



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Caracterización estructural de metales celulares de Al-Si fabricados mediante la técnica de infiltración por gravedad sobre preforma soluble**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Químico Metalúrgico**

**PRESENTA**

Erika Elvia Aguilar Chávez

**DIRECTOR DE TESIS**

M. C. Jorge Luis Romero Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor:** José Alejandro García Hinojosa

**VOCAL:**                   **Profesor:** José Guadalupe Ramírez Vieyra

**SECRETARIO:**       **Profesor:** Jorge Luis Romero Hernández

**1er. SUPLENTE:**       **Profesor:** Ignacio Alejandro Figueroa Vargas

**2° SUPLENTE:**         **Profesor:** Héctor Israel Quiroga Herrera

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales, Anexo de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM.

**ASESOR DEL TEMA:**

Jorge Luis Romero Hernández

**SUSTENTANTE:**

Erika Elvia Aguilar Chávez

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.</b> -----	13
<b>OBJETIVOS.</b> -----	14
<b>CAPÍTULO 1 Marco teórico de las espumas metálicas.</b> -----	15
1.1 Sólido celular. -----	15
1.11 Tipo de celda. -----	15
1.12 Estructura de una celda. -----	16
1.13 Clasificación. -----	17
1.2 Sólido celular metálico. -----	17
1.21 Clasificación. -----	17
1.22 Propiedades. -----	18
1.23 Curva de compresión. -----	20
1.3 Caracterización de propiedades. -----	21
1.4 Compuestos de metales celulares. -----	23
1.41 Materiales compuestos de metal celular AFS (Estructura tipo sándwich). -----	23
1.5 Aplicaciones de los metales celulares. -----	23
1.6 Desarrollo cronológico de los metales celulares. -----	26
1.7 Empresas, centros de investigación y universidades que producen metales celulares. -----	28
1.8 Procesos de fabricación de metales celulares. -----	30
1.81 Clasificación. -----	30
1.82 Descripción de los procesos de fabricación de metales celulares por vía líquida. --	31
<b>CAPITULO 2 Técnica de infiltración de metal líquido por efecto de la gravedad sobre preformas removible.</b> -----	38
2.1 Descripción del proceso. -----	38
2.2 Etapas del proceso. -----	38
2.3 Caracterización de la estructura. -----	43

<b>CAPÍTULO 3 Planteamiento experimental.</b> -----	47
3.1 Elección, fabricación y análisis químico de la aleación de Al a utilizar. -----	47
3.2 Molde de colada para la etapa de infiltración. -----	48
3.3 Selección del material a emplear en la preforma. -----	49
3.4 Selección de la morfología de partícula para la preforma. -----	50
3.5 Tratamiento térmico de la preforma. -----	52
3.6 Calcinación de la preforma. -----	52
3.7 Fabricación de metales celulares. -----	53
3.8 Caracterización estructural de los metales celulares obtenidos. -----	55
 <b>CAPÍTULO 4 Resultados y discusión.</b> -----	 57
4.1 Caracterización Macroestructural. -----	57
4.11 Análisis cualitativo de la macroestructura mediante inspección visual. -----	57
4.12 Topología y conectividad de celda. -----	58
4.13 Porosidad. -----	63
4.14 Grado de expansión. -----	68
4.15 Defectos macroestructurales. -----	71
4.16 Propiedades físicas obtenidas a partir de la caracterización macroestructural. -----	72
4.2 Caracterización mesoestructural. -----	77
4.21 Forma de celda. -----	77
4.22 Características dimensionales de celda (Tamaño de celda, pared y borde). -----	79
4.23 Homogeneidad. -----	84
4.24 Variación del tamaño de celda con respecto al promedio de tamaño de partícula espaciadora.-----	85
4.25 Variación del tamaño de celda con respecto al promedio de tamaño de celda. -----	88
4.26 Defectos mesoestructurales. -----	90
4.3 Caracterización microestructural. -----	92
4.31 Interpretación metalográfica de la microestructura del sólido celular. -----	92
4.32 Análisis químico de intermetálico. -----	94
4.33 Defectos microestructurales. -----	96

<b>CAPÍTULO 5 Conclusiones.</b> .....	98
5.1 Macroestructura. ....	98
5.11 Análisis cualitativo de la macroestructura mediante inspección visual. ....	98
5.12 Topología y conectividad de celda. ....	98
5.13 % Porosidad. ....	98
5.14 Grado de expansión. ....	98
5.15 Defectos macroestructurales. ....	98
5.16 Propiedades. ....	99
5.2 Mesoestructura. ....	99
5.21 Forma de celda. ....	99
5.22 Tamaño de celda promedio. ....	100
5.23 Homogeneidad. ....	100
5.24 Variación del tamaño de celda con respecto al tamaño de partícula espaciadora. -	100
5.25 Variación del tamaño de celda con respecto a su tamaño promedio.....	100
5.26 Tamaño de pared y borde de celda. ....	101
5.27 Defectos mesoestructurales. ....	101
5.3 Microestructura. ....	101
5.31 Interpretación metalográfica de la estructura del sólido celular. ....	101
5.32 Análisis químico de la microestructura. ....	102
5.33 Defectos microestructurales. ....	102
<b>CAPITULO 6 REFERENCIAS.</b> .....	103

## Índice de figuras

- **Figura 1** Tipo de celda para 3 metales celulares comerciales (Alporas, Alulight y ERG). 15
- **Figura 2** Límite de densidad relativa que distingue un sólido celular de un poroso. 16
- **Figura 3** Estructura de una celda cerrada. 16
- **Figura 4** Clasificación de Banhart. 18
- **Figura 5** Técnica de unión en un compuesto de metal celular AFS. 23
- **Figura 6** Proceso de espumado líquido por inyección de gas. 33
- **Figura 7** Proceso Gasar por aplicación de H<sub>2</sub> a presión. 34
- **Figura 8** Proceso de espumado con agente espumante. 35
- **Figura 9** Proceso de colado de metal fundido sobre preforma de polímero. 36
- **Figura 10** Proceso de infiltración de metal líquido sobre preforma removible mediante aplicación de presión y vacío. 37
- **Figura 11** Proceso de infiltración por gravedad y presión hidrostática. 38
- **Figura 12** Fotografía del corte transversal de una espuma metálica (a), estructura de una esponja metálica (b) y defecto macroestructural de una esponja metálica (c). 43
- **Figura 13** Método de preparación de muestras para la adquisición de imágenes a partir del corte en 2D. 44
- **Figura 14** Adquisición de imágenes con el microscopio estereoscópico y escáner. 44
- **Figura 15** Binarización de la imagen para el análisis de su estructura. 44
- **Figura 16** Análisis de imagen para el estudio de paredes y bordes en un sólido celular. 45
- **Figura 17** Preparación metalográfica del corte en 2D de un metal celular. 46
- **Figura 18** Micrografía por microscopía óptica y MEB. 46
- **Figura 19** Dimensiones del molde. 49
- **Figura 20** Preparación metalográfica. 56
- **Figura 21** Microscopios empleados para la adquisición de imágenes de la estructura del metal celular. 56
- **Figura 22** Cara superior de los sólidos celulares obtenidos. 57

• <b>Figura 23</b> Topología y conectividad para determinada morfología de celda	59
• <b>Figura 24</b> Imágenes de la superficie de las muestras.	61
• <b>Figura 25</b> Esqueleto de la estructura y bordes de conectividad de celda.	62
• <b>Figura 26</b> Imágenes retocadas - binarizadas del corte transversal de muestras representativas de la cara superior de cada probeta obtenida y detección de áreas para su análisis.	64
• <b>Figura 27</b> Defectos macroestructurales para los metales celulares del caso A.	71
• <b>Figura 28</b> Comparación de la forma de partícula con respecto a la forma de celda.	78
• <b>Figura 29</b> Estructura para cada tipo de celda (a) y ejemplo de medición de borde y pared para una muestra con morfología de celda angular-alargada (b).	81
• <b>Figura 30</b> Cuadro comparativo de las imágenes obtenidas con el microscopio estereoscópico para el metal celular correspondiente.	90
• <b>Figura 31</b> Micrografías a 100X donde se incluye el borde de celda para determinada morfología y caracterización de la microestructura a 500 X con el microscopio metalográfico.	93
• <b>Figura 32</b> Zona de microanálisis para el intermetálico en las micrografías para determinada morfología de celda.	95
• <b>Figura 33</b> Defectos microestructurales en las muestras para una morfología específica.	97

### Índice de tablas

• <b>Tabla 1</b> Tipos de propiedades de un metal celular.	18
• <b>Tabla 2</b> Intervalo de propiedades físicas y mecánicas de tres metales celulares comerciales.	19
• <b>Tabla 3</b> Desarrollo tecnológico a través del tiempo de los metales celulares.	26
• <b>Tabla 4</b> Compañías manufactureras de metales celulares.	28
• <b>Tabla 5</b> Tipos de partículas espaciadoras y sus características para el proceso vía líquida por medio de infiltración.	39

- **Tabla 6** Tipos de mezclas para la fabricación de partículas espaciadoras y sus características para el proceso vía líquida por medio de infiltración. 40
- **Tabla 7** Composición química de la aleación hipoeutéctica obtenida por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) y composición química nominal de la aleación. 48
- **Tabla 8** Características físicas de las partículas espaciadoras utilizadas para la preforma. 50
- **Tabla 9** Composición de la mezcla ternaria sal-agua-componente orgánico. 52
- **Tabla 10** Análisis de la topología y conectividad para determinada morfología de celda. 60
- **Tabla 11** Ejemplo de dato arrojados por el programa y construcción de tablas de frecuencia. 65
- **Tabla 12** % de Porosidad para cada muestra con determinada morfología de celda. 66
- **Tabla 13** Análisis del % porosidad con respecto al valor promedio de área de celda. 68
- **Tabla 14** Grado de expansión para cada una de las muestras con determinada morfología de celda. 70
- **Tabla 15** Análisis del grado de expansión (G) con respecto al valor promedio de área de celda. 71
- **Tabla 16** Densidad relativa para cada una de las muestras con determinada morfología de celda. 73
- **Tabla 17** Análisis de la densidad relativa con respecto al valor promedio de área de celda. 74
- **Tabla 18** Densidad absoluta de los 3 metales celulares. 76
- **Tabla 19** Análisis de la densidad absoluta con respecto al valor promedio de área de celda. 77
- **Tabla 20** Tamaño de celda promedio y tamaño de partícula espaciadora. 79
- **Tabla 21** Análisis de la topología y conectividad para determinada morfología de celda. 80
- **Tabla 22** Desviación estándar (s) del tamaño promedio de celda para una morfología específica. 81

- **Tabla 23** Mediciones de borde y pared para un valor máximo y mínimo de % de Frecuencia para determinada morfología de celda. 84
- **Tabla 24** Coeficiente de variación  $cv$  del tamaño promedio de celda para cada morfología. 85
- **Tabla 25** Datos estadísticos y %Probabilidad de encontrar celdas con diferencia en tamaño no mayor al 10 % con respecto al tamaño promedio de partícula espaciadora. 86
- **Tabla 26** Datos estadísticos y % Probabilidad de encontrar celdas con diferencia en tamaño no mayor al 10 % con respecto al tamaño promedio de celda. 88
- **Tabla 27** Análisis de defectos meso estructurales para cada determinada morfología. 91
- **Tabla 28** Composición química de intermetálico para determinada morfología de celda. 95

### Índice de gráficas

- **Gráfica 1** Curva de compresión elástico - plástica de tres metales celulares comerciales (ERG, Alulight y Alporas). 21
- **Gráfica 2** Distribución de la densidad a lo largo de los ejes x, y. 45
- **Gráfica 3** Diagrama de fases al equilibrio Al-Si. 47
- **Gráfica 4** Análisis EDX de la composición química de la aleación hipoeutéctica. 48
- **Gráfica 5** Diagrama ternario de Goodall. 51
- **Gráfico 6** Periodo de tratamiento térmico de calcinación de la preforma. 52
- **Gráfica 7** %Porosidad vs. Área en  $mm^2$  para el poro cúbico. 65
- **Gráfica 8** %Porosidad vs. Área en  $mm^2$  para el poro angular-alargado. 66
- **Gráfica 9** %Porosidad vs. Área en  $mm^2$  para el poro esférico. 66
- **Gráfica 10** Grado de expansión vs. Área  $mm^2$  para el poro cúbico. 69
- **Gráfica 11** Grado de expansión vs. Área  $mm^2$  para el poro angular-alargado. 69
- **Gráfica 12** Grado de expansión vs. Área  $mm^2$  para el poro esférico. 69
- **Gráfica 13** Densidad Relativa vs. Área  $mm^2$  para el poro cúbico. 72
- **Gráfica 14** Densidad Relativa vs. Área  $mm^2$  para el poro angular-alargado. 73
- **Gráfica 15** Densidad Relativa vs. Área  $mm^2$  para el poro esférico. 73
- **Gráfica 16** Densidad Absoluta vs. Área  $mm^2$  para el poro cúbico. 75

• <b>Gráfica 17</b> Densidad Absoluta vs. Área mm <sup>2</sup> para el poro angular-alargado.	75
• <b>Gráfica 18</b> Densidad Absoluta vs. Área mm <sup>2</sup> para el poro angular-alargado.	76
• <b>Gráfica 19</b> % Frecuencia vs. Borde (mm) para la celda cúbica.	82
• <b>Gráfica 20</b> % Frecuencia vs. Borde (mm) para la celda angular-alargada.	82
• <b>Gráfica 21</b> %Frecuencia vs. Pared (mm) para la celda angular- alargada.	82
• <b>Gráfica 22</b> %Frecuencia vs. Pared (mm) para la celda esférica.	83
• <b>Gráfica 23</b> Distribución de celdas con forma cúbica.	86
• <b>Gráfica 24</b> Distribución de celdas con forma angular-alargada.	87
• <b>Gráfica 25</b> Distribución de celdas con forma esférica.	87
• <b>Gráfica 26</b> Distribución de celdas con forma cúbica.	88
• <b>Gráfica 27</b> Distribución de celdas con forma angular-alargada.	89
• <b>Gráfica 28</b> Distribución de celdas con forma esférica.	89
• <b>Gráfica 29</b> Análisis EDX de la composición química del intermetálico para las 3 muestras de diferente morfología.	96

### Índice de esquemas

• <b>Esquema 1</b> Métodos de caracterización de metales celulares.	22
• <b>Esquema 2</b> Multifuncionalidad de un metal celular.	24
• <b>Esquema 3</b> Tipo de aplicación de un metal celular con respecto al tipo de celda.	25
• <b>Esquema 4</b> Clasificación de los procesos de fabricación de metales celulares a partir del estado de agregación del metal y en disolución.	31
• <b>Esquema 5</b> Proceso de infiltración por gravedad para la obtención de un metal de celda abierta y cerrada.	54

### Índice de diagrama de flujo

• <b>Diagrama de flujo 1</b> Técnica de infiltración de metal líquido sobre preforma removible.	53
---	----

## INTRODUCCIÓN

La tecnología de materiales está en continuo desarrollo y progreso, el tetraedro de los materiales nos muestra una amplia perspectiva de los diversos campos disciplinarios en donde interviene [24]. Para utilizar un determinado material es indispensable elegirlo de acuerdo con el funcionamiento que se le asigne. Hoy en día se cuenta con una gran variedad de materiales, sin embargo las especificaciones de las propiedades requeridas son cada día más exigentes y es necesario modificarlas constantemente dependiendo del sector que se vaya a beneficiar, tal es el caso de los materiales metálicos, su alta demanda ha demostrado en diversos sectores económicos del país el grado de utilidad del material; su producción y manufactura ha permitido tener un campo amplio de aplicaciones, el sector económico con mayor repercusión es el de transporte por las propiedades de resistencia y rigidez aportadas con respecto a otros materiales. Sin embargo, la creciente necesidad de fabricar vehículos con el menor peso posible ha dificultado su aplicación debido al alto peso específico que presenta, por tal motivo los investigadores han realizado una búsqueda exhaustiva de nuevos materiales y métodos de fabricación que permitieran obtener materiales con mayor rigidez y bajo peso específico [23].

Una alternativa a dicho problema surgió con la patente de Sosnick como resultado de la fabricación de espumas metálicas en el año de 1948 [2,9,20], las espumas metálicas son sólidos de material metálico cuya estructura está formada por compartimientos que conjuntan las propiedades de un sólido celular con las propiedades intrínsecas de un material metálico [4], incluso este tipo de estructura se puede encontrar en la naturaleza con otro tipo de materiales como el hueso de cualquier animal, el bambú, la madera entre otros, a partir de éste descubrimiento surgieron nuevos métodos para su fabricación, en los años 60's y 70's se realizaron espumas metálicas a partir de metal fundido, sin embargo los procesos no fueron suficientemente optimizados [1], ésta investigación resurgió en los años 80 y 90's en varias industrias e instituciones del mundo principalmente enfocado en el estudio de espumas metálicas base Al [22].

Actualmente existen 150 instituciones enfocadas principalmente en su producción y caracterización [27], varias instalaciones de producción a pequeña escala de espumas de aluminio se encuentran en Japón, Canadá, Eslovaquia, Austria y Alemania, en México se encuentra aún en vías de desarrollo; la producción de espumas de níquel, hierro y plomo está aún en fase de investigación [20].

Comúnmente suelen denominarse espumas metálicas a aquellos materiales metálicos que contienen vacíos. En un sentido más estricto es conveniente mencionar que las espumas metálicas son un caso particular de metales celulares, ya que existen espumas, esponjas y materiales porosos metálicos.

Para la fabricación de metales celulares existen diversas vías que permiten obtener diferentes estructuras dependiendo de la morfología, tamaño de celda y topología, que están relacionados con las propiedades y el comportamiento final del material obtenido [4]; la presente tesis está enfocada en el estudio de la estructura de metales celulares de Al-Si fabricadas por vía líquida mediante la variación de algunos parámetros de la técnica de infiltración por gravedad sobre preformas solubles.

### **Objetivo General**

Obtener y caracterizar diferentes estructuras de metales celulares de Al-Si mediante la modificación de determinados parámetros tales como: morfología de replicación, tamaño de celda, material de la partícula espaciadora, modo de infiltración de metal fundido sobre la preforma, medio de enfriamiento del metal celular fabricado y tipo de sistema del molde metálico a partir de la técnica de infiltración de metal líquido por gravedad e identificar el efecto del precalentamiento de la preforma en su estructura.

### **Objetivos Particulares**

- Realizar la caracterización estructural de los metales celulares de Al-Si fabricados a partir de los diferentes niveles que conforman la estructura mediante el análisis de imagen óptica.
- Identificar el efecto de la modificación de los parámetros en la formación de sólidos celulares empleando la técnica de infiltración por gravedad utilizando el análisis de imagen óptica.

## CAPÍTULO 1 Marco teórico

### 1.1 Sólido celular

Definición: La palabra célula proviene del latín cella que significa “pequeño compartimiento, espacio cerrado”, un sólido celular es un material compuesto por un conjunto de compartimentos denominadas celdas ya sea de tipo cerrado, abierto o mixto, cuentan con una determinada morfología, están dispuestas en una red unidas entre sí y forman mallas bidimensionales, tridimensionales o mixtas [25].

#### 1.11 Tipo de celda

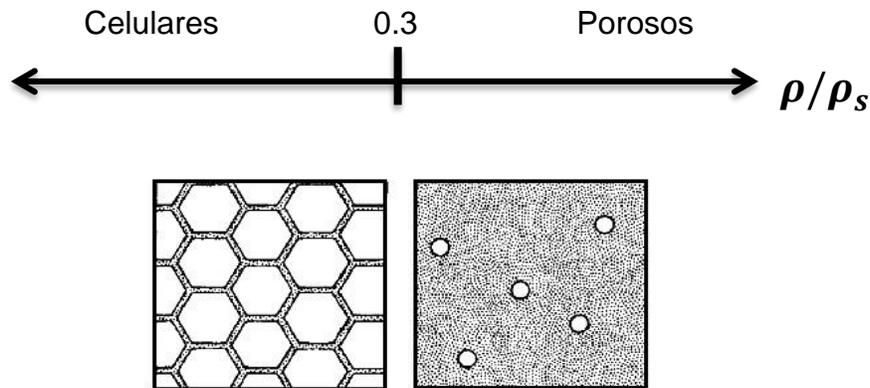
La estructura de la malla del sólido celular, como ya se había mencionado, puede ser de tipo bidimensional, tridimensional o mixta, dicha estructura presenta un determinado tipo de celdas, las cuales se describen a continuación en la Figura 1.

- Celda abierta:** Tipo de estructura en donde las celdas están interconectadas entre sí mediante brazos sólidos denominados bordes.
- Celda cerrada:** Tipo de estructura en donde los poros están aislados unos de otros, no permiten el acceso a su superficie interna y no interactúan entre sí. El sólido de la celda rodea a todo el volumen de espacio vacío, a la superficie con menor espesor se le denomina pared, mientras que el borde es la sección de mayor espesor.
- Celda mixta:** Tipo de estructura en donde las celdas están parcialmente interconectadas.



**Figura 1** Tipo de celda para 3 metales celulares comerciales (Alporas, Alulight y ERG).

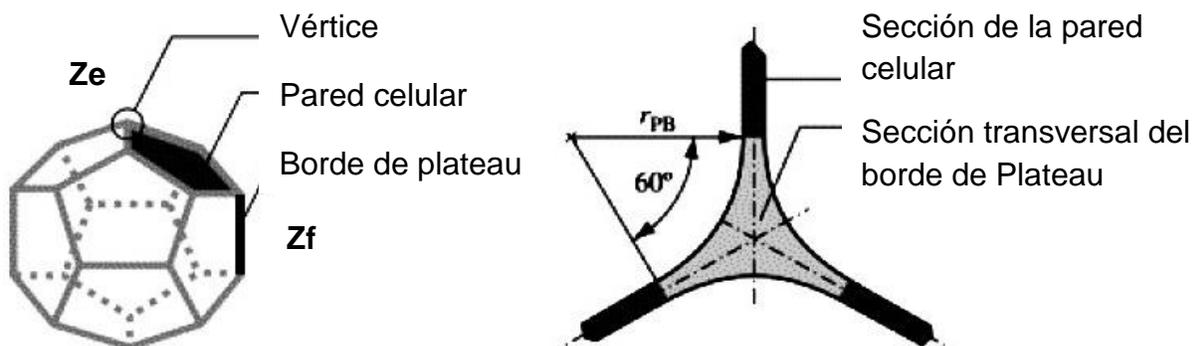
En la estructura de un sólido celular la densidad relativa va aumentando conforme las celdas se van aislando entre sí hasta que el valor de la densidad relativa es mayor a 0.3, a esta estructura se le denomina sólido poroso.



**Figura 2** Límite de densidad relativa que distingue un sólido celular de un poroso [25].

### 1.12 Estructura de una celda

Se define como celda a cualquier cuerpo poligonal que rodea un espacio vacío, las características más importantes de una celda son su geometría y tamaño, mismos que están definidos por los elementos de la estructura de la celda. Desde un punto de vista geométrico el elemento para una celda cerrada consta de vértices en donde se unen los bordes, los cuales rodean las paredes cerrando y confinando un determinado volumen de espacio vacío de la celda. El número de bordes que se unen en un vértice es la conectividad de bordes  $Z_e$  y el número de paredes que se unen en un borde es la conectividad de paredes  $Z_f$  (Ver figura 3). Con respecto a los elementos de la estructura de celda abierta se consideran los elementos que conforman a una celda cerrada a excepción de las paredes de celda ya que no confinan ningún espacio vacío [5].



**Figura 3** Estructura de una celda cerrada [5].

### 1.13 Clasificación

Los sólidos celulares se clasifican de acuerdo con el mapa conceptual que se muestra a continuación:

**Sólido celular**

**Origen:** Natural (Paneles de abeja, madera, esponja, corcho, coral y hueso) o artificial (Espumas metálicas, poliuretano, polietileno, pan, entre otros [19,22]).

**Material base:** Polimérico, cerámico, metálico, etc.

**Estructura de malla:** Bidimensional, tridimensional o mixta.

### 1.2 Sólido celular metálico

Definición: Sólido celular de material metálico compuesto por un conjunto de compartimentos denominados celdas que están dispuestas en una red unidas entre sí formando mallas bidimensionales, tridimensionales o mixtas con un determinado tipo de celda.

#### 1.21 Clasificación

Banhart los clasificó con base a la interconexión de las celdas formadas en el material metálico [7] de la siguiente manera como se muestra en la figura 4:

- Metal celular

El metal celular se conforma de células definidas. Los límites de estas células son de metal sólido y en el interior son espacios vacíos. En un sistema ideal las células individuales están separadas una de la otra por metal, sin embargo, en la realidad esto no sucede ya que depende del proceso de fabricación y de las imperfecciones originadas.

- Esponja metálica

En una esponja, los espacios vacíos son llenados con metal formando una red continua, coexistiendo una red de espacios vacíos los cuales también están interconectados por celdas abiertas o esferas huecas sinterizadas.

- Espuma metálica sólida

Las espumas sólidas se forman debido a la solidificación del metal líquido con burbujas de gas que están finamente dispersas, las formas de las celdas son cerradas, redondas o polihedrales y están separadas una de otra por una capa delgada.

- Metal poroso

Metal celular en donde las celdas cerradas o poros están normalmente aislados uno de otro, producto de gases atrapados y se caracterizan por tener una superficie lisa.



**Figura 4** Clasificación de Banhart [7].

## 1.22 Propiedades

En la tabla 1 nos muestra las diversas propiedades que presentan los metales celulares.

**Tabla 1** Tipos de propiedades de un metal celular [23].,

Tipos de propiedades	Propiedades características
Físicas	*Densidad baja.
	*Permeabilidad alta.
	Tamaño de celda y tipo de celda (abierta, mixta y cerrada).
	*Peso específico bajo.

## Continuación de la tabla

<b>Mecánicas</b>	Resistencia a la compresión alta - aumenta la densidad, aumenta la resistencia.
	*Resistencia al impacto alta, con densidades intermedias depende de la densidad.
	*Rigidez alta (amortiguación). Módulo de elasticidad alto a baja densidad.
<b>Eléctricas</b>	Buena conductividad eléctrica minimiza la penetración de ondas electromagnéticas.
<b>Térmicas</b>	Alta transferencia de calor, baja capacidad térmica, buen aislante térmico por la baja cantidad de aire almacenado en su interior.
<b>Magnéticas</b>	Protector electromagnético. Permeabilidad magnética baja, convierte la energía magnética en calor.
<b>Acústicas</b>	Eficiente absorbente de ruidos y de vibraciones. Aislamiento acústico.
<b>Reciclabilidad</b>	Permite nuevamente utilizar el metal con el cual se fabricó la espuma metálica para la producción de nuevas.

\*En comparación con el sólido metálico base.

Ashby y otros se dieron a la tarea de encontrar intervalos de propiedades mecánicas nominales para algunos metales celulares comerciales y de esta manera han creado reglas para su determinación (Ver tabla 2) [25].

**Tabla 2** Intervalo de propiedades físicas y mecánicas de tres metales celulares comerciales [25].

<b>Metal celular</b>	<b>ERG</b>	<b>Alulight</b>	<b>Alporas</b>
<b>Material</b>	Al	Al	Al
<b>Tipo de celda</b>	Abierta	Cerrada	Cerrada
<b>Tamaño de celda, <math>d</math> (mm)</b>	2,5-4,5	4,2	4,5
<b>Densidad relativa <math>\rho/\rho_s</math></b>	0,05-0,1	0,1-0,35	0,08-0,1
<b>Módulo de Young, <math>E</math> (Gpa)</b>	0,06-0,3	1,7-12	0,4-1
<b>Módulo de cortadura, <math>G</math> (Gpa)</b>	0,02-0,1	0,6-5,2	0,3-0,35

### Continuación de la tabla

<b>Resistencia a la compresión, <math>\sigma_r</math> (Mpa)</b>	0,9-3,0	1,9-14,0	1,3-1,7
<b>Límite elástico, <math>\sigma_y</math> (Mpa)</b>	0,9-2,7	2,0-20	1,5-1,8
<b>Resistencia a la tracción, <math>\sigma_t</math> (Mpa)</b>	1,9-3,5	2,2-3,0	1,6-1,9
<b>Densidad relativa <math>\rho/\rho_s</math></b>	0,05-0,1	0,1-0,35	0,08-0,1
<b>Densidad <math>\rho</math> (mg/m<sup>3</sup>)</b>	0,16-0,25	0,3-1,0	0,2-0,25
<b>Módulo de Young, <math>E</math> (Gpa)</b>	0,06-0,3	1,7-12	0,4-1

### 1.23 Curva de compresión

Para obtener las propiedades mecánicas se realiza un ensayo destructivo de compresión en donde se obtiene una curva esfuerzo-deformación y se divide en 3 etapas.

#### **a) Etapa de deformación lineal**

El material presenta elasticidad lineal a muy bajas deformaciones.

