



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA.

TESIS:

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN FRACTAL DE LAS PARTÍCULAS
ESPACIADