facilidades que se disponga. La caída de presión ΔP presenta la forma general:

$$\Delta P / L = \xi(1/a) \left[v_a^m \rho_a / (1 - \alpha)^{2-m} \right] v_f^{2-m} d^{-m} \quad (4.13)$$

donde a es el tamaño de la celda

$$a = 1.24 d \sqrt{3\pi / \rho_r} \quad (4.14)$$

El exponente m y el coeficiente ξ han sido calibrados por mediciones experimentales para los materiales comerciales *DUOCEL*, dando los valores:

$$m = 0.4$$

$$\xi = 4$$

Las caídas de presión para diferentes condiciones pueden ser predichas con la ecuación 4.13, considerando que el exponente m y el coeficiente ξ pueden ser distintos [11].

4.4. Métodos para Caracterizar Materiales Celulares

Los materiales celulares pueden ser caracterizados de diferentes maneras para obtener sus propiedades mecánicas o físicas. En general, existen métodos destructivos y no destructivos para el estudio de los materiales de acuerdo a que si la esponja es deformada o transformada irreversiblemente, o permanece sin cambios o es afectada insignificamente durante la caracterización.

4.4.1. Difracción de Rayos-X

La difracción de rayos-x es una técnica consistente en hacer pasar un haz de rayos-x a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio. El haz incide en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y, por difracción, da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal, aplicando la ley de Bragg. Es una de las técnicas que goza de mayor prestigio entre la comunidad científica para dilucidar estructuras cristalinas, debido a su precisión y a la experiencia acumulada durante décadas, elementos que la hacen muy fiable [12].

4.4.2. Microscopia Electrónica de Barrido

El microscopio electrónico de barrido es un instrumento diseñado para estudiar, en alta resolución la superficie de los sólidos. El SEM (Scanning Electrón Microscope) crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto, explora la superficie de la imagen punto por punto. Su

funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión. A medida que el haz de electrones barre la muestra, se presenta toda la imagen de la misma en el monitor. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 200,000 veces o más. Este tipo de microscopio es muy útil porque produce imágenes tridimensionales de la superficie del objeto [13].

4.4.3. Microscopia Óptica

El tipo de microscopio más utilizado es el microscopio óptico, el cual usa luz visible para crear una imagen aumentada del objeto. El microscopio óptico más simple es la lente convexa doble con una distancia focal corta. Estas lentes pueden aumentar un objeto hasta 15 veces. Por lo general se utilizan microscopios compuestos, que disponen de varias lentes con las que se consiguen aumentos mayores. Algunos microscopios ópticos pueden aumentar un objeto por encima de las 2,000 veces.

La micrografía, consiste en fotografiar objetos a través de un microscopio, donde utiliza una cámara montada por encima del ocular del microscopio. La cámara suele carecer de objetivo, ya que el microscopio actúa como tal [14].

4.4.4. Densidad

La densidad de un material poroso puede ser determinada pesando el material poroso en estudio y determinando su volumen a partir de sus dimensiones geométricas. En este tipo de materiales no es posible determinar su volumen a partir del principio de Arquímedes debido a que

este principio no es aplicable en materiales porosos; dado el caso de que este principio quisiera ser aplicado se tendrían que rellenar los poros de la superficie de las esponjas con una resina y este ensayo dejaría de ser no destructivo para convertirse en ensayo destructivo [1].

4.4.5. Porosidad

La porosidad para un volumen determinado del material, se define a través del cociente entre el volumen de aire contenido en las cavidades del mismo y el volumen total considerado del material.

Otra forma de definirla, nos dice que la porosidad es el volumen de poros de la esponja, y nos indica la posibilidad de ésta de almacenar más o menos cantidad de fluido. Se expresa por el porcentaje de volumen de poros respecto al volumen total de la esponja (porosidad total). Además de esta porosidad total, se define como porosidad abierta la correspondiente a huecos interconectados, es decir, el volumen de huecos susceptibles de ser ocupados por fluidos. Este concepto de porosidad abierta está directamente relacionado con el de permeabilidad.

Existen diferentes tipos de porosidad los cuales se describen a continuación:

Absoluta: La porosidad absoluta es considerada como el volumen poroso del total de poros estén o no interconectados del material en estudio.

Efectiva: La porosidad efectiva se refiere al porcentaje de poros interconectados que permiten la circulación de fluidos. También se conoce como porosidad abierta.

No Efectiva: La porosidad no efectiva representa la diferencia entre la porosidad absoluta y la porosidad abierta; también es conocida como porosidad cerrada [15].

4.4.6. Tortuosidad

El parámetro tortuosidad, τ , está directamente relacionado con la forma de los poros y la variación de su sección recta a lo largo de su longitud, así como con la existencia de ramificaciones colaterales. Para el caso de materiales absorbentes acústicos, rígidos porosos, las teorías clásicas parten de asumir microestructuras uniformes de poros de forma cilíndrica alineados según la dirección de propagación de la onda sonora. En el caso real de geometrías de los poros extremadamente complejas, resulta imposible el cálculo de la tortuosidad a través de algoritmos matemáticos, por lo que se recurre a su determinación experimental.

La tortuosidad es la relación entre la distancia actual de flujo y el espesor geométrico compactado. La variación de la tortuosidad con respecto a la densidad del material ha sido estimada en diversos estudios. Un reciente análisis sugiere que

$$\tau = \frac{0.9}{(1-f)^{1.3}} \quad (4.15)$$

donde: τ es la tortuosidad y $1-f$ es la porosidad [16].

4.4.7. Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se dice que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

La permeabilidad es exclusivamente una propiedad de un medio poroso y el valor numérico particular obtenido es constante e independiente del tipo de fluido utilizado en su medición [17].

Cuando los poros de una espuma metálica están interconectados, un fluido como el aire y el agua pueden hacerse pasar a través del material. El calor puede ser intercambiado entre el fluido y la espuma metálica; es por ello que las espumas metálicas pueden proporcionar un alto desempeño como intercambiadores de calor en electrónica o en aplicaciones aeroespaciales.

En cierto tipo de aplicaciones uno de los parámetros importantes es la resistencia al flujo a través del material poroso. Mientras más baja sea la resistencia al paso del flujo menor es la energía que debe emplearse para hacer pasar el fluido por el medio poroso. Sin embargo, en algunos casos la alta resistencia al flujo trae consigo beneficios, tales como un aumento en la efectividad de la transferencia de calor entre el fluido y el sólido, en intercambiadores de calor compactos [18].

V. METODOLOGÍA

En esta sección se hace una descripción de los materiales y procedimientos utilizados en la fabricación de las esponjas metálicas de aluminio. También se describen los procedimientos empleados en la caracterización física y microestructural de las mismas. La Figura 5.1 muestra un diagrama del desarrollo experimental.

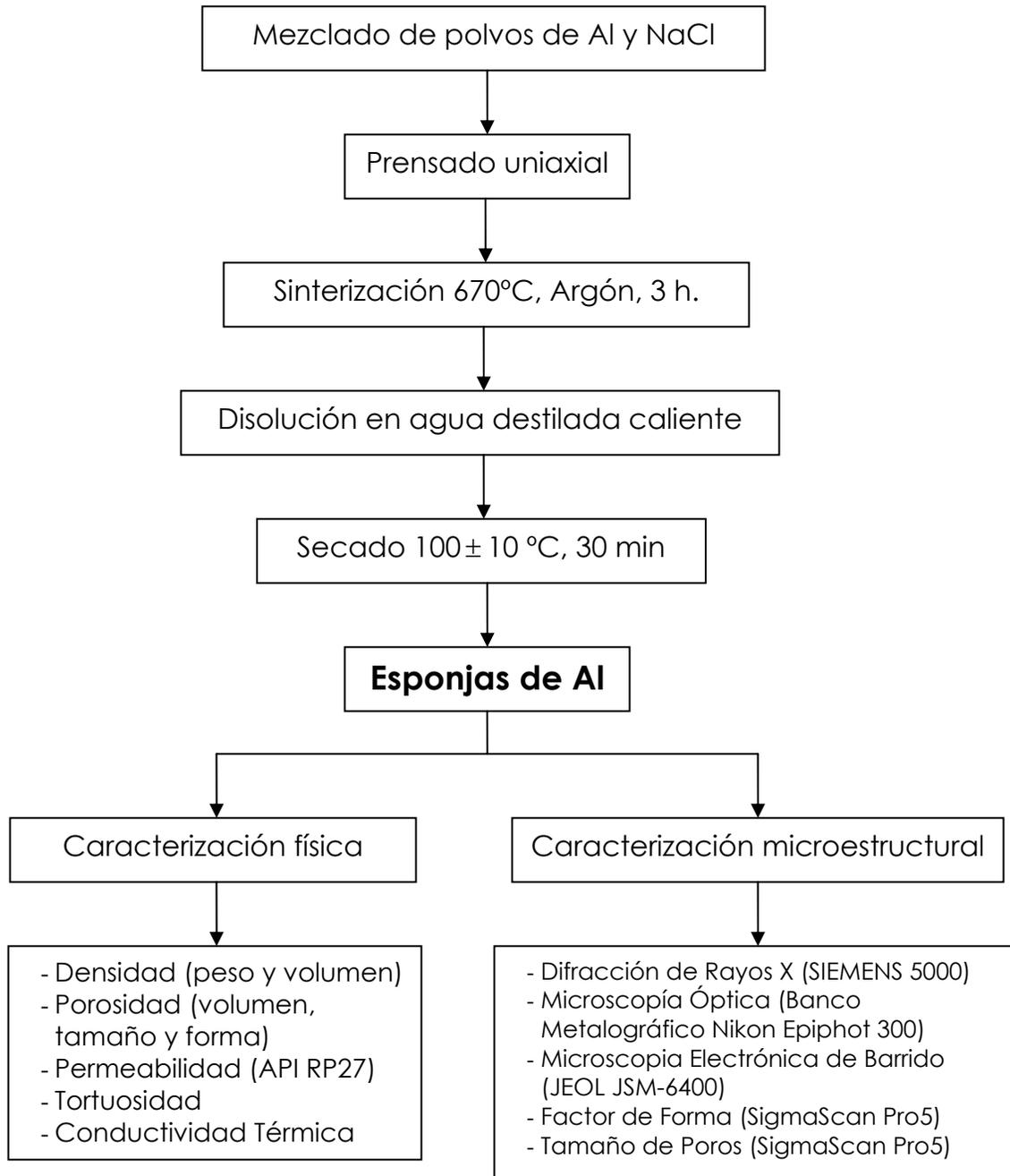


Fig. 5.1. Diagrama del desarrollo experimental.

Para la fabricación de las esponjas de aluminio con diferente contenido de sólidos se emplea una técnica convencional de metalurgia de polvos; el método ha sido propuesto recientemente en el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Liverpool, UK, y es denominado “Proceso de Sinterización y Disolución” (SDP, *Sintering and Dissolution Process*) [3,4].

5.1. Mezclado de polvos de Al y NaCl

Para la fabricación de las esponjas metálicas se emplearon polvos metálicos de aluminio (*Alfa Aesar*), que de acuerdo con las especificaciones del proveedor tienen un tamaño de partícula de 7-15 micrones y una pureza del 99.5%, así como tres diferentes tamaños de NaCl en su forma común de sal de mesa, la cual se pasó por mallas y separo en diferentes granulometrías: 250-419 μm , 420-589 μm y 590-1000 μm . Los polvos se mezclan homogéneamente en un molino de bolas en relaciones volumen de NaCl:Al de 65:35 y 70:30 para dar origen a seis esponjas metálicas con diferentes características morfológicas.

Tabla 5.1. Cantidades empleadas de NaCl y Al para la fabricación de las esponjas metálicas.

	NaCl:Al	
	65:35	70:30
g NaCl	8.82	9.50
g Al	5.92	5.07

5.2. Prensado Uniaxial

Con las seis mezclas resultantes se prepararon compactos cilíndricos de 3.81 cm (1.5 in) de diámetro y 5 mm (0.19 in) de espesor por compactación uniaxial en frío haciendo uso de una prensa hidráulica y dados cilíndricos de acero, como se muestra en la Figura 5.2. En la compactación de las diferentes mezclas se aplicó la carga necesaria

hasta lograr el espesor final deseado. En el proceso de compactación se buscó eliminar todos los huecos del compacto, fenómeno que se logra por la deformación plástica de los polvos metálicos acompañado de fractura parcial de los granos de sal.

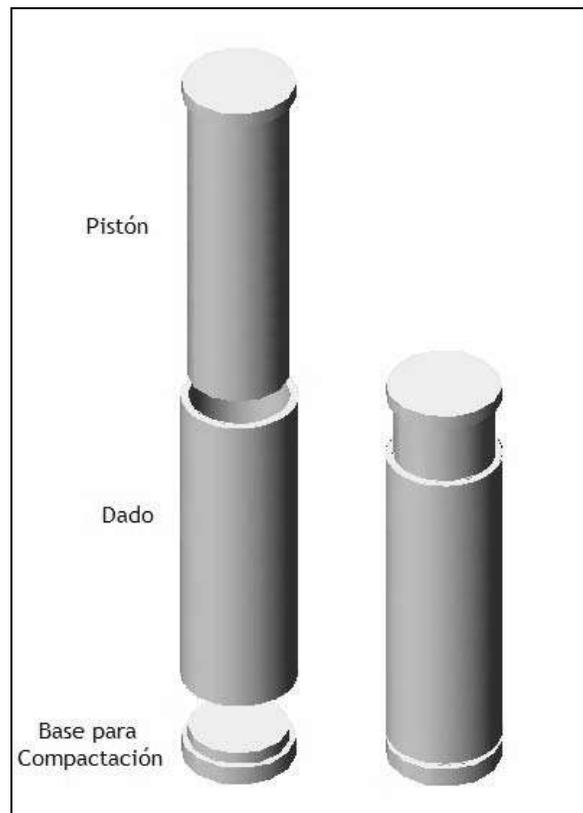


Fig. 5.2. Dado de acero utilizado en la compactación de las mezclas de polvos de NaCl:Al.

Es importante mencionar que se prepararon un mínimo de tres compactos de cada una de las seis diferentes mezclas para efectuar las distintas pruebas de caracterización.

A los compactos en verde obtenidos se les midió la densidad a partir de su peso y dimensiones geométricas, con el objeto de realizar cálculos posteriores de porcentaje de eliminación de sales una vez sinterizados.

5.3. Sinterización

Los compactos en verde se sometieron a un proceso de sinterización en un horno tubular horizontal Lindberg Blue M modelo STF55433C (Fig. 5.3). Los compactos fueron colocados dentro de un crisol de grafito para después ser introducidos a la zona caliente del horno. La etapa de sinterización se realizó a 670 °C, temperatura ligeramente superior al punto de fusión del aluminio por un periodo de 3 horas debido que menores tiempos de sinterización dan como resultado una mala unión entre las partículas de aluminio; por el contrario, a mayores tiempos de sinterización las uniones entre las partículas de aluminio pueden oxidarse [3,4].



Fig. 5.3. Horno tubular horizontal Lindberg Blue con atmósfera controlada.

El tiempo total del ciclo térmico de sinterización fue aproximadamente de 6 horas con 30 minutos, tomando en cuenta el tiempo que el horno tarda en llegar a la temperatura de sinterización deseada (30 min), el tiempo que el horno permanece a la temperatura de sinterización (3 h) y finalmente el tiempo aproximado que se requiere para que el horno

enfríe hasta 100 °C (3 h), como se muestra en la Figura 5.4. Durante el proceso de sinterización se utilizó un flujo continuo de argón para evitar la oxidación del producto. A los sinterizados se les midió la densidad a partir de su peso y dimensiones geométricas para comprobar posibles pérdidas de peso durante el proceso de sinterización.