#### **b) Etapa de colapso (Plateau)**

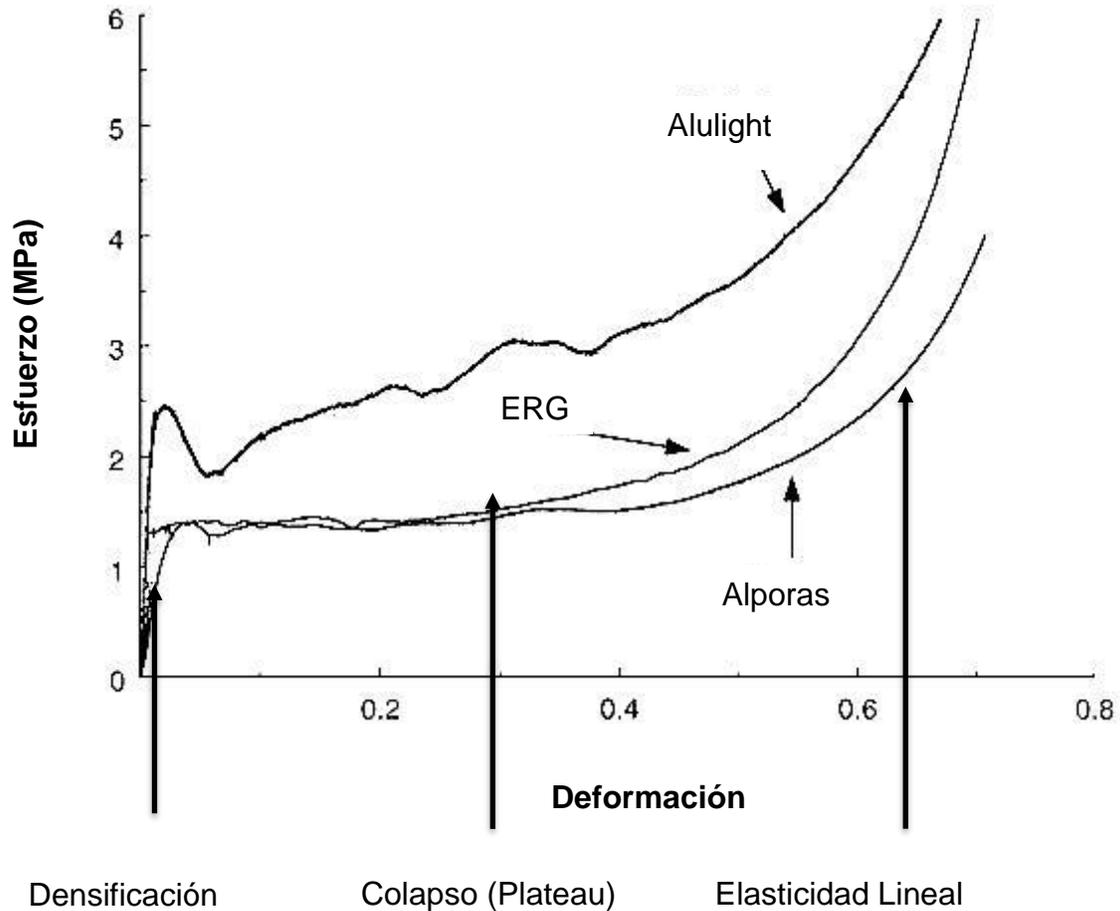
Se origina deformación a esfuerzo cuasiestático en donde los bordes de celdas se curvan, ceden o se rompen, también se le denomina zona de colapso, la forma de colapso de las espumas metálicas de aluminio depende del tratamiento térmico al que se sometieron, así como de la composición química de la aleación.

#### **c) Etapa de densificación**

Se presenta un régimen de densificación tras producirse el agrupamiento de celdas y un incremento del esfuerzo.

Para un metal celular de celda cerrada existe un ligero incremento en el esfuerzo con la deformación plástica por los esfuerzos de las paredes de celda.

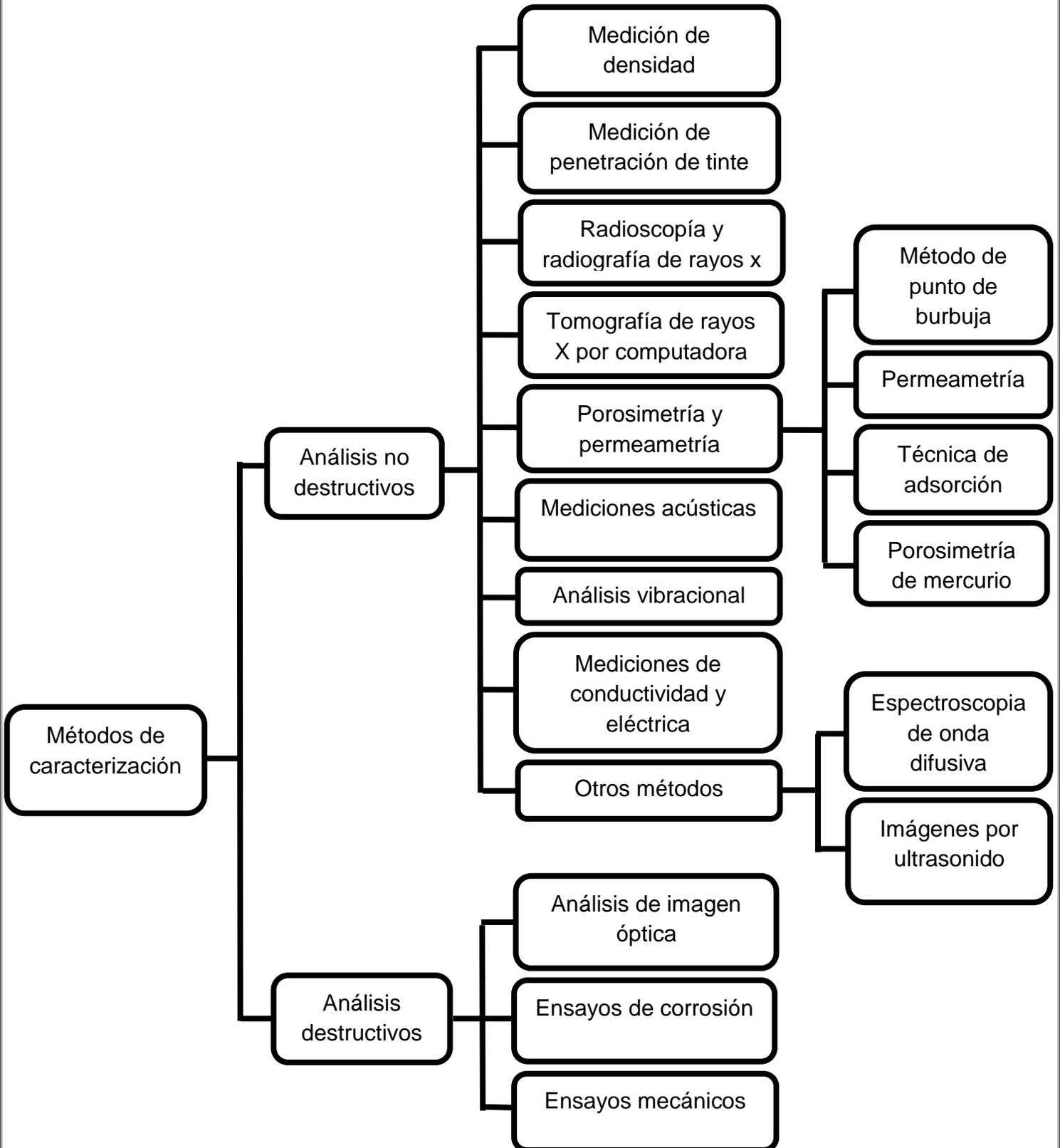
**Gráfica 1** Curva de compresión elástico - plástica de tres metales celulares comerciales (ERG, Alulight y Alporas) [25].



### 1.3 Caracterización de propiedades

Para caracterizar los metales celulares se utilizan diversas técnicas de análisis destructivos y no destructivos, la elección de las técnicas dependerá en gran medida del proceso de fabricación utilizado, los métodos de caracterización se resumen en el esquema 1 [2,4].

Esquema 1 Métodos de caracterización de metales celulares [4].

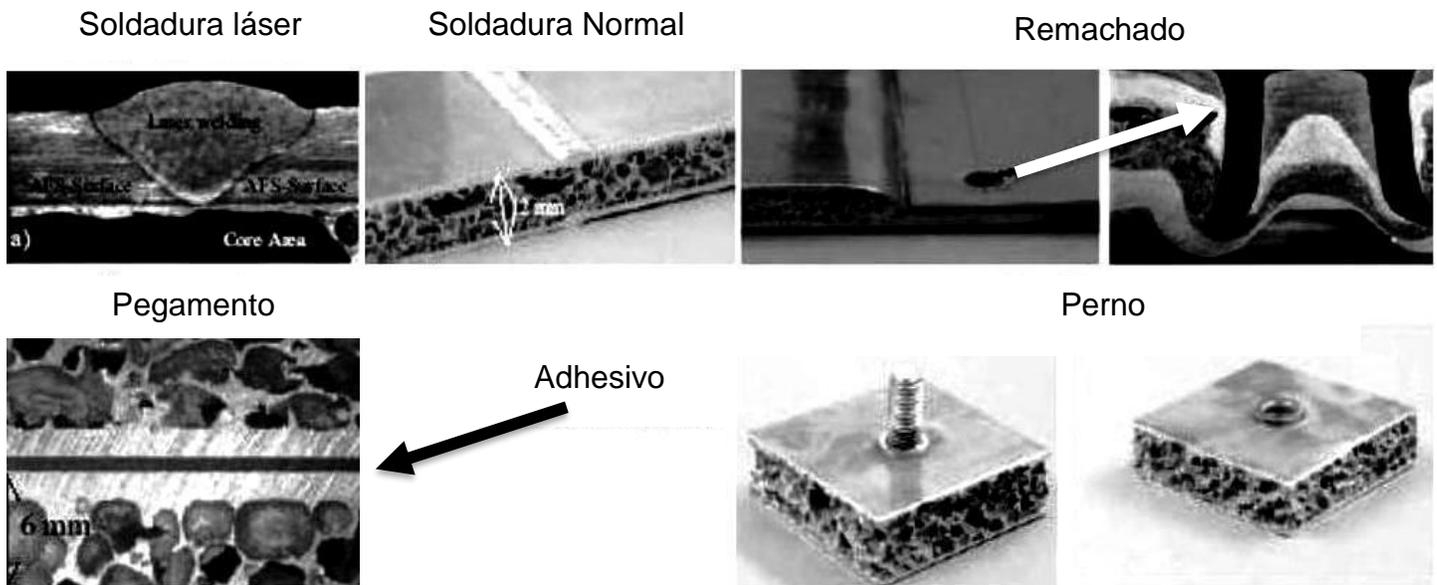


## 1.4 Compuestos de metales celulares

La combinación de metales celulares con otros materiales permite adaptar las propiedades del metal celular con las de otro tipo de material. La técnica más simple es llenar las secciones huecas con espuma, las estructuras tipo sándwich contienen un núcleo de espuma metálica y una variedad de hojas de la cara [27].

### 1.41 Materiales compuestos de metal celular AFS (Estructura tipo sándwich).

Existen varias técnicas para que el metal celular quede integrado y fijo a las estructuras huecas. Se ha demostrado que se obtiene mejor amortiguamiento al utilizar pegamento de tipo industrial [30], las técnicas de unión más utilizadas se muestran en la Figura 5.



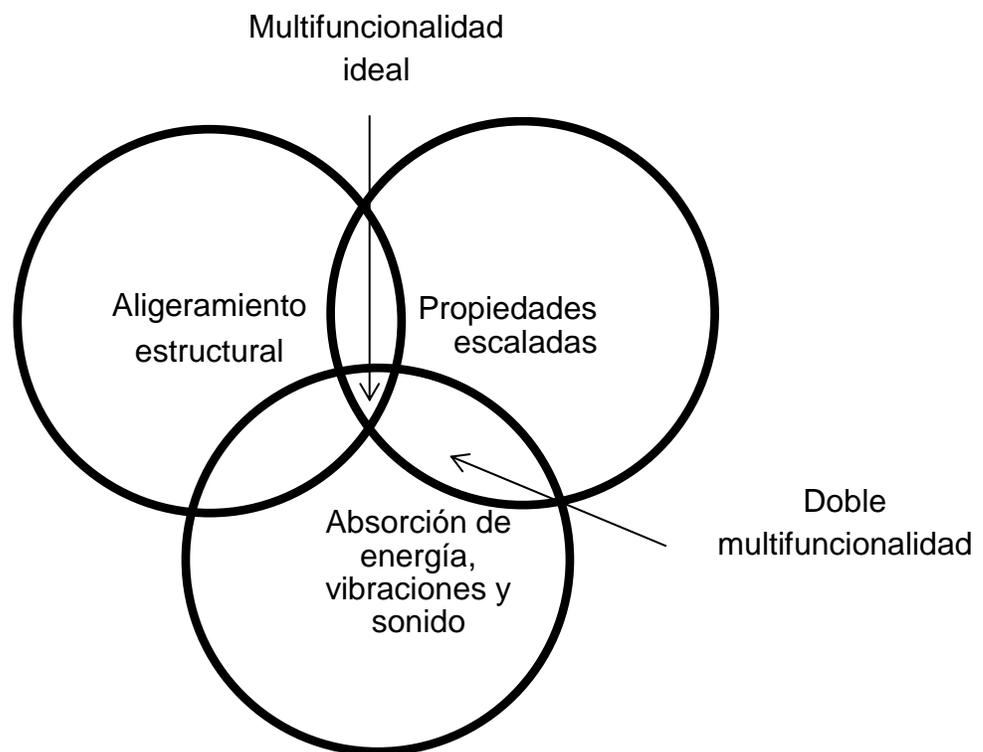
**Figura 5** Técnica de unión en un compuesto de metal celular AFS.

## 1.5 Aplicaciones de los metales celulares

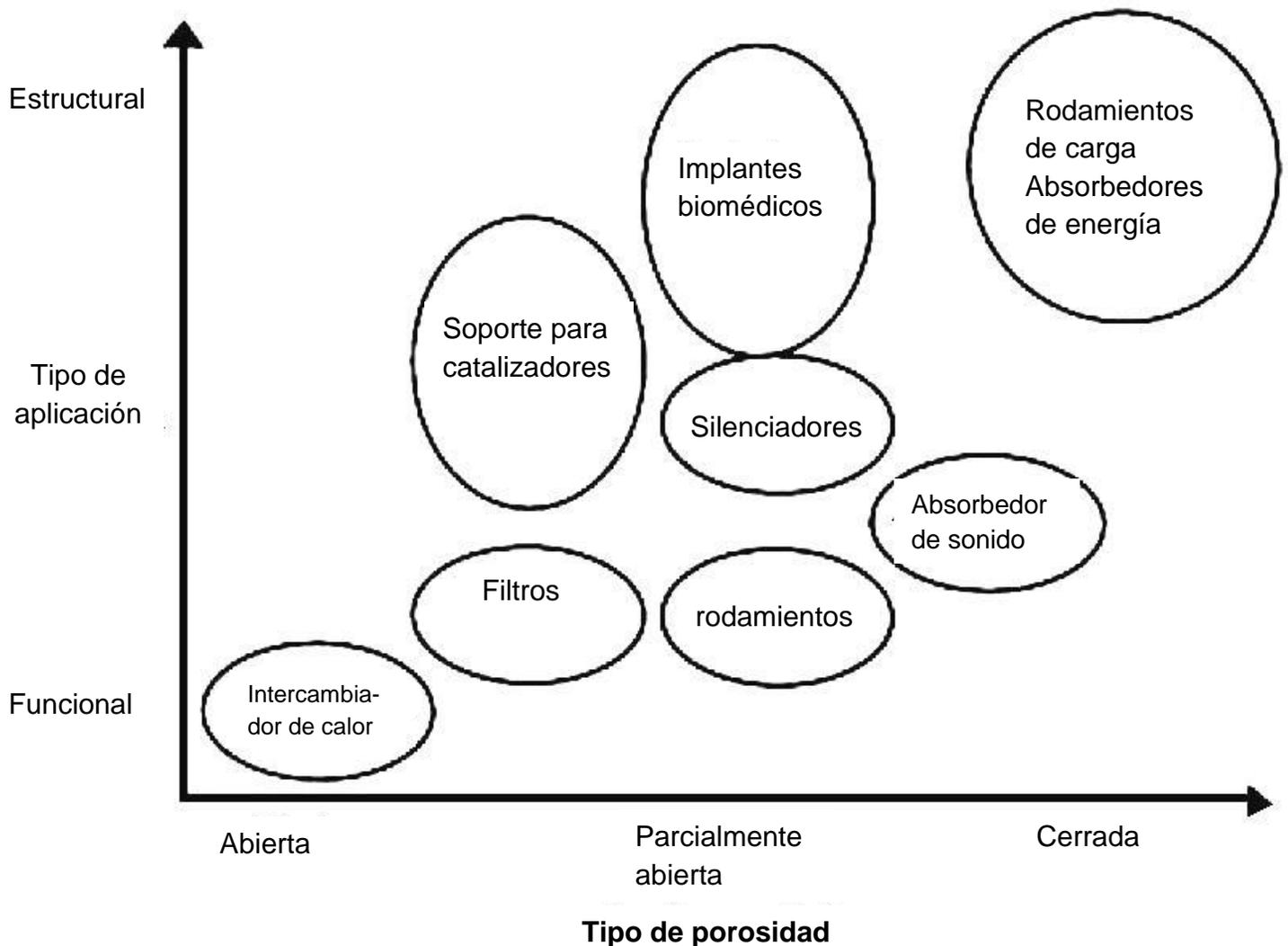
La principal ventaja de un material celular frente a un material metálico base convencional es su alta multifuncionalidad permitiendo estructuras más ligeras, un rango más amplio de propiedades como el de la densidad, así como el origen de nuevas propiedades denominadas “propiedades emergentes”,

esto como resultado de la combinación de las propiedades del material metálico base con la estructura formada por espacios vacíos del metal celular, los metales celulares se pueden emplear para la atenuación de vibraciones o impactos, para aislamiento acústico entre otras aplicaciones. En los esquemas 2 y 3 muestran la multifuncionalidad que presentan los materiales celulares, así como las diversas aplicaciones ya sea funcional o estructural dependiendo del tipo de celda que presenta el metal celular [4,25].

**Esquema 2** Multifuncionalidad de un metal celular.



**Esquema 3** Tipo de aplicación de un metal celular con respecto al tipo de celda.



### 1.6 Desarrollo cronológico de los metales celulares

El desarrollo de los metales celulares a través de la historia ha originado la obtención de métodos cada vez más innovadores con el fin de disminuir los costos de fabricación, que sea sustentable con el medio ambiente junto con la mejoría de la calidad de la estructura del metal celular, a continuación, se muestra una cronología de los avances más representativos a través del tiempo con respecto a su fabricación [12] (Ver tabla 3).

**Tabla 3** Desarrollo tecnológico a través del tiempo de los metales celulares

No.	Año	Institución o empresa	Acontecimiento histórico
1	77dC	Plinio el viejo quien fue el que informó.	Primera referencia de metales porosos hechos por el hombre en la literatura llamado granulación utilizado por los orfebres etruscos para producir piezas de joyería fina [4].
2	1920	Los metales porosos comenzaron a utilizarse para aplicaciones de ingeniería.	Polvo sinterizado y mallas fueron los primeros metales porosos disponibles y usados en ingeniería comercialmente [4].
3	1948	Benjamín Sosnick.	Patente y primer registro de espumas metálicas, "Proceso para hacer espumas con masa de metal"
5	1959	United Aircraft Corporation.	Desarrollo de un método para hacer espumas a partir de polvo metálico mezclado con un producto formador de gas por descomposición a alta temperatura.
6	1963	Hardy y Peisker.	Desarrollo de un método mediante la adición de agentes espumantes directamente al metal semifundido mejorando su estructura.
9	2000	M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson y H.N.G. Wadley.	Publicación del catálogo "Metal Foams: A Design Guide", donde se presentan las propiedades mecánicas de las espumas metálicas.
10	2000	Batawros A., Bart-Smith H., Evans A.	Publicación del trabajo "Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam", en el cual se realizaron ensayos de compresión cuasiestáticos donde se obtuvieron mediciones de deformación superficial que indicaba la existencia de plasticidad localizada a tensiones por debajo del límite elástico de la espuma metálica, lo cual tiende a reducir la pendiente de su curva tensión-deformación, modificando su módulo de Young.

## Continuación de tabla

11	2001	Banhart.	Banhart "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams".
12	2002	Degischer H., Kriszt B.	En el manual de metales celulares "Handbook of Cellular Metals" se proponen relaciones para la estimación de propiedades mecánicas de las espumas de aluminio a partir de su densidad relativa.
13	2005	Casolco, Torres Villaseñor G., Gomez A. López-Para M.	Publicación del artículo "Influencia del tamaño de grano del NaCl en el procesamiento de espumas de Zn-Al-Cu"
14	2005	Patricia Fernández Morales	Ha realizado diversas publicaciones referentes a la fabricación, caracterización de propiedades mecánicas y de la microestructura, entre otros de esponjas metálicas base Al. La tesis doctoral que desarrolló llevó por nombre "Obtención y evaluación de esponjas de aleación de Al fabricadas mediante preformas solubles bajo presión de vacío".
15	2012	Irausquín I.	Tesis en donde se presenta el estudio y análisis del comportamiento mecánico a compresión de una espuma de Al de celda cerrada a diferentes velocidades de deformación.
16	2014	Ignacio Figueroa Vargas	Ha realizado aportaciones a la comunidad científica y tecnológica, el cambio climático y la contaminación ambiental lo han motivado para diseñar nuevos procesos de producción de espumas metálicas partiendo de materiales ligeros como el Al y el Mg para su aplicación como captadores de CO <sub>2</sub> .

## 1.7 Empresas, centros de investigación y universidades que producen metales celulares.

En la actualidad, existen más de 12 empresas distribuidas por Europa, Japón y Norteamérica que comercializan metales celulares, así como también existen diversos centros de investigación y universidades investigando el desarrollo de nuevos procesos, nuevas aplicaciones, caracterización y modelación ya sea de los procesos o de los materiales obtenidos. Dichas entidades se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4** Compañías manufactureras de metales celulares [12].

<b>Proceso de producción</b>	<b>a) Compañía</b>	<b>b) Denominación comercial/proceso</b>
<b>1) Espumación directa del fundido por inyección de gas.</b>	Cymat Aluminium Corporation, Canadá	Cymat
	HKB-LKR, Austria	Metcomb
	Foamtech, Korea	Lasom
	Sperre, Noruega	
<b>2) Espumación directa del fundido por adición de agente espumante.</b>	ShinkoWireCo, Japón	Alporas
	Cambridge University, EE. UU.	Formgrip
<b>3) Fundición de precisión (investment casting).</b>	IPP Alemnia	
	M-Pore, Alemania	
	ERG, Oakland, USA.	Duocel
<b>4) Infiltración en moldes solubles.</b>	Instituto de Tecnología Federal de Suiza	
	Nortwestern Univesity, EE.UU.	
<b>5) Reacción eutéctica sólido-gas.</b>	DMI, Ucrania	Gasar
<b>6) Infiltración del metal líquido en molde de esferas huecas.</b>	Instituto Tecnológico de Georgia, EE. UU.	Syntactic

**Continuación de la tabla**

<p><b>7) Adición de agente por espumante a precursores producidos PM.</b></p>	<p>Mepura, Austria Gleich-IWE, Alemania Fraunhofer Institute, Bremen, Alemania Neuman, Austria Schunk--Honsel, Alemania</p>	<p>Alulight  Foaminal  Alufoam</p>
<p><b>8) Sinterización de polvos/fibras.</b></p>	<p>GKN Sinter Filter GMBH</p>	
<p><b>9) Sinterización de polvos.</b></p>	<p>Porvair Advanced Materials, EE.UU.</p>	<p>Metpor</p>
<p><b>10) Sinterización-disolución de moldes solubles.</b></p>	<p>Liverpool University, Inglaterra</p>	<p>DSP</p>
<p><b>11) Sinterización de esferas huecas metálicas.</b></p>	<p>IFAM,Bremen, Alemania</p>	
<p><b>12) Técnicas de deposición.</b></p>	<p>IncoSpecialProducts, Canadá  Recemat International Sumitorno, Japón Dunlop, Inglaterra</p>	<p>Incofoam  Recemat Celmet Retimet</p>

En México en el instituto de investigaciones en materiales (IIM) se han realizado destacadas contribuciones a la ciencia de los materiales , en particular en el área de la metalurgia no ferrosa con metales como Al, Ti, Mg y aleaciones de estos, ya que se han desarrollado espumas metálicas con base de magnesio capaz de capturar CO<sub>2</sub> , en el laboratorio de Materiales metálicos avanzados se producen espumas de Ti que podrían ser utilizados como implantes biomédicos, para tratar de aligerar estructuras en el sector automotriz se han utilizado aleaciones de metales como el aluminio y el magnesio.

## 1.8 Procesos de fabricación de metales celulares.

Existe una gran diversidad de procesos de fabricación para la producción de metales celulares a partir del metal líquido, polvo metálico o de un electrolito que contiene iones metálicos. Cada proceso funciona para una selección de metales o aleaciones y produce espumas con una morfología en particular en un determinado rango de densidad. La rentabilidad de cada proceso es diferente. Esto implica que sólo unos pocos métodos son adecuados para una producción en masa de grandes volúmenes. Las aleaciones de aluminio son comercialmente los más explotados debido a:

- Su baja densidad.
- Alta ductilidad.
- Alta conductividad térmica.
- Coste competitivo.

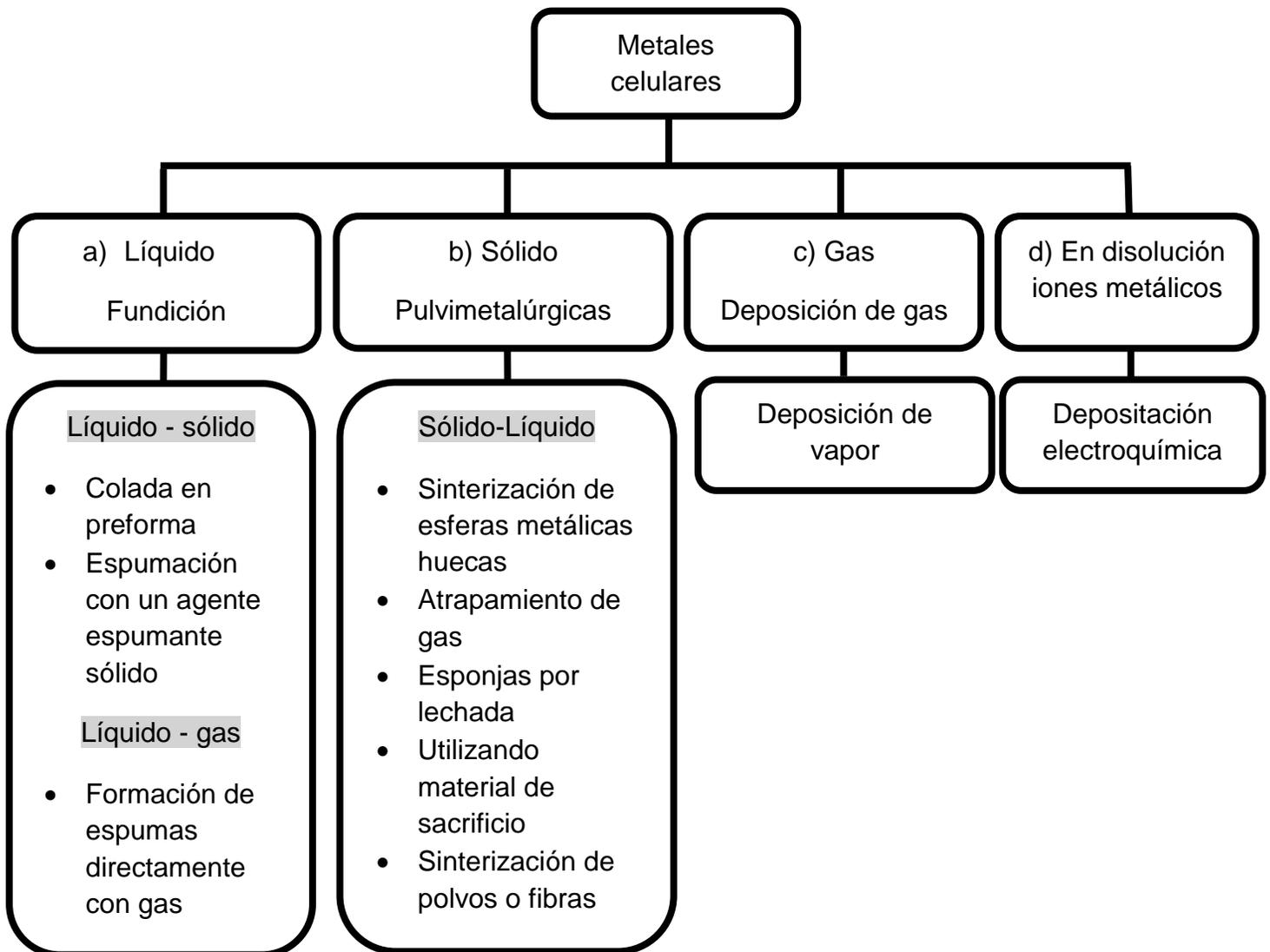
### 1.81 Clasificación

Los diversos procesos de fabricación también se pueden clasificar en base al estado de agregación de la materia en el que el metal se procesa. Los procesos de fabricación de las espumas metálicas son el resultado de la dispersión de sustancias entre sí y se definen 4 familias las cuales se enuncian a continuación [2] :

- a partir de metal líquido.
- a partir de metal sólido en forma de polvo.
- a partir de vapor de metal o compuestos metálicos gaseosos.
- a partir de una solución de iones metálicos [2, 4, 5,11].

La clasificación más general de los métodos o rutas de fabricación de metales celulares es aquella que distingue en función del estado del metal durante el procesado. Así, consideramos que el material puede estar en estado sólido, líquido, gaseoso o incluso en forma de disolución iónica (métodos de electrodeposición). El esquema 4 muestra un mapa conceptual de las rutas de fabricación con base a esta clasificación.

**Esquema 4** Clasificación de los procesos de fabricación de metales celulares a partir del estado de agregación del metal y en disolución [4,5].



### 1.82 Descripción de los procesos de fabricación de metales celulares por vía líquida

A continuación, se describe cada uno de los procesos pertenecientes a la ruta por vía líquida para la fabricación de metales celulares.

- **Líquido-gas**

**Empresa o institución educativa:** Hydroaluminium Co. (Noruega) y Cymat Aluminium Co. Usando el desarrollado en Alcan (Canadá) Norshk-Hydro.

### **Descripción del proceso**

En el seno del metal fundido se aplica la inyección de un gas inerte ( $N_2$ , Ar) para generar burbujas con impulsores y soplantes rotatorios, dado que el drenaje por gravedad del metal fundido excede la rapidez suficiente para obtener la espuma metálica surge la necesidad de agregar una determinada fracción de partículas cerámicas además de grafito y  $TiB_2$  a fin de aumentar la viscosidad del metal fundido y disminuir la rapidez de drenaje del metal, controlando de este modo la cantidad de ascenso de burbujas hacia la superficie del metal líquido evitando su escape; la masa uniforme de burbujas de gas que flota sobre la superficie del líquido se estabiliza y la espuma líquida es extraída mediante una cinta transportadora para permitir su solidificación, este proceso es utilizado para aleaciones de aluminio debido a su baja densidad y baja oxidación en presencia de oxígeno del aire.

La ruta de formación de espuma por fusión ha sido revolucionada por los científicos que trabajan en los Lightmetals, Centro de Competencia (LKR) y la planta metalúrgica Hütte Klein-Reichenbach GmbH, en Austria [2]. El punto clave es un nuevo concepto de inyección de gas que conduce a espumas con una excelente uniformidad de tamaños de celda en forma de complejo con una piel exterior cerrada. La explotación comercial de este tipo de espuma de aluminio llamada "Metcomb" está en camino [3] (Ver figura 6).