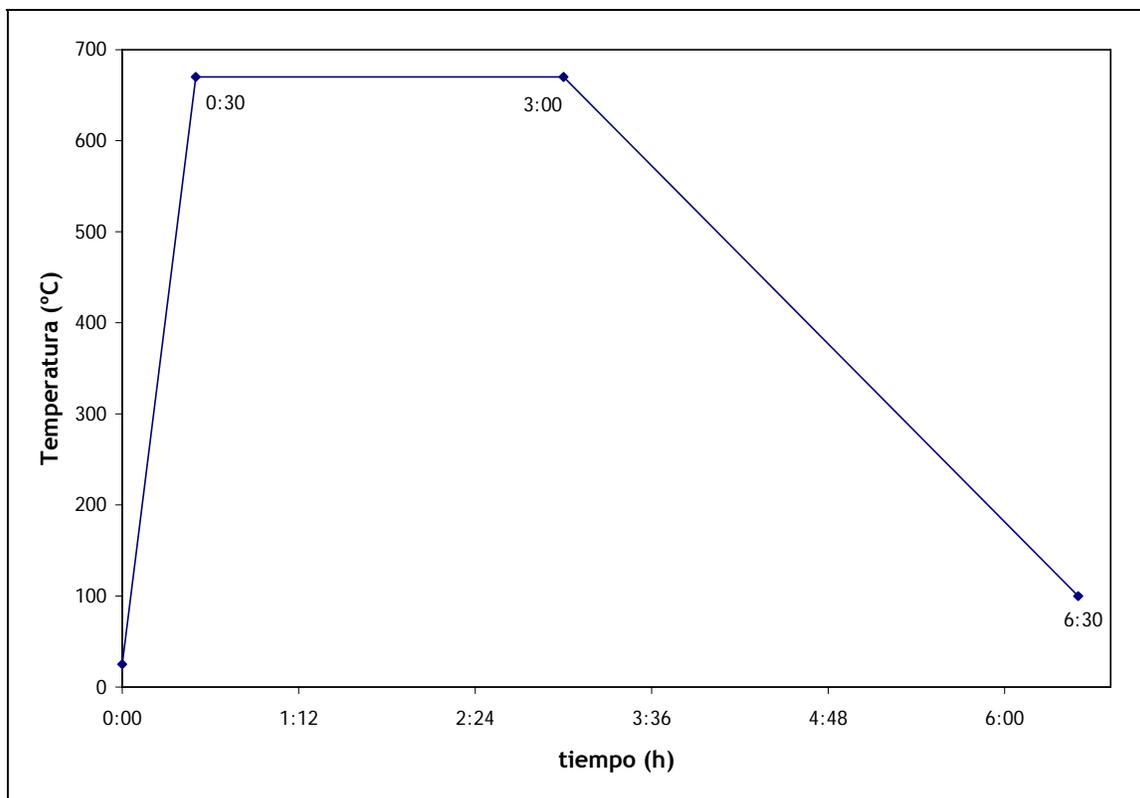


Fig. 5.4. Ciclo térmico de sinterización de las esponjas.

Aquí es importante señalar la modificación hecha a la técnica de Sinterización y Disolución propuesta por T. Fung, F. Hana, D. Sun y Y. Zhao [3,4]. Estos autores sinterizan los compactos NaCl/Al encapsulados en los dados de compactación de acero, los cuales son sellados en sus extremos con vidrio fundido, servido y solidificado para evitar la oxidación del Al al sinterizarse en atmósfera ambiental.

En la presente investigación, las esponjas fueron liberadas de los dados para ser sinterizadas en atmósfera de Argón y soportes de grafito, lo que confiere mayor flexibilidad a la técnica para sinterizar los componentes con cualquier dimensión y geometría.

5.4. Disolución

Los sinterizados se someten a un proceso de disolución en agua destilada caliente para remover la sal incluida y obtener las esponjas metálicas de estructura porosa abierta. La Figura 5.5.a ilustra en que consistió el proceso de disolución; en esta etapa se hace uso de una parrilla eléctrica para calentar el agua destilada contenida en un vaso de precipitados dentro del cual se coloca el sinterizado con el objeto de removerle la sal contenida. Durante este proceso se cambia varias veces el agua para evitar su saturación con sal. Esta parte del proceso requiere de varias horas las cuales varían dependiendo del tamaño de grano de la sal contenida en los sinterizados, pues entre más pequeño es el tamaño de grano de la sal más difícil es su remoción. También se utiliza una tina de ultrasonido BRANSON 2510 (Fig. 5.5.b) para ayudar a la eliminación de la sal en los sinterizados.

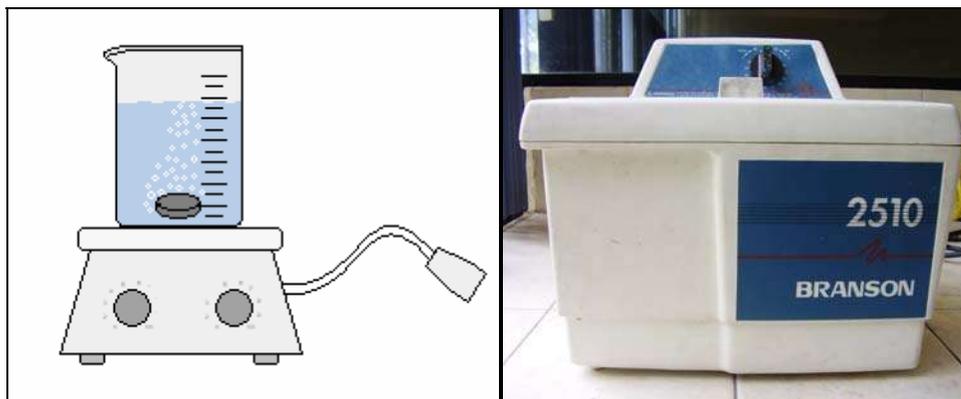


Fig. 5.5. Técnicas empleadas en la eliminación de sal contenida en los sinterizados: (a) disolución en agua destilada caliente y (b) ultrasonido BRANSON modelo 2510.

5.5. Secado

Después de la disolución los sinterizados se secan en una mufla Barnstead Thermolyne 1300 (Fig. 5.6) a temperatura de 100 ± 10 °C por 30 minutos aproximadamente. Una vez seco el sinterizado es pesado para saber si la sal incluida en éste ha sido removida totalmente, en el caso de no haberlo logrado el sinterizado se vuelve a someter al proceso de disolución y secado. Las esponjas metálicas obtenidas por el proceso de sinterización y disolución contienen menos del 5% en volumen de sal de mesa.

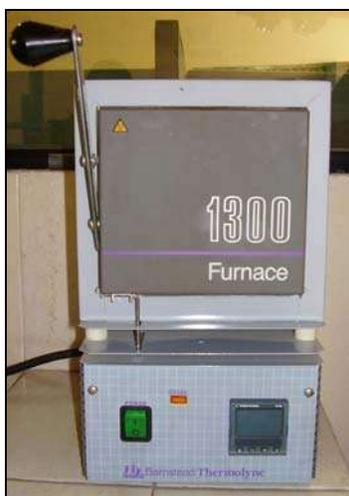


Fig. 5.6. Mufla Barnstead Thermolyne modelo 1300.

5.6. Caracterización Microestructural de los polvos y esponjas de Aluminio

5.6.1. Difracción de Rayos-X

La difracción de rayos-x fue utilizada con el objeto de analizar la pureza de los materiales empleados en la fabricación de las esponjas metálicas; con esta técnica también se analizaron las esponjas metálicas con la finalidad de conocer si durante el proceso de fabricación se formaron fases ajenas al aluminio metálico. El difractómetro utilizado fue un SIEMENS 5000 en un rango de barrido de 20 a 100 grados.

5.6.2. Microscopía Electrónica de Barrido

Los polvos precursores de las esponjas metálicas fueron observados en un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6400). Se estudió su morfología y distribución de tamaño de partícula. Se obtuvieron también imágenes por electrones secundarios de las seis diferentes esponjas de aluminio fabricadas para observar las características morfológicas de los cuellos formados y en su caso analizar si existe microporosidad formada en los mismos.

5.6.3. Microscopía Óptica y Análisis de Imágenes

Se realizó un estudio de microscopía óptica empleando un banco metalográfico Nikon Epiphot 300 para determinar características de las celdas porosas tales como tamaño, distribución y forma de los poros. El estudio fue cuantitativamente complementado por análisis de imágenes empleando el Analizador SigmaScan Pro5 [19]. Para tal efecto, las esponjas se sometieron a una preparación previa, la cual consistió en tres pasos: montaje, desbastado y pulido, descritos a continuación.

Primeramente, los poros de secciones de esponjas fracturadas fueron llenados con resina líquida marca *Cristafix*. El endurecimiento de la resina sintética se efectuó a temperatura y presión atmosférica. Se evitó infiltrar cortes de esponja realizadas con disco de diamante para no alterar la forma original de los poros formados.

El desbaste se efectuó sobre papel abrasivo de carburo de silicio de diferentes grados 200, 220, 400, 600, 1000 y 1200, respectivamente. Al pasar de un abrasivo a otro, debe girarse la probeta 90° y desbastar hasta que se borren por completo las huellas del abrasivo anterior,

teniendo el cuidado de lavar la probeta con agua abundante y no eliminar por completo el volumen de esponja infiltrada con resina.

El pulido tuvo por objeto disminuir la presencia de rayado de la operación del desbaste. La forma en que se realizó el pulido fue, apoyando la cara desbastada de la probeta sobre un paño rociado con una suspensión de abrasivo y fijado a un disco que gira accionado por un motor. Como abrasivo se utilizó una suspensión de polvo de diamante en aceite mineral. Se aplicó una presión moderada sobre la probeta y durante la operación del pulido la probeta se desplazó en la dirección del radio, desde el borde hasta el centro del disco. La probeta se lavó con agua y se secó con aire caliente.

Una vez que se tuvieron listas las seis diferentes muestras, éstas fueron examinadas con el banco metalográfico. Se tomaron un total de 30 campos por muestra en cortes transversales de las mismas, lo que significó el análisis de 328 a 780 poros de acuerdo a la esponja resultante (Tabla 5.2). Con la ayuda del analizador de imágenes SigmaScan Pro5 se cuantificó el volumen de poros y determinó el diámetro de Feret y el factor de forma de los mismos.

Tabla.5.2. Número de poros por esponja analizados con el software SigmaScan Pro5.

NaCl:Al	Tamaño de Sal Precursor (μm)	No. Poros
65:35	250-419	780
	420-589	756
	590-1000	578
70:30	250-419	741
	420-589	553
	590-1000	328

5.6.3.1. Porosidad

La porosidad de las esponjas se cuantificó por el cociente del área total de poros ocupados entre el área del campo ocupado por cada micrografía analizada. Se realizó un análisis estadístico de todas las imágenes estudiadas reportando la variación estándar de la propiedad evaluada. Por el número de campos analizados por muestra, se consideró aproximadamente del 0.5 al 1% del área total del corte transversal de la esponja seccionada diametralmente a través de su centro.

5.6.3.2. Tamaño de Poros

El análisis de imágenes provee resultados del tamaño de los poros en las esponjas en términos del diámetro de Feret. Esta medición proporciona el diámetro de un objeto circular ficticio que tiene la misma área que el objeto en estudio (Fig.5.7), en este caso los poros de las esponjas.

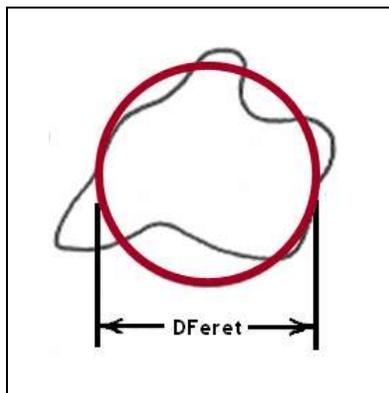


Fig.5.7. Representación descriptiva del diámetro de Feret.

5.6.3.3. Forma de los Poros

Con el uso del software SigmaScan Pro5 [19] se obtuvieron valores, en términos del factor de forma de un objeto, que nos describen la forma de los poros de las esponjas. El factor de forma mide la “redondez” del poro; un círculo perfecto tiene un factor de forma de 1.00 y una línea tiene un

factor de forma aproximadamente de 0.00. El factor de forma se define matemáticamente como:

$$S = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (5.1)$$

donde: S es el factor de forma del objeto, A el área del objeto (μm^2) y P el perímetro del objeto (μm).

5.7. Caracterización Física de las esponjas de Aluminio

La caracterización física consistió en la medición de densidad y porosidad del bulto, tortuosidad, permeabilidad y conductividad térmica de las esponjas metálicas fabricadas.

5.7.1. Densidad

La densidad se midió en varias etapas de la fabricación de las esponjas metálicas; una de ellas fue después de la compactación de la mezcla de los polvos de aluminio y sal de mesa, y otra después de la sinterización de los compactos con el objeto de determinar cambios durante la sinterización. La densidad se midió a partir del peso y dimensiones geométricas de los compactos y sinterizados con la ecuación 5.2.

$$\rho = \frac{w}{V} \quad (5.2)$$

donde : ρ es la densidad de la esponja metálica (g/cm^3), w es el peso de la esponja metálica (g) y V es el volumen de la esponja metálica. La densidad del producto final fue determinada por el mismo procedimiento.

5.7.2. Porosidad

La porosidad de las esponjas metálicas fabricadas se determinó a partir de la ecuación 5.3, en términos de por ciento de porosidad.

$$\% \text{ porosidad} = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \quad (5.3)$$

Primeramente se determinó la densidad relativa de las esponjas metálicas fabricadas con la ecuación 5.4,

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (5.4)$$

donde: ρ_r es la densidad relativa y ρ_s es la densidad del aluminio puro ($\approx 2.7 \text{ g/cm}^3$).

Este valor de porosidad medido directamente en el bulto del material provee una buena aproximación de la porosidad total del material, a diferencia del valor obtenido por el análisis de imágenes que considera una porción representativa de la muestra.

Una vez obtenida la porosidad de las esponjas, también fue posible el cálculo de su porcentaje de sólidos con la ecuación 5.5.

$$\% \text{ sólidos} = 100 - \% \text{ porosidad} \quad (5.5)$$

5.7.3. Tortuosidad

De acuerdo al modelo reportado por German [16] se efectuaron los cálculos para obtener los valores correspondientes a la tortuosidad de las espumas de aluminio elaboradas con la ecuación 5.6.

$$\tau = \frac{0.9}{(1-f)^{1.3}} \quad (5.6)$$

donde: τ es la tortuosidad y $1-f$ es la porosidad.

5.7.4. Permeabilidad

La permeabilidad de las esponjas metálicas fue obtenida mediante el montaje de un arreglo experimental de acuerdo con el estándar *API RP27: "Prácticas Recomendadas para Determinar la Permeabilidad de un Medio Poroso"* [17], ilustrado en la Figura 5.8. Básicamente, se mide el flujo volumétrico a través del medio poroso para una altura (carga hidrostática) constante del fluido.

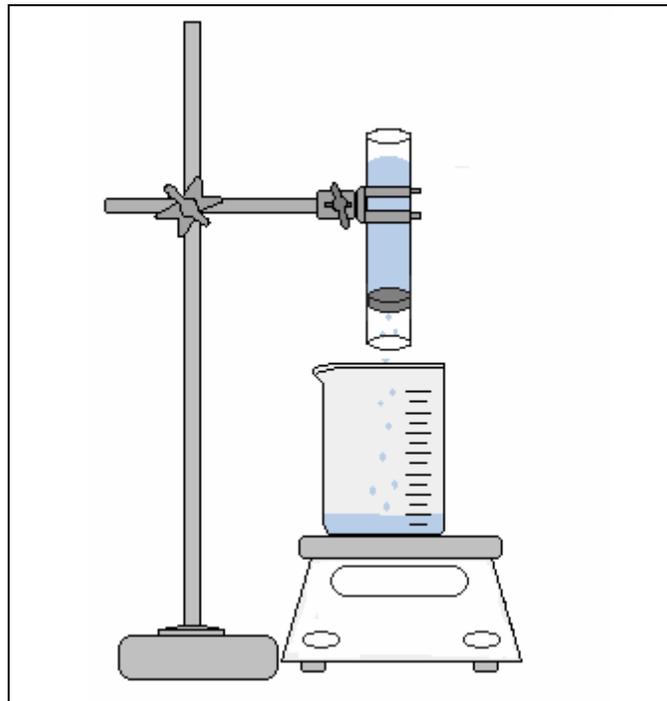


Fig. 5.8. Arreglo experimental empleado para obtener la permeabilidad de las esponjas metálicas fabricadas.

Las esponjas metálicas fueron colocadas en el interior de un tubo de acrílico y herméticamente selladas en su perímetro a la pared interna del tubo empleando silicón. Se empleó una carga hidrostática constante de agua destilada como fluido y se procedió a medir el volumen colectado en el fondo en función del tiempo. Cabe señalar, que se utilizó una balanza analítica con la que se pesaba el agua colectada en función

del tiempo con el objetivo de tener mediciones más precisas y después calcular el flujo volumétrico con la ecuación 5.7,

$$Q = \frac{F}{\rho_{H_2O}} \quad (5.7)$$

donde: Q es el flujo volumétrico (cm^3/s), F es el flujo másico (g/s) y ρ_{H_2O} ($\approx 0.9982 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Una vez obtenido el flujo volumétrico para las distintas esponjas metálicas y conocida el área para el paso del fluido, se calculó la velocidad de flujo por unidad de área v (cm/s) empleando la ecuación 5.9.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.8)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (5.9)$$

Con el valor de v se obtuvo el valor de permeabilidad para cada una de las distintas esponjas a partir de la ecuación 5.10, la cual es una derivación de la ley de Darcy para flujo laminar de fluidos a través de un medio permeable [20].

$$k = \frac{v\mu}{\rho g \left[\frac{h}{L} + 1 \right]} \quad (5.10)$$

donde: k es la permeabilidad intrínseca del medio (darcy), μ es la viscosidad del fluido (0.01005 poise), ρ es la densidad del fluido ($\approx 0.9982 \text{ g}/\text{cm}^3$), g es la aceleración de la gravedad ($\approx 981 \text{ cm}/\text{s}^2$), h es el espesor del medio poroso ($\approx 0.55 \text{ cm}$) y L es la altura del nivel del fluido (10 cm).

5.7.5. Conductividad Térmica

La conductividad térmica de las esponjas fabricadas se determinó mediante el montaje de un arreglo experimental basado en el principio comparativo de conductividad térmica por placas calientes midiendo tal propiedad entre dos placas de referencia de conductividad térmica conocida [21,22]. El dispositivo empleado se muestra en la imagen de la Figura 5.9.

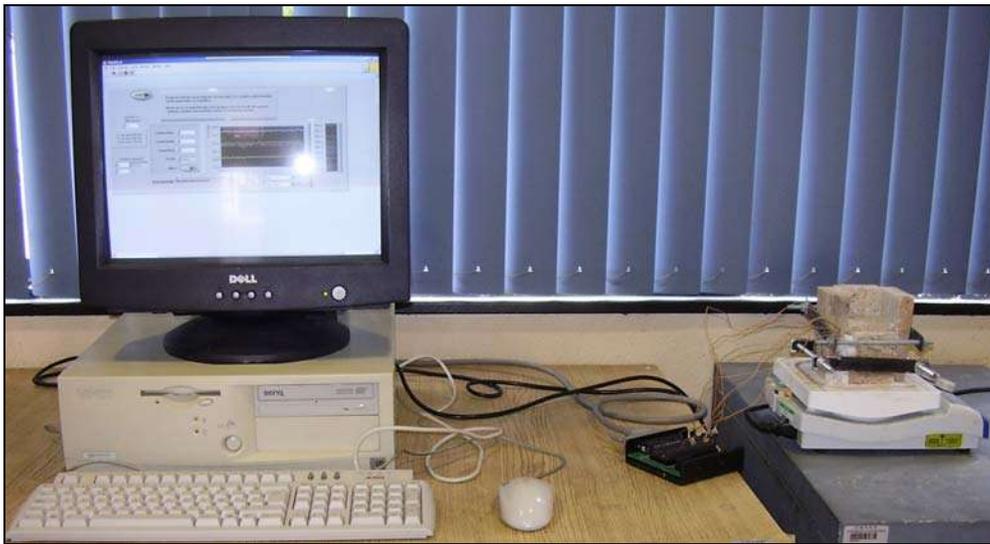


Fig. 5.9. Arreglo experimental empleado para obtener la conductividad térmica de las esponjas metálicas fabricadas.

El arreglo está conformado por una computadora de escritorio convencional, una tarjeta de adquisición de datos marca Plastronic Enclosures, un medio de presión, una parrilla eléctrica, un material de referencia superior, la muestra, un material de referencia inferior, seis termopares tipo K, pasta conductora de alta temperatura marca Omegatherm 201, ladrillo refractario y tierra diatomea.

La Figura 5.10 muestra la configuración interna del arreglo utilizado para obtener las conductividades térmicas de las esponjas de aluminio. Cabe señalar, que se emplea una presión de compresión entre los materiales

de referencia y la muestra para asegurar el contacto uniforme entre ellos. Dos secciones cilíndricas de cobre grado electrolítico (C-1100) con las mismas dimensiones ($D=3.81$ cm, $h=1$ cm) fueron utilizadas como materiales de referencia superior e inferior ($k=226$ W/mK). En tales cilindros se maquinaron un par de ranuras paralelas de longitud radial para insertar los termopares como se muestra en la Figura 5.11; las esponjas de aluminio fueron también maquinadas con las mismas ranuras. Los termopares se insertaron en las ranuras de los materiales y fueron adheridos a ellos con pasta conductora de alta temperatura. El arreglo de discos fue aislado en una cámara de ladrillos de sílice rellena en sus cavidades con tierra diatomea con el objeto de aislar térmicamente el sistema y disminuir al máximo las pérdidas de calor, asegurando así una transferencia de calor unidireccional.

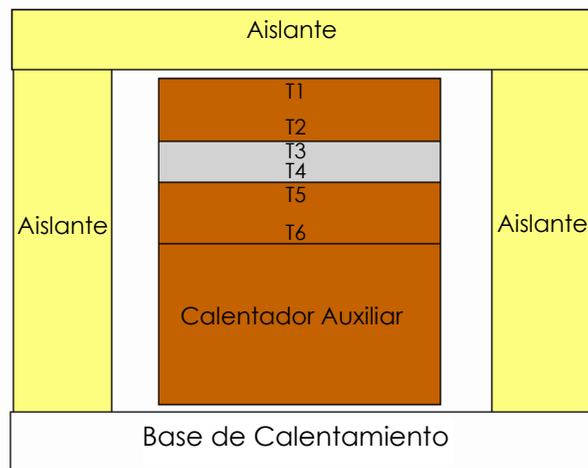


Fig. 5.10. Diagrama esquemático del arreglo experimental empleado para obtener la conductividad térmica de las esponjas a partir de los gradientes de temperatura.

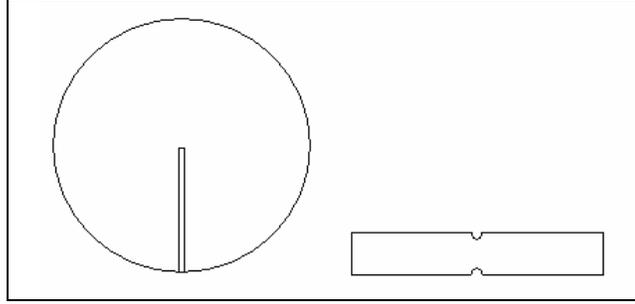


Fig. 5.11. Tipo de ranura hecha en los materiales de referencia y en las esponjas de aluminio.

Una vez que la tarjeta de adquisición de datos fue conectada a la computadora, se conectaron a su vez en la tarjeta los termopares. Un programa de adquisición de datos en LabView 7.1 permitió obtener las temperaturas en los diferentes puntos del arreglo. Las temperaturas fueron medidas durante todo el experimento a una velocidad de adquisición de datos aproximadamente a 21 lecturas por segundo. Una vez que la temperatura dentro del arreglo alcanza el equilibrio, se procedió a registrar los valores de temperatura para calcular la conductividad térmica mediante la ecuación 5.11. Cada experimento se realizó a cuatro diferentes temperaturas, 100, 200, 300 y 400 °C.

$$k_s = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x}{\Delta T} \right)_s \left[\left(k_r \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{Tr} + \left(k_r \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{Br} \right] \quad (5.11)$$

$$\Delta T_{Tr} = T_1 - T_2 \quad (5.12)$$

$$\Delta T_s = T_3 - T_4 \quad (5.13)$$

$$\Delta T_{Br} = T_5 - T_6 \quad (5.14)$$

donde los subíndices significan: S es la muestra, Tr es la referencia superior, Br es la referencia inferior. ΔT representa la diferencia de temperatura medida entre los termopares colocados en las ranuras radiales de los materiales separados a una distancia Δx y finalmente, k_s y k_r son las conductividades térmicas de la esponja de aluminio y el cobre, respectivamente en W/mK.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se reportan y discuten los resultados obtenidos en la caracterización física y microestructural de las esponjas metálicas fabricadas con el proceso de sinterización y disolución.

6.1. Morfología de los polvos precursores de las esponjas de Aluminio

La Figura 6.1 muestra imágenes por electrones secundarios de los polvos de aluminio y sal de sodio empleados. Las partículas de aluminio tienen forma globular, algunas de las cuales son alargadas en uno de sus ejes. En general, su superficie es tersa y no presenta vértices o aristas. De acuerdo a las especificaciones del proveedor, su tamaño de partícula oscila de 7-15 μm , sin embargo se observaron partículas por encima de las 20 μm y finos micrométricos. Como se observa en la Figura 6.1.b, la morfología de los granos de NaCl es irregular; debido a la estructura cúbica del cloruro de sodio, los granos muestran formas facetadas y angulares, presentado aglomeración de finos en los granos grandes. Como se señaló en la sección experimental, los granos de sal fueron tamizados y separados en tres rangos de tamaño de partícula en el orden de 250-419 μm , 420-589 μm y 590-1000 μm .

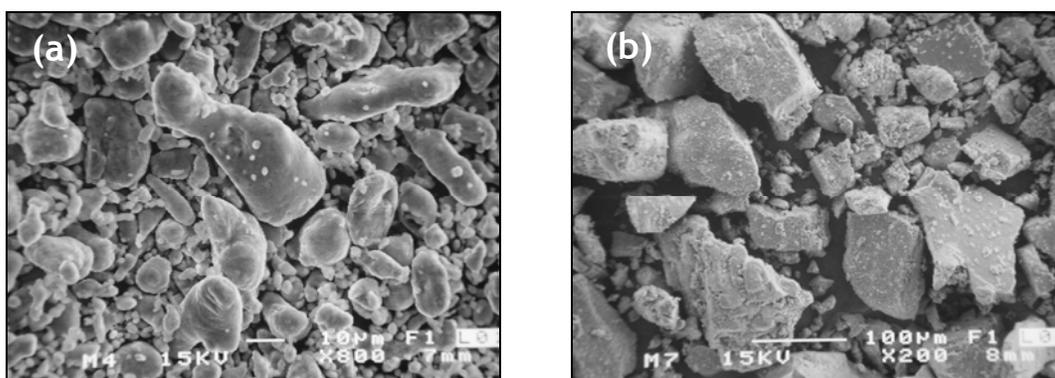


Fig. 6.1. Imágenes del MEB: Polvos precursores de las esponjas metálicas de aluminio (a) aluminio metálico y (b) sal de mesa.

6.2. Compactación de mezclas de polvos Al/NaCl

La compactación de las mezclas Al/NaCl preparadas presenta la dificultad de aplicar carga sobre combinaciones disímiles en estructura. Por un lado, los polvos de aluminio tienen un carácter maleable bajo carga debido a su capacidad de deformación plástica. Por el contrario, los granos de NaCl son de naturaleza frágil y pueden colapsar bajo carga. Debido a ello, al preparar los compactos con dimensiones uniformes de 3.81 cm de diámetro y aproximadamente 0.55 cm de espesor, la carga necesaria para la compactación de las diferentes mezclas resultó no ser la misma en todos los casos. La Tabla 6.1 resume los valores de carga aplicada y su consecuente presión ejercida durante la etapa de compactación.

Es claro que el rango de presión ejercida resultó menor para aquellas mezclas con contenido de 35% de aluminio (69-86 MPa). Al haber mayor cantidad de partículas metálicas, éstas absorben energía deformándose plásticamente, lo que implica el desplazamiento de fase metálica en el compacto formado a través de los huecos, con la consecuente disminución de porosidad. La razón por la cual los compactos se llevaron a espesores de 0.55 cm fue para eliminar el total de porosidad en los mismos, lo cual fue así diseñado en base al volumen ocupado por el aluminio y sal de NaCl. De esta manera, se asegura que la porosidad final una vez producidas las esponjas corresponderá únicamente al volumen ocupado por la sal y no por porosidad inicial del proceso de compactación. Al incrementar el contenido de sal de 65 a 70% en volumen aumenta la fase rígida, y aún cuando seguramente es parcialmente triturado el grano de sal, se requiere de mayor energía para reducir el espesor del compacto a 0.55 cm comparado con el caso cuando se tiene mayor contenido de aluminio, el cual como ya se

mencionó se deforma plásticamente a menores cargas aplicadas. Sin embargo, para ambas relaciones Al/NaCl fue evidente la aplicación de menor carga para el tamaño de sal más fino, lo cual indica que tal rango de tamaños favorece el acomodo compacto de la mezcla de polvos.

Tabla 6.1. Cargas y presiones aplicadas en la compactación de las mezclas de los polvos precursores de las esponjas metálicas.

Tamaño de sal precursor (μm)	Carga Aplicada (Ton)		Presión (MPa)	
	65:35	70:30	65:35	70:30
250-419	8	15	69	129
420-589	10	18	86	155
590-1000	10	18	86	155

Es importante señalar, que cuando se aplicaron cargas de compactación menores a las tabuladas en la Tabla 6.1, el resultado fue el colapsamiento de los compactos perdiendo peso y forma (Fig. 6.2.a). Por el contrario, cuando se aplican cargas mayores a las tabuladas, los compactos presentaron delaminación en su superficie o fractura parcial o total aún cuando las porciones libres de defectos mostraban buena cohesión entre partículas (Fig. 6.2.b).

Los compactos producidos en el rango de presiones mostrados en la Tabla 6.1 presentan buena conformación manteniendo perfecta geometría al ser expulsados del dado de acero de compactación, es decir, conservan la forma cilíndrica de origen tal y como se muestra en la Figura 6.2.c. Al estar libres de defectos o fractura, fue posible su sinterización sin estar encapsulados, tal y como originalmente es propuesto en el método de Disolución y Sinterización por T. Fung, F. Hana, D. Sun y Y. Zhao [3,4].

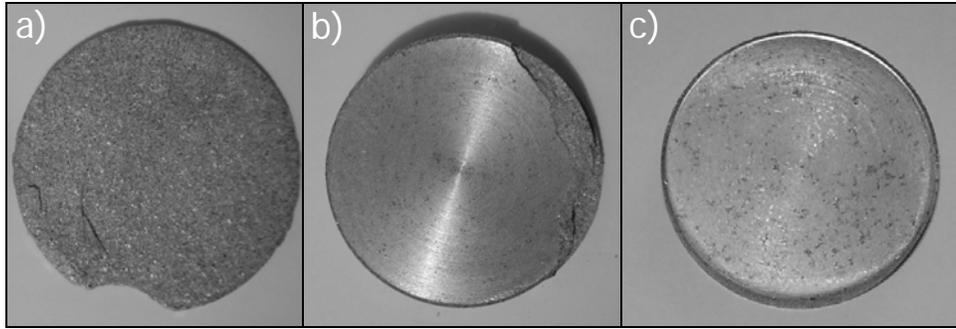


Fig. 6.2. Compactos obtenidos a presiones de compactación: (a) inferiores a la óptima presión, (b) superiores a la óptima presión y (c) a la óptima presión.