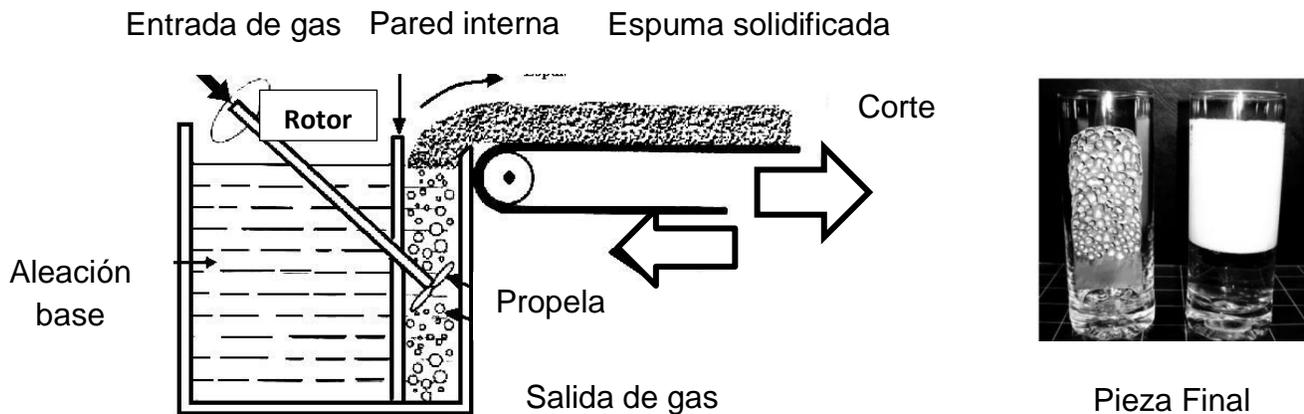
#### **a) Ventajas del proceso**

- Técnica de fabricación continua.
- Se puede hacer en grandes cantidades.
- Proceso económico en comparación con los demás procesos.
- Relativamente sencillo.

#### **b) Desventajas**

- Gradiente de densidades producido por el drenaje en la espuma.
- Distorsión de las celdas que sucede debido a la extracción eventual de la espuma por la celda transportadora, se restringe a forma de plancha de espuma.

- No produce espumas con geometría específica.



**Figura 6** Proceso de espumado líquido por inyección de gas.

**Empresa o institución educativa:** Academia estatal de metalurgia de Ucrania.

#### **Descripción del proceso:**

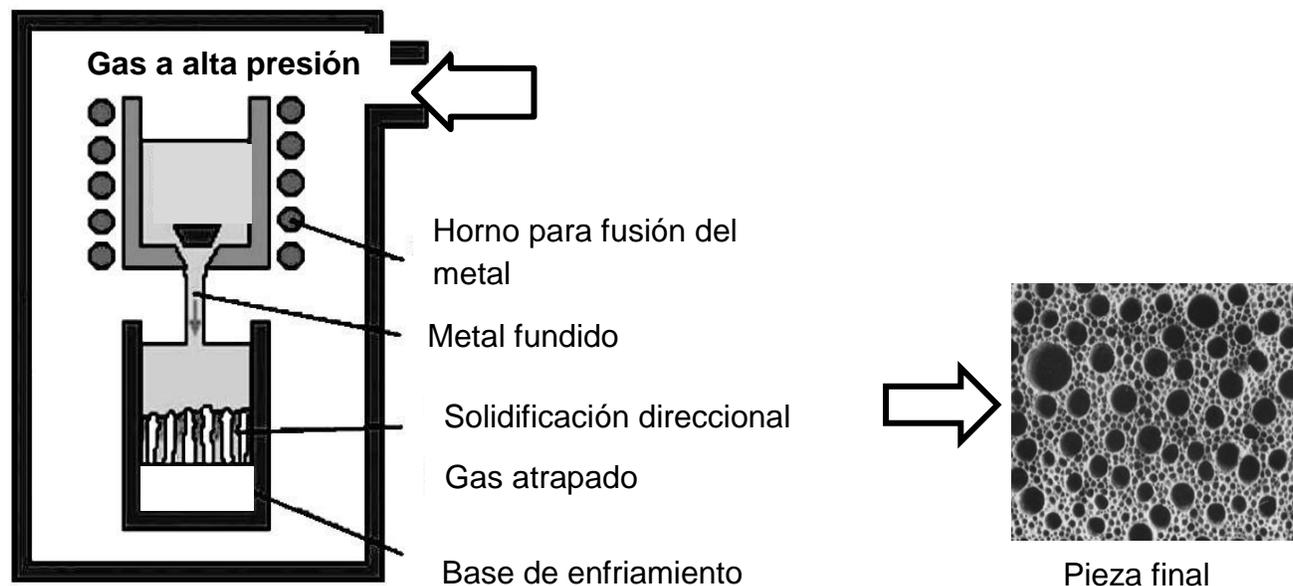
Se basa en la solubilidad variable de hidrógeno en función de la presión. Se funde el metal bajo una atmósfera de alta presión de hidrógeno para la formación de un sistema eutéctico del metal con el hidrógeno, se obtiene una fundición cargada con hidrógeno; al bajar la temperatura de la fundición se presenta una transición eutéctica a un sistema homogéneo invariante de 2 fases sólido-gas. Cuando la fundición solidifica en una base fría del crisol gradualmente, el gas formado en la transformación eutéctica es atrapado, el metal resultante presenta poros alargados y paralelos alineados en la dirección del enfriamiento (Ver figura 7).

#### **a) Ventajas del proceso**

- Se puede aplicar a otros metales además del aluminio como cobre y níquel.

#### **c) Desventajas**

- Proceso complejo y costoso, producto de baja calidad, baja porosidad y la distribución de poros no es uniforme.
- Forma final para formas simples, fabricación lenta y difícil a escala industrial.



**Figura 7** Proceso Gasar por aplicación de  $H_2$  a presión [12].

- **Líquido-sólido**

**Empresa o institución educativa:** Compañía Shinko Wire Amagasaki (Osaka, Japón).

**Descripción del proceso**

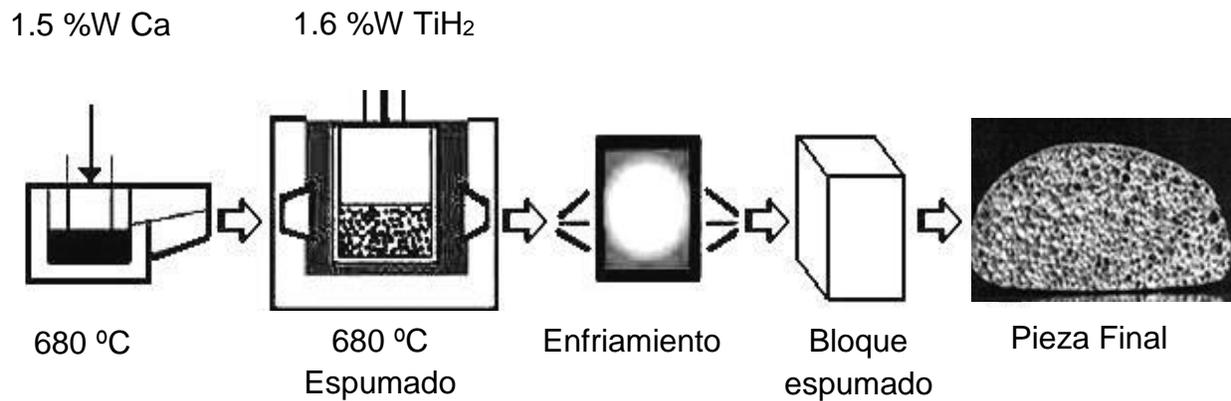
Se funde el metal, se agregan polvos o fibras para aumentar su viscosidad, posteriormente se agrega el agente espumante que es el que dará lugar a una reacción química provocando la liberación de gases, los cuales se dispersan uniformemente a lo largo del metal fundido para la formación de burbujas que originarán la espuma; el aumento de la viscosidad del metal impedirá que las burbujas de gas floten se unan o se escapen al exterior consiguiendo que el gas se disperse uniformemente a lo largo del metal. Se llena un molde gradualmente en 15 minutos con espuma a presión constante, se enfría con ventiladores y se extrae. El agente espumante se descompone por debajo de la  $T_f$  del metal (se investiga la forma de modificarlo). Jiangsu Tianbo en Nanjing también ha puesto en marcha una planta de producción recientemente [3] (Ver figura 8).

**a) Ventajas del proceso**

- Mayor control sobre la localización y el tamaño de los poros, se obtienen espumas muy homogéneas y se reproduce fácilmente.

### b) Desventajas

- Es muy costoso, no produce espumas con geometría específica y se presentan gradientes de densidad.



**Figura 8** Proceso de espumado con agente espumante [25].

**Empresa o institución educativa:** Y. Yamaha y K. Shimojina, Duocel (California ERG USA).

### Descripción del proceso

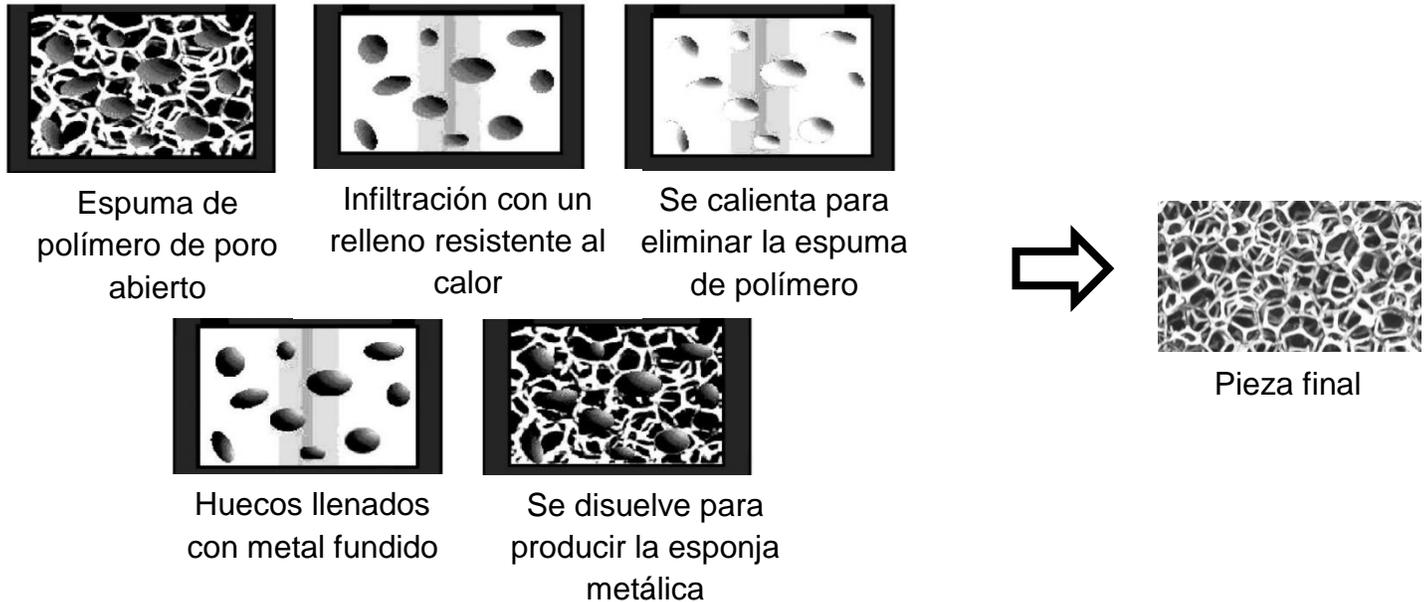
Dentro del seno del crisol se forma una espuma polimérica el cual se rellena con un material refractario, para retirar la espuma polimérica (poliuretano) se realiza un tratamiento térmico para que quede únicamente la preforma refractaria, posteriormente se funde el metal, se vierte al molde en vacío y con alta presión se asegura una total infiltración, una vez solidificada direccionalmente y enfriada, se retira la preforma con agua presurizada o con otro medio alternativo (Ver figura 9).

### Ventajas del proceso

- Espumas de gran calidad se obtienen réplicas exactas de las espumas poliméricas.
- Se pueden hacer piezas complejas y se pueden usar otras aleaciones.

### Desventajas

- Proceso costoso y producción de espumas en baja cantidad.



**Figura 9** Proceso de colado de metal fundido sobre preforma de polímero [11].

**Empresa o institución educativa:** SINTACTIC Instituto Federal de Tecnología Suizo.

### Descripción del proceso

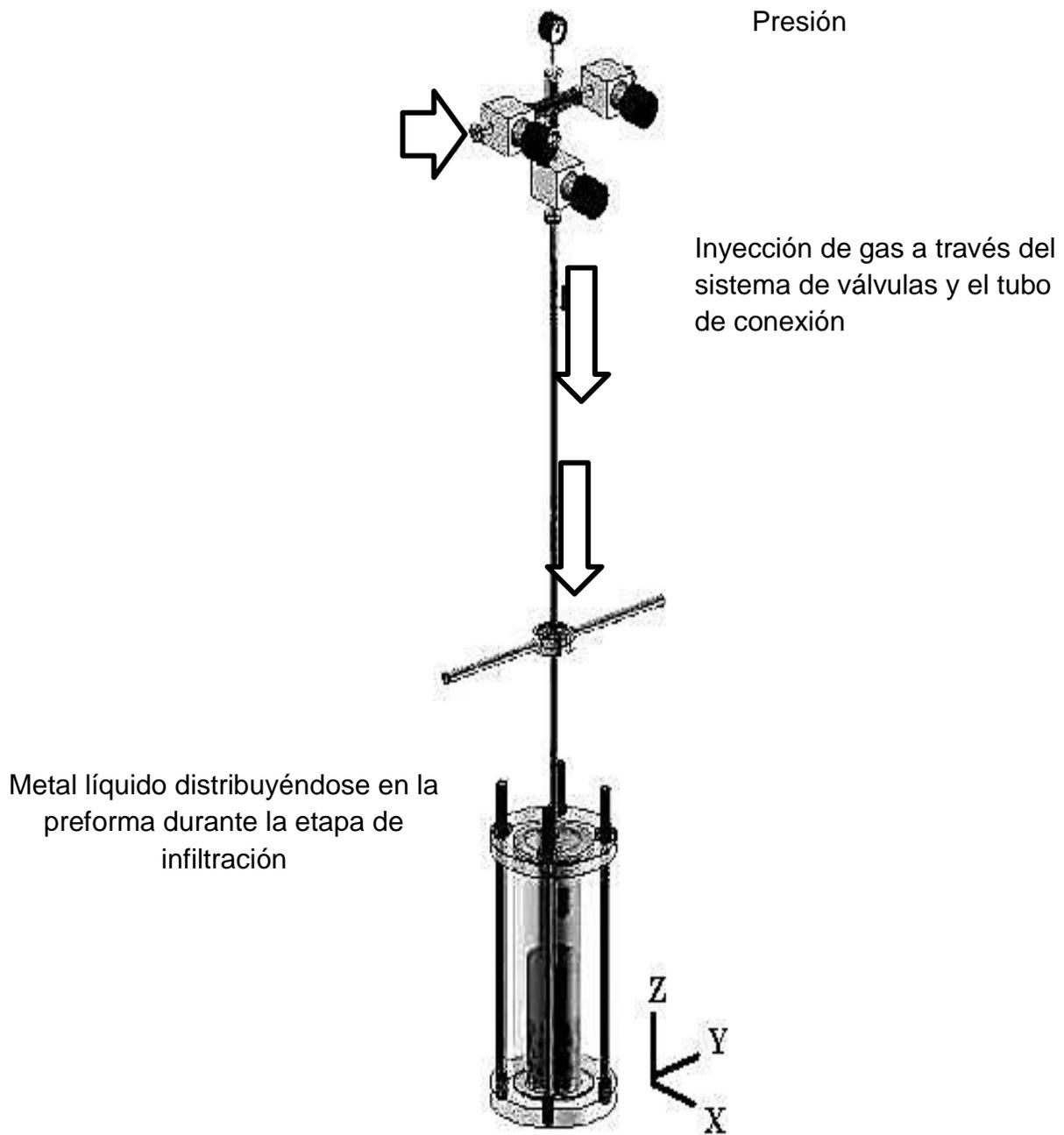
Se funde el metal y se vierte, o se introducen sobre el metal líquido previamente colado esferas huecas o gránulos de material ya sea orgánico o inorgánico; éstos deben tener baja conductividad térmica, baja capacidad calorífica y baja densidad; los gránulos añadidos pueden permanecer en la fase metálica o removerse con agua, disolventes ácidos o tratamientos térmicos en función de su naturaleza; es necesario una máquina de fundición a presión (Ver figura 10).

### Ventajas del proceso

- Se puede utilizar para una amplia gama de metales aluminio, magnesio, zinc, plomo, estaño.
- Se puede realizar el diseño de la geometría de los gránulos y control de la distribución y tamaño de celda, se pueden fabricar paneles de sándwich.

### Desventajas

- Adhesión de gránulos y falta de infiltración del metal.

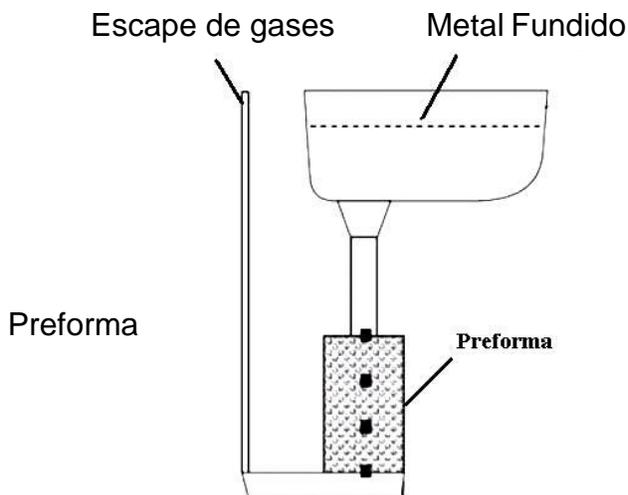


**Figura 10** Proceso de infiltración de metal líquido sobre preforma removible mediante aplicación de presión y vacío [21, 28].

## CAPÍTULO 2 Técnica de infiltración por gravedad sobre preformas removibles para la fabricación de metales celulares.

### 2.1 Descripción del proceso

Desarrollada en el Instituto Federal de Tecnología Suizo, el proceso por vía líquida consiste en vaciar el metal líquido sobre una preforma de tal forma que rellene los intersticios dejados entre las partículas que la conforman, generalmente sal. Una vez solidificado el metal introducido junto con la estructura de la preforma se extrae del molde, se máquina y se introduce en algún disolvente para remover las partículas [8]. En el caso de la sal se utiliza agua. La estructura obtenida es un metal celular de celda abierta denominado esponja metálica como resultado de la replicación de los granos de sal en el metal líquido, la infiltración se puede llevar a cabo mediante presión externa con gas inerte, aplicando vacío, o impulsado por la fuerza de gravedad y agitación mecánica, ésta última es la versión más simple de la técnica y consiste en vaciar el metal líquido sobre una preforma removible; los procesos de infiltración tienen su origen en la fabricación de materiales compuestos de matriz metálica (MM), en esta técnica se pueden emplear una amplia gama de metales (Ver figura 11).



**Figura 11** Proceso de infiltración por gravedad y presión hidrostática [8].

### 2.2 Etapas del proceso

La fabricación de sólidos celulares por infiltración por gravedad sobre preforma removible requiere la implementación de diversas etapas y son las siguientes:

- **Ensamblado y preparación de la preforma**

En esta etapa se realiza la fabricación de la preforma, la preforma se conforma de partículas con una determinada forma, tamaño, rugosidad superficial y algún tipo de recubrimiento para la modificación de la tensión superficial durante la etapa de infiltración. La preforma es la responsable de las propiedades mecánicas obtenidas en la esponja metálica resultante. Las partículas de la preforma pueden ser de materiales orgánicos, inorgánicos o una mezcla de estos. Los criterios que influyen en la selección de estas partículas son principalmente: la facilidad de obtención, modificación o producción, calidad superficial, resistencia a la compresión, resistencia a elevadas temperaturas y facilidad de remoción al término de su solidificación.

En el caso de las mezclas para la fabricación de las partículas espaciadoras, la composición elegida será un factor determinante para el proceso de peletización, los tratamientos térmicos necesarios para el secado, mejoramiento de la resistencia a la compresión, características de superficie de cada partícula, grado de porosidad de la misma partícula y la rapidez de disolución de la preforma. A continuación, en las siguientes tablas se resumen las principales partículas posibles a utilizar para la preparación de la preforma.

**Tabla 5** Tipos de partículas espaciadoras y sus características para el proceso vía líquida por medio de infiltración [28].

<b>Partícula espaciadora</b>	<b>Compuesto</b>	<b>Características</b>
<b>NaCl</b>	Inorgánico	Presentan dos tipos de geometrías (esferoidal o angular) y tamaños de hasta 400 $\mu\text{m}$ . El compuesto metal-preforma se disuelve fácilmente empleando agua como disolvente, durante la compresión tienen tendencia a la fractura en caso de que se aplique y cuando su tamaño es mayor a 1mm.
<b>Silica-Gel</b>	Inorgánico	Fabricadas comercialmente, presentan morfología y tamaño de partícula con exactitud, su punto de fusión es elevado, su rugosidad y defectos superficiales son menores, Se requiere el uso de disoluciones con ácido fluorhídrico, siendo un inconveniente desde el punto de vista económico, facilidad de manejo y ambiental.

## Continuación de la tabla

<b>Poliestireno</b>	Orgánico	Punto de fusión bajo, se eliminan mediante la aplicación de un tratamiento térmico, permiten la deposición de componentes adhesivos cuyo objetivo es el de controlar el tamaño de los canales entre poros o el grado de porosidad de tipo abierta.
<b>Ceno-esferas (Fly –Ash)</b>	Orgánico	Al ser huecas disminuyen la cantidad de sólido en un volumen determinado. Se utilizan para la fabricación de materiales celulares de poro cerrado donde la pared de cada celda también estará constituida por la pared de la ceno-esfera.

**Tabla 6** Tipos de mezclas para la fabricación de partículas espaciadoras y sus características para el proceso vía líquida por medio de infiltración [28].

<b>Partícula Espaciadora</b>	<b>Mezcla</b>	<b>Características</b>
<b>a) Mezcla de arena de fundición y resina epóxica</b>	Inorgánico- Orgánico	Realizada por Berchemy consiste en obtener partículas a partir de una mezcla de arena para moldes de fundición (básicamente silicio) y una resina fenólica para su peletización, a altas temperaturas pueden presentar baja resistencia.
<b>b) Mezcla de harina-sal-agua</b>	Orgánico- Inorgánico	Goodall y Mortensen han propuesto la fabricación de partículas a partir de un compuesto ternario de harina, agua y sal permitiendo fabricar partículas de diferentes tamaños y diferente morfología, la harina es un aglutinante que le confiere al pellet maleabilidad y con esto resistencia a la fractura. Para la determinación de una composición adecuada para la mezcla se requieren de varias pruebas ya que pueden presentarse inconvenientes con la solubilidad y la resistencia a compresión de las partículas durante la infiltración del metal líquido.

- **Fundición del metal**

Se lleva a la temperatura de fusión alcanzada (temperatura de infiltración), la pérdida de energía en el metal debe ser mínima al momento de colar, la determinación de la temperatura y tiempo se realiza mediante experimentos.

- **Infiltración del metal**

Se impulsa el metal a través de la preforma mediante agitación mecánica y por efecto de la gravedad, el metal cuando está en contacto con las partículas forma un ángulo mayor a  $90^\circ$  contribuyendo al deficiente mojado de las últimas partículas por el efecto de la tensión superficial impidiendo el avance del metal líquido a través de la preforma.

- **Eliminación de la preforma**

Consiste en eliminar la preforma conformada de partículas. Dependiendo del tipo de material se disuelve en agua, se remueve mediante una disolución de ácido o se calcina como resultado de un tratamiento térmico dependiendo del tipo de compuesto y de su punto de fusión.

- **Variables a considerar**

En esta técnica se debe garantizar la fluidez del material base, mojabilidad de ésta sobre la preforma y el escape de los gases contenidos.

- **Transferencia de calor**

La transferencia de calor es importante porque de ella depende la infiltración del metal a través de la preforma, se debe procurar un equilibrio térmico en los dispositivos calentadores y contenedores, sin embargo los gradientes de temperatura están presentes entre el metal líquido y la preforma, generando una región semisólida en el frente de infiltración. Si la temperatura no es lo suficientemente elevada no se tendrá la energía suficiente para la fusión del semisólido originando una infiltración deficiente.

- **Formación de gases**

Se debe evitar la formación de gases residuales como resultado de la calcinación de componentes orgánicos de las partículas, liberación de gas de las partículas huecas y demás mediante la implementación de sistemas de ventilación, generación de vacío y solidificación direccionada.

- **Limitaciones del proceso**

La técnica cuenta con ciertas limitaciones ya que no considera determinadas variables favoreciendo la presencia de defectos estructurales en los metales celulares y en consecuencia disminuyen su calidad, las cuales son las siguientes:

- **Presión**

Una baja presión de infiltración provocará defectos microestructurales en el metal celular por la infiltración del metal en espacios anchos generando porosidad no controlada, también se propicia la formación de bordes de celda no interconectados modificando las propiedades mecánicas de forma perjudicial. En el caso de que la presión exceda significativamente la infiltración del metal, esta se realiza totalmente incluso en los defectos de las partículas (fracturas y porosidad) favoreciendo la aparición de defectos en las paredes de la celda o bordes interconectados no deseados. Para la infiltración del metal a través de la preforma puede usarse la presión de un gas, ya que entre la preforma y el metal líquido existe un ángulo de contacto el cual provoca una determinada resistencia además de la tensión superficial. Se debe determinar el valor de presión que garantice la infiltración del metal el cual se obtiene de manera experimental y depende del tipo, forma de las partículas que conforman la preforma y el metal a fundir. Por lo general para la mayoría de los procesos de infiltración sin vacío oscila entre los 25 y 275 KPa mientras que para partículas del orden de milímetros puede alcanzar varios MPa.

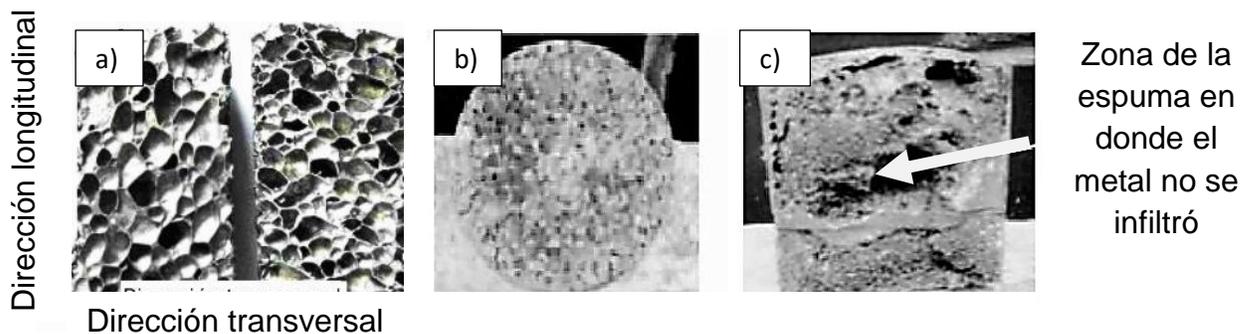
- **Formación de gases**

La generación de vacío evita la formación de óxidos en las paredes de las celdas.

### 2.3 Caracterización de la estructura.

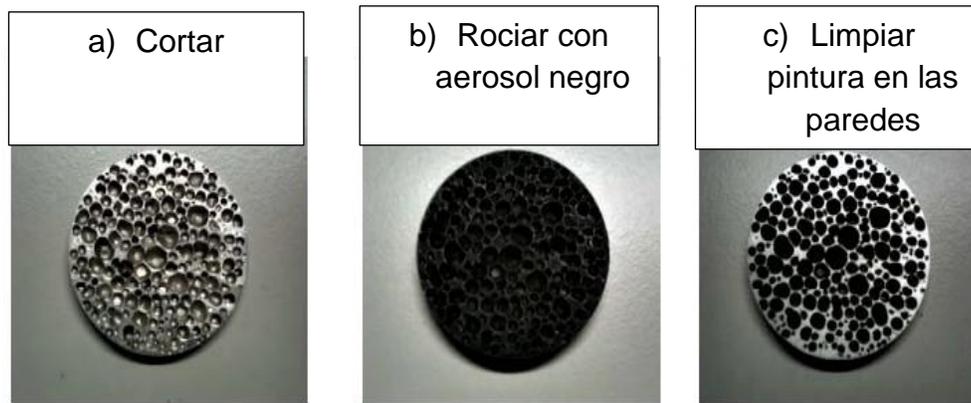
Para caracterizar las propiedades finales de cualquier metal celular, que dependen de su estructura, existen diversas técnicas de caracterización mediante análisis destructivos y no destructivos dependiendo del nivel que se desea analizar. A continuación, se describen los diferentes niveles estructurales que conforman el metal celular, así como las técnicas que se pueden emplear a partir del análisis de imagen óptica

**Macro estructura:** Para su caracterización contempla el análisis de imágenes obtenidas por fotografía convencional con una cámara de alta resolución y se analiza el modo en el que la estructura celular varía dentro del metal celular tal y como se obtiene en su proceso de fabricación, así como los defectos macro estructurales presentes (Ver figura 12).



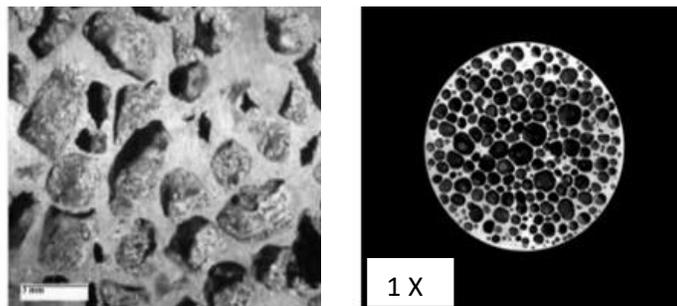
**Figura 12** Fotografía del corte transversal de una espuma metálica (a), estructura de una esponja metálica (b) y defecto macroestructural de una esponja metálica (c) [5, 30].

Para la obtención de diversos parámetros tales como la densidad, porosidad y grado de expansión existen 2 técnicas de análisis de imagen óptica el método de intersección y mediante el corte de secciones 2D, la primera técnica permite realizar mediciones del tamaño de celda, sin embargo es imprecisa ya que depende de la vista de la persona que está realizando las mediciones mientras que la segunda técnica consiste en el procesamiento de imagen adaptada específicamente a la caracterización de la estructura de cortes transversales en 2D con cortadoras de diamante para evitar provocar algún daño. Para contrastar la morfología de poros estos se rellenan con una resina negra como la cera de abeja de color negro o a partir de la aplicación de un tinte negro mate en una de las caras (Figura 13).



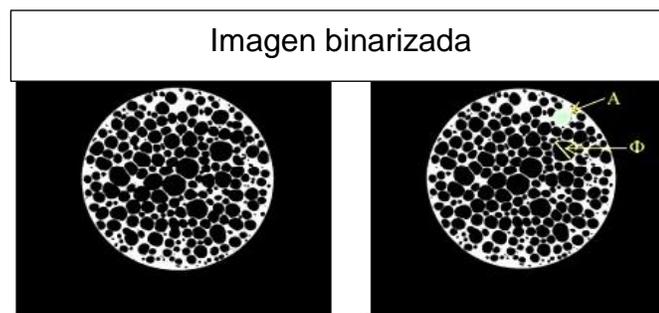
**Figura 13** Método de preparación de muestras para la adquisición de imágenes a partir del corte en 2D [27].

Una vez obtenida la muestra lista para capturar se adquiere la imagen de la cara de una de las muestras con ayuda del microscopio estereoscópico o se digitaliza mediante escaneo (Figura 14).

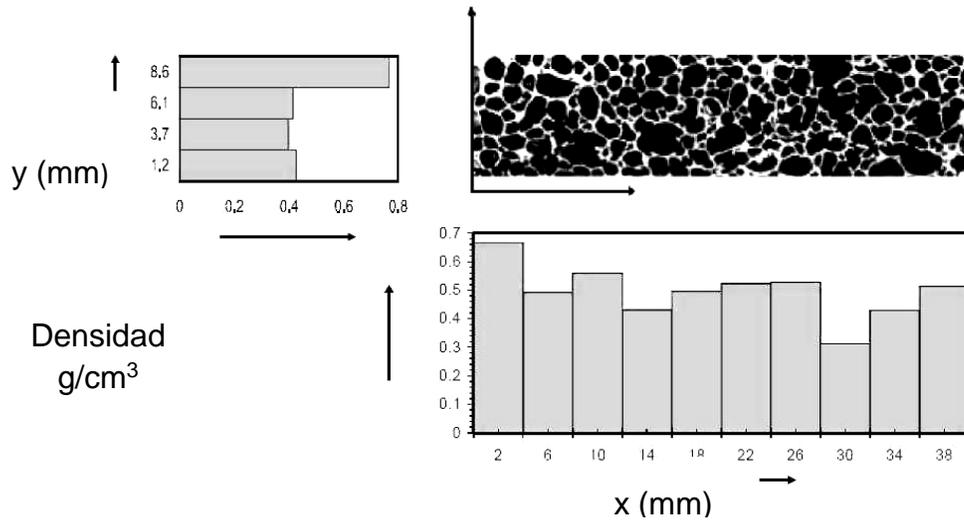


**Figura 14** Adquisición de imágenes con el microscopio estereoscópico y escáner [27] 28].

En primera instancia se retocan las imágenes con un software como Adobe Photoshop y se binarizan con un software analizador de imágenes como Visilog v de Noesis ó UTHSCSA, entre otros. El alto contraste entre el fondo de los poros y las paredes celulares facilita la binarización de la imagen y con esto la imagen esta lista para el análisis cuantitativo de la estructura a partir de la información numérica detallada de la distribución de la densidad, grado de expansión y porosidad (Ver figura 15).

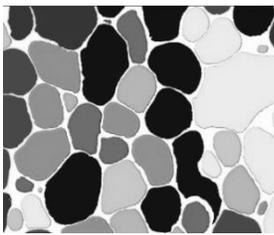


**Figura 15** Binarización de la imagen para el análisis de su estructura [27].



**Gráfica 2** Distribución de la densidad a lo largo de los ejes  $x$ ,  $y$ .

**Mesoestructura:** Para la caracterización de este nivel se enfoca en el estudio de la geometría, el tamaño de celda y de sus elementos (paredes y bordes dependiendo de su topología), contemplando su carácter abierto o cerrado y la forma en el que se distribuye el material entre las paredes y bordes así como los defectos mesoestructurales presentes, para su estudio mediante un software analizador de imágenes se realiza la separación lineal de poros, la imagen binarizada de paredes y la estructura del esqueleto para el estudio de los parámetros antes mencionados (Ver figura 16).



Separación lineal de poros.

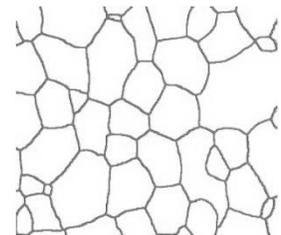
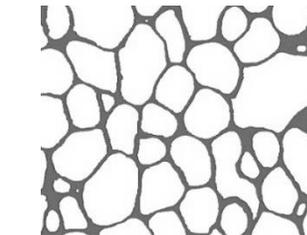
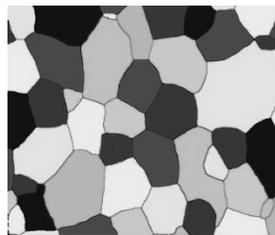
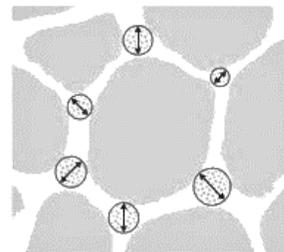
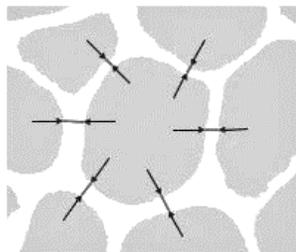


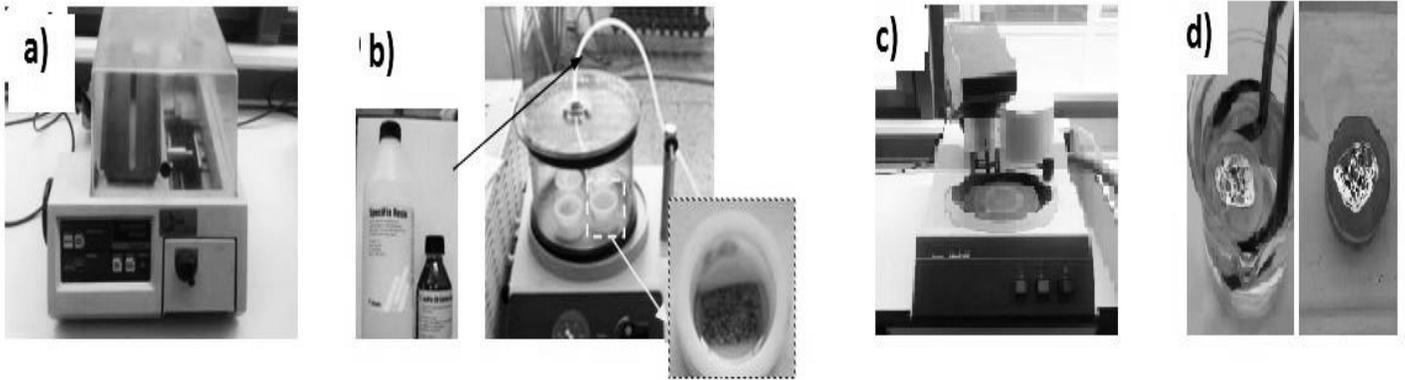
Imagen binarizada de paredes y esqueleto.



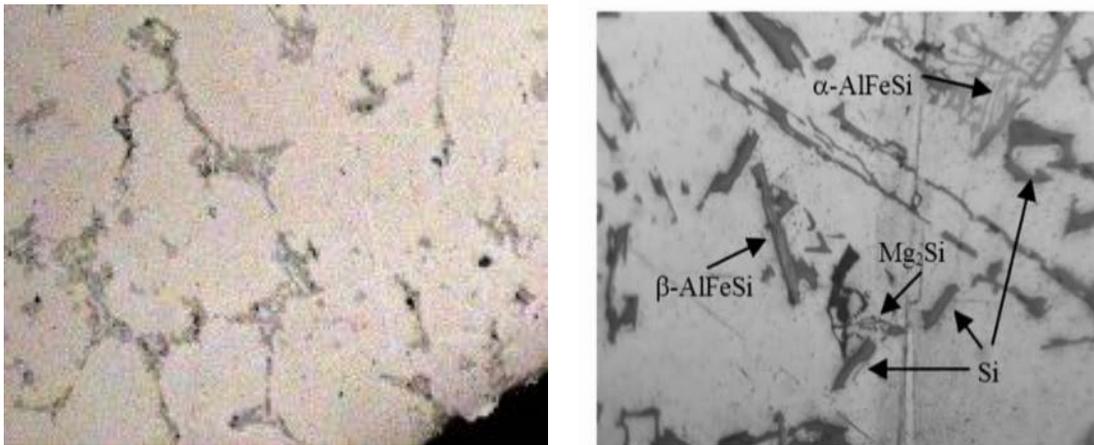
Medición de pared y borde de celda.

**Figura 16** Análisis de imagen para el estudio de paredes y bordes en un metal celular [4].

**Microestructura:** Este nivel contempla el material de los bordes y/o paredes de un metal celular como la composición y los precipitados. Para analizar la microestructura y la composición química se emplean técnicas convencionales de caracterización metalográfica (Figura 17). La metodología de preparación de metales celulares es similar a la que se utiliza comúnmente para otros materiales metálicos, se emplea el microscopio metalográfico y el Microscopio electrónico de barrido para la obtención de micrografías (Figura 18). Para el análisis de la composición química de la aleación y de los precipitados se emplea espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX).



**Figura 17** Preparación metalográfica del corte en 2D de un metal celular [27].



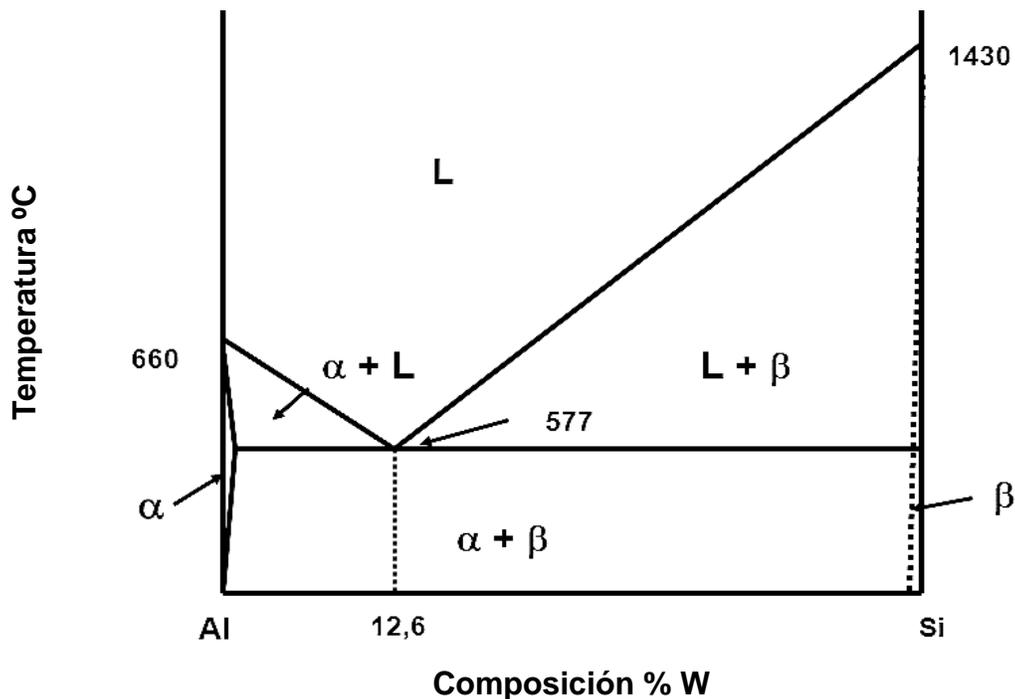
**Figura 18** Micrografía por microscopia óptica y MEB [5,14].

## CAPÍTULO 3 Planteamiento experimental

Empleando la técnica de infiltración de metal líquido sobre preforma soluble por efecto de la fuerza de gravedad y agitación mecánica se obtuvieron tres sólidos celulares partiendo de la modificación de determinados parámetros tales como: material de las partículas espaciadoras, morfología de celda, precalentamiento de la preforma, tipo de sistema del molde metálico, modo de infiltración del metal líquido sobre la preforma y medio de enfriamiento del sólido celular fabricado, el procedimiento experimental se describe detalladamente a continuación:

### 3.1 Elección, fabricación y análisis químico de la aleación de Al a utilizar

Por medio de la técnica de fusión se fabricó una aleación Al-Si con un contenido de 5.78% de Si, por debajo del punto eutéctico como se muestra en el diagrama de fases 3 (Gráfico 3). Esta aleación se eligió debido a que el Si es un elemento aleante que le confiere colabilidad al Al líquido lo que nos permite mayor fluidez durante la etapa de infiltración. Además, su contenido de Si se encuentra dentro del rango de las aleaciones comerciales más utilizadas. A continuación, se muestra el análisis químico de la aleación utilizando espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) por sus siglas en inglés empleando microscopía electrónica de barrido junto con la composición química nominal correspondiente.

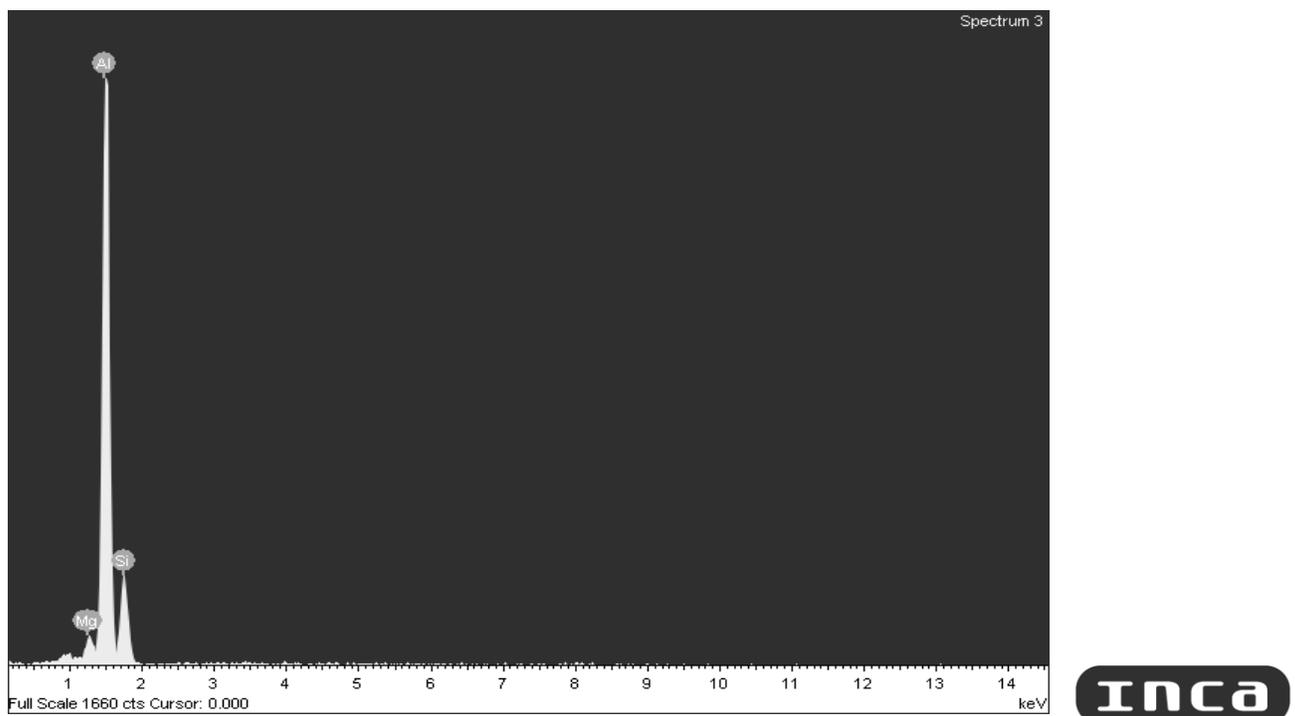


Gráfica 3 Diagrama de fases al equilibrio Al-Si.

El porcentaje en peso de Si y de Mg se determinó realizando un microanálisis elemental (Gráfico 4), la composición química nominal nos muestra que la aleación es del grupo 4xx.x (Ver tabla 7).

**Tabla 7** Composición química de la aleación hipoeutéctica obtenida por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) y composición química nominal de la aleación.

Elemento químico	Si	Mg
Composición química EDS w t%	5.78±0.04	0.48±0.07
Composición química nominal 4xx.x(Si) w t%	3.3-13	0.05-0.1

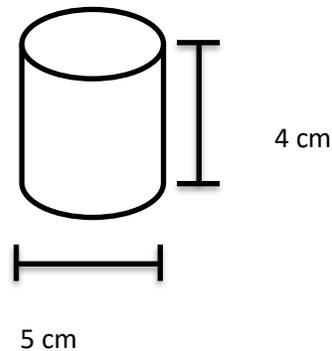


**Gráfica 4** Análisis EDX de la composición química de la aleación hipoeutéctica.

### 3.2 Molde de colada para la etapa de infiltración

El tipo de sistema del molde de colada que se utilizó fue un molde metálico de acero inoxidable de forma cilíndrica con tapa o sin tapa dependiendo del caso, para abrir o cerrar el sistema, se eligió acero inoxidable considerando que es un material resistente a la corrosión y resistente al esfuerzo ejercido por la agitación mecánica, además permite la transferencia de calor y un ciclo de trabajo a

elevada temperatura en un tiempo prolongado. Las dimensiones del molde metálico se presentan en la Figura 20.



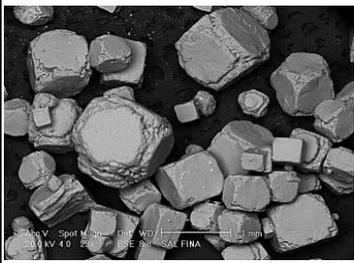
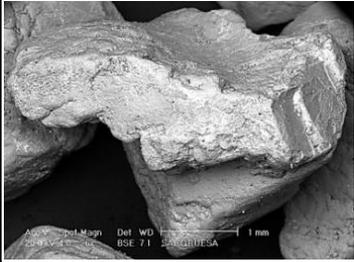
**Figura 19** Dimensiones del molde.

### 3.3 Selección del material a emplear en la preforma

Para la fabricación de metales celulares se utilizó la técnica de infiltración por efecto de la fuerza de gravedad sobre preforma soluble, utilizando como referencia el manual para la fabricación de espumas metálicas por infiltración [25, 29]. Posteriormente se eligió el material para los elementos de replicación que conformarían la preforma tomando en consideración el punto de fusión del material propiciando, la replicación de diferentes formas y tamaños de partícula sin dejar a un lado el análisis del costo del material y accesibilidad en el mercado.

Los materiales seleccionados fueron la sal y la harina de uso comercial; la sal fina y la sal de grano tienen un punto de fusión elevado, de 801°C, por encima del punto de fusión del Al que es de 660°C, permitiendo que el material de la preforma no se funda durante la infiltración además de la replicación de dos diferentes morfologías la cúbica y la angular-alargada respectivamente. A excepción de la morfología esférica ya que se utilizó una mezcla ternaria sal-agua-componente orgánico para la elaboración de los pellets, la harina también es de uso comercial y su punto de fusión nos permite su calcinación durante el drenaje del metal líquido. A continuación, en la siguiente tabla se muestran las imágenes de las partículas para cada caso, así como las principales características de las mismas (Ver tabla 8).

**Tabla 8** Características físicas de las partículas espaciadoras utilizadas para la preforma.

No	Imagen	Composición de la preforma	Forma	Tamaño promedio	Color
1)		NaCl (Sal fina)	Cúbica	0.539 mm	Blanco
2)		NaCl (Sal gruesa)	Alargada- Angular	3.645 mm	Blanco
3)		Pellets de NaCl (sal fina)- H <sub>2</sub> O-Componente orgánico (harina)	Esférica	5 mm	Oscuro

### 3.4 Selección de la morfología de partícula para la preforma.

A partir de la tabla 8 se selecciona la morfología de celda deseada en la estructura del metal celular a fabricar, se tienen 2 dos casos:

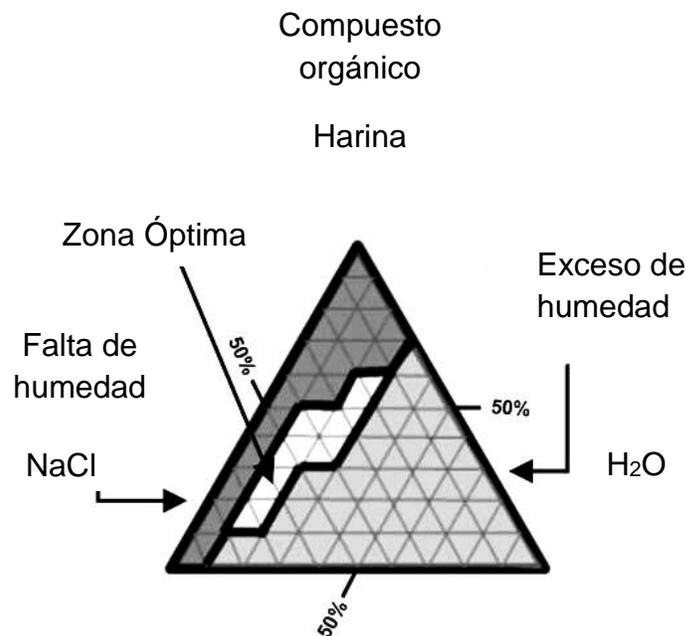
- **CASO A** La partícula tiene la morfología deseada.

La sal fina y de grano ya cuentan con una determinada morfología de partícula, para la elaboración de las preformas. Únicamente se selecciona directamente la morfología deseada del material correspondiente para emplearlo en la preforma.

- **CASO B La partícula no tiene la morfología deseada.**

Para la morfología esférica será necesaria la fabricación de pellets a partir de una mezcla ternaria de sal-harina-agua, cuya flexibilidad permitirá su fabricación de forma manual. Al igual que la sal estas partículas le confieren soporte y resistencia mecánica durante el drenaje del metal líquido, la harina actúa como aglutinante de los componentes, la sal le confiere resistencia mecánica a los pellets y el agua será el factor crítico que promoverá su aglomeración, el cual deberá ser la cantidad suficiente para que los pellets presenten cierta consistencia sólida y la flexibilidad suficiente para evitar su prematura disolución y así favorecer la adecuada rapidez de disolución, promover la disminución de los gases evacuados durante la infiltración y disminuir el tiempo de tratamiento de secado y calcinación.

Para la selección de la composición de la mezcla ternaria partimos del diagrama ternario de Goodall el cual se muestra en el gráfico 4.



**Gráfica 5** Diagrama ternario de Goodall [21,28].

En este diagrama se representa la zona óptima de composiciones para la mezcla, se debe considerar un alto contenido de sal para garantizar la suficiente resistencia a la abrasión y compresión durante el drenaje del metal líquido, además de una elevada solubilidad. En el caso de la harina se utilizará la menor cantidad posible para facilitar su calcinación y la cantidad de agua necesaria para la aglutinación, esto se localiza en el diagrama ternario entre la zona de mezcla seca y zona de mezcla

óptima, la composición óptima elegida como punto de partida fue la de 65 % de NaCl, 20 %H<sub>2</sub>O y 15% de harina, la cual se varió con base a un análisis de maleabilidad de forma manual hasta obtener una mezcla con la mayor cantidad de sal posible y la cantidad de agua y harina necesaria para el conformado de los pellets sin que se fracturaran. La composición elegida se muestra en la tabla 9.

**Tabla 9** Composición de la mezcla ternaria sal-agua-componente orgánico.

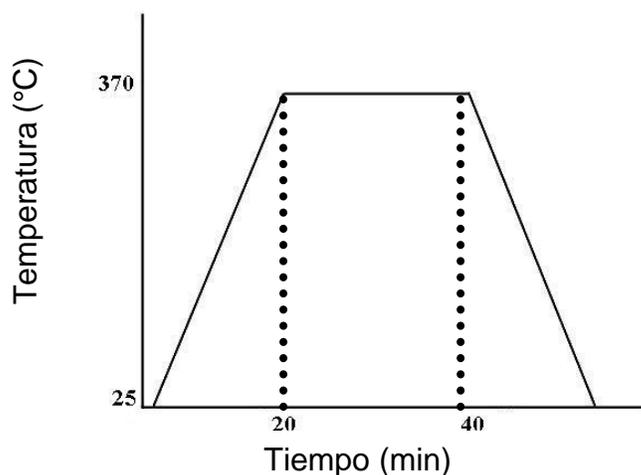
%w	a) NaCl	b) Compuesto orgánico (harina)	c) Agua
1)	68.4 %	9.7 %	20.9%

### 3.5 Tratamiento térmico de la preforma.

Al término de la fabricación de los pellets, éstos se sometieron a un tratamiento térmico para la eliminación de la humedad dentro de la mufla a una T=100°C por un periodo de 3hrs.

### 3.6 Calcinación de la preforma.

Para la calcinación de la preforma se realizó un tratamiento térmico a una T= 370°C durante 20 minutos para reducir la cantidad de componentes orgánicos presentes en la mezcla y sinterizar los pellets a fin de que resistan y no se desintegren durante la infiltración del metal líquido (Gráfico 5).



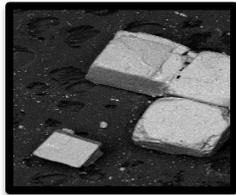
**Gráfica 6** Periodo de tratamiento térmico de calcinación de la preforma [28].

### 3.7 Fabricación de metales celulares.

En el diagrama de flujo 1 se encuentra el esquema de la técnica empleada.

Diagrama de flujo 1 Técnica de infiltración de metal líquido sobre preforma removible.

## TÉCNICA DE INFILTRACION DE METAL LÍQUIDO POR GRAVEDAD SOBRE PREFORMAS REMOVIBLES.



1) Determinar la morfología de celda que se requiere emplear en la estructura del metal celular seleccionando el material de la tabla 1.0.



2) Precalear la preforma de la sal de grano a una  $T=200^{\circ}\text{C}$  durante 15 minutos, si se utiliza sal fina no se efectuará el precalentamiento y para el caso B una vez efectuada la calcinación continuar con el paso siguiente.



3) Fundir el lingote de la aleación hipoeutética Al-Si por arriba de su punto de fusión ( $770^{\circ}\text{C}$ ).



4) Vaciar el metal líquido sobre la preforma de sal de grano o sal fina y por efecto de la fuerza de gravedad aunada a una agitación mecánica el metal líquido drenará a través de la estructura, para el caso B agregar las partículas junto con el metal líquido.



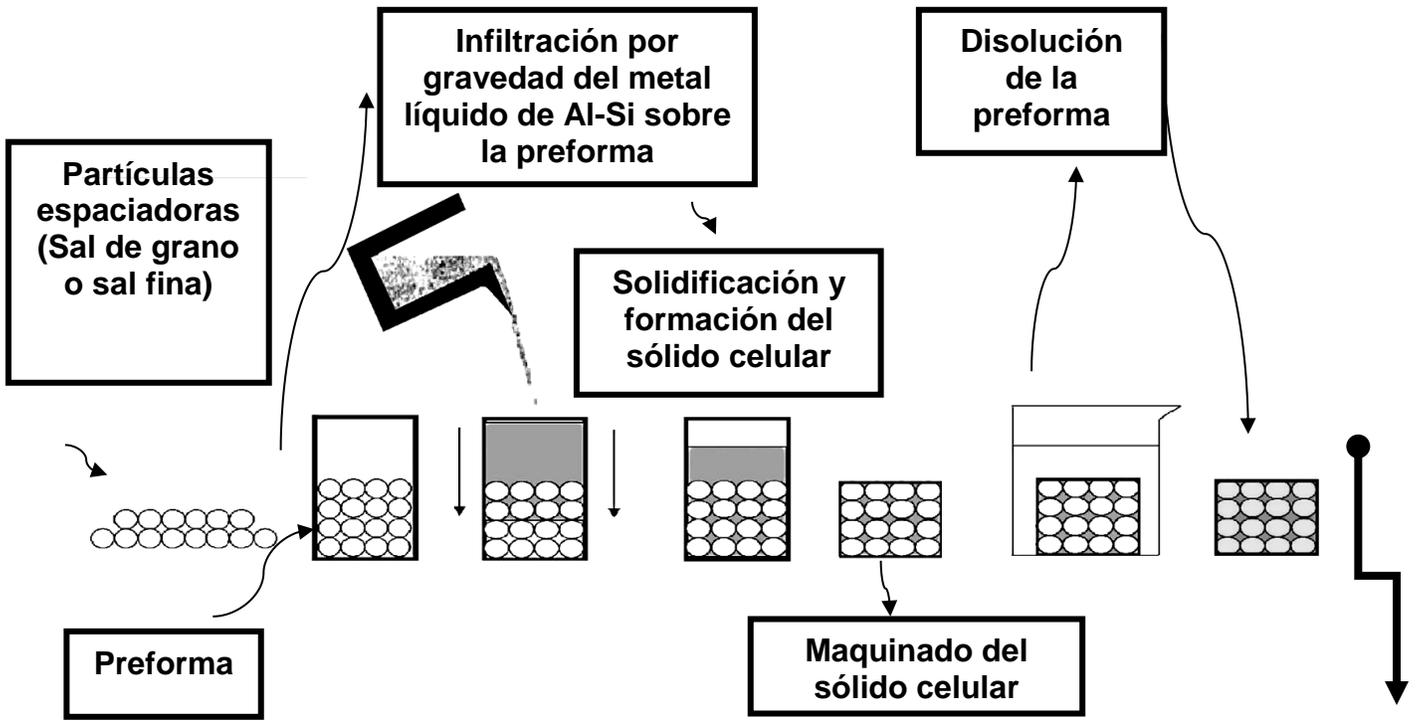
5) El molde metálico junto con el metal celular obtenido se enfría al equilibrio caso A y fuera del equilibrio caso B.