6.3. Sinterización de compactos

Se encontró que la temperatura óptima de sinterización es $670\text{ }^{\circ}\text{C}$ por espacio de 3 horas. Cuando los compactos fueron sinterizados a temperatura inferior a $670\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero guardando la temperatura mayor al punto de fusión del aluminio ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$), las esponjas metálicas resultantes eran frágiles debido a una débil unión entre los cuellos metálicos. La sinterización en estado sólido de un compacto poroso monolítico habitualmente se lleva a cabo a temperaturas de 60-70% su temperatura de fusión. En casos donde existe adición de aleantes, es posible la formación de segundas fases que disminuyen la temperatura de sinterización por aparición de líquido. En el presente caso, los granos de sal se mantienen térmicamente inertes a la temperatura de sinterización propuesta, no así el aluminio que se consolida a partir del contacto entre partículas como resultado de un proceso de difusión de masa térmicamente activo. Al sinterizar los compactos a $670\text{ }^{\circ}\text{C}$, se indujo la aparición localizada de pequeñas cantidades de líquido que ayudaron a la formación de los ligamentos metálicos que dan origen al material celular. Sin embargo, cuando la temperatura de sinterización se estableció por arriba de $670\text{ }^{\circ}\text{C}$, parte del aluminio líquido formado fluía fácilmente a la superficie de los compactos por acción capilar formando pequeñas esferas metálicas en la superficie a pesar del buen grado de

unión. El tamaño de las microesferas de aluminio formadas incrementó conforme aumentaba la temperatura de sinterización; las pérdidas de aluminio por goteo capilar resultan en esponjas metálicas no homogéneas pues se modifica la relación NaCl:Al preestablecida en el compacto, además de modificar la geometría del mismo y perder la capacidad de controlar el tamaño de los poros formados.

En conclusión, se encontró que 670 °C es la mejor temperatura para llevar a cabo la sinterización de los compactos de aluminio puro con el propósito de sinterizar esponjas metálicas de buena calidad; a esta temperatura el aluminio reblandecido y localmente líquido presenta la fluidez necesaria para formar ligamentos alrededor de las partículas de cloruro de sodio sin emerger del compacto por fenómenos capilares.

La Figura 6.3 presenta una imagen de las esponjas producidas una vez removida la sal incluida por disolución en agua caliente bajo ultrasonido. Se observa que las esponjas mantienen una forma cilíndrica perfecta. No hubo malformaciones o desprendimientos en sus perfiles y su aspecto es metálico opaco. A simple vista son homogéneas y continuas sin formación de grietas o colapso.

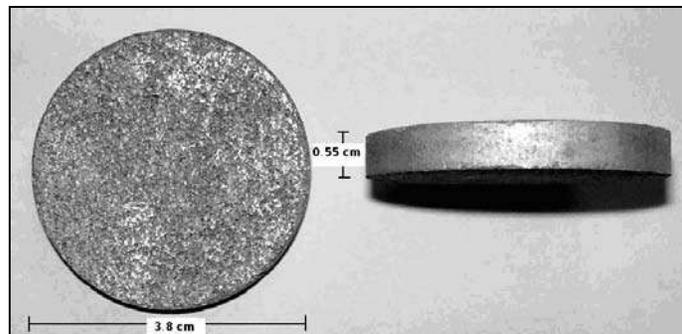


Fig. 6.3. Aspecto de las esponjas metálicas producidas.

6.4. Difracción de Rayos-X

Tanto los polvos de aluminio como las esponjas formadas fueron analizados por difracción de rayos-x con el objeto de conocer si persiste el carácter metálico o se presentan cambios estructurales por oxidación durante el procesamiento.

Los perfiles obtenidos son mostrados en las Figuras 6.4 y 6.5, los cuales indican que la atmósfera protectora de argón mantiene libre de óxido la superficie de las esponjas. Esto es importante, pues en caso de haber oxidación de los polvos metálicos precursores, el fenómeno de sinterización tendría que efectuarse a mayor temperatura, o bien adicionando un segundo elemento más activo como puede ser magnesio o titanio para reducir el fenómeno de oxidación del aluminio [23]. Como se muestra en la Figura 6.5, las reflexiones del aluminio metálico se conservan en las esponjas, sin embargo la intensidad de los picos es menor respecto de los polvos (Ver Fig. 6.4), fenómeno que se atribuye a un menor volumen de sólidos expuesto al haz incidente de rayos-x debido a la elevada porosidad de las esponjas. El aluminio tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (fcc) y sus planos principales de reflexión, en orden de intensidad, son (111), (200), (220), (311) y (222), información obtenida de la tarjeta JCPS #85-1327 reportada en la literatura [24].

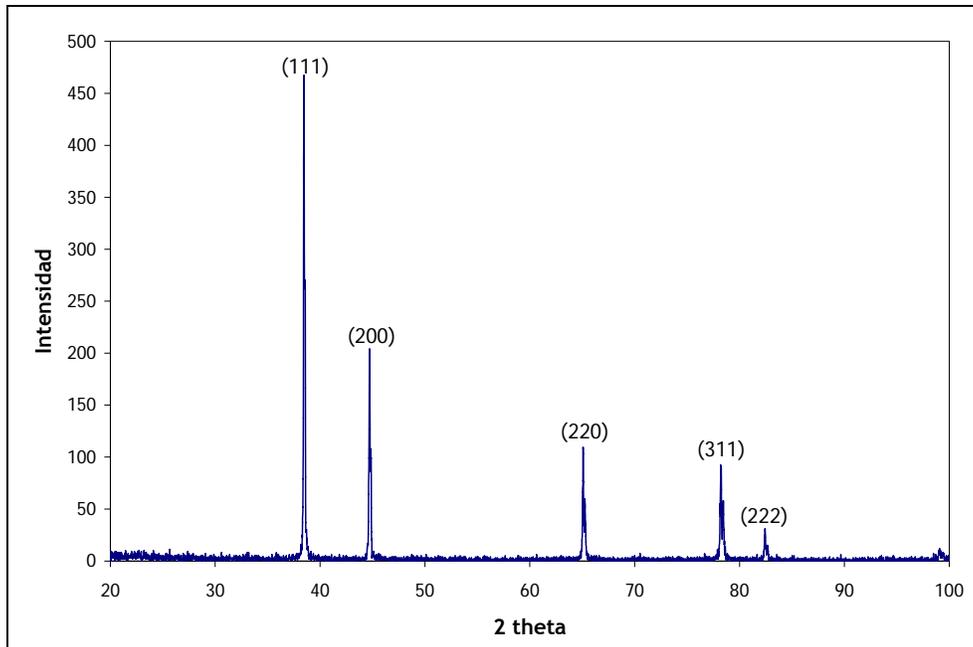


Fig. 6.4. Difractograma de rayos-x de los polvos precursores de aluminio.

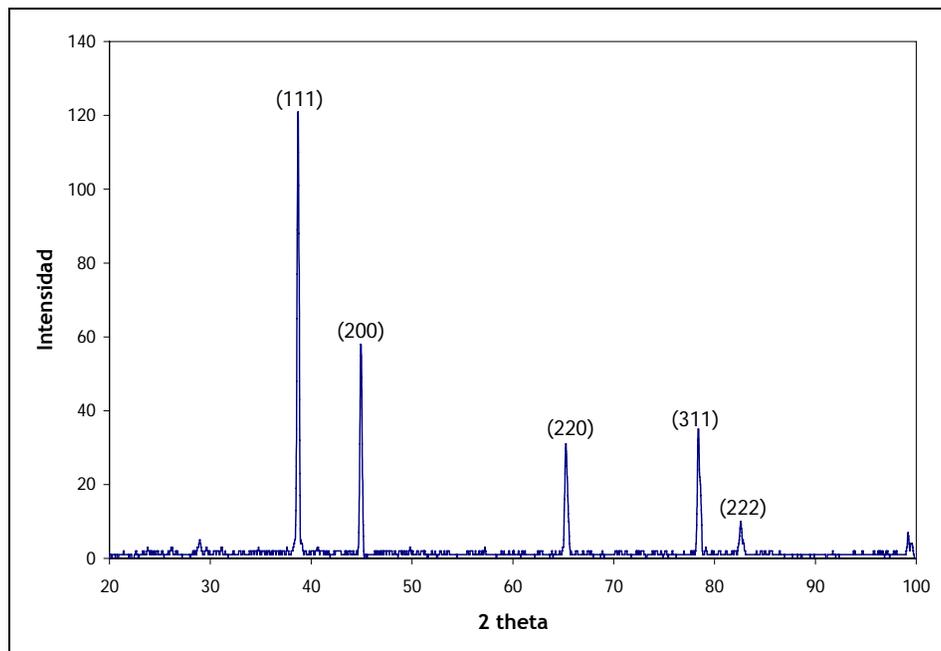


Fig. 6.5. Difractograma de rayos-x de las esponjas de aluminio fabricadas.

6.5. Microscopia Electrónica de Barrido

Las Figuras 6.6 y 6.7 muestran imágenes por electrones secundarios de las esponjas de aluminio fabricadas por el método SDP. La Figura 6.6 corresponde a las esponjas metálicas fabricadas a partir de mezclas con 65% en volumen de sal común, mientras que las de la Figura 6.7 corresponden a esponjas obtenidas a partir de mezclas con 70% de sal. Se observa que los poros en todas las esponjas presentan forma irregular; generalmente, la morfología de los poros corresponde a la forma de granos de sal empleados en su fabricación.

Observando detenidamente se aprecia un mayor número de cavidades en las imágenes de la Figura 6.7, las cuales corresponden a muestras de esponjas con mayor contenido de porosidad ($\approx 70\%$ volumen). Las imágenes observadas corresponden a muestras fracturadas no pulidas, por lo que es difícil apreciar con claridad los ligamentos metálicos que forman las células metálicas. Se observa que no existe alineación alguna de los poros formados, esto es, la distribución de poros es aleatoria y homogénea en las muestras, por lo que se espera manifiesten propiedades isotrópicas. De manera general, a mayor tamaño de grano de sal precursora, corresponde también un tamaño de poro más grande, independientemente de la porosidad total de la muestra.

Es importante señalar que para todos los tamaños de sal empleados, se observaron esponjas con tamaños de poros menores al rango de tamaño de partícula de la sal precursora. Esto se atribuye a que durante el proceso de compactación se presenta cierto grado de trituración de los granos de sal por la carga aplicada. Durante el proceso normal de obtención de sal de mesa, ésta es reducida en tamaño por medios mecánicos de molienda, lo cual induce grietas en los granos. Un

concepto básico de la pulvimetalurgia de las partículas frágiles indica que a mayor tamaño de partícula, mayor es la probabilidad de retener grietas o indicios de falla bajo carga. Esto explica la aparición de poros pequeños cuando se parte de precursores de sal de tamaño grueso.

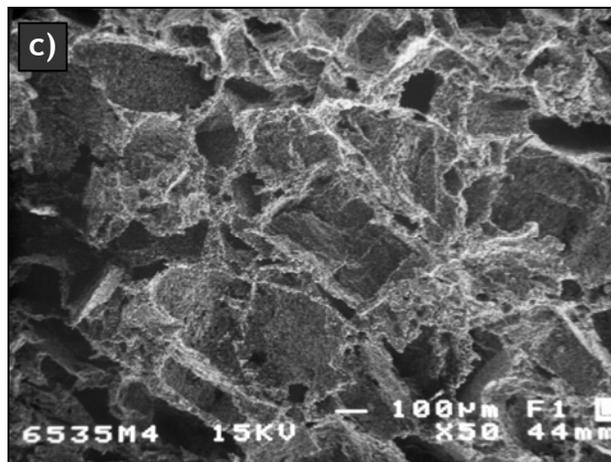
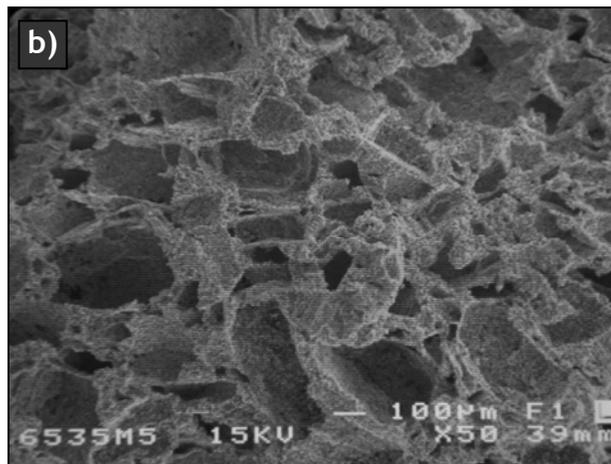
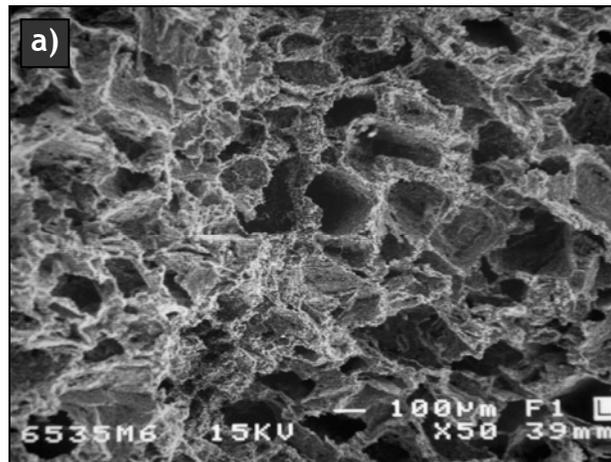


Fig. 6.6. Micrografías MEB de esponjas de aluminio 65:35 con diferente tamaño de sal precursor. a) 250-419 μm ; b) 420-589 μm ; y c) 590-1000 μm .

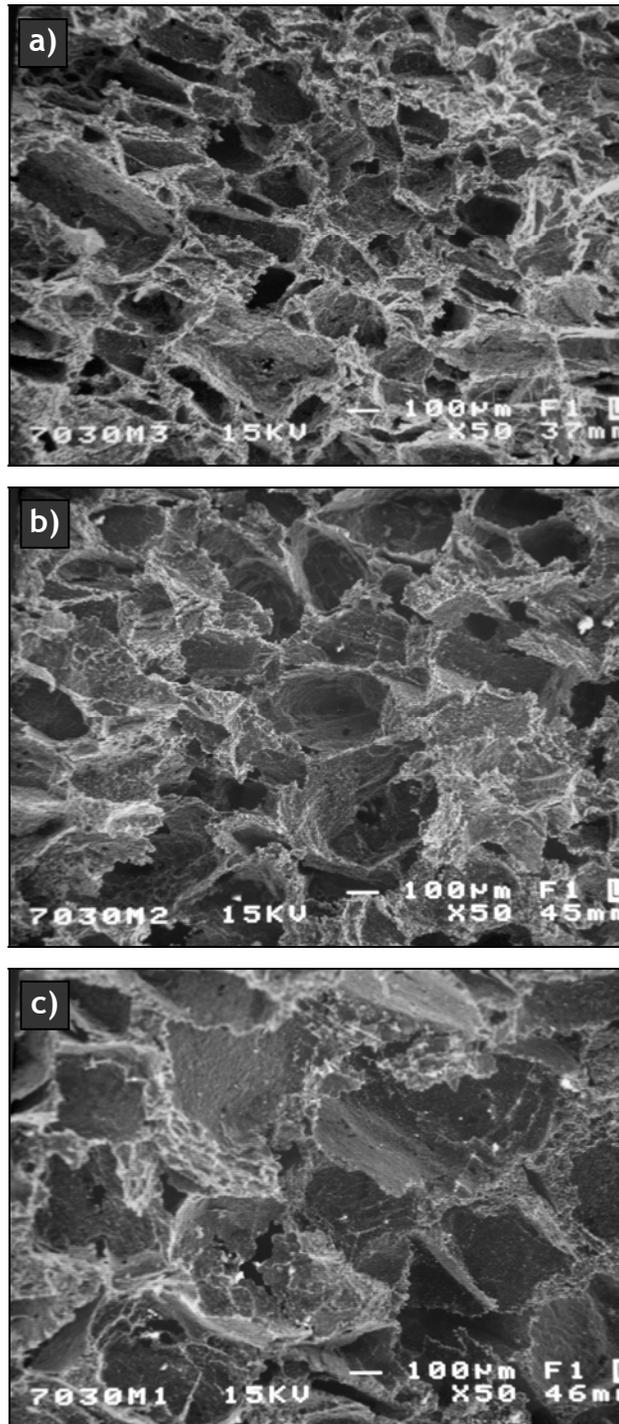


Fig. 6.7. Micrografías MEB de esponjas de aluminio 70:30 con diferente tamaño de sal precursor. a) 250-419 μm ; b) 420-589 μm ; y c) 590-1000 μm .

6.6. Microscopía Óptica y Análisis de Imágenes

Las Figuras 6.8 y 6.9 presentan micrografías obtenidas por microscopía óptica de secciones transversales de esponjas desbastadas en papel de carburo de silicio y pulidas en suspensión de diamante. Se observa con detalle la formación de cuellos o ligamentos metálicos en ambas esponjas, 65:35 y 70:30; los cuellos son continuos y fuertes formando células abiertas. Sin embargo, existe también la formación de microporosidad en los ligamentos debido a la fractura parcial de una fracción de granos de sal originando la formación de finos de sal que a su vez dan paso a la aparición de pequeños poros en los cuellos. Los poros de las esponjas adquieren la morfología de la sal empleada, es por ello que los poros tienen forma irregular y sus vértices son angulares.

Las mezclas preparadas dieron origen a seis tipos de esponjas con diferentes características estructurales; las diferencias consisten principalmente en el tamaño y forma de poro resultante, el grado de porosidad total, y la forma y distribución de los cuellos. Como ya se ha mencionado, todas estas propiedades son modificadas por la cantidad de sal empleada y el tamaño de grano de la misma, factores que afectan la carga aplicada durante la compactación en frío y la conducta de sinterización de la masa de polvos.

Con ayuda del analizador de imágenes SigmaScan Pro5 se efectuó el estudio de 180 micrografías obtenidas con el Banco Metalográfico Nikon Epiphot 300. El objeto del estudio es determinar parámetros estructurales tales como porosidad total, y forma y tamaño de poros de las diferentes esponjas fabricadas. El estudio resulta profundo y dedicado al tener que cuantificar y analizar cada uno de los poros presentes en las imágenes de las esponjas con el fin de obtener la información deseada. Cabe señalar

que el principal error de este método de análisis consiste en la demarcación del perímetro de los poros señalados, lo cual puede modificar ligeramente los valores de áreas y forma de los poros en cuestión.

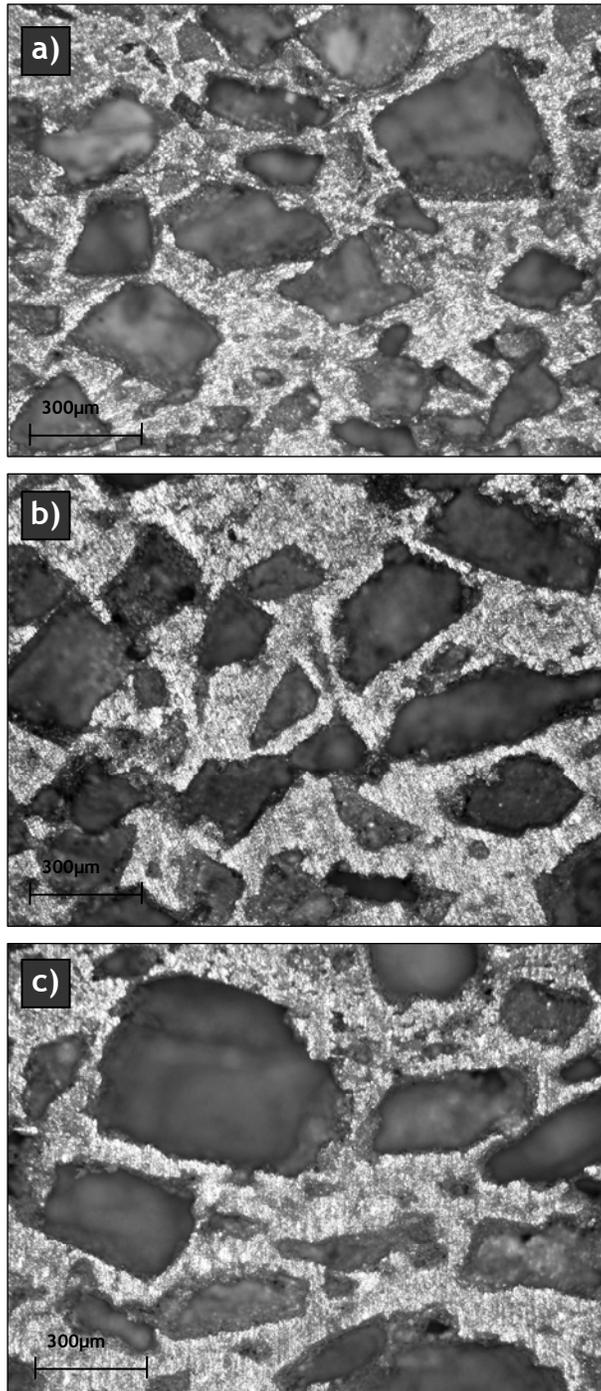


Fig. 6.8. Micrografías que muestran la porosidad característica y cuellos formados en las esponjas de aluminio 65:35 obtenidas a partir de diferentes tamaños de sal. a) 250-419 μm ; b) 420-589 μm ; y c) 590-1000 μm .

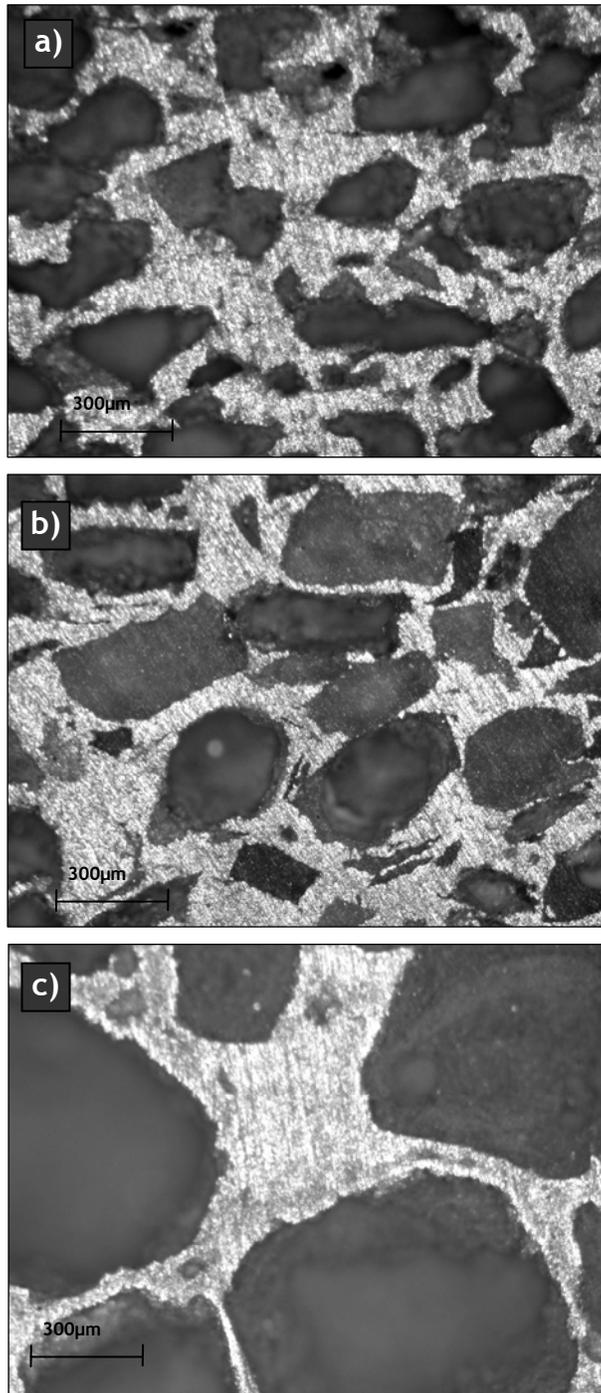


Fig. 6.9. Micrografías que muestran la porosidad características y cuellos formados en las esponjas de aluminio 70:30 obtenidas a partir de diferentes tamaños de sal. a) 250-419 μm ; b) 420-589 μm ; y c) 590-1000 μm .

6.6.1. Porosidad

La Tabla 6.2 presenta los resultados de porosidad de las esponjas de aluminio en términos de porosidad en bulto y porosidad calculada por análisis de imágenes. La porosidad en bulto se obtuvo a partir de las dimensiones y peso de las esponjas, considerando también la densidad del aluminio metálico puro; mientras que la porosidad obtenida con el analizador de imágenes corresponde a la cuantificación de poros directamente de las imágenes ópticas de las esponjas. De manera aproximada, se obtuvo que la porosidad en bulto corresponde al volumen de sal removido de la relación NaCl:Al de la cual se parte. Esto es, las esponjas 65:35 tienen una porosidad de 65.60 a 66.92 %, mientras que las esponjas 70:30 presentan porosidad de 69.88 a 70.96%.

Tabla. 6.2. Porosidades de las esponjas metálicas.

NaCl:Al	Tamaño de Sal Precursor (μm)	% Porosidad (del bulto)	% Porosidad (Análisis de Imágenes)
65:35	250-419	66.92	68.53
	420-589	66.39	62.41
	590-1000	65.60	65.78
70:30	250-419	70.67	71.94
	420-589	70.96	65.98
	590-1000	69.88	68.91

La Tabla 6.2 muestra también la porosidad obtenida por análisis de imágenes con el software SigmaScan Pro5. De manera general, por este método de análisis también se cuantifica una mayor porosidad para las esponjas 70:30. Sin embargo, también se observa que este método muestra mayor dispersión en los datos obtenidos. Al respecto se puede considerar como un valor más preciso la porosidad medida en bulto, pues el resultado del análisis de imágenes se obtiene a partir de un

número de micrografías, que aunque representativo de la distribución, forma y tamaño de los poros, finalmente son una fracción de la porosidad total del material.

6.6.2. Diámetro de Feret

La Tabla 6.3 muestra los resultados del tamaño de los poros en las esponjas de aluminio medidos en términos del diámetro de Feret y determinados con ayuda del analizador de imágenes SigmaScan Pro5. Como se puede observar, el diámetro del poro resulta siempre menor que el tamaño de grano de la sal precursora para todas las muestras de esponjas. Esto se debe al fenómeno de trituración que sufren los granos de sal en el proceso de compactación en frío. Como lo indican los valores de desviación estándar calculados, existe una dispersión significativa en el tamaño de los poros; sin embargo, tal dispersión corresponde también a la ventana de tamaños del rango de sales empleados. Los tamaños de poros obtenidos indican también que el grado de trituración es mayor conforme incrementa el tamaño de sal empleado. Como ya se explico previamente, partículas frágiles procesadas por medios mecánicos, como en este caso la sal de mesa para su reducción de tamaño, guardan esfuerzos e inicios de fractura en su cuerpo, lo cual es más posible que se presente conforme mayor es el tamaño de la partícula dado su área expuesta.

Es evidente que a mayor tamaño de sal precursora, mayor es el tamaño de poro obtenido. También se observa un mayor tamaño de poro en las esponjas 70:30 respecto de las 65:35. Esta tendencia implica que al contener mayor cantidad de aluminio, el componente metálico de las esponjas 65:35 absorbe parte de la carga aplicada durante la compactación en frío para deformarse plásticamente y envolver en

mayor grado a los granos de sal, lo cual significa una mejor transferencia de la carga y aparentemente mayor fractura de dichos granos, lo que finalmente origina poros mas pequeños en las esponjas resultantes.

Tabla. 6.3. Diámetro de Feret de los poros de las esponjas de aluminio.

NaCl:Al	Tamaño de Sal Precursor (μm)	D_{Feret} (μm)	Desviación Estándar
65:35	250-419	157.34	85.59
	420-589	141.06	101.24
	590-1000	162.30	123.36
70:30	250-419	164.38	91.81
	420-589	174.25	114.96
	590-1000	210.86	179.80

Cabe señalar que la medición del tamaño de poros se efectuó en secciones transversales de esponjas, lo que indica que los resultados corresponden a diámetro de poros interconectados dirigidos de forma aleatoria. Así mismo, el tamaño de éstos está expresado en función del diámetro ficticio de un poro esférico de área equivalente al área real del poro medido a través del diámetro de Feret. Esto se menciona debido a que la forma de los granos de sal precursora es irregular y su tamaño fue medido a través de una técnica de cribado, lo que indica que su tamaño expresado en términos de diámetro de Feret pudiera resultar menor al obtenido por tamices y mostrado como rango de tamaños en la Tabla 6.3, y entonces pudiera realizarse una comparación más adecuada entre el tamaño de sal precursor y el tamaño de poro resultante usando una misma escala de tamaños. Sin embargo, este procedimiento experimental no se efectuó y se propone como tema complementario de estudio al presente trabajo.

6.6.3. Factor de Forma

La Tabla 6.4 presenta resultados del factor de forma de los poros en las esponjas de aluminio medido también a través del analizador de imágenes SigmaScan Pro5. Además del tamaño, la forma y rugosidad de las cavidades de un medio poroso determinan su conducta permeable; la forma del poro determina igualmente la forma, continuidad y tamaño de los ligamentos metálicos que forman las células huecas, y por tanto, la capacidad de transferencia de calor a través de la estructura sólida porosa. El factor de forma medido, *SFactor*, es un número adimensional de extensión 0 a 1 que indica la redondez de un objeto. En este caso, un valor de la unidad significaría un poro perfectamente redondo. Como se observa en la Tabla 6.4 el factor de forma de los poros en las esponjas fabricadas está entre 0.47 y 0.51, lo que indica poros de forma altamente irregular. Esto es de esperarse debido a la naturaleza irregular en forma de los granos de sal precursora, además de considerar las fracturas irregulares consecuentes de la compactación en frío. Aparentemente no hay variación de la forma de los poros entre las diferentes esponjas, independientemente de su contenido metálico y tamaño de poros, aunque se aprecia un ligero incremento en el grado de esfericidad de los poros en las esponjas más porosas (70:30).

Tabla. 6.4. Factor de forma de los poros de las esponjas de aluminio.

NaCl:Al	Tamaño de Sal Precursor (μm)	SFactor	Desviación Estándar
65:35	250-419	0.48	0.13
	420-589	0.47	0.15
	590-1000	0.47	0.14
70:30	250-419	0.47	0.13
	420-589	0.48	0.13
	590-1000	0.51	0.13

6.7. Densidad

La Tabla 6.5 presenta los valores de densidad de las esponjas fabricadas. Es bien conocido la aceptación y uso del aluminio y sus aleaciones en diversas aplicaciones dadas sus características, en particular su baja densidad. En el presente trabajo, las esponjas de aluminio fabricadas resultaron más de tres veces menos densas que el aluminio metálico, el cual tienen una densidad de 2.7 g/cm^3 . Su densidad está considerablemente por debajo de la densidad del agua. De manera general, la densidad de las esponjas 70:30 resultó aproximadamente un 15% menor que las esponjas 65:35, fenómeno atribuido obviamente a su diferencia en contenido de sólidos. La Tabla 6.5 también indica que a mayor tamaño de poros (mayor tamaño de sal precursora), mayor es la densidad relativa de las esponjas, aunque en mínimo grado. Realmente no es de esperar un cambio en esta característica de las esponjas con el tamaño de poro, pues desde el diseño experimental se partió de relaciones Al/NaCl constantes compactadas a dimensiones de altura y diámetro semejantes.

Tabla. 6.5. Densidad y Densidad Relativa de las esponjas de Aluminio fabricadas.

NaCl:Al	Tamaño de Sal Precursor (μm)	Densidad (g/cm^3)	Densidad Relativa
65:35	250-419	0.8930	0.3307
	420-589	0.9071	0.3359
	590-1000	0.9286	0.3439
70:30	250-419	0.7916	0.2931
	420-589	0.7840	0.2903
	590-1000	0.8129	0.3010

La Figura 6.10 muestra un gráfico de la densidad de las esponjas en función de su porosidad total. Las esponjas se grafican independientemente de su relación Al/NaCl de partida, y se consideran como seis diferentes grados de esponjas metálicas de aluminio obtenidas. Es claro que a mayor contenido de poros, disminuye la densidad del material celular en cuestión. La conducta lineal del gráfico lleva a la conclusión de que la densidad de las esponjas es únicamente función del contenido de sólidos y no del arreglo estructural de los ligamentos metálicos y huecos presentes.