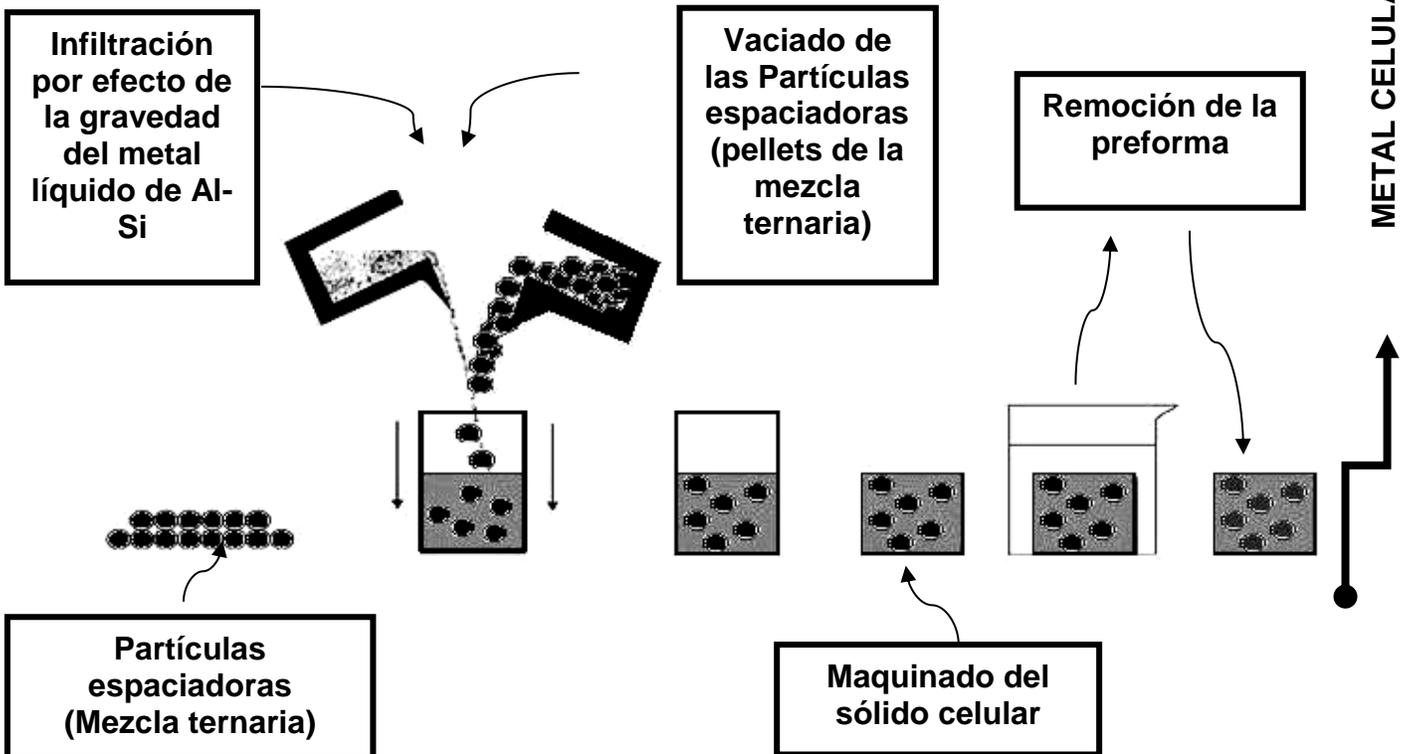
6) Finalmente se desmoldea el metal celular para realizar su caracterización estructural.

Esquema 5 Proceso de infiltración por gravedad para la obtención de un metal de celda abierta y cerrada.

**CASO A Celda abierta**



**CASO B Celda cerrada**



### **3.8 Caracterización estructural de los metales celulares obtenidos.**

Para la caracterización de los diferentes niveles de estructura de un metal celular se determinó el análisis mediante imagen óptica de tipo destructivo. A continuación, se describe la metodología utilizada a fin de obtener las imágenes requeridas para la caracterización estructural de cada sólido celular fabricado.

#### **Niveles de caracterización estructural.**

- **Macroestructura**

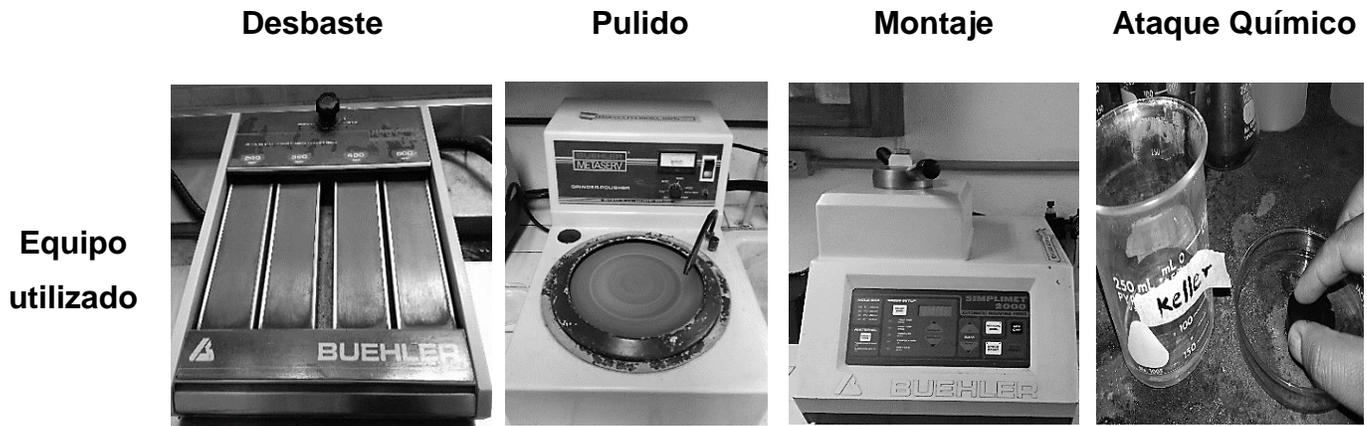
1. Capturar imágenes de la parte superior del metal celular utilizando una cámara convencional.
2. Realizar cortes transversales de muestras de la cara superior de la probeta, efectuar su desbaste hasta lija 600, digitalizar imágenes mediante escaneo y adquirir imágenes empleando el microscopio electrónico de barrido. Previamente al escaneo, aplicar un tinte oscuro para muestras con forma angular-alargada obtenidas de la replicación de partículas de sal de grano para facilitar el análisis debido a su morfología.

- **Mesoestructura**

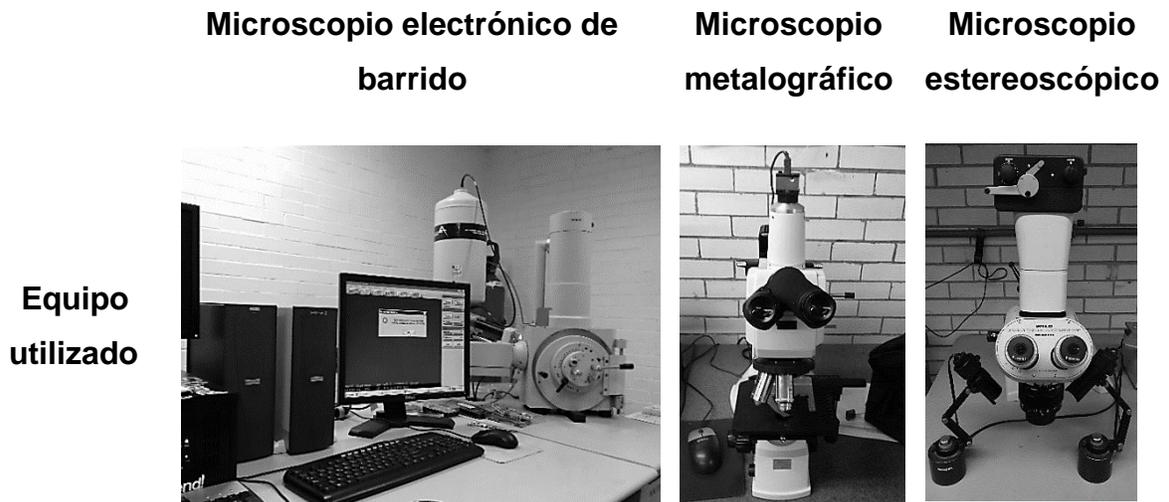
1. Adquirir imágenes de muestras de la parte superior del metal celular con ayuda del microscopio estereoscópico y el Microscopio Electrónico de Barrido.
2. Adquirir imágenes de las partículas de sal fina y sal de grano utilizando el microscopio electrónico de barrido.

- **Microestructura**

1. Realizar la preparación metalográfica convencional de muestras obtenidas de cortes transversales de la cara superior de los metales celulares.
2. Adquirir micrografías utilizando microscopio metalográfico y el microscopio electrónico de barrido.
3. Adicionalmente, efectuar el análisis químico empleando espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) por sus siglas en inglés mediante microscopía electrónica de barrido de las muestras preparadas metalográficamente.



**Figura 20** Preparación metalográfica.



**Figura 21** Microscopios empleados para la adquisición de imágenes de la estructura del metal.

## CAPITULO IV Resultados y discusión.

### 4.1 Caracterización Macroestructural.

La caracterización macroestructural contempla el análisis de imágenes obtenidas por fotografía convencional y a partir de cortes en secciones 2D para observar el modo en que la estructura celular varía dentro del metal celular.

#### 4.11 Análisis cualitativo de la macroestructura mediante inspección visual.

Con una cámara convencional se capturaron las imágenes de la parte superior de cada sólido celular las cuales se muestran en la figura 23.



**Figura 22** Cara superior de los sólidos celulares obtenidos a 1x (ojo desnudo).

Como resultado de la etapa de infiltración de metal líquido sobre la preforma se obtuvieron 3 estructuras de metales celulares diferentes. Mediante inspección visual se puede apreciar la distribución de metal sólido alrededor de los espacios vacíos de toda la superficie de las caras de las probetas como resultado del modo de infiltración del metal líquido sobre las partículas espaciadoras utilizadas (Figura 23), la fuerza de gravedad y la energía mecánica debido a la agitación propició el drenaje del metal líquido alrededor de estas abarcando toda la superficie. En la imagen a) se observa porosidad de dimensiones muy pequeñas como resultado de la replicación de partículas de sal fina con un tamaño  $\approx 0.539\text{mm}$  en toda la superficie y no se alcanza a definir su morfología; en la imagen b) se observa una red de porosidad de mayor tamaño debido a la replicación de partículas de sal gruesa con un tamaño  $\approx 3.645\text{mm}$  en toda su superficie y no se define con claridad su morfología, la distribución de porosidad en toda la cara superior de las superficies de ambas probetas (a y b) es el

resultado del vaciado del metal líquido directamente sobre un conjunto de partículas espaciadoras juntas de determinada morfología y tamaño; finalmente en la imagen c) se observa claramente la morfología y el tamaño de las partículas replicadas de los pellets con un tamaño promedio de  $\approx 5\text{mm}$  dispersas en la matriz de Al, así como defectos estructurales que posteriormente se analizarán a detalle, la estructura obtenida es el resultado de vaciar simultáneamente las partículas espaciadoras y el metal líquido.

El modo de infiltración del metal líquido sobre las partículas espaciadoras para el caso A (vaciado directo de metal líquido sobre la preforma) y caso B (vaciado de metal líquido simultáneamente con la adición de las partículas espaciadoras) modificó drásticamente la estructura del sólido celular resultante debido a la distribución del metal líquido alrededor de las partículas espaciadoras.

En cuanto a la longitud de la infiltración para las 3 probetas fabricadas no fue mayor al 30 %, el efecto de la gravedad junto con la agitación mecánica y la presión atmosférica no fueron suficientes para efectuar una mayor infiltración, no obstante, la tensión superficial del líquido originó un ángulo formado entre el metal líquido y el de contacto con las partículas espaciadoras de la preforma, el cual no fue mayor a  $90^\circ$  dado que impidió su mojabilidad durante la infiltración.

La forma de la celda está en función de la temperatura del metal líquido al momento del vaciado, presión atmosférica del lugar en donde se llevó a cabo la infiltración, tensión superficial del metal líquido, modo de infiltración del metal líquido sobre la preforma y la forma de la partícula utilizada para la preforma entre otros factores, los cuales se abordarán más adelante.

#### **4.12 Topología y conectividad de celda**

- **Topología**

El tipo de celda presente en el metal celular es de vital importancia en su caracterización ya que influye significativamente en la respuesta a la compresión. Dos espumas con diferente topología, pero con la misma densidad relativa difieren significativamente en su rigidez, la existencia de paredes entre los bordes de celda cerrada le confiere mayor rigidez frente a una de celda abierta. Con ayuda del microscopio estereoscópico y el MEB se obtuvieron imágenes a diferentes aumentos para la observación y determinación de la topología e interconectividad de celda, las cuales se muestran en la figura 24.

No. de muestra

a) Al-Si  
Topología

b) Al-Si  
Interconectividad

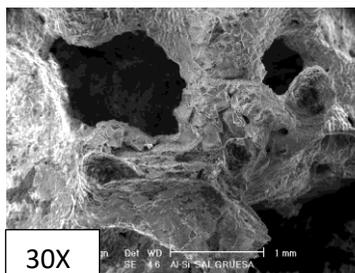
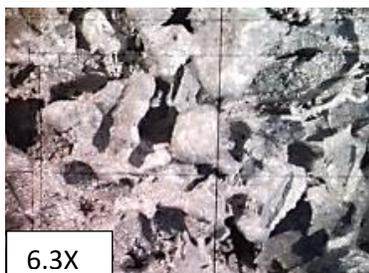
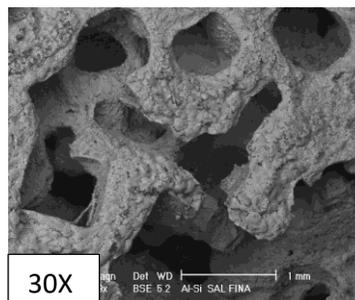
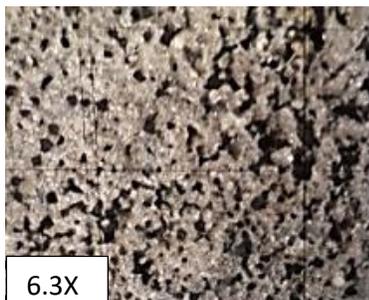
1) Celda cúbica

2) Celda angular-  
alargada

3) Celda esférica

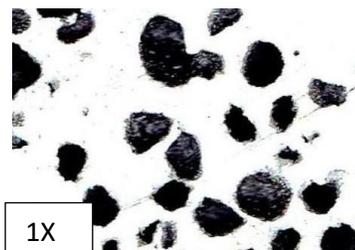
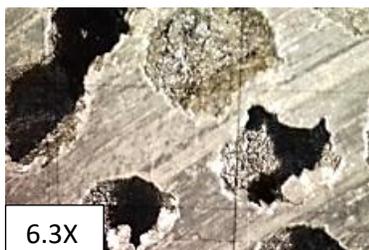
CASO A

CASO B



Estereoscopio

MEB



Estereoscopio

Foto convencional

**Figura 23** Topología y conectividad para determinada morfología de celda.

En la figura anterior podemos observar las imágenes a un aumento de 6.3X para cada muestra analizada. Mediante microscopía estereoscópica se puede observar una clara conectividad de celdas con pared para la de morfología angular-alargada, la fase sólida es discontinua mientras que la fase gaseosa es continua y se corrobora con la imagen obtenida en MEB en donde se define claramente el brazo de interconexión las cuales presentan paredes, el tipo de celda del metal celular es de tipo mixta. En cuanto a la morfología cúbica mediante microscopía estereoscópica no se alcanza a definir con claridad su interconectividad, sin embargo, con el microscopio electrónico de barrido se puede observar a detalle los brazos de interconexión entre celdas, se deduce que el metal celular presenta

celdas de tipo abierta, se observa una fase sólida discontinua debido a la presencia de defectos meso estructurales que se analizarán más adelante y una fase gaseosa continua. Finalmente, para la morfología esférica, la conectividad entre celdas no existe, las paredes de celda encierran espacios vacíos con gas en su interior, la fase sólida es continua y la fase gaseosa es discontinua la celda resultante presenta una topología de tipo cerrada, el análisis se resume en la Tabla 10.

**Tabla 10** Análisis de la topología y conectividad para determinada morfología de celda.

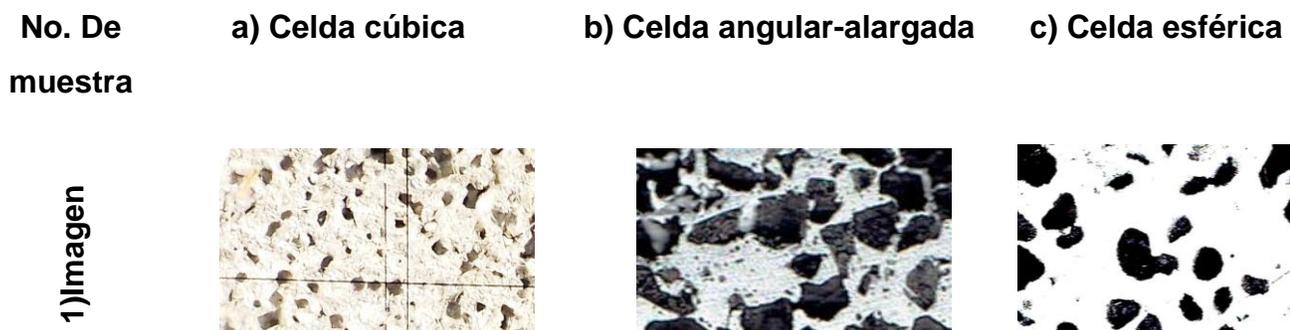
No. De muestra	a) Topología	b) Interconectividad	c) Características
1) Celda Cúbica	Celda abierta	Si presenta	Fase sólida discontinua, fase gaseosa continua
2) Celda Angular-alargada	Celda mixta	Si presenta	Fase sólida discontinua, fase gaseosa continua
3) Celda Esférica	Celda cerrada	No presenta	Fase sólida continua Fase gaseosa discontinua encerrado en paredes de celda

La topología y conectividad se determina por la continuidad o discontinuidad de la fase gaseosa y de la fase sólida como resultado del modo de infiltración del metal líquido sobre las partículas espaciadoras ya que al vaciar directamente el metal líquido sobre estas la estructura obtenida es de topología de tipo abierta y mixta mientras que al vaciar el metal líquido simultáneamente junto con las partículas obtuvimos una topología de tipo cerrada.

- **Conectividad de celda**

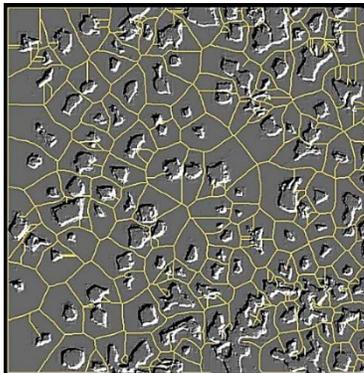
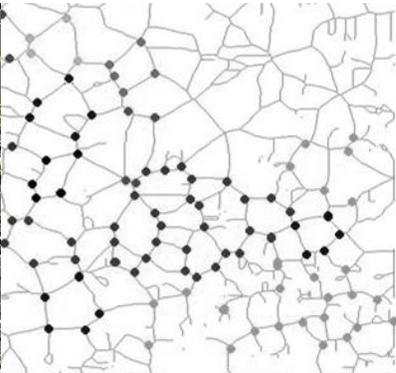
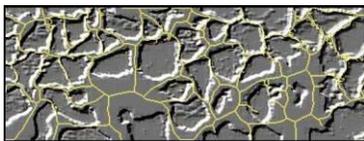
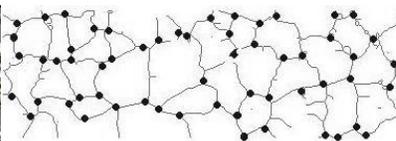
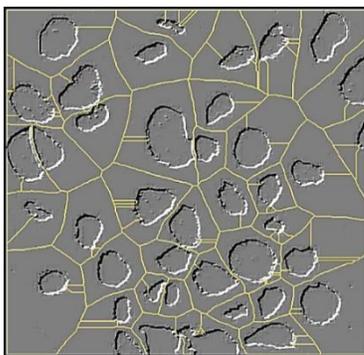
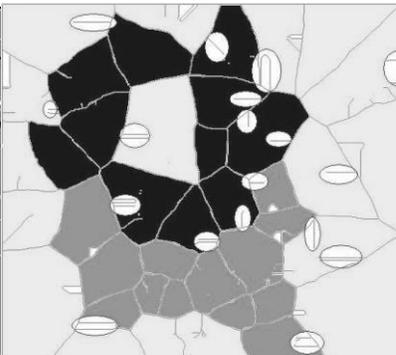
Para analizar el esqueleto correspondiente a cada morfología de celda se obtuvieron imágenes de muestras de cortes en 2D. Para esto se realizó un muestreo aleatorio en la cara superior de las probetas fabricadas realizando un corte transversal para la obtención de muestras representativas las cuales se desbastaron con precaución hasta lija 600 para no perjudicar los bordes de las celdas que

conforman la estructura, posteriormente se escanearon sus superficies para las muestras con morfología esférica y angular – alargada a diferencia de la muestra con morfología cúbica cuya imagen se obtuvo mediante microscopía estereoscópica, ya que mediante el escaneo no se definían con claridad las celdas por sus dimensiones tan pequeñas. Cabe mencionar que a la superficie de la muestra con forma angular-alargada se le aplicó un tinte negro mate para definir mejor el área de las celdas ya que se dificultaba su observación debido a su morfología. Finalmente, las tres imágenes resultantes se retocaron. En la figura 25 se muestran las imágenes obtenidas de las superficies de las muestras.



**Figura 24** Imágenes de la superficie de las muestras.

Las imágenes anteriores se procesaron con el software Image- Pro Plus para detectar la morfología y estructura del esqueleto de cada muestra con la finalidad de analizar los bordes y determinar el No. de conectividad de celda. En la figura 26 se muestran las imágenes procesadas.

No. De muestra	a) Morfología y esqueleto de la estructura	b) Bordes de conectividad de celda	c) Conectividad y No. de conectividad
1) Celda cúbica Abierta			Si presenta No. (5,6)
2) Celda angular-alargada			Si presenta No.(5)
3) Celda esférica			No presenta

**Figura 25** Esqueleto de la estructura y bordes de conectividad de celda.

Los bordes de celda se localizaron con puntos negros (1, 2) y para la imagen 3 se localizaron las líneas paralelas debido a la carencia de interconexión.

En la estructura de celda cúbica se observan zonas de menor concentración de celdas, el No. de

conectividad obtenida es de 5 y los bordes de celda están localizados en forma de puntos de color gris, en las zonas de mayor concentración de porosidad su conectividad aumenta a 6 y en la imagen se muestran en forma de puntos de color negro, en la zona donde la porosidad ya no se define (porosidad no controlada) existe un rompimiento de conectividades.

En la estructura de celda angular-alargada se observa una concentración uniforme de porosidad, aunque su estructura es irregular. Los puntos de conexión son constantes siendo el No. de conectividad de 5 y se observan en forma de puntos de color negro.

En la estructura de celda esférica las celdas son distantes y como resultado el software muestra líneas paralelas rectas, los bordes de celda y el No. de conectividad no están definidos, hay una mayor concentración de celdas en la parte inferior de color negro, conforme va abarcando la parte superior éstas se van dispersando de forma aleatoria (localizadas en la imagen de gris oscuro y tenue) y la distancia entre las celdas va aumentando.

#### 4.13 Porosidad

El % de porosidad es una medida del % de espacios vacíos con respecto al metal sólido, es un parámetro de suma importancia ya que está relacionado directamente con la densidad relativa del material y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$p = 1 - \frac{\rho_*}{\rho_s} \times 100 \text{ ----- Ec.1}$$

Donde

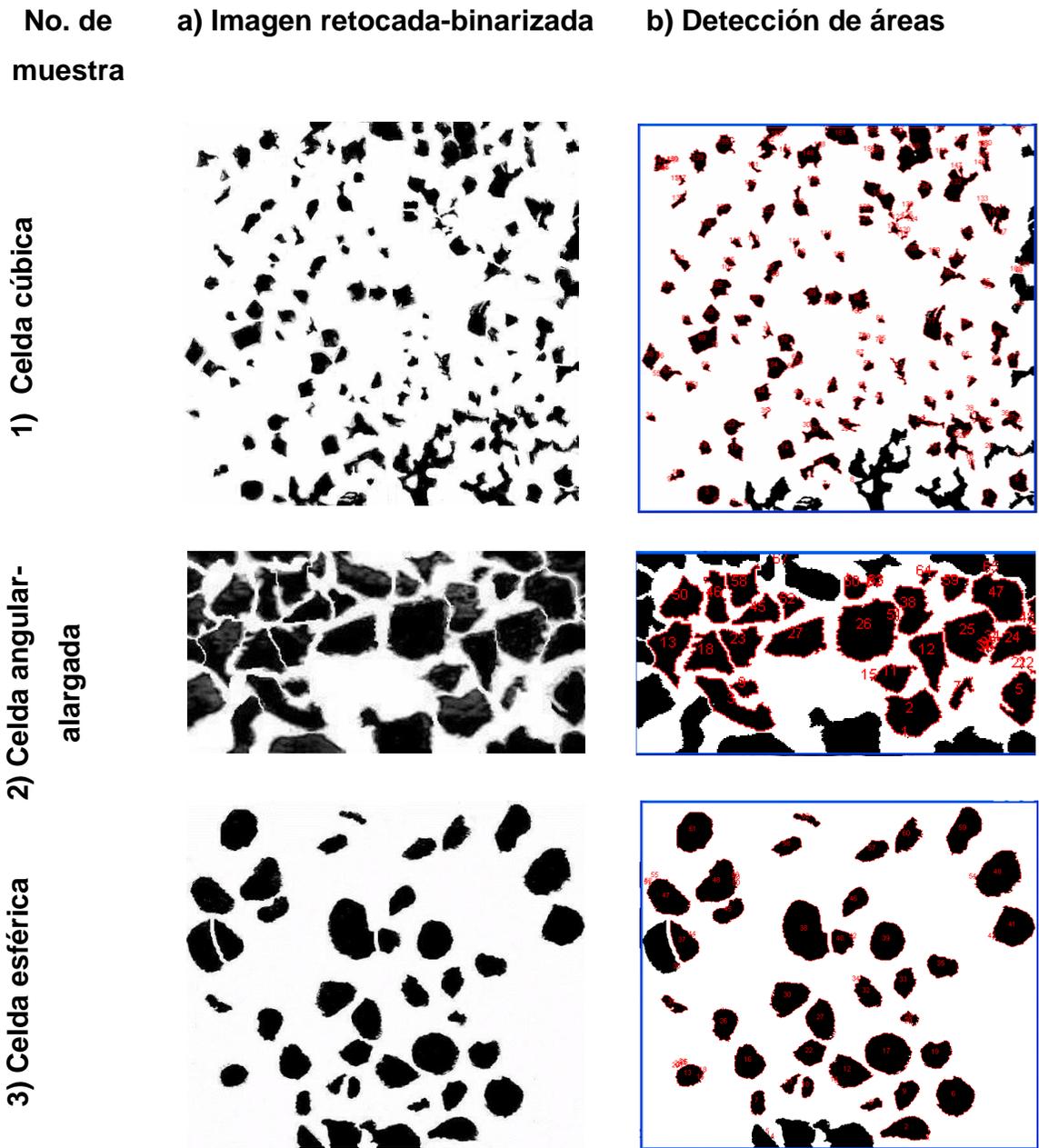
$p$  : Porosidad

$\rho_*$  : Densidad relativa

$\rho_s$  : Densidad del sólido que conforma el metal celular

Para analizar el % de porosidad se empleó el método de análisis de imagen mediante corte en 2D realizando un tratamiento de datos estadísticos, con el analizador de imágenes UTHSCSA. Se binarizaron las imágenes retocadas anteriormente obtenidas, se detectaron las superficies de las

celdas y se analizaron las imágenes para obtener la información numérica correspondiente al área de las celdas. A continuación, en la figura 27 se muestran las imágenes retocadas-binarizadas y la detección áreas correspondientes.



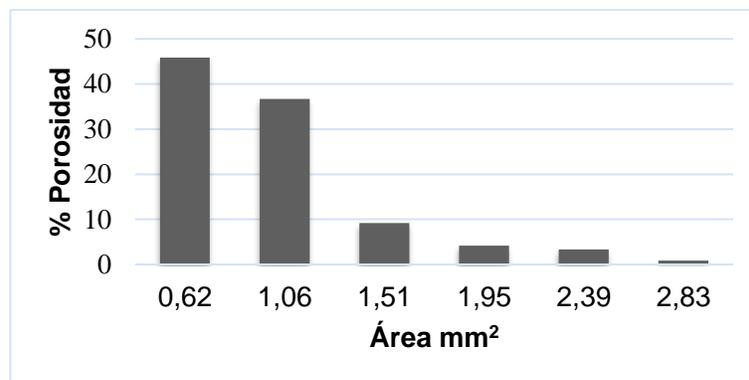
**Figura 26** Imágenes retocadas - binarizadas del corte transversal de muestras representativas de la cara superior de cada probeta obtenida y detección de áreas para su análisis.

A partir de los datos de área de las imágenes retocadas-binarizadas que arrojó el programa y la escala de la imagen, se efectuó una relación de escalas convirtiendo las áreas de pixeles<sup>2</sup> a mm<sup>2</sup> posteriormente con estos datos se realizó un análisis estadístico para datos agrupados. En la siguiente tabla se muestra un ejemplo del tratamiento de datos para la imagen procesada con morfología cúbica.

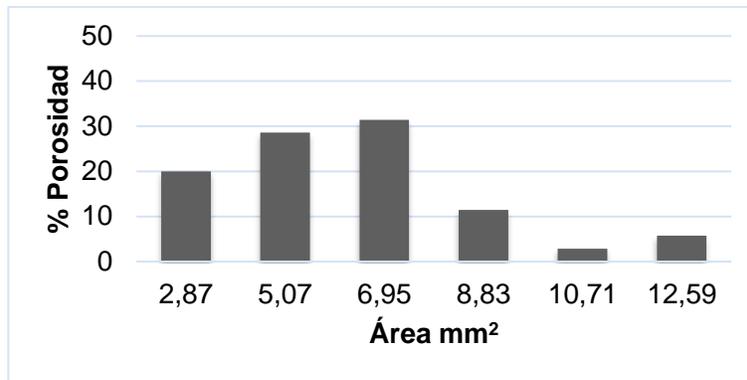
**Tabla 11** Ejemplo de datos arrojados por el programa y construcción de tablas de frecuencia.

Object	Área	Área (mm <sup>2</sup> )	Grupos (1)	Frecuencia (1)	Lado (mm)	Grupo (2)	Frecuencia (2)	
<b>Mean</b>								
<b>Std. Dev.</b>	<b>% DE POROSIDAD</b>					<b>DENSIDAD ABSOLUTA</b>		
	<b>Datos</b>							
#1	556	96.84	0.7758	0.4467	36.0000	0.8808	0.5629	9.0000
#2	170	57.87	0.4636	0.7119	31.0000	0.6809	0.6998	31.0000
#3	901	122.43	0.9808	0.9771	22.0000	0.9903	0.8367	25.0000

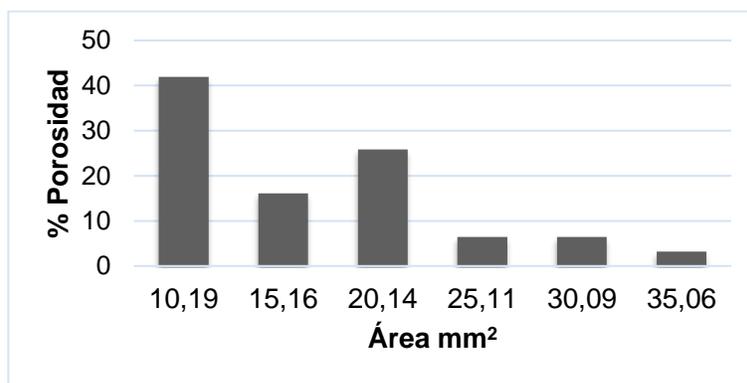
A partir de las tablas construidas de los datos arrojados de las imágenes retocadas, se obtuvieron las siguientes gráficas % de Porosidad vs. Área:



**Gráfica 7** %Porosidad vs. Área en mm<sup>2</sup> para el poro cúbico.



**Gráfica 8** % Porosidad vs. Área en mm<sup>2</sup> para el poro angular-alargado.



**Gráfica 9** % Porosidad vs. Área en mm<sup>2</sup> para el poro esférico.

**Tabla 12** % de Porosidad para cada muestra con determinada morfología de celda.

% Porosidad	a) Poro cúbico	b) Poro angular-alargado	c) Poro esférico
1) <i>p</i>	16.66	16.66	16.66

En las tres gráficas correspondientes a cada tipo de morfología se muestra una distribución normal de Gauss con un máximo, un mínimo y una media de porosidad, el promedio total de porosidad fue la misma con un valor de 16.66 mm<sup>2</sup> para las tres muestras obtenidas, diferenciándose entre sí en la distribución de la porosidad con respecto al área, la media para la morfología cúbica corresponde a un valor de 0.77 mm<sup>2</sup> por arriba de este valor la porosidad va disminuyendo mientras que por debajo

de este valor aumenta inclinándose por un área de  $0.62 \text{ mm}^2$  (por debajo de la media), la media para la morfología angular-alargada tiene un valor de  $5.14 \text{ mm}^2$  por debajo de este valor la porosidad disminuye y por arriba de este valor aumenta inclinándose hacia un valor de área de  $5.06 \text{ mm}^2$  (por debajo de la media), la media para la morfología esférica tiene un valor de  $14.13 \text{ mm}^2$  por debajo de este valor la porosidad aumenta y por arriba del mismo la porosidad disminuye inclinándose la media por un área de  $15.16$  (por arriba de la media).

Para las muestras del caso A (morfología cúbica y angular-alargada) los valores de la media tuvieron una cierta inclinación hacia valores menores de área con respecto a la distribución de la porosidad de 0.15 unidades (34.23% con respecto al tamaño de clase) para la morfología cúbica y de 0.07 unidades (4.02% con respecto al tamaño de clase) para la morfología angular-alargada, siendo para la morfología cúbica la disminución más significativa.

Para el caso B (morfología esférica) el valor de la media tuvo una cierta inclinación hacia valores mayores de área con respecto a la distribución de la porosidad de 1.03 unidades (20.74% con respecto al tamaño de clase).

La inclinación de valores de área por debajo de la media del caso A (morfología cúbica y angular-alargada) es más significativa en la morfología cúbica en donde se aprecia un aumento considerable de porosidad ya que la distribución del metal líquido va siendo inversamente proporcional a la porosidad, mientras que para la morfología angular-alargada este aumento no es apreciable de forma significativa, el aumento de porosidad se debe a la porosidad no controlada en la superficie del material elevándose el área media de replicación de partícula el cual debería ser muy cercano al tamaño de partícula replicada (sal fina) esto como resultado de la falta de precalentamiento de las partículas de sal propiciando el choque térmico con el metal fundido, en el caso de la replicación de la sal de grano el valor de la media de áreas es muy cercano con respecto al tamaño promedio de partícula siendo ligeramente menor, cabe mencionar que las partículas de sal de grano se precalentaron previamente para llevar a cabo la infiltración presentando porosidad controlada.

Para la inclinación de valores de área por arriba de la media en el caso B (morfología esférica) la porosidad disminuye de forma notable debido a que conforme aumenta el área de porosidad ésta disminuye porque la distribución de metal sólido va siendo mayor con respecto a la porosidad, el valor medio de área difiere de forma significativa con el tamaño de replicación siendo esta menor debido a

la carencia de precalentamiento de los pellets provocando su contracción hacia su interior como consecuencia del choque térmico originado.

La variación del % de la porosidad depende directamente de la distribución del metal líquido siendo inversamente proporcionales y ésta aumenta debido a la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras al momento de llevar a cabo la infiltración.

**Tabla 13** Análisis del % porosidad con respecto al valor promedio de área de celda.

No. Celda	Máximo	Mínimo	Media
1) Cubica	0.77	0.69	0.77
2) Angular- alargada	6.94	10.70	5.14
3) Esférica	10.19	35.06	14.13

#### 4.14 Grado de expansión

El grado de expansión ( $G$ ) indica cuantas veces se ha incrementado el volumen del material base ( $V_s$ ) al introducir gas en su interior. Este parámetro está directamente relacionado con la densidad relativa y con la porosidad de la espuma. El grado de expansión ( $G$ ) viene planteada por la siguiente ecuación

$$G = \frac{1}{\rho_r} \text{----- Ec.2}$$

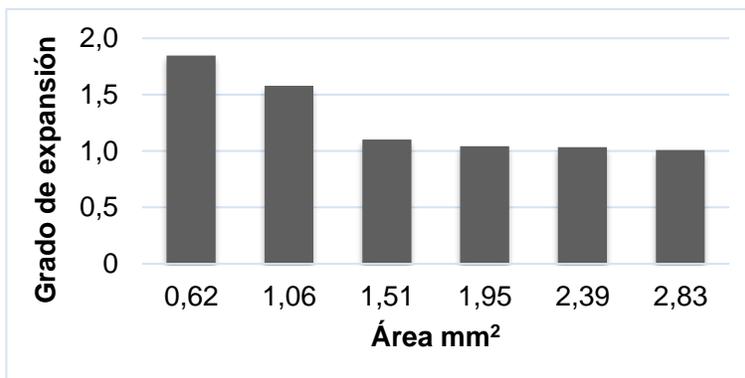
Donde

$G$ : Grado de expansión

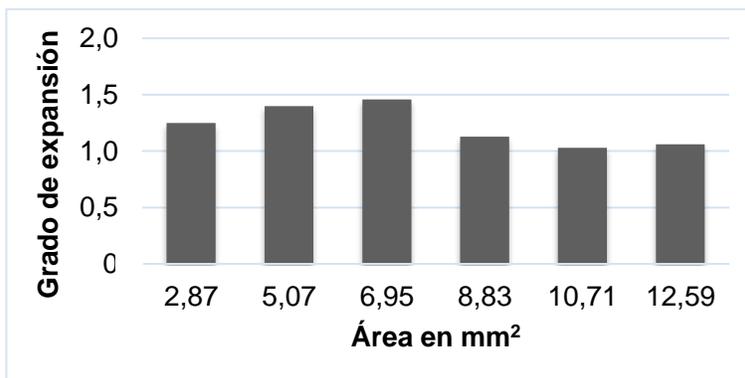
$\rho_r$  : Densidad relativa

Para analizar el grado de expansión de igual manera se utilizó el análisis de imagen mediante cortes en 2D y el tratamiento de datos estadísticos específicamente adaptado a la obtención de información numérica del grado de expansión.

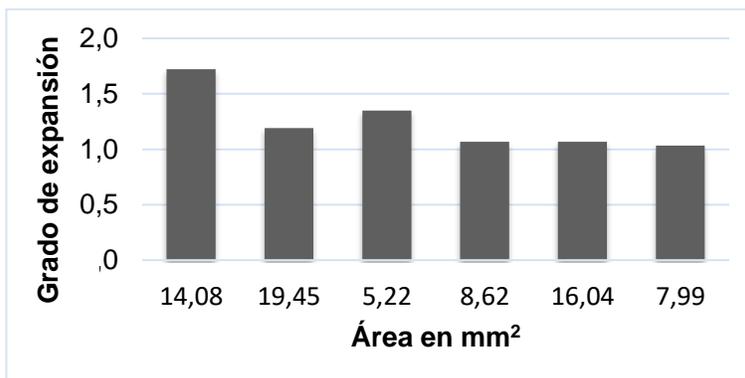
Enseguida se muestran los gráficos obtenidos de Grado de expansión vs. Área para una morfología de celda en específico.



**Gráfica 10** Grado de expansión vs. Área mm<sup>2</sup> para el poro cúbico.



**Gráfica 11** Grado de expansión vs. Área mm<sup>2</sup> para el poro angular-alargado.



**Gráfico 12** Grado de expansión vs. Área mm<sup>2</sup> para el poro esférico.

**Tabla 14** Grado de expansión para cada una de las muestras con determinada morfología de celda.

<b>Grado de expansión</b>	<b>a) Celda cúbica</b>	<b>b) Celda angular-alargada</b>	<b>c) Celda esférica</b>
<b>1) <i>G</i></b>	1.26	1.22	1.23

En la tabla 15 se observa el grado de expansión promedio para cada morfología determinada, el valor más elevado lo tiene la morfología cúbica debido a que presenta mayor porosidad seguido del poro esférico y poro angular alargado.

En los tres gráficos correspondientes a cada morfología se puede apreciar inicialmente una región de mayor grado de expansión. Posteriormente, a partir de un determinado valor, comienza a comportarse esta distribución constante ya que en esa región es en donde se presenta mayor porosidad conteniendo este intervalo de área a la media. Para la celda cúbica los valores de grado de expansión tienen variaciones que van desde 1.8 hasta 1 de grado de expansión debido a la porosidad no controlada del metal celular como consecuencia de la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras, mientras que para la celda angular alargada estas variaciones no son tan notorias ya que van desde 1.2 hasta 1.4, tendiendo a ser uniforme. El grado de expansión presentando porosidad estable como resultado del precalentamiento de las partículas espaciadoras, tanto de la celda alargada como la de morfología cúbica se aprecia en la región de mayor grado de expansión una tendencia continua ya sea de aumento o disminución del grado de expansión, de este modo se corrobora que los metales celulares son de celda abierta mientras que para el de morfología esférica existen fluctuaciones dentro de la región de mayor grado de expansión deduciendo que se trata de un metal celular de celda cerrada. La distribución inicial del grado de expansión con tendencia continua o discontinua nos da un indicio de la topología del metal celular (abierto y cerrado respectivamente) y aumenta debido a la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras.

**Tabla 15** Análisis del grado de expansión (G) con respecto al valor promedio de área de celda.

No. Celda	Intervalo de área de la región de mayor grado de expansión (mm <sup>2</sup> )	Intervalo del grado de expansión entre el valor máximo y mínimo	Media
1) Cubica	0.62-1.50	1.8-1	0.77
2) Angular-alargada	2.86-6.94	1.2-1.4	5.14
3) Esférica	10.19-20.13	1.7-1.2	14.13

#### 4.15 Defectos macroestructurales.

En las probetas del caso A ambas presentaron macro rechupes, mientras que la probeta del caso B no presentó algún defecto macroestructural. Esto se debe a la falta de salida de escape de gases en el caso A en donde después del vaciado del metal líquido sobre la preforma el molde se cerró inmediatamente, siendo un sistema cerrado, mientras que para el caso B no se cerró el molde siendo un sistema abierto favoreciendo el escape de gases.

La infiltración del metal líquido en un sistema abierto o cerrado afecta directamente en la calidad de los metales celulares obtenidos, ya que la falta de escape de gases en el momento de la infiltración favorece la aparición de defectos macro estructurales como los macro rechupes.

**Defecto macroestructural**

**a) Celda cúbica**

**b) Celda angular  
-alargada**

**Macrorechupe**



**Figura 27** Defecto macroestructural para los metales celulares del caso A (a ojo desnudo) 1x.

#### 4.16 Propiedades físicas obtenidas a partir de la caracterización macroestructural

Para la obtención de las propiedades físicas (densidad relativa y densidad absoluta) de igual forma se analizaron las imágenes retocadas y binarizadas anteriormente mediante el análisis de imagen de corte en 2D.

- **Densidad relativa**

La densidad relativa  $\rho_r$ , es la propiedad que tiene mayor influencia sobre el comportamiento a compresión de las espumas metálicas y se define como la relación entre la densidad del sólido celular y la densidad del metal convencional. Con los datos obtenidos de % de porosidad se obtuvo la densidad relativa promedio y su distribución mediante la siguiente ecuación

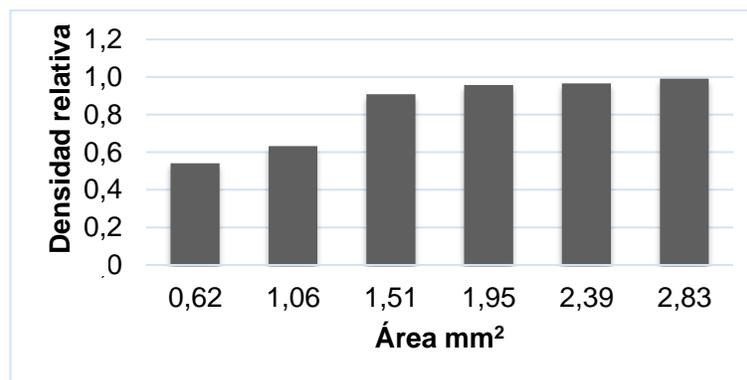
$$\rho_r = 1 - p \text{ ----- Ec.3}$$

Donde

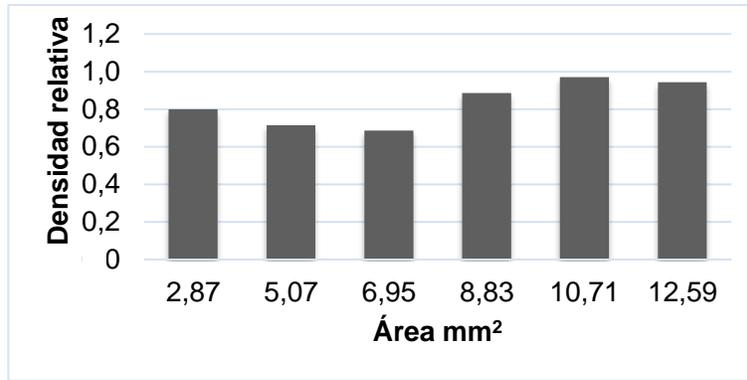
$\rho_r$  : Densidad relativa

$p$  : Porosidad

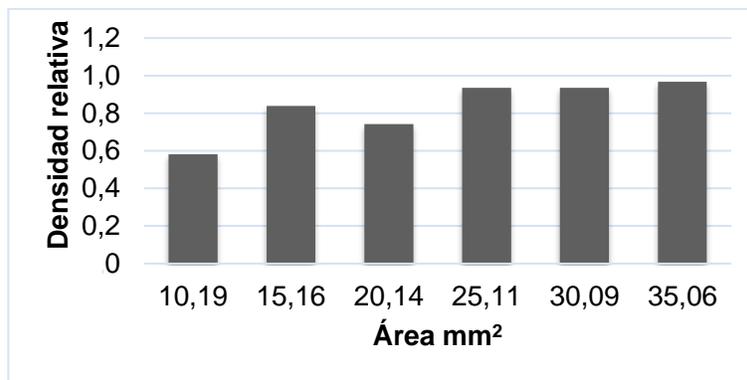
La tabla y las gráficas se muestran a continuación:



**Gráfica 13** Densidad Relativa vs. Área mm<sup>2</sup> para el poro cúbico.



**Gráfica 14** Densidad Relativa vs. Área mm<sup>2</sup> para el poro angular-alargado.



**Gráfica 15** Densidad Relativa vs. Área mm<sup>2</sup> para el poro esférico.

**Tabla 16** Densidad relativa para cada una de las muestras con determinada morfología de celda.

Densidad relativa	a) Celda cúbica	b) Celda angular-alargado	c) Celda esférica	d) Densidad relativa Al
1) $\rho_r$	0.83	0.83	0.83	1

En la tabla 17 se puede apreciar que la densidad relativa para los tres metales celulares es la misma. Sin embargo, difieren entre sí en cuanto a su distribución con respecto al área.

Con base a las gráficas obtenidas se puede observar la distribución de la densidad relativa con respecto al área, de igual forma que en los gráficos anteriores se aprecia continuidad a lo largo de la gráfica para el caso A mientras que para el caso B existen fluctuaciones como resultado de la topología de los materiales celulares. En la primer gráfica se puede apreciar una región en donde disminuye drásticamente la densidad relativa del metal celular como resultado de la porosidad no controlada, para la morfología alargada se presenta un ligero cambio de (0.8-0.7) tendiendo a ser la densidad relativa constante y en la de morfología esférica el cambio de densidad relativa es más acentuada que la de morfología cúbica pero menos significativa que la de morfología cubica con un intervalo de 0.572-0.8 tendiendo a ser de igual forma constante.

**Tabla 17** Análisis de la densidad relativa con respecto al valor promedio de área de celda.

No. Celda	Intervalo de área de la región de menor $\rho_r$ (mm <sup>2</sup> )	Intervalo entre el valor máximo y mínimo de $\rho_r$	Media
1) Cúbica	0.62-1.50	0.5-1.9	0.77
2) Angular-alargada	2.86-6.94	0.8-0.7	5.14
3) Esférica	10.19-20.13	0.57-0.8	14.13

Tres sólidos celulares pueden tener la misma densidad relativa pero difieren en cuanto a su distribución con respecto al área y se ve directamente afectada por la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras; ésta falta de precalentamiento de la preforma favorece variaciones significativas en los valores de densidad relativa, propiciando la carencia de uniformidad y en consecuencia la falta de valores constantes con respecto al área abarcada debido a la presencia de porosidad no controlada. Los valores de distribución de la densidad relativa con respecto al área dependen en gran medida de la topología del sólido celular.

- **Densidad absoluta del metal celular**

La diferencia entre la densidad del aluminio y la del silicio es mínima ( $\rho_{Al} = 2.7 \frac{g}{cm^3}$ ,  $\rho_{Si} = 2.33 \frac{g}{cm^3}$ ), en consecuencia, el Si es uno de los pocos elementos que pueden ser adicionados al aluminio sin que se presente un cambio esencial en la densidad de este último.

A partir de la densidad relativa obtenida y conociendo la densidad del Al mediante la ecuación:

$$\rho_e = \rho_r \times \rho_s \text{ ----- Ec.4}$$

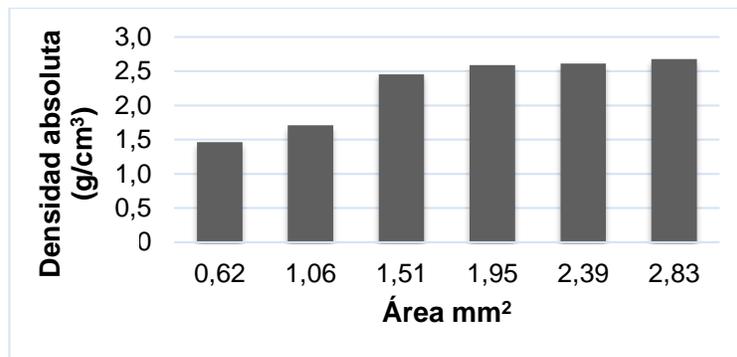
Donde

$\rho_e$ : Densidad absoluta del metal celular

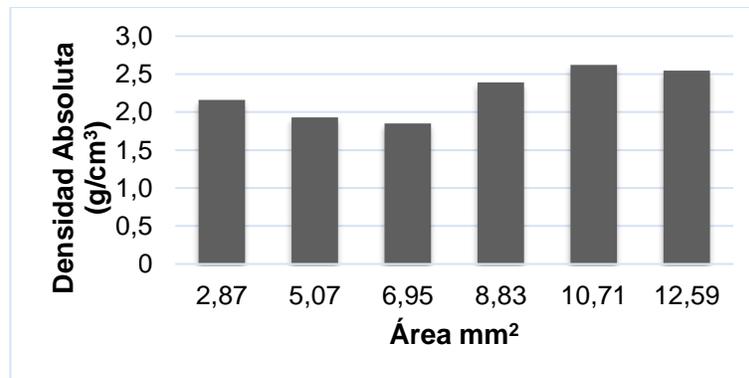
$\rho_r$ : Densidad relativa

$\rho_s$ : Densidad del sólido que conforma el metal celular

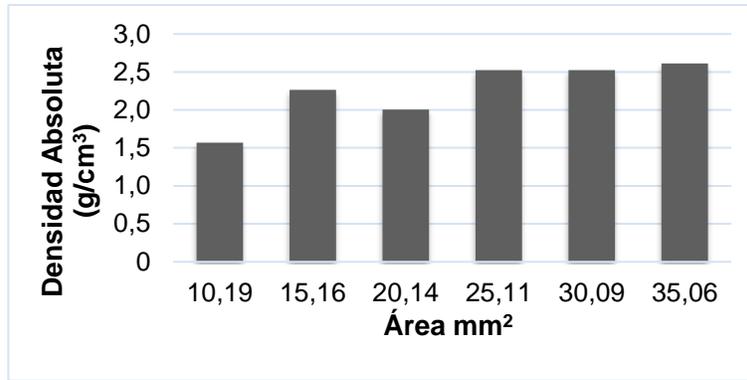
A partir de los valores de densidad obtenidos se construyeron gráficas de la distribución de Densidad Absoluta vs. Área mm<sup>2</sup>, las cuales se muestran a continuación:



**Gráfica 16** Densidad Absoluta vs. Área mm<sup>2</sup> para el poro cúbico.



**Gráfica 17** Densidad Absoluta vs. Área mm<sup>2</sup> para el poro angular-alargado.



**Gráfica 18** Densidad Absoluta vs. Área mm<sup>2</sup> el poro esférico.

**Tabla 18** Densidad absoluta de los 3 metales celulares.

Densidad g/ cm <sup>3</sup> metal celular	a) Celda cúbica	b) Celda angular- alargada	c) Celda esférica	Densidad del Al
1) $\rho_e$	2.25	2.25	2.25	2.7 g/cm <sup>3</sup>

En la tabla 19 se muestran los valores obtenidos de densidades siendo iguales para todos los metales celulares en contraste con la densidad del metal convencional poniendo en evidencia la disminución de la densidad por la presencia de porosidad. El comportamiento de la distribución de la densidad para los tres metales celulares es diferente ya que corresponde a la estructura de tres metales celulares diferentes y las tres tienden a ser constantes. Sin embargo, la gráfica de la morfología cúbica tiene mayor variación de la densidad debido a la presencia de porosidad no controlada (1.5-2.5), mientras que para la morfología angular alargada la variación de la densidad no es tan pronunciada (2.5-2) como en el caso de la morfología cúbica. Para ambas morfologías angular y cúbica, la variación de la densidad es de forma continua, infiriendo que se trata de una topología de celda de tipo abierta. En cuanto a la morfología esférica existe una apreciable variación de 1.5-2.25, para un valor de área de 15.1646 mm<sup>2</sup>, se presenta una pronunciada fluctuación por una elevación de la densidad debido a que existe mayor masa de metal convencional con respecto al volumen que lo contiene, infiriendo que se trata de una topología de celda de tipo cerrada. Este análisis se resume en la tabla 20:

**Tabla 19** Análisis de la densidad absoluta con respecto al valor promedio de área de celda.

No. Celda	Intervalo de área de la región de menor densidad absoluta (mm <sup>2</sup> )	Intervalo de densidad absoluta entre el valor máximo y mínimo	Promedio de área de celda
1) Cúbica	0.62-1.50	1.5-2.5	0.77
2) Angular-alargada	2.86-6.94	2.5-2	5.14
3) Esférica	10.19-20.13	1.5-2.5	14.13

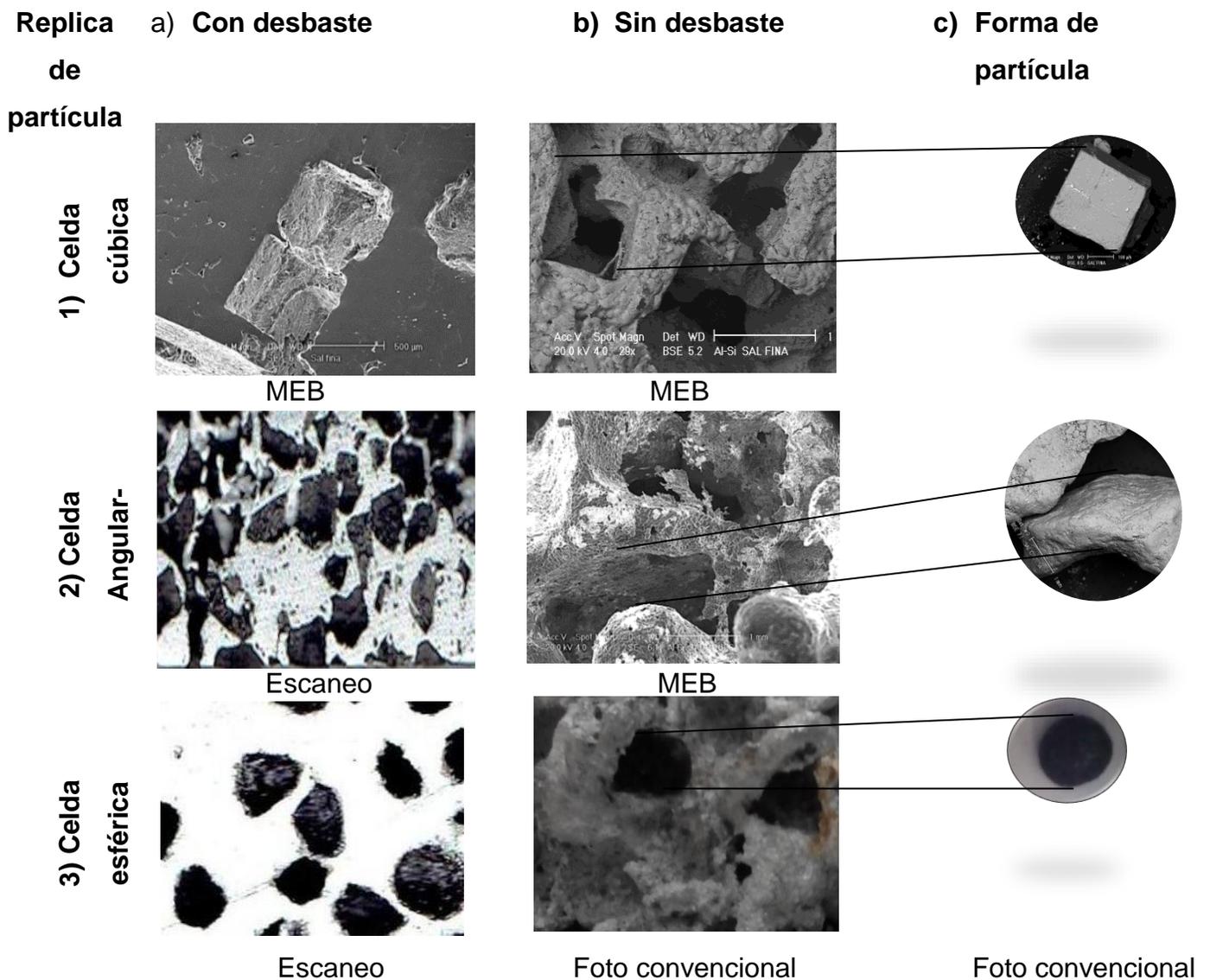
La presencia de porosidad genera la disminución del valor de la densidad del sólido celular con respecto al material de origen, la distribución de la densidad se ve directamente afectada por el exceso o carencia de porosidad, ya que se presenta una disminución significativa de éstos valores por la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras propiciando porosidad no controlada. De igual forma los valores de distribución de la densidad con respecto al área dependen en gran medida con la topología del sólido celular.

## 4.2 Caracterización meso estructural

### 4.21 Forma de celda

Las propiedades estructurales como forma de celda y características dimensionales, así como las propiedades mecánicas de los metales celulares dependen en gran medida de la estructura de la preforma. Los defectos estructurales deberán de ser los menos posibles y para esto es necesario controlar la morfología de la partícula de modo que el espacio vacío de la celda sea lo más fiel a la forma de la partícula espaciadora utilizada. En la figura 29 se pueden observar las imágenes de cortes transversales desbastadas y muestras sin corte ni desbaste para cada tipo de morfología de partícula en comparación con la forma de la partícula espaciadora utilizada. Se puede observar que la replicación en negativo de granos cúbicos y granos angulares – alargados en el metal se conserva (imagen 1 b) y 2 b), algunas replications de sal no mantienen una forma perfectamente cúbica debido a que presentan fracturas y grietas en su superficie por lo que no son completamente perfectas (imagen 1a)). De igual forma los granos angulares presentan varias irregularidades en su superficie que, en contraste con la morfología angular y alargada de la sal de grano, se conserva. Esto se observa claramente en las imágenes 2a) y 2b). Finalmente, en las replications de la forma esférica,

se puede notar claramente que difiere en gran medida de la partícula de morfología original. Existen varias partículas alargadas con tendencia a la morfología esférica y presentan una ligera protuberancia hacia su interior debido a su contracción durante la infiltración, pocas son las partículas que conservan esta morfología. Emplear diferentes formas de partículas espaciadoras permite obtener diferentes tipos de estructuras. El tipo de material que conforman las partículas espaciadoras, la forma de fabricación en caso de que se haya llevado a cabo, así como su comportamiento en el momento de la infiltración del metal líquido con base a su precalentamiento y a la temperatura de fusión o de infiltración, contribuyen en la forma final de la estructura.