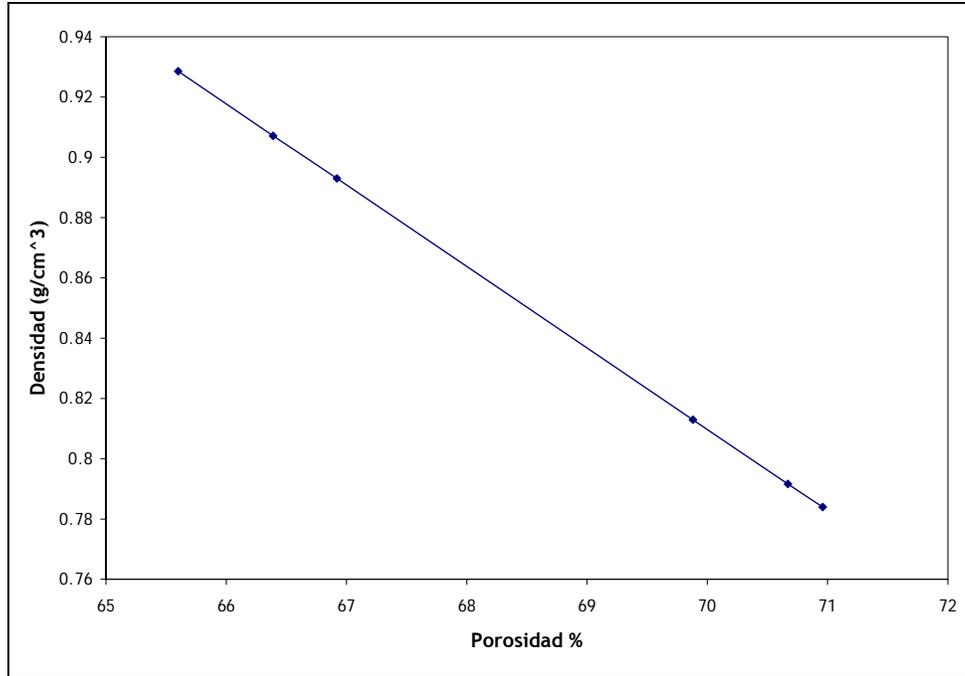


Fig. 6.10. Gráfica de porosidad del bulto vs. densidad.

6.8. Tortuosidad

Como se indicó en la sección experimental, los valores de tortuosidad se calcularon a partir de la densidad de sólidos empleando un modelo para lechos porosos en columnas empacadas. La tortuosidad de un medio poroso con estructura irregular de poros, indica la distancia excedida que un fluido viaja para cruzar el espesor original del compacto. La Figura 6.11 indica que a mayor porosidad de la espuma metálica, menor es la tortuosidad del medio. Esto se debe a que a menor contenido de sólidos, menor es el recorrido que tiene que hacer un fluido de una superficie a otra del compacto, puesto que se reduce la tortuosidad del medio poroso. En conclusión, la estructura más porosa de las esponjas induce una menor densidad y menor tortuosidad del medio.

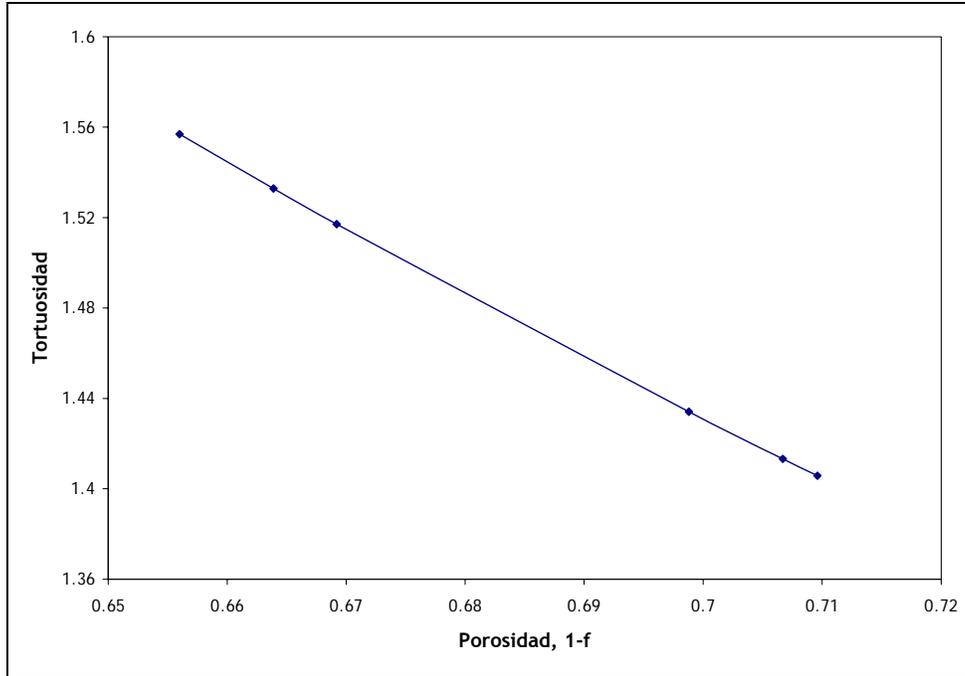


Fig. 6.11. Gráfica de porosidad del bulto vs. tortuosidad.

6.9. Permeabilidad

La Tabla 6.6 presenta los valores de permeabilidad de las esponjas determinados por el principio de Darcy empleando el arreglo experimental descrito en la sección experimental. Lo más importante a destacar de estos resultados es la conducta permeable de las esponjas producidas. Sin embargo, los resultados no indican tendencias que pudieran esperarse. Por ejemplo, la permeabilidad es una función del grado de porosidad; a mayor cantidad de poros, mayor permeabilidad, conducta que no reflejan los resultados obtenidos. Así mismo, la permeabilidad decrece rápidamente a menor tamaño de poros; este fenómeno aplica para las esponjas 70:30 pero se manifiesta opuesto en tendencia para las esponjas 65:35. Es importante señalar que el estudio realizado se basa en una norma para columnas empacadas y no para sinterizados porosos con formación de cuellos y ligamentos. Puesto que la permeabilidad es también función de la forma, textura e interconectividad de poros, aparentemente el arreglo montado no

responde a las características del material examinado, hecho que se constató por la falta de reproducibilidad entre experimentos. Aun cuando se confirmó la conducta permeable de las esponjas de aluminio, es necesario cuantificar esta propiedad de manera adecuada dada la aplicación que se pretende para estos materiales como medios de transferencia de calor.

Tabla 6.6. Permeabilidad de las esponjas de aluminio fabricadas.

NaCl:Al	Tamaño de Sal Precursor (μm)	Permeabilidad (Darcy)
65:35	250-419	116.90
	420-589	55.16
	590-1000	82.57
70:30	250-419	12.42
	420-589	25.84
	590-1000	24.40

6.10. Conductividad Térmica

La conducción es el flujo de calor a través de un material en respuesta de un gradiente de temperaturas. En un material poroso el calor transportado por este mecanismo es reducido debido a la introducción de una resistencia térmica. Cuando el área transversal del sólido es reducida el flujo de calor tendrá resistencia; es por ello que el calor transferido en el sólido por efecto de la conducción puede disminuir si la fracción volumétrica del sólido disminuye.

La conductividad térmica de las esponjas se determinó empleando el principio comparativo de conductividades en un arreglo de placas calientes como se describe en la sección experimental. La ecuación

empleada en el cálculo de la conductividad térmica de las esponjas está en función de las diferencias de temperatura que hay en las superficies de las placas de referencia y muestra problema:

$$k_s = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x}{\Delta T} \right)_s \left[\left(k_r \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{Tr} + \left(k_r \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{Br} \right]$$

donde: $\Delta T_{Tr} = T_1 - T_2$

$$\Delta T_s = T_3 - T_4$$

$$\Delta T_{Br} = T_5 - T_6$$

T_1 y T_2 son las temperaturas en la superficie superior e inferior respectivamente, del material de referencia superior.

T_3 y T_4 son las temperaturas en la superficie superior e inferior respectivamente, de la muestra.

T_5 y T_6 son las temperaturas en la superficie superior e inferior respectivamente, del material de referencia inferior.

La Figura 6.12 muestra un ejemplo de la temperatura registrada en las placas cuando se experimentó con una esponja a 100 °C. Las temperaturas de interés son aquellas que se logran una vez alcanzado el equilibrio, temperaturas que se obtuvieron en un margen de diferencia de ± 0.3 °C para todas las muestras en tiempos de 15 a 40 minutos dependiendo del grado de esponja analizada.

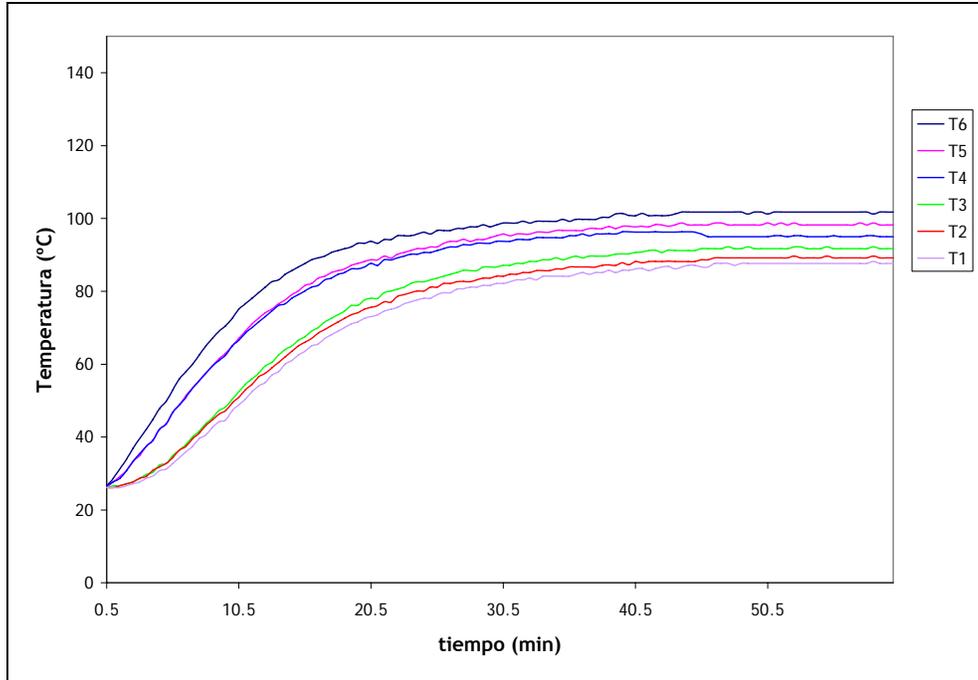


Fig. 6.12. Temperaturas de las placas registradas con la tarjeta de adquisición de datos en los diferentes puntos del arreglo experimental hasta alcanzar el equilibrio.

Todos los experimentos fueron realizados en original y réplica, observándose reproducibilidad en los valores de temperatura de equilibrio obtenidos. Una vez efectuados los cálculos de conductividad térmica a las temperaturas de 100, 200, 300 y 400 °C fijadas en la fuente principal de calor para todas las esponjas de aluminio, se procedió a graficar la conductividad térmica en función de la temperatura de la muestra como se presenta en las Figuras 6.13 a 6.18.

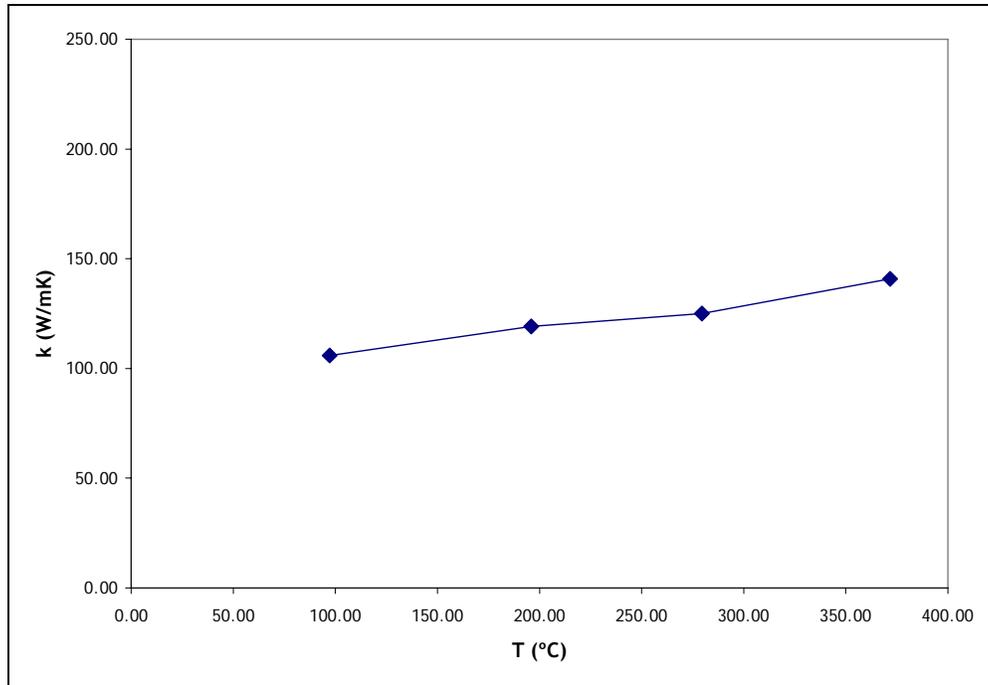


Fig. 6.13. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 65:35 (250-419 μm).

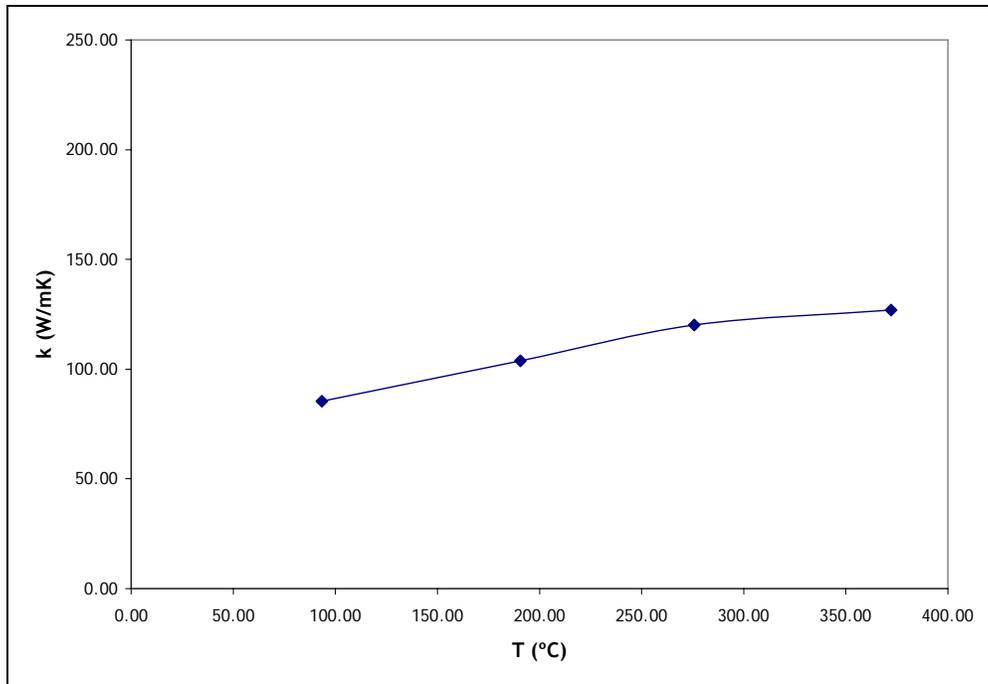


Fig. 6.14. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 65:35 (420-589 μm).

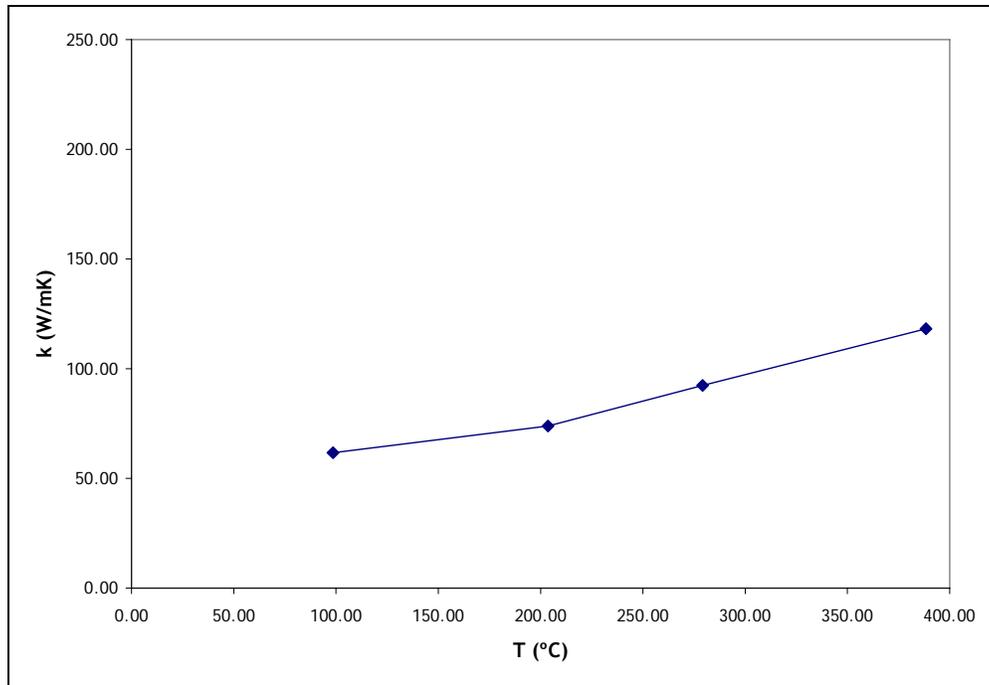


Fig. 6.15. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 65:35 (590-1000 μm).

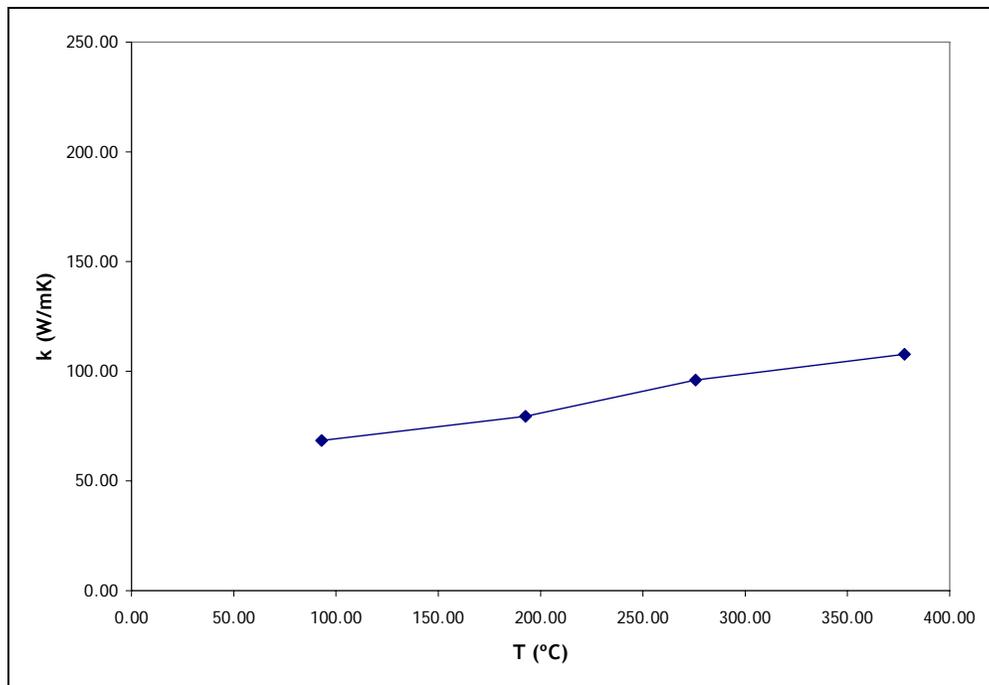


Fig. 6.16. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 70:30 (250-419 μm).

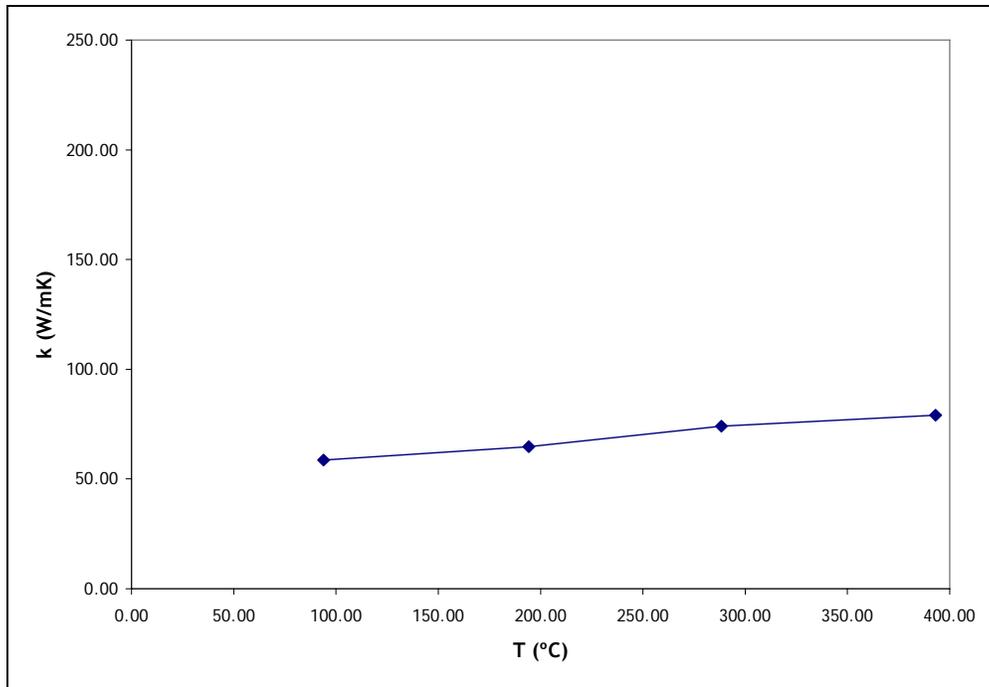


Fig. 6.17. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 70:30 (420-589 μm).

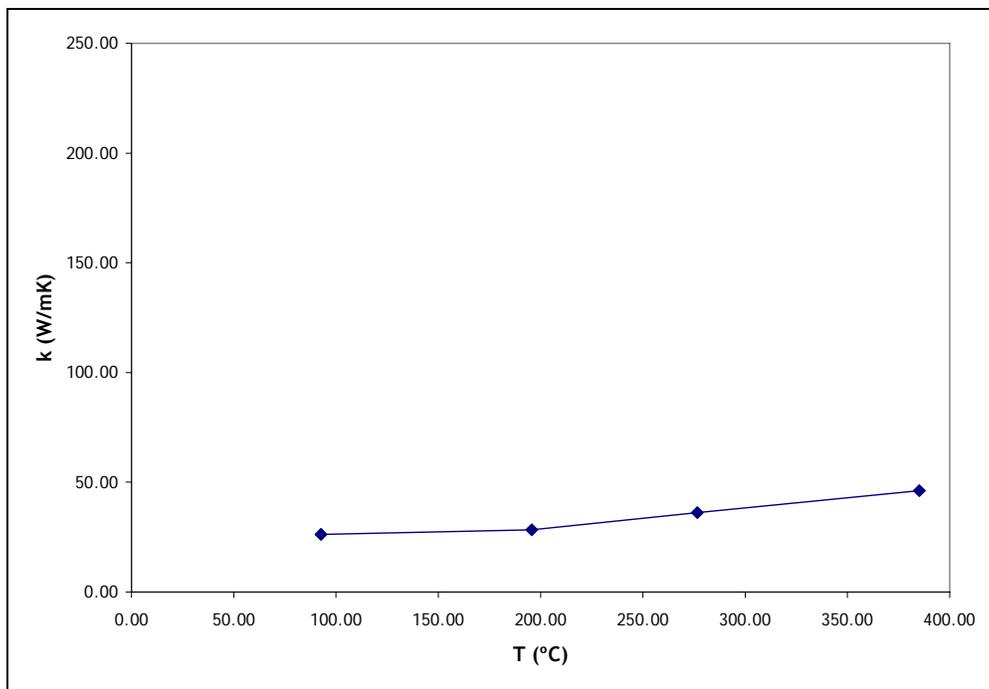


Fig. 6.18. Gráfica de Temperatura vs. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio 70:30 (590-1000 μm).

En general, las figuras mostradas presentan un aumento en la conductividad térmica de las esponjas de aluminio conforme incrementa la temperatura del ensayo. Es evidente que las esponjas 65:35 presentan también mayor conductividad térmica respecto de las esponjas 70:30. Este fenómeno se debe simplemente al mayor contenido de sólidos en las esponjas 65:35, sólido que se presenta a manera de ligamentos metálicos y continuos que permiten mayor transferencia de calor. Se observa también que el aumento de conductividad en las esponjas es aproximadamente lineal hasta los 300°C, temperatura a partir de la cual la conductividad aumenta en menor proporción.

De manera complementaria a los gráficos mostrados, la Tabla 6.7 resume los valores de conductividad térmica de los seis diferentes grados de esponjas fabricadas en función de la temperatura. Cabe señalar que durante la realización de los experimentos de conductividad, la fuente de calor primaria fue programada para trabajar a 100, 200, 300 y 400°C, sin embargo, la superficie de la placa de cobre ubicada en el fondo del arreglo y que hace la función de plato caliente y fuente final de aporte térmico al medio, registró en todos los casos temperaturas menores a las de la fuente primaria. Obviamente, las esponjas de aluminio montadas también mostraron menor temperatura debido al principio de transferencia unidireccional de calor en que se basa el arreglo, por lo cual como se observa en las Figuras 6.13 a 6.18, la temperatura de las esponjas no coincide en los diferentes puntos de registro de conductividad.

Tabla 6.7. Conductividad Térmica de las esponjas de Aluminio a diferentes temperaturas.

NaCl:Al	Tamaño de Sal Precursor (μm)	Conductividad Térmica (W/mK)			
		100 °C	200 °C	300 °C	400 °C
65:35	250-419	106.57	119.47	127.16	149.97
	420-589	86.42	105.75	123.43	124.90
	590-1000	61.69	73.13	97.86	120.15
70:30	250-419	68.50	80.85	100.29	107.15
	420-589	58.67	65.23	75.07	78.92
	590-1000	25.90	28.68	38.64	46.96

Para poder comparar los valores de conductividad entre los diferentes grados de esponjas a una misma temperatura, los datos de conductividad de las Figuras 6.13 a 6.18 fueron ajustados a líneas de tendencia empleando las herramientas de análisis del procesador de datos Excel. Los valores de conductividad térmica a 100, 200, 300 y 400°C mostrados en la Tabla 6.7 fueron interpolados o extrapolados de estas ecuaciones, ecuaciones de ajuste que resultan en polinomios de tercer grado mostrados a continuación.

Para 65:35 (250-419 μm), $97\text{ °C} < T < 372\text{ °C}$

$$k = 3.3889 \times 10^{-6} T^3 - 2293.8293 \times 10^{-6} T^2 + 579919.6351 \times 10^{-6} T + 68.1245$$

$$R^2 = 1.00$$

Para 65 :35 (420-589 μm), $93\text{ °C} < T < 373\text{ °C}$

$$k = -2.4269 \times 10^{-6} T^3 + 1373.6403 \times 10^{-6} T^2 - 48875.1340 \times 10^{-6} T + 79.9932$$

$$R^2 = 1.00$$

Para 65 :35 (590-1000 μm) $98\text{ °C} < T < 392\text{ °C}$

$$k = -2.6197 \times 10^{-6} T^3 + 2236.3437 \times 10^{-6} T^2 - 373156.8885 \times 10^{-6} T + 79.2635$$

$$R^2 = 1.00$$

Para 70:30 (250-419 μm) $92\text{ }^\circ\text{C} < T < 378\text{ }^\circ\text{C}$

$$k = -3.2780 \times 10^{-6} T^3 + 2320.9708 \times 10^{-6} T^2 - 343265.9356 \times 10^{-6} T + 82.8904$$

$$R^2 = 1.00$$

Para 70:30 (420-589 μm) $93\text{ }^\circ\text{C} < T < 394\text{ }^\circ\text{C}$

$$k = -1.5439 \times 10^{-6} T^3 + 1090.2160 \times 10^{-6} T^2 - 153381.0694 \times 10^{-6} T + 64.6461$$

$$R^2 = 1.00$$

Para 70:30 (590-1000 μm) $92\text{ }^\circ\text{C} < T < 386\text{ }^\circ\text{C}$

$$k = -1.4741 \times 10^{-6} T^3 + 1244.0928 \times 10^{-6} T^2 - 242306.9582 \times 10^{-6} T + 39.1661$$

$$R^2 = 1.00$$

La Figura 6.19 muestra el comportamiento de la conductividad térmica en las esponjas en función de su densidad relativa. Los puntos de la derecha corresponden a las esponjas 65:35, es decir, con mayor contenido de sólidos. Es evidente que a mayor densidad relativa, mayor conductividad del sólido poroso. Como se mostró en la Tabla 6.5, la densidad en bulto de las esponjas varía de 0.7840 a 0.9286 g/cm³. Considerando la densidad teórica del aluminio metálico igual a 2.7 g/cm³ y conductividad térmica de 235 W/mK a 25°C, el aluminio presenta una conductividad específica de 87.04 W/mK, mientras que la conductividad térmica específica de las espumas está en el rango de 31.8 a 119.3 W/mK, para las espumas de menor y mayor conductividad térmica mostrada. Esto indica que de acuerdo a las características estructurales de cada uno de los grados de esponjas obtenidas, y considerando la masa de estos ligeros componentes, su mayor conductividad específica respecto del aluminio metálico le confiere ventajas en aquellas aplicaciones de control térmico en las cuales es importante mantener un bajo peso.

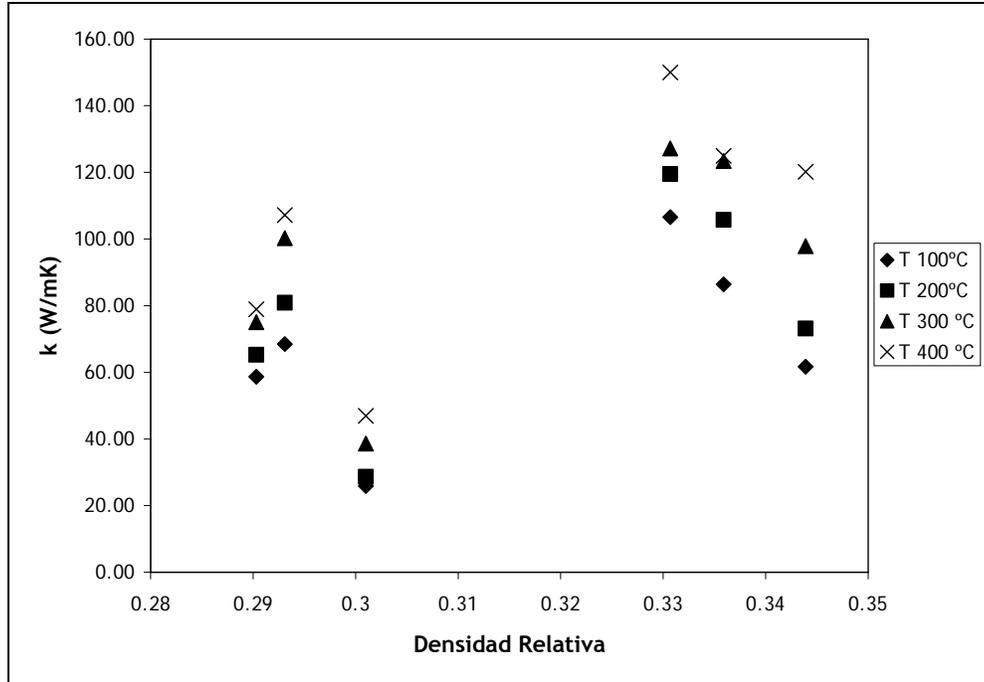


Fig. 6.19. Gráfica de Conductividad Térmica de esponjas de Aluminio con diferente densidad relativa a diferentes temperaturas.