**Figura 28** Comparación de la forma de partícula con respecto a la forma de celda.

## 4.22 Características dimensionales de celda (Tamaño de celda, pared y borde).

- **Tamaño de celda promedio**

Existen diversas teorías en donde se plantea que el tamaño de celda no afecta las propiedades mecánicas del metal celular. La teoría de Onck establece que en la relación del tamaño de celda y el tamaño de la probeta afecta el módulo de elasticidad  $E$  y el esfuerzo de colapso plástico  $\sigma_{pl}^*$ . Durante la compresión del metal celular, el límite entre el tamaño de la celda y la longitud de la probeta para que las propiedades mecánicas no disminuyan considerablemente es equivalente a  $\frac{L}{d} = 8$ , siendo  $L$  el largo de la probeta y  $d$  el tamaño promedio de la celda ya que, por debajo de este valor, hay un mayor número de celdas no afectadas por la carga de compresión aplicada, previniendo de este modo las variaciones que pueden ocasionar los bordes de celda libre de esfuerzos.

Una preforma con partículas equiaxiales y con tamaño homogéneo genera un metal celular con un tamaño de celda más homogéneo. En la Tabla 21 se muestran los valores del tamaño promedio de celda, así como el tamaño promedio de partícula espaciadora para determinada morfología de partícula.

**Tabla 20** Tamaño de celda promedio y tamaño de partícula espaciadora.

No.	a) ST <sub>1</sub> Cubico	b) ST <sub>2</sub> Angular- alargado	c) ST <sub>3</sub> Esférico
1) Promedio de tamaño de celda (mm)	0.84	3.32	4.13
2) Promedio de tamaño de partícula espaciadora (mm)	0.53	3.64	5

Nota: Donde ST se refiere a la sección transversal de la cara superior de la espuma metálica.

Con base a la tabla anterior se puede observar, a grandes rasgos, la variación del promedio del tamaño de celda como resultado de la replicación de diferentes materiales para determinada morfología de celda, en contraste con el promedio de tamaño de partícula espaciadora, Se puede observar que las dimensiones para la morfología angular-alargada y esférica no presentan demasiadas variaciones con respecto al tamaño de partícula espaciadora, a diferencia de la

morfología cúbica, presentando una variación significativa. Estas variaciones se muestran en la siguiente tabla a modo de porcentajes:

**Tabla 21** Análisis de la topología y conectividad de celda para determinada morfología de celda.

No.	a) ST <sub>1</sub> Cúbico	b) ST <sub>2</sub> Angular- alargado	c)ST <sub>3</sub> Esférico
<b>1) Material de partícula espaciadora</b>	Sal fina	Sal de grano	Pellet de mezcla ternaria
<b>2) Variación del tamaño de celda promedio con respecto al tamaño promedio total de partícula espaciadora</b>	56.45% Por encima del promedio tamaño total de la partícula espaciadora	8.82% Por debajo del promedio tamaño total de la partícula espaciadora	17.36% Por debajo del promedio tamaño total de la partícula espaciadora
<b>3) Control del tamaño de celda promedio</b>	Tamaño de celda no controlado	Tamaño de celda controlado	Tamaño de celda levemente controlado

Se puede apreciar que el tamaño de celda para la de morfología esférica y angular alargada está controlado debido a la mínima variación del tamaño de celda promedio con respecto al tamaño total de partícula espaciadora. La mínima variación se debe al tipo de material del que están compuestos las partículas espaciadoras y al control granulométrico de las mismas. En el caso de la morfología esférica se debe al tipo de material, los pellets, que al estar compuestos por una mezcla ternaria de harina- agua- sal durante la infiltración del metal líquido se contraen, disminuyendo su tamaño, aunado a una fabricación manual deficiente y en el caso de la morfología angular-alargada proviene únicamente del control granulométrico de las partículas espaciadoras y de la fricción con metal líquido durante la infiltración.

La variación del tamaño promedio de celda de la morfología cúbica, con respecto al tamaño promedio de la partícula espaciadora, tiene una variación de más de la mitad por encima del tamaño total de la partícula espaciadora y en consecuencia el tamaño de celda no está controlado. Este incremento del tamaño de celda con respecto al de la partícula espaciadora se debe a la falta de control de porosidad del material por falta de precalentamiento. A continuación, se muestra la tabla de desviación estándar

del tamaño de celda para cada uno de los materiales celulares obtenidos con determinada morfología.

**Tabla 22** Desviación estándar (s) del tamaño promedio de celda para una morfología específica.

No.	a) ST <sub>1</sub> Cúbico	b) ST <sub>2</sub> Angular-Alargado	c) ST <sub>3</sub> Esférico
1) Desviación estándar del tamaño de celda (s)	0.25	0.96	0.97

La desviación estándar es más elevada para la morfología esférica debido a que hay mayor dispersión en los valores de los datos obtenidos, como consecuencia de la variación del tamaño de celda debida a su contracción. En cuanto a la morfología cúbica, la desviación es baja debido a que los valores de tamaño de celda son cercanos al valor del tamaño de celda promedio, confirmando así un tamaño de celda superior al tamaño de replicación esperado y para la morfología angular -alargada presenta una significativa dispersión entre los datos debido a la carencia del control granulométrico de las partículas replicadas.

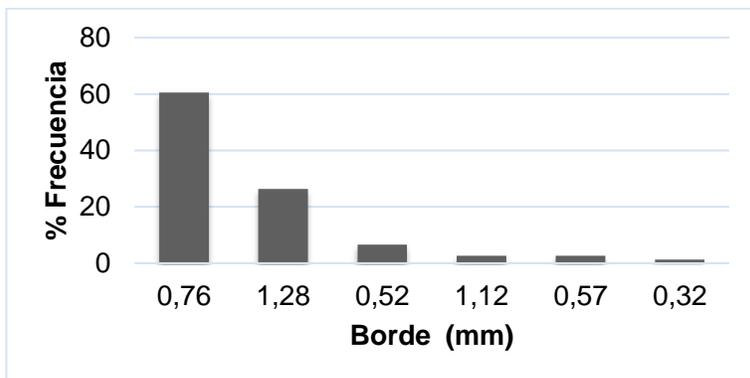
- **Tamaño de pared y borde**

Un metal celular con tamaños de borde y/o pared homogénea genera una estructura más uniforme. Para analizar el espesor de pared y de borde se procesaron 3 imágenes para resaltar su morfología con el analizador de imágenes Image Pro y se muestran en la figura 30. A partir de la imagen 30 a) se realizaron las mediciones de paredes y bordes. En la imagen 30 b) se colocó una flecha para la medición de borde y en la de pared una cruz.

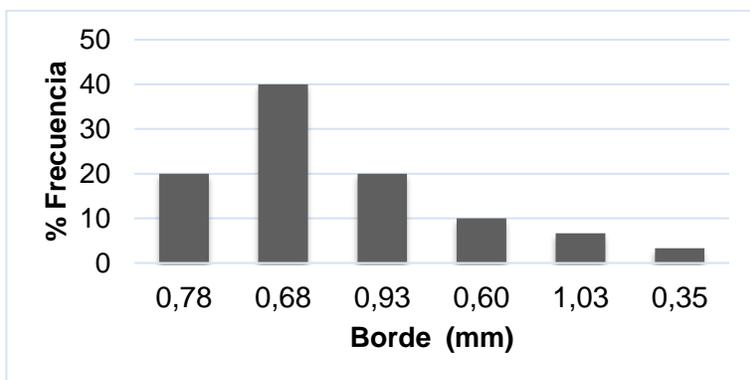


**Figura 29** Ejemplo de la medición de borde y pared para una celda angular- alargada (b).

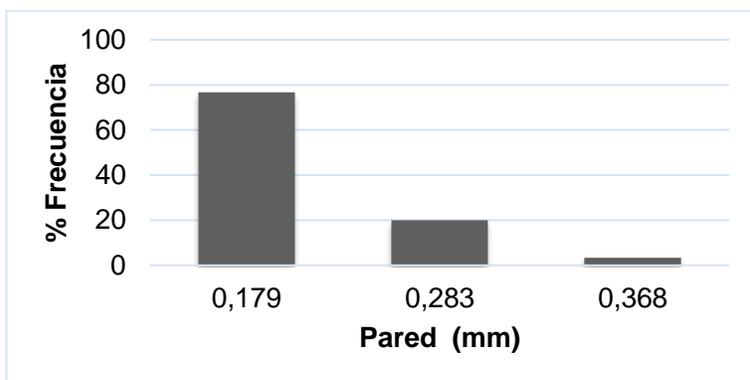
Con los resultados obtenidos se realizaron las gráficas %Frecuencia vs. Borde o Pared dependiendo de la morfología de celda.



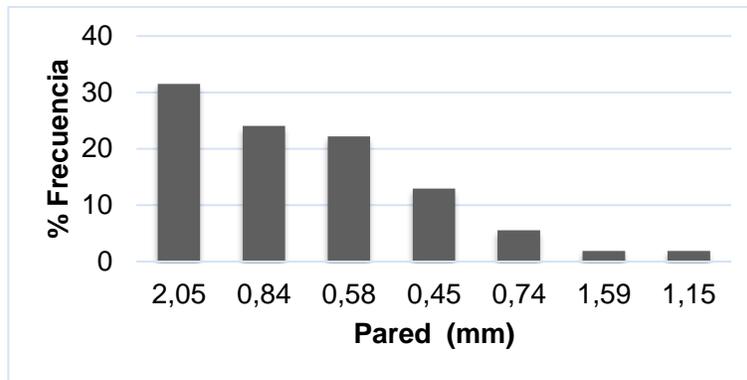
**Gráfica 19** % Frecuencia vs. Borde (mm) para la celda cúbica.



**Gráfica 20** % Frecuencia vs. Borde (mm) para la celda angular-alargada.



**Gráfica 21** % Frecuencia vs. Pared (mm) para la celda angular- alargada.



**Gráfica 22** % Frecuencia vs. Pared (mm) para la celda esférica.

A partir de las gráficas anteriores se puede observar el % de frecuencia de las mediciones obtenidas de borde de celda. Se presenta mayor frecuencia para el borde de celda con forma cúbica con un valor del 60% y en menor medida con un valor del 40% para la de morfología angular-alargada.

En las gráficas % Frecuencia vs. Pared la mayor frecuencia se presenta para la de celda con morfología angular-alargada con un valor del 50 % y en menor medida para la de morfología esférica con un valor del 32%.

El valor de mayor % de frecuencia de borde de celda para la morfología cúbica es de 0.75 mm mientras que para la de morfología angular-alargada es de 0.68 mm.

El valor de mayor % de frecuencia de pared para la de morfología angular- alargada es de 0.17 mm mientras que para la de morfología esférica es de 2.04mm.

Para ninguna de las gráficas de paredes y borde las mediciones son uniformes.

El análisis se resume en la siguiente tabla:

**Tabla 23** Mediciones de borde y pared para un valor máximo y mínimo de % de Frecuencia para determinada morfología de celda.

No. Celda	a) Tipo de medición	b) Frecuencia máxima (%)	c) Medición (mm)	d) Frecuencia mínimo (%)	e) Medición (mm)	f) Promedio de medición (mm)
<b>1) Cúbico</b>	Borde	60	0.75	1.75	0.32	2.08
	Pared	50	0.17	3.75	0.36	0.27
<b>2) Angular-alargada</b>	Borde	40	0.68	3.5	0.34	0.55
	Pared	32	2.04	2	1.15	2.43
<b>3) Esférica</b>	Pared					

#### 4.23 Homogeneidad

Para apreciar el comportamiento homogéneo de la variable cuantitativa (tamaño de celda), se calcula el coeficiente de variación mediante la ecuación 5:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \text{----- Ec.5}$$

Donde

$CV$  : Coeficiente de variación

$s$  : Desviación estándar

$\bar{x}$  : Media

**Tabla 24** Coeficiente de variación *cv* del tamaño promedio de celda para cada morfología

No.	a) ST <sub>1</sub> Cúbico	b) ST <sub>2</sub> Angular- Alargado	c) ST <sub>3</sub> Esférico
1) Coeficiente de variación del tamaño promedio ( <i>cv</i> ) de celda.	0.29	0.29	0.23

En la tabla anterior se puede observar mayor homogeneidad para la de morfología cúbica, es decir existe mayor variabilidad del tamaño de celda con respecto al tamaño promedio, ligeramente menor a la morfología cúbica para la de morfología angular-alargada y significativamente menor en contraste con ambas para la de morfología esférica.

Como ya se ha mencionado anteriormente esta variabilidad se debe a la falta de control de la porosidad para la morfología cúbica, para la morfología angular-alargada a la falta del control granulométrico del tamaño de partícula y para la morfología esférica la fabricación manual deficiente de esferas aunado a su contracción por el choque térmico generado durante la infiltración del metal líquido.

#### 4.24 Variación del tamaño de celda con respecto al promedio de tamaño de partícula espaciadora.

El tamaño promedio de celda debe ser lo más cercano posible al tamaño promedio de partícula espaciadora o de replicación y para esto es necesario encontrar el porcentaje de tamaño de celda de partícula con valores cercanos al valor promedio de tamaño de celda de partícula espaciadora. Este propósito fue para calcular la probabilidad de encontrar celdas con un % límite de tamaño por encima del tamaño promedio de partícula espaciadora permitido, en este caso se tomó como base un 10% (No  $\mu > 10$ ) y se utilizó la ecuación 6.

**Ecuación utilizada para los Intervalos de confianza y z.**

$$x - \frac{z\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < x + \frac{z\sigma}{\sqrt{n}} \text{----- Ec.6}$$

**Donde**

$\mu$ : Media

$n$ : Número de datos

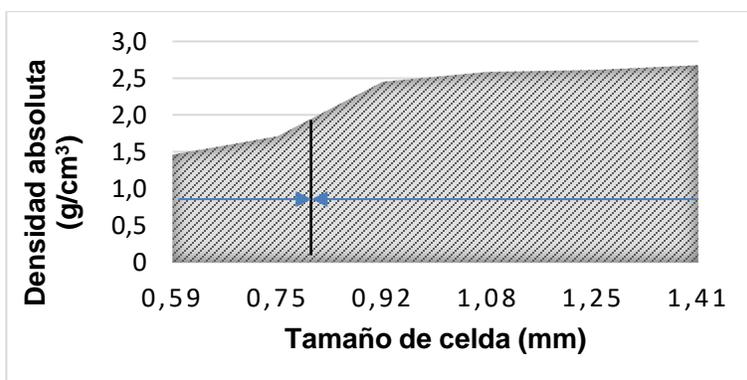
$x$ : El valor de interés

$\sigma$ : Desviación estándar

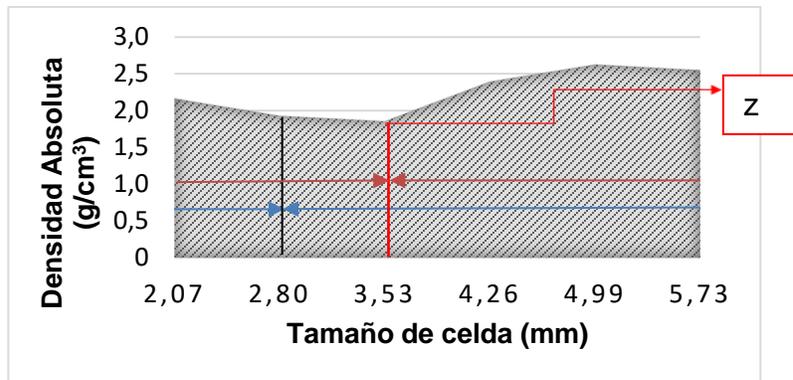
$z$ : Variable estándar

**Tabla 25** Datos estadísticos y %Probabilidad de encontrar celdas con diferencia en tamaño no mayor al 10 % con respecto al tamaño promedio de partícula espaciadora.

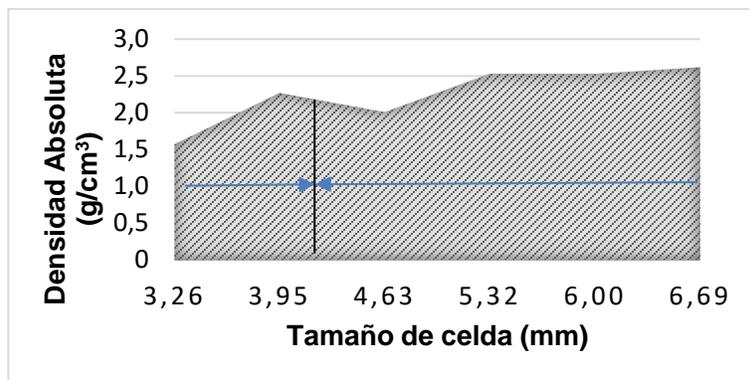
No.	Datos	a) Celda cúbica	b) Celda Angular-Alargada	c) Celda esférica
1)	Promedio de tamaño de partícula espaciadora (mm)	0.54	3.645	5
2)	$\mu$ (media)	0.84	3.32	4.13
3)	$\sigma$ (desviación estándar)	0.25	0.96	0.97
4)	$n$ (no. de datos)	120	35	31
5)	$x_1$	0.59	4.00	5.5
6)	$Z$	-10.8	4.19	7.8
7)	$P$ (Probabilidad)	0%	50%	100%



**Gráfica 23** Distribución de celdas con forma cúbica.



**Gráfica 24** Distribución de celdas con forma angular-alargada.



**Gráfica 25** Distribución de celdas con forma esférica.

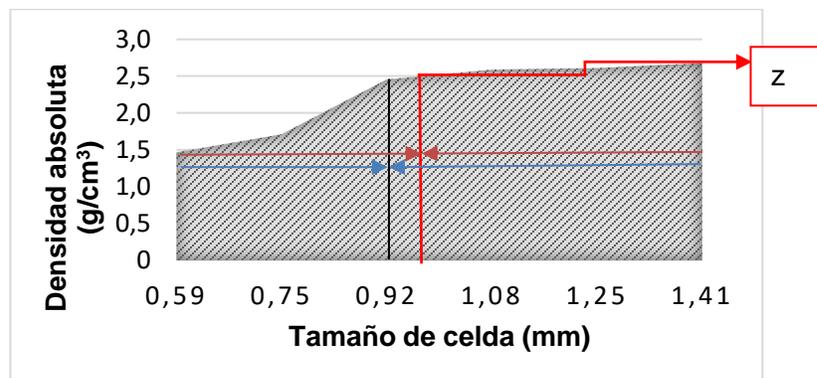
Tomando en cuenta los valores de probabilidad obtenidos para la celda de morfología cúbica, se puede apreciar que no vamos a encontrar partículas con un tamaño no mayor al 10 % con respecto al tamaño promedio de partícula espaciadora ya que el tamaño de celda está por debajo del valor mínimo de la distribución de la gráfica 22 obteniendo una probabilidad del 0%, es decir el tamaño de celda no está controlado, mientras que para la morfología angular-alargada y esférica si vamos a encontrar en gran medida tamaños de celda cercanos al valor del tamaño promedio de partícula espaciadora con un 50 y 100 % de probabilidad. Para la morfología de celda esférica éste 100% de probabilidad se debe a que el valor de  $z$  se sale del intervalo de confianza para el extremo derecho permitido, en la celda de morfología cúbica se obtiene mayor variación de hasta un 50% de tamaño de celda excesivo por encima del tamaño promedio de partícula espaciadora en comparación con el tamaño promedio de celda de las demás morfologías cuyo cambio no es tan significativo.

#### 4.25 Variación del tamaño de celda con respecto a su tamaño promedio.

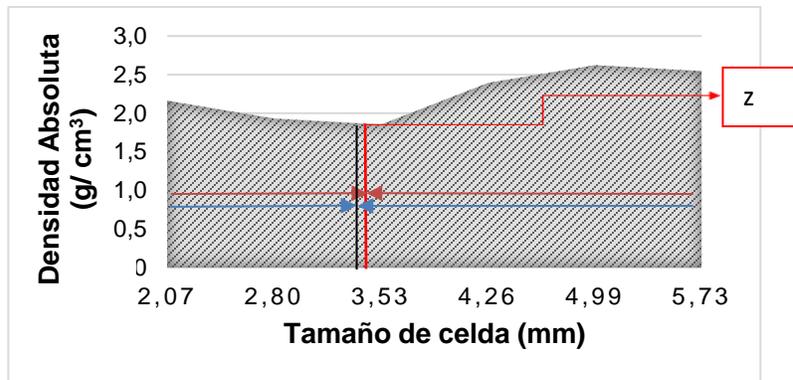
Para determinar la magnitud de la falta de control del tamaño promedio de partícula se evaluará el cálculo de la probabilidad de encontrar partículas con un tamaño de celda no mayor al 10 % ( $No \mu > 10\%$ ) como referencia con respecto al tamaño promedio de celda obtenido mediante la ecuación 6.

**Tabla 26** Datos estadísticos y % Probabilidad de encontrar celdas con diferencia en tamaño no mayor al 10 % con respecto al tamaño promedio de celda.

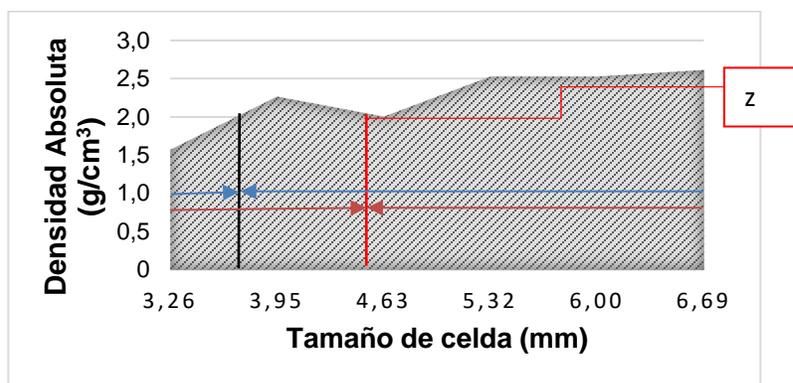
No.	Datos	a) Celda cúbica	b) Celda Angular-Alargada	c) Celda esférica
1)	Promedio de tamaño de partícula espaciadora(mm)	0.84	3.32	4.13
2)	$\mu$ (media)	0.84	3.32	4.13
3)	$\sigma$ (desviación estándar)	0.25	0.96	0.97
4)	n (no. de datos)	120	35	31
5)	$x_1$	0.92	3.65	4.54
6)	Z	3.65	2.031	2.35
7)	% P (Probabilidad)	49.99%	47.88	49.06



**Gráfica 26** Distribución de celdas con forma cúbica.



**Gráfica 27** Distribución de celdas con forma angular-alargada.

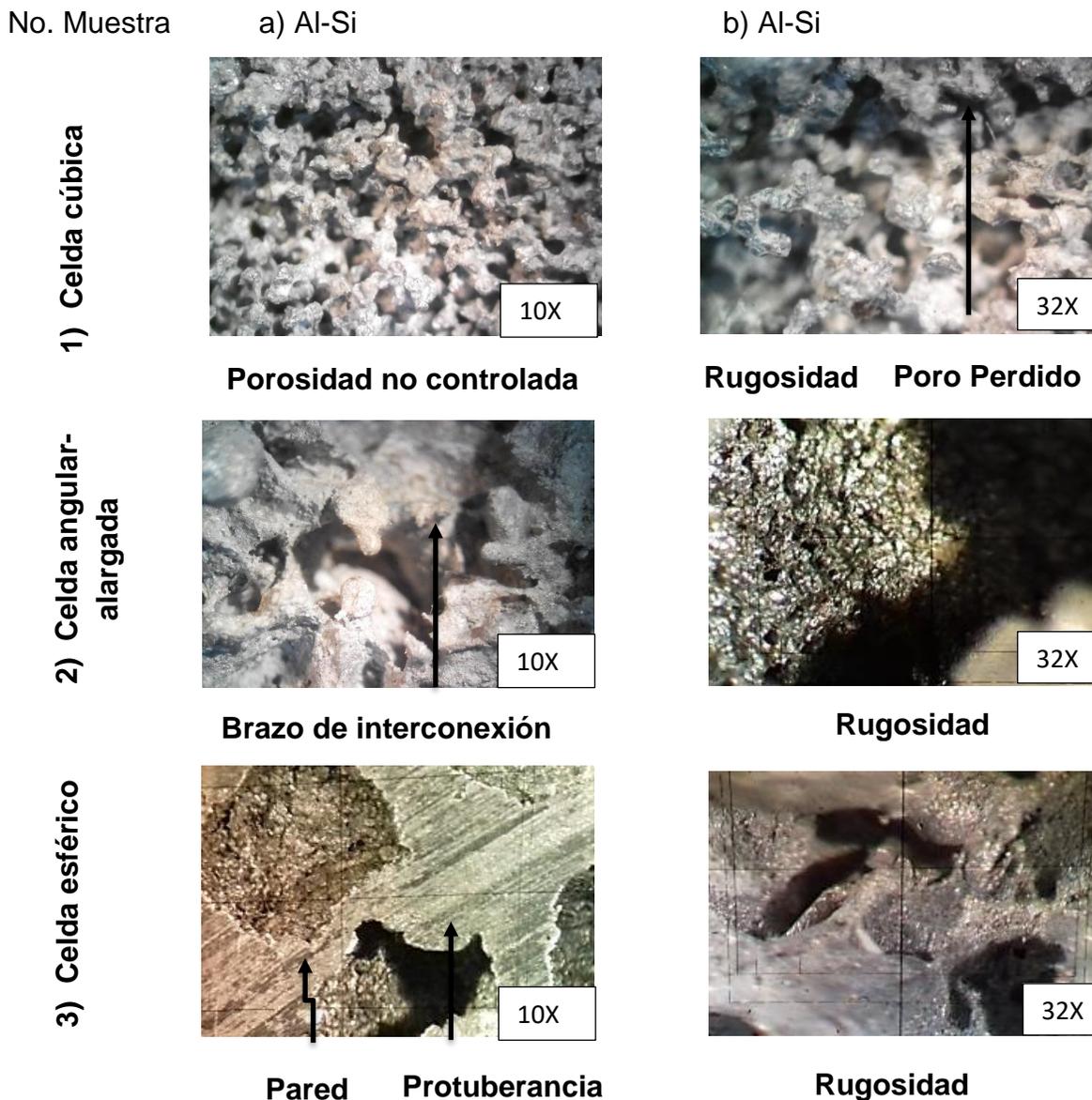


**Gráfica 28** Distribución de celdas con forma esférica.

Al calcular la probabilidad de encontrar celdas con tamaños no mayores al 10% con respecto al tamaño promedio de celda se puede corroborar que podemos encontrar gran cantidad de tamaños de celda con valores cercanos y no mayores al 10 % con respecto al tamaño promedio de celda, para b) y c) se confirma el control del tamaño de celda con un grado del 47.88% y 49.06%, mientras que para la de morfología cúbica se demuestra que su tamaño no está controlado con un 50 % de probabilidad de encontrar tamaños de celda cercanos al tamaño de celda promedio, el cual está un 50 % de tamaño excesivo por encima del tamaño promedio de partícula espaciadora identificando finalmente la porosidad no controlada presente en el metal celular.

#### 4.26 Defectos mesoestructurales

Las imperfecciones estructurales en las celdas cerradas como rugosidad en las paredes y bordes de celda influyen significativamente en su rigidez propiciando la disminución del módulo de Young. Con ayuda del microscopio estereoscópico se capturaron varias imágenes a diferentes aumentos para identificar los defectos mesoestructurales presentes en el metal celular.



**Figura 30** Cuadro comparativo de las imágenes obtenidas con el microscopio estereoscópico para el metal celular correspondiente.

En las imágenes de la figura 31 se puede observar la presencia de defectos mesoestructurales y la rugosidad de superficie a diferentes aumentos. Para la morfología cúbica se puede apreciar porosidad no controlada y en consecuencia celdas de borde perdido (1a)) como consecuencia de la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras generando un choque térmico con el metal fundido , mientras que para la de morfología esférica se aprecian poros con tendencia esférica (3a)) ya que presentan protuberancias en su interior debido a su contracción durante la infiltración del metal líquido y para las imágenes de morfología angular-alargada no se observan defectos mesoestructurales apreciables. En cuanto a la rugosidad es más marcada la de morfología esférica en contraste con la de morfología alargada – angular y cúbica ya que la superficie interior de la de celda esférica presenta una tonalidad oscura debido al remanente de partículas provenientes de la calcinación generada durante la infiltración del metal fundido y cuya remoción con el disolvente no fue satisfactoria, mientras que las de forma angular – alargada y cúbica aún presentan el color gris de una fundición limpia de aluminio. A modo de resumen en la tabla 28 se muestran los diferentes defectos mesoestructurales identificados para cada determinada morfología.