De la Tabla 6.7 se obtiene que la conductividad térmica en ambos juegos de esponjas aumenta con la disminución del tamaño de los poros. Esta conducta se ilustra de mejor manera en los gráficos de la Figura 6.20. Los gráficos muestran claramente como disminuye la conductividad con el aumento del diámetro del poro independientemente de la relación Al/NaCl y la temperatura de la esponja en cuestión. El fenómeno de mayor conductividad a menor tamaño de poro, expresado en términos del diámetro de Feret, se explica en función del área superficial expuesta del sólido; a menor tamaño de poro, mayor cantidad de ligamentos, y por tanto mayor medio de transporte del flujo térmico.

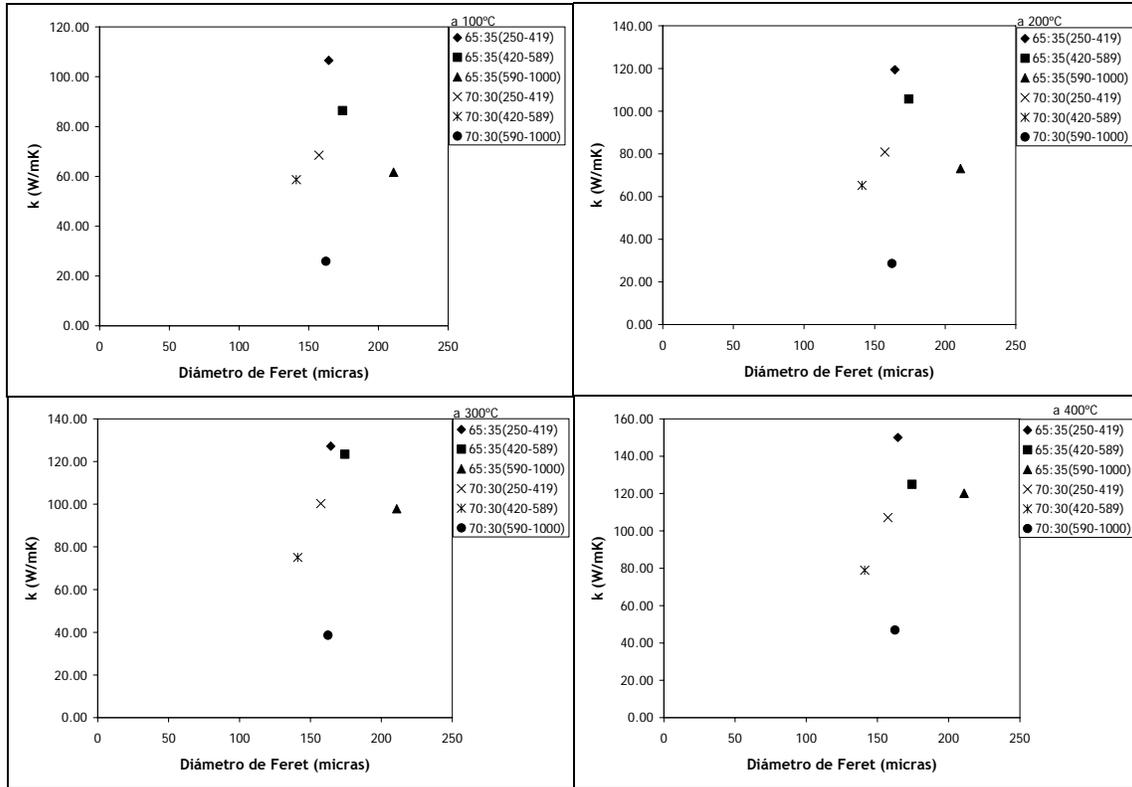


Fig. 6.20. Gráficas de Conductividad Térmica en función del diámetro de Feret a diferente temperatura.

La Figura 6.21 muestra la variación de la conductividad térmica de las esponjas en función de la forma del poro. Como se ha explicado anteriormente, el factor de forma tiene valores de 0 a 1; mientras más cercano es su valor a la unidad, mayor redondez presenta el poro. De manera general, los poros en los diferentes grados de esponjas son irregulares en forma con un factor de forma en el orden de 0.5. Sin embargo como se observa en la Figura 6.21, las esponjas con menor contenido de aluminio (70:30) muestran poros ligeramente más redondos conforme aumenta el tamaño de sal precursor, y por tanto, el tamaño de poro formado. Este incremento de tamaño de poro y mayor redondez, inducen una menor conductividad térmica para el material. La menor conductividad con el aumento de tamaño de poro está relacionada con una menor área superficial de contacto de los ligamentos metálicos.

A su vez, poros más redondos implican ligamentos de pared más tersa y de menor superficie de transferencia, lo que puede explicar la disminución de conductividad con la forma del poro. Sin embargo, al ser la forma del poro una consecuencia del tamaño que adquiere el mismo, y dado el porcentaje de variación de conductividad térmica con tales características morfológicas del material, en el presente trabajo se considera que el cambio en conductividad es debido principalmente al tamaño y no la forma del poro. Esto puede confirmarse con la conducta de la conductividad para las esponjas con mayor contenido de aluminio (65:35), en las cuales el factor de forma de los poros se mantiene prácticamente invariable (0.47-0.48), mientras que la conductividad varía a expensas del tamaño de poro formado.

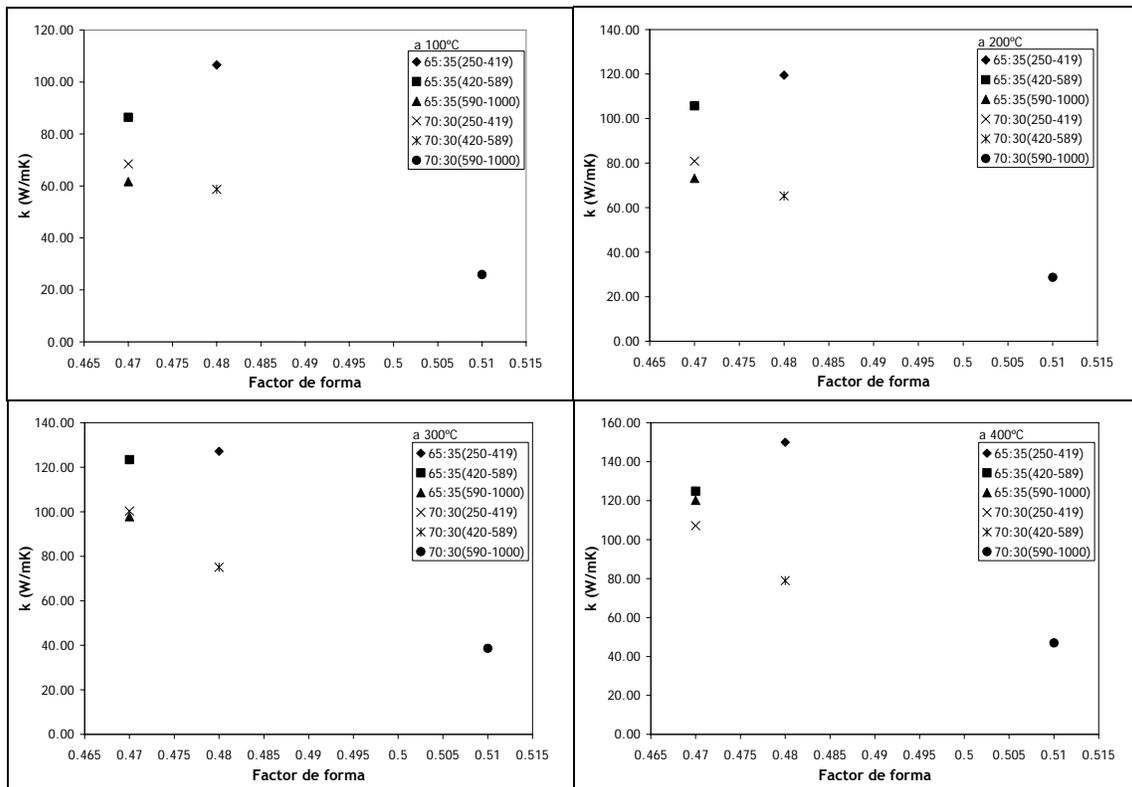


Fig. 6.21. Gráficas de Conductividad Térmica en función de la forma de los poros para las diferentes esponjas.

Finalmente, para concluir este capítulo de la investigación, recordemos que el buen desempeño de los disipadores térmicos utilizados en el enfriamiento de dispositivos electrónicos es función de su geometría y obviamente conductividad térmica. Por esta razón, muchos de los componentes actuales de disipación térmica son fabricados en base aluminio, además de ser baratos y ligeros. Sin embargo como se ha mostrado, las esponjas de aluminio poseen mejores propiedades específicas que su precursor metálico al combinar una baja densidad relativa, alta área superficial, características morfológicas controlables y buena conductividad térmica, lo que las convierte en excelentes candidatos para aplicaciones de disipación térmica.

VII. CONCLUSIONES

A continuación se enlistan las principales conclusiones de este trabajo.

- Se fabricaron esponjas metálicas de aluminio de baja densidad con porosidad abierta en el rango de 65-70% en volumen empleando un Proceso de Sinterización y Disolución (SDP) a partir de polvos precursores de aluminio metálico y tres diferentes tamaños de sal de cloruro de sodio en su presentación de sal de mesa.
- El Proceso de Sinterización y Disolución permitió la elaboración de esponjas de aluminio a bajo costo de producción, con geometría definida, ligeras, y tamaño y forma de poros controlados, las cuales presentan porosidad interconectada homogéneamente distribuida y densidad equivalente a un tercio de la densidad teórica del aluminio metálico.
- El proceso original de fabricación SDP fue exitosamente modificado en su etapa de consolidación, en cuanto a que se omitió el uso del encapsulado en dados de acero y vidrio durante la sinterización. Los compactos liberados de los dados presentan la resistencia necesaria para conservar su geometría, lo cual se aprovecho para sinterizarlos sin presión en una atmósfera dinámica de argón con objeto de evitar su oxidación, procedimiento que resulta más flexible en la elaboración de esponjas de aluminio.
- Los poros de las esponjas de aluminio se caracterizan por adquirir el tamaño y forma de las sales precursoras. Sin

embargo, el tamaño de los granos de sal precursores disminuyó durante el proceso de compactación en frío, lo que condujo a una reducción del tamaño de poro esperado en las esponjas.

- Las esponjas fabricadas consisten de ligamentos metálicos firmes y continuos formando un material celular permeable. Se obtuvieron seis diferentes grados de esponjas con tamaño de poros en el rango de 141.06 a 210.86 μm expresado en términos de diámetro de Feret, y una forma irregular de poro con factor de forma aproximado a 0.5.
- Se implementó un arreglo experimental de platos calientes, usando como material de referencia placas de cobre grado electrolítico, en la determinación de la conductividad térmica de las esponjas de aluminio. Se encontró que la conductividad térmica de las esponjas se ve afectada por la forma, pero principalmente el tamaño de los poros, así como su contenido de sólidos. De manera general, a mayor temperatura, mayor conductividad térmica de las esponjas, independientemente de la porosidad y morfología de poros.
- Las esponjas de aluminio fabricadas tienen una gran área superficial, son ligeras, por su naturaleza química resistentes a la corrosión, resultan de un proceso de producción económico y poseen alta conductividad térmica, lo cual las hace ideales en aplicaciones de intercambio de calor tales como disipadores térmicos en dispositivos electrónicos.

VIII. RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones para continuar y/o mejorar el trabajo que se presenta en este trabajo de tesis.

- La adición de pequeñas cantidades de magnesio, titanio o estaño para mejorar la resistencia mecánica y química (corrosión) de las esponjas de aluminio, pero principalmente para disminuir la temperatura de fusión del aluminio líquido y así obtener un líquido más fluido que mejore la calidad de las esponjas fabricadas. Al ser elementos más activos que el aluminio, su uso implica también su oxidación preferente para proteger al aluminio mismo en caso de posible oxidación.
- Estudiar con mayor detalle el efecto de la forma y tamaño de los poros de las esponjas metálicas sobre la conductividad térmica utilizando granos de sal con morfologías controladas.
- Buscar un arreglo experimental adecuado para determinar la permeabilidad de las esponjas fabricadas, procedimiento que no debe verse afectado por la formación de ligamentos en las espumas debido al proceso de sinterización como resultó ser en el arreglo actual que es recomendado para columnas empacadas como lo establece la norma 27 del American Petroleum Institute [17].
- Usar platos de iniconel como material de referencia en lugar de platos de cobre en el arreglo experimental montado en la determinación de la conductividad térmica de las esponjas. Puesto que la conductividad térmica del iniconel (166 W/mK) es

mucho menor que la del cobre (385 W/mK), las diferencias de temperatura entre las superficies calientes de los materiales de referencia resultaría mayor y con ello se disminuiría el error introducido en el cálculo de la conductividad térmica cuando se emplean diferencias de temperatura pequeñas.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Banhart. *Manufactures, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams*. Progress in Materials Science. 46 (2001) 559-632.
- [2] W.H. Hsieh, J.Y. Wu, W.H. Shin, W.C. Chiu. *Experimental Investigation of Heat-Transfer Characteristics of Aluminum-Foam Heat Sinks*. International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 5149-5157.
- [3] D.X. Sun, Y.Y. Zhao. *A Novel Sintering-Dissolution Process for Manufacturing Al Foams*. Scripta Materialia 44 (2001) 105-110.
- [4] Y. Zhao, F. Hana, T. Fung. *Optimisation of Compaction and Liquid-State Sintering in Sintering and Dissolution Process for Manufacturing Al Foams*. Materials Science and Engineering A364 (2004) 117-125.
- [5] F. Baumgärther, I. Duarte, J. Banhart. *Industrialization of Powder Compact Foaming Process*. Advanced Engineering Materials (2000), 2, No. 4 168-174.
- [6] N. Babcsán, D. Leitmeier, J. Banhart. *Metal Foams - High Temperature Colloids Part I. Ex situ Analysis of Metal Foams*. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 261 (2005) 123-130.
- [7] X. Ma, A.J. Peyton, Y.Y. Zhao. *Measurement of the Electrical Conductivity of Open-Celled Aluminium Foam using Non-Contact Eddy Current Techniques*. NDT&E International 38 (2005) 359-367.
- [8] <http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave/>
- [9] *Ciencia de Materiales*. Universidad de Huelva.
- [10] <http://www.npl.co.uk/thermal/stuff/guide1.html#>
- [11] M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L. J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley. *Metal Foams*. Butterworth-Heinemann. Woburn, MA, USA. 2000.
- [12] B.D. Cullity. *Elements of X-ray diffraction*. Addison- Wesley Publishing Company, Third Printing- February 1967.
- [13] M.T. Santoyo. *Física del Estado Sólido*. ITM 2005.
- [14] <http://es.wikipedia.org/wiki/Porosidad>

- [15]** A.H. Benouali, L. Froyen, J.F. Delerue, M. Wevers. *Mechanical Analysis and Microstructural Characterization of Metal Foams*. Materials Science and Technology (2002) Vol. 18 489-494.
- [16]** R.M. German. *Particle Packing Characteristics*. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA, 1989.
- [17]** API RP 27: *Recommended Practice for Determining Permeability of Porous Media*, The American Petroleum Institute, 1956.
- [18]** J-F. Despois, A. Mortensen. *Permeability of Open-Pore Microcellular Materials*. Acta Materialia 53 (2005) 1381-1388.
- [19]** SigmaScan Pro Image Analysis 5.0.
- [20]** D. Weaire. *Foam Physics*. Advanced Engineering Materials (2002),4, No. 10 723-725.
- [21]** N. Babcsán, I. Mészáros, N. Herman. *Thermal and Electrical Conductivity Measurements on Aluminum Foams*. Mat-wiss. u. Werkstofftech. 34, 391-394 (2003).
- [22]** C. Hung, J. Miller. *Thermal Conductivity of Pristine and Brominated P-100 Fibres*. NASA Technical Memorandum 88863.
- [23]** C.Y. Zhao, T.J. Lu, H.P. Hodson. *Thermal Radiation in Ultralight Metal Foams with Open Cells*. International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 2927-2939.
- [24]** Tarjeta 85-1327 International Centre for Diffraction Data, 2003.
- [25]** Nordtest Method: *NT Build 489*.
- [26]** <http://www.heatsink-guide.com>