**Tabla 27** Análisis de defectos mesoestructurales para cada determinada morfología.

<b>Muestra</b>	<b>a) Porosidad no controlada</b>	<b>b) La forma no corresponde a la partícula replicada</b>	<b>c) Replicación de partículas espaciadoras con forma defectuosa</b>	<b>d) Rugosidad marcada</b>	<b>e) Contaminación superficial debido al remanente de las partículas espaciadoras</b>
<b>1) Celda cúbica</b>	Presenta porosidad no controlada	La forma si corresponde a la partícula replicada	Si se presenta	Rugosidad no tan marcada de color gris	Sin contaminación
<b>2) Celda angular alargada</b>	No presenta porosidad no controlada	La forma si corresponde a la partícula replicada	No es apreciable	Rugosidad no tan marcada de color gris	Sin contaminación

## Continuación de la tabla

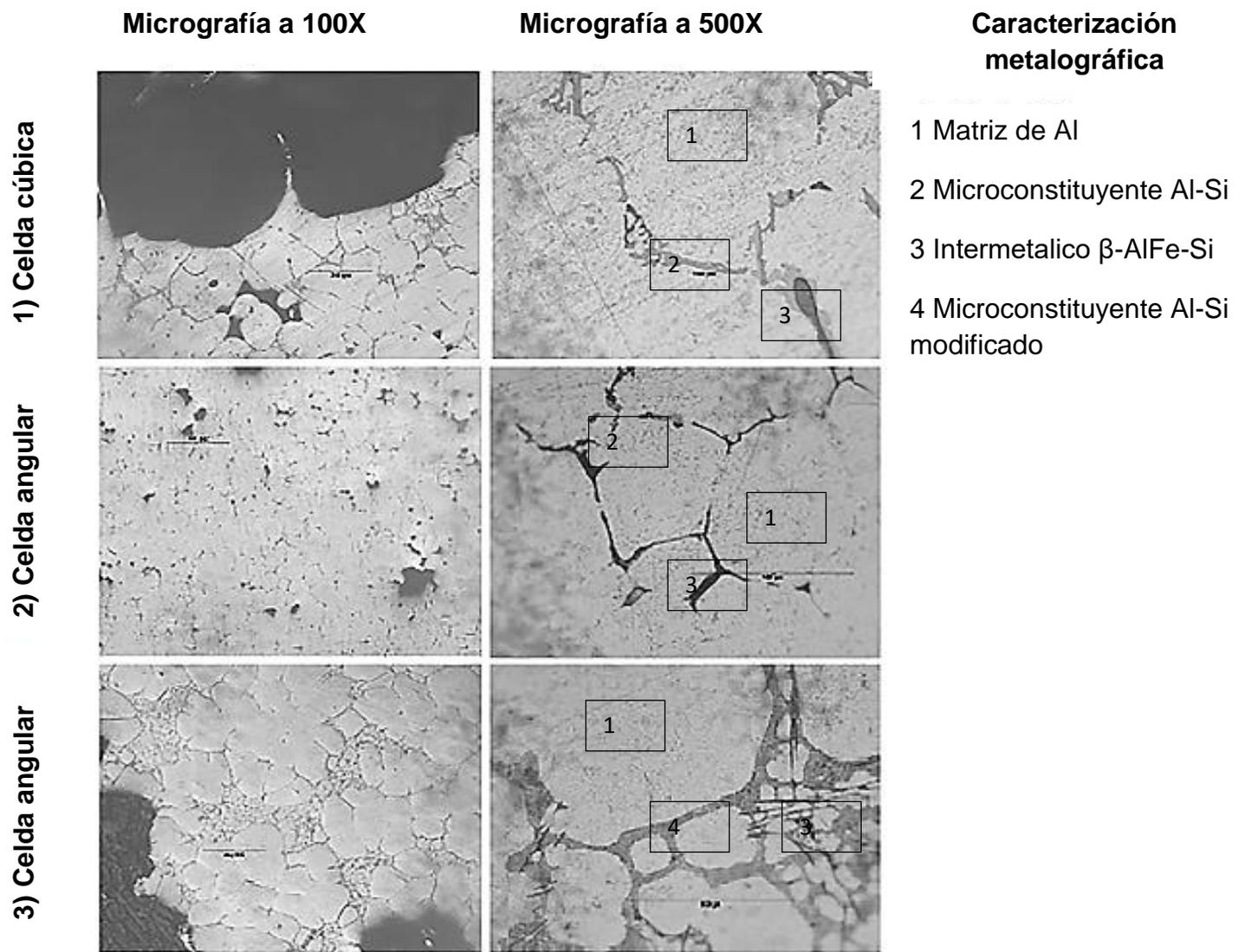
<b>3) Celda esférica</b>	No presenta porosidad no controlada	La forma no corresponde a la partícula replicada por la presencia de protuberancias de la pared hacia el interior del poro	Si se presenta ya que los pellets e elaboraron de forma manual	Rugosidad muy marcada de tonalidad oscura	Con partículas provenientes de la calcinación de los pellets ocasionando el oscurecimiento la pared del poro
--------------------------	-------------------------------------	--	--	---	--

### 4.3 Caracterización microestructural.

El tipo de aleación afecta de forma significativa las propiedades mecánicas obtenidas en el sólido celular, ya que su microestructura afecta directamente el comportamiento de los bordes y paredes de la misma.

#### 4.31 Interpretación metalográfica de la microestructura del sólido celular

Con ayuda del microscopio metalográfico y el software Omni MetModular Imaging System se tomaron las siguientes micrografías cerca del borde de poro para observar la microestructura. Se aprecia claramente la estructura dendrítica originada por el Si en la matriz de Al en toda la superficie de la muestra, incluyendo los bordes de poro. Para observar con mayor detenimiento su microestructura se tomaron micrografías a diferentes aumentos (Figura 32):



**Figura 31** Micrografías a 100X donde se incluye el borde de celda para determinada morfología y caracterización de la microestructura a 500X con el microscopio metalográfico.

En la tabla 32 se muestran las micrografías correspondientes a cada una de las muestras de determinada morfología de celda provenientes por la infiltración de la fundición de la aleación de Al-Si, a 500X. Se puede apreciar una estructura dendrítica de Si embebida en una solución sólida de Si en Al ( $\alpha$ ) para las 3 diferentes micrografías. La diferencia entre la densidad del aluminio y la del silicio es mínima ( $\rho_{Al} = 2.7 \frac{g}{cm^3}$ ,  $\rho_{Si} = 2.33 \frac{g}{cm^3}$ ) demostrando así que el Si es uno de los pocos elementos que pueden ser adicionados al aluminio sin que exista un cambio esencial en la densidad de este último. En aleaciones binarias de Al-Si le confiere resistencia a la corrosión, excelente colabilidad baja

expansión térmica. Dentro de esta especie de red dendrítica de Si podemos encontrar precipitados de Fe como partículas alargadas y oscuras además de defectos microestructurales los cuales se analizarán a detalle más adelante. La presencia de intermetálicos en el sólido celular específicamente en los bordes y paredes de celda y su forma de distribución, afecta considerablemente sus propiedades mecánicas ya que debido a la forma de aguja por ser de tipo  $\beta$ -AlFeSi se pueden originar zonas de concentración de esfuerzos, siendo propensas a fallas a causa de la dureza y fragilidad conferida. Sin embargo, es un elemento que no es susceptible de ser eliminado en la aleación. En las 3 micrografías se puede apreciar la velocidad de enfriamiento, la cual tiene un efecto significativo para la de celda esférica (CASO B) cuyo enfriamiento fue notablemente rápido en agua modificando la estructura de Si, mientras que para las de morfología cúbica y angular- alargada su enfriamiento fue lento a temperatura ambiente. Este enfriamiento se puede corroborar con el espacio interdendrítico (DAS) el cual es notablemente más pequeño para el caso B en comparación con el caso A. De igual forma que la morfología de los intermetálicos de Fe la morfología del Si también tiene repercusión en sus propiedades mecánicas y su modificación la mejora. No obstante, estas se ven perjudicadas cuando se incrementa el tamaño, la forma y la cantidad de fases complejas de  $\beta$ -AlFeSi. Para la celda cúbica se nota una dispersión de estas fases, para la de celda angular alargada se presenta de forma más acentuada el tamaño de estas fases mientras que para la de morfología esférica la forma y la cantidad de fases es significativa teniendo mayor repercusión en sus propiedades mecánicas en comparación con la morfología cúbica.

#### **4.32 Análisis químico de intermetálico**

Para determinar la presencia de intermetálicos de Fe se realizó un microanálisis empleando espectroscopia de dispersión de energía de rayos X mediante MEB con ayuda del software INCA. En la tabla 20 se muestra el análisis químico respectivo, junto con la micrografía y la visualización de los elementos identificados en la gráfica.

**Tabla 28** Composición química de intermetálico para determinada morfología de celda.

Tipo de celda	Cúbica		Angular - alargada		Esférica	
Elementos detectados en el intermetálico	% W	% Atómico	% W	% Atómico	% W	% Atómico
Al	55.81	63.51	67.77	75.81	90.70	92.52
Si	22.63	24.67	12.7	13.66	5.96	5.83
Fe	21.55	11.82	19.5	10.53	3.34	1.64
<b>Total</b>	100	100	100	100	100	100

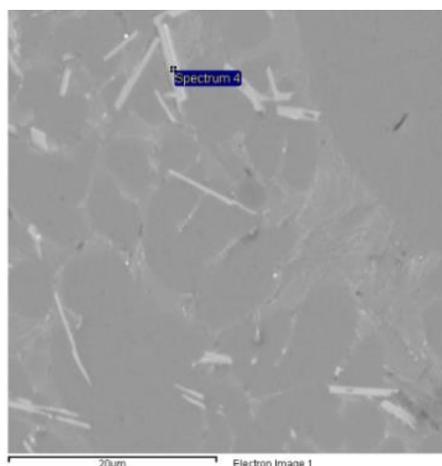
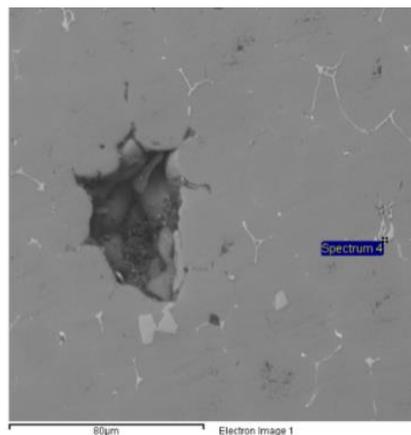
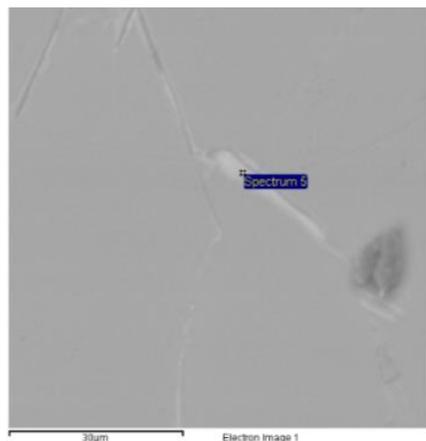
**Figura 32** Zona de microanálisis para el intermetálico en las micrografías cada determinada morfología de celda.

Tipo de celda

a) Cúbica

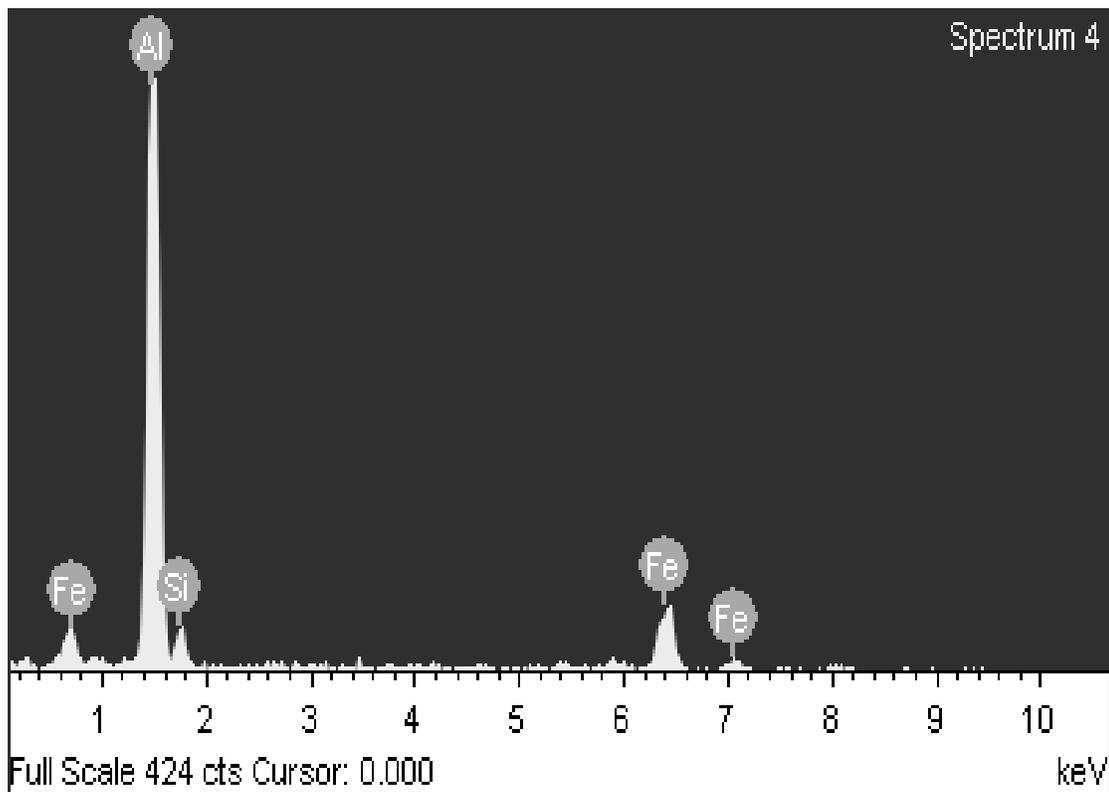
b) Angular-Alargada

1) Zona de microanálisis



c) Esférica

**Gráfico 29** Análisis EDX de la composición química del intermetálico para las 3 muestras de diferente morfología.



**INCA**

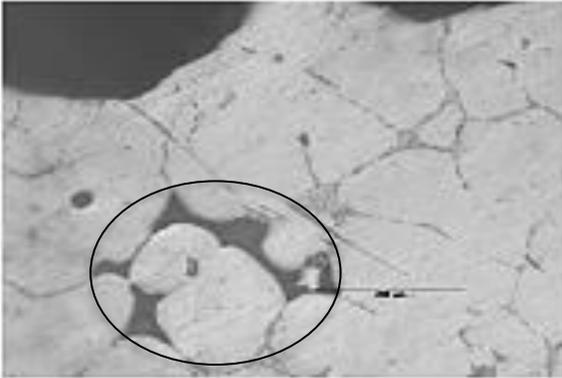
Con base a las observaciones se realizó el análisis químico para cada intermetálico observado con el microscopio metalográfico y se confirmó la presencia de Fe como impureza formando parte de las muestras de morfología cúbica y alargada. En las micrografías se pueden observar claramente partículas alargadas y claras en contraste con la tonalidad menos clara de la estructura dendrítica originada por el Si, el intermetálico es de tipo  $\beta$ -AlFeSi debido al tipo de morfología que presentan.

#### 4.33 Defectos microestructurales

La presencia de defectos microestructurales origina la falla prematura de las piezas. Son defectos por contracción formados durante la solidificación. Empleando el microscopio metalográfico y mediante el software Omni MetModular Imaging System se tomaron 3 micrografías 100X para observar con detenimiento los defectos microestructurales.

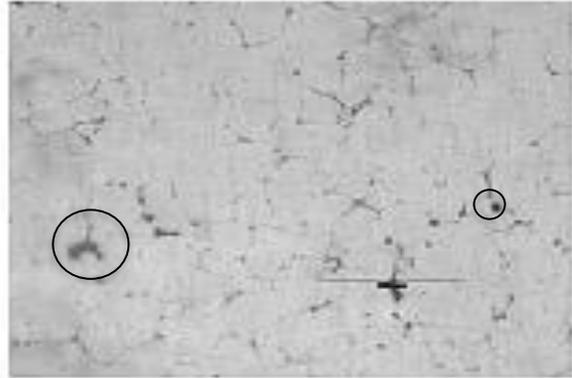
1) Defecto microestructural

a) Celda cúbica



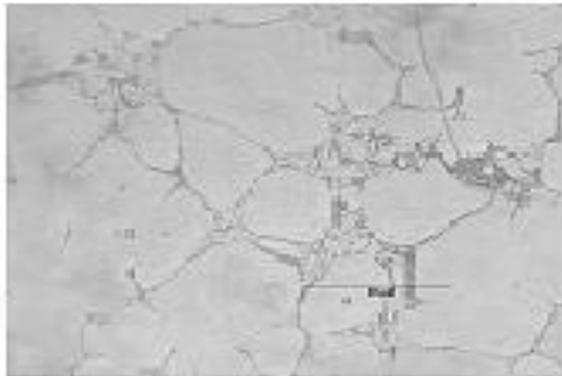
Microrechupe

b) Celda Angular-Alargada



Microrechupe

c) Celda esférica



No se aprecian microrechupes

**Figura 33** Defectos microestructurales en las muestras para una morfología específica.

Para la micrografía de la morfología cúbica y angular-alargada se muestra la presencia de microrechupes dentro de la red dendrítica de Si como resultado de la falta de escape de gases durante la infiltración, ya que al término del vaciado se cerraban inmediatamente los moldes metálicos, mientras que para la fundición de celda esférica no se observan microrechupes ya que, a diferencia de las fundiciones anteriores, en esta sí se llevó a cabo el escape de gases en un molde de tipo abierto.

## **CAPITULO V Conclusiones.**

### **5.1 Macroestructura**

#### **5.11 Análisis cualitativo de la macroestructura mediante inspección visual**

El modo de infiltración del metal líquido sobre las partículas espaciadoras para el caso A (vaciado directo de metal líquido sobre la preforma) y caso B (vaciado de metal líquido simultáneamente con la adición de las partículas espaciadoras) modificó drásticamente la estructura del sólido celular resultante debido a la distribución del metal líquido alrededor de las partículas espaciadoras.

La infiltración del metal líquido por efecto de la gravedad y agitación mecánica no es mayor a un 30% de la sección longitudinal de la probeta.

#### **5.12 Topología y conectividad de celda**

La topología y conectividad se determina por la continuidad o discontinuidad de la fase gaseosa y de la fase sólida como resultado del modo de infiltración del metal líquido sobre las partículas espaciadoras ya que al vaciar directamente el metal líquido sobre la partícula espaciadoras se obtuvo una topología de tipo abierta y mixta mientras que al vaciar el metal líquido simultáneamente junto con las partículas espaciadoras obtuvimos una topología de tipo cerrada.

#### **5.13 % Porosidad**

La variación del % de la porosidad depende directamente de la distribución del metal líquido siendo inversamente proporcionales y ésta aumenta debido a la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras al momento de llevar a cabo la infiltración.

#### **5.14 Grado de expansión**

La distribución inicial del grado de expansión con tendencia continua o discontinua nos da un indicio de la topología del metal celular (abierto y cerrado respectivamente) y se ve directamente afectado por la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras ya que ésta aumenta.

#### **5.15 Defectos macroestructurales**

La infiltración del metal líquido sobre las partículas espaciadoras en un sistema abierto o cerrado

afecta directamente en la calidad de los metales celulares obtenidos, ya que la falta de escape de gases al momento de la infiltración favorece la aparición de defectos macroestructurales como los macrorechupes.

## **5.16 Propiedades**

- **Densidad relativa**

Tres sólidos celulares pueden tener la misma densidad relativa, pero difieren en cuanto a su distribución con respecto al área y se ve directamente afectada por la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras. Esta falta de precalentamiento de la preforma favorece variaciones significativas en los valores de densidad relativa propiciado la carencia de uniformidad y en consecuencia la falta de valores constantes con respecto al área abarcada debido a la presencia de porosidad no controlada, los valores de la distribución de la densidad relativa con respecto al área dependen en gran medida de la topología del metal celular.

- **Densidad absoluta**

La distribución de la densidad se ve directamente afectada por el exceso o carencia de porosidad ya que se presenta una disminución significativa de estos valores por la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras propiciado porosidad no controlada, de igual forma los valores de la distribución de la densidad con respecto al área dependen en gran medida con la topología del metal celular.

## **5.2 Mesoestructura**

### **5.21 Forma de celda**

Emplear diferentes formas de partículas espaciadoras permite obtener diferentes tipos de estructuras, el tipo de material que conforman las partículas espaciadoras, la forma de fabricación en caso de que se lleve a cabo, así como su comportamiento en el momento de la infiltración del metal líquido con base a su precalentamiento y a la T de fusión o de infiltración contribuyen en la forma final de la estructura.

## **5.22 Tamaño de celda promedio**

Diferentes tamaños de partícula permiten la fabricación de diferentes estructuras de metales celulares, valores cercanos del tamaño de celda promedio con el tamaño de partícula espaciadora permiten obtener su adecuado control, éste disminuye por diversos factores como la falta de control granulométrico, deficiente forma de fabricación, pérdidas superficiales de material por la fricción con el metal líquido durante la infiltración y de forma significativa por la falta de precalentamiento generando porosidad no controlada y con esto un aumento drástico del tamaño promedio de celda.

## **5.23 Homogeneidad**

La homogeneidad del tamaño de celda depende de la variabilidad de los valores de tamaño de celda obtenido en la estructura de los metales celulares, en consecuencia el valor del coeficiente de variación se ve aumentado por diversos factores como: carencia de control granulométrico del tamaño de partícula a replicar, falta de control de la porosidad debido a la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras y pérdidas dimensionales por fricción de las mismas durante la infiltración así como su control dimensional con base a la forma de fabricación sin dejar a un lado el comportamiento del tipo de material utilizado durante la infiltración del metal líquido.

## **5.24 Variación del tamaño de celda con respecto al tamaño de partícula espaciadora**

El grado de control del tamaño de partícula está determinado por la determinación del porcentaje de probabilidad de encontrar valores de tamaños de celda cercanos al valor tamaño promedio de la partícula espaciadora, valores cercanos a un 0% de probabilidad nos muestra una falta de control sobre el tamaño de celda el cual se debe a diversos factores como la presencia de porosidad no controlada como efecto de la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras.

## **5.25 Variación del tamaño de celda con respecto al tamaño partícula espaciadora promedio**

Se puede determinar para un tamaño de celda no controlado el % de probabilidad de encontrar tamaños de celda cercanos al valor tamaño promedio, el cual ya toma en cuenta la magnitud del aumento drástico de su tamaño con respecto al tamaño de la partícula espaciadora, de igual forma se plantea un 10 % por arriba del tamaño promedio de celda que es el de referencia y de éste modo determinar el % de probabilidad de encontrar valores elevados de tamaños de celda con respecto al valor elevado del promedio del tamaño de celda para finalmente determinar la magnitud de la

porosidad no controlada como consecuencia de la falta de precalentamiento de las partículas espaciadoras.

### **5.26 Tamaño de pared y borde de celda**

El tamaño de pared y borde de celda no es uniforme y se aprecia en el tamaño de borde promedio de celda para la morfología cúbica es de 2.08 mm y para la morfología angular-alargado es de 0.55 mm, el tamaño de pared promedio para la morfología angular-alargada es de 0.27 y para la morfología esférica es de 2.43.

### **5.27 Defectos mesoestructurales**

La presencia de defectos mesoestructurales modifica drásticamente la estructura del sólido celular obtenido y se pueden encontrar defectos tales como: porosidad no controlada, forma no congruente con la partícula espaciadora, replicación de partículas con forma defectuosa, remanente de material de partículas espaciadoras y rugosidad marcada, como consecuencia de la falta de control de determinados parámetros precalentamiento de la preforma, control granulométrico de las partículas espaciadoras, modo de fabricación de las partículas espaciadoras en caso de que se haya llevado a cabo, contaminación de las partículas espaciadoras en los espacios vacíos replicados y presencia de rugosidad marcada a causa del cambio de coloración de la superficie del metal fundido.

## **5.3 Microestructura**

### **5.31 Interpretación metalográfica de la estructura del sólido celular**

El medio de enfriamiento del metal celular de Al-Si repercute en la microestructura resultante, ya que el hecho de enfriar la probeta fuera del equilibrio y al equilibrio permite obtener diferentes microestructuras y por lo tanto las propiedades mecánicas también se ven afectadas, al enfriar fuera del equilibrio con el medio de enfriamiento agua permitió obtener una microestructura modificada y al enfriar al equilibrio no se presentó ninguna modificación en la microestructura ya que se enfriaron en medio ambiente, ésta modificación se debe a la variación de la velocidad de enfriamiento.

### **5.32 Análisis químico de la microestructura**

El análisis químico es de vital importancia para identificar el tipo de aleación del sólido celular, así como para corroborar la presencia de fases complejas en la microestructura que pudieran llegar a afectar las propiedades mecánicas de los bordes y paredes del sólido celular.

### **5.33 Defectos microestructurales**

El análisis químico por EDS permite corroborar la presencia de intermetálico en la microestructura dado que el Fe no es un elemento susceptible de eliminar en la aleación la manera de distribución así como la forma de aguja propicia zonas de concentración de esfuerzos debido su dureza y fragilidad y por ende repercute en las propiedades mecánicas del sólido celular así que es de vital importancia controlar la cantidad de precipitados como el de tipo  $\beta$ -AlFeSi presentes en la microestructura ya que forma parte de las paredes y/o borde de celda dependiendo del tipo de celda.

## CAPITULO VII REFERENCIAS

- [1] Banhart, J. and Baumeister, J. (1998), Production methods for metallic foams, Materials Research Society, 521(), pp.121-130.
- [2] Banhart, John (2001), Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science, 46(), pp.1-64.
- [3] Babcsá, N., Banhart, J. and Leitmeier, D. (), Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming, pp.1-15.
- [4] Cadena, Franco y Hermenegildo, Javier, (2013), Obtención y caracterización de espumas metálicas de Al por ruta sólida, (Tesis inédita de Maestría), UNAM, México.pp.12-14,2526-27.
- [5] Cárcel González Bernabé, Efectos de la estructura celular sobre el comportamiento mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado obtenida por fusión. Aplicación en absorbedores de energía, Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, España, pp.3, 8, 28,49-51,55-61.
- [6] De la Rosa Luis Daniel (2005), Fabricación de espumas de aluminio por medio de inyección de aire, Tesis de maestría, UNAM, México, pp.85-86.
- [7] Díaz del Castillo Rodríguez Felipe, Apuntes, pp. 3-4,5-13.
- [8] Díaz Juan, Fernando, Giraldo, Lucas y Fernández, Patricia, (2014), Obtención de metales celulares de poro abierto utilizando materiales cerámicos como preforma removible, Revista Investigaciones Aplicadas, 8(01), pp.1-5.
- [9] Duarte, Isabel y Oliveira, Mónica (2012), Aluminium Alloy Foams: Production and Properties, Powder Metallurgy.pp.1-23.
- [10] Erjavec Mateja, (2011), Mechanical properties of cellular materials, Universidad de Ljubljana, pp.1.
- [11] Fernández Calles Andrés, (2012), Estudio del comportamiento mecánico de espumas pulvimetalúrgicas de aluminio, (Tesis inédita de Licenciatura), Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas, México.pp.13-18,23.

- [12] Fernández, P., Cruz, J. & Coletto, J., (2008), Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida, Revista de Metalurgia, 44(6), pp.2-11.
- [13] Fernández, Patricia, Torres, V., Gabriel, Cruz, R., Javier, Gaviria, G., Sebastián y Ochoa, Edgar, (2007), Fabricación de metales celulares base aluminio, Scientia et Technica Año XIII, No 36, pp. 1-6.
- [14] Fernández, M, P., Cruz, R, L., J. y García, Cambroner, L., E., (2009), Uso de aluminio reciclado para la producción a bajo costo de espumas metálicas de poro abierto, Prospect., 8(1), pp.1-5.
- [15] Fernández, P., Cruz, L., J., & Coletto J., (2008), Procesos de fabricación de metales celulares. Parte II: Vía sólida, deposición de metales, otros procesos ,45 (2), pp. 125.
- [16] Fernández, Patricia, Daza, Mauricio, Oviedo, Eduardo, Ortega, Camilo, Cruz, Javier, (2007), Diseño de un equipo para la fabricación de esponjas metálicas, Investigaciones Aplicadas, pp.2.
- [17] Fernández, Morales, Patricia, (2009), Influencia de la microestructura en el comportamiento mecánico de metales celulares base aluminio, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana Circular 1ra. 70-01, Laureles, Medellín (Colombia), pp.2-3.
- [18] Fernández, M., Patricia, Daza, M., Mauricio, Oviedo, S., Eduardo, & Cruz R. Javier, (2008), Estudio comparativo con base en el ensayo de compresión de esponjas de aluminio obtenidas mediante infiltración de preformas solubles, Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1 (3), pp.
- [19] F., Ashby, Michael and Tianjian, LU, (2003), Metal foams: A survey, Science in China (Series B), 46(6), pp.1-12.
- [20] F. López, R., O. Fonseca C., S. Valdez. & Said R. Casolco, (2009), Materiales Porosos Una visión de múltiples aplicaciones en la ingeniería, Journal de Investigación de la Escuela de Graduados e Innovación, pp.22-25.
- [21] Figueroa Vargas Ignacio Alejandro, Lara Rodríguez Gabriel Ángel, Novelo Peralta Omar, Molina Ramírez Oscar David, Manual Para la fabricación de espumas metálicas por infiltración.
- [22] Franco, R., Jon & Herrera, M., Daniel A., (2013), Estudio de las propiedades mecánicas de espumas metálicas de celda cerrada, (Tesis inédita de grado licenciatura), Universidad Central de Venezuela, Venezuela, pp. 21-22,27-28,31-40

[23] Gutiérrez, Vázquez, J., A., and Oñoro, J., (2008), Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones, Revista de metalurgia, 44 (5), pp. 1-, 3,7-8,14.

[24] G., Evans, Anthony, W., Hutchinson, John , and F. Ashby Michael ,(1998), Cellular metals, Metals and alloys, Current Chemistry ISSN 1359-02866, pp.1-15.

[25] Irausquín Castro, Ignacio, Alejandro, (2012), Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía, (Tesis inédita de doctorado), Universidad Carlos III de Madrid, España, pp.46, 56, 57, 62,65-66, 67,79.

[26] Kammer, Catrin and Goslar, (1999), Aluminium foam, Training in aluminium Application Technologies, pp.1-24.

[27] Lázaro, Nebreda, Jaime, (2014), Optimización de la estructura celular en espumas de aluminio, (Tesis inédita de doctorado), Universidad de Valladolid, España. pp. 21,24-2528, 48-49, 50,54, 56-57,67-68,70-71, 74, 47,84-85.

[28] Molina, Ramírez, Oscar, David, (2015), Caracterización microestructural y mecánica de espumas metálicas de aluminio fabricadas por un nuevo proceso de infiltración, (Tesis inédita de maestría), UNAM, México, pp.8, 13,22-23, 26-37,69-72.

[29] Norbert Babcsán and John Banhart, Metal Foams towards high- temperature colloid chemistry, Technical University Berlin, Institute of Materials Science and Technology, pp.1-3.

[30] Ochoa de Jesús Oscar Edgar, (2008), Obtención y propiedades de espumas metálicas base Zinalco, IPN, México, pp.49- 52.

[31] Philippe, Lefebvre, Louis, Banhart John and Dunand, David, C., (2008), Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments, Germany, Advanced Engineering Materials, 10(9), pp.1-11.

[32] Romero Manuel Iván, Desarrollo de un proceso para obtener espumas de aleación A356 mediante la ruta de fundición empleando como agente espumante  $TiH_2$  tratado térmicamente, pp.42.

[33] Surace, Rossella, De Filippis and Luigi, A., C., Investigation and Comparison of Aluminium Foams Manufactured by Different Techniques, Advanced Knowledge Application in Practical, pp.1-20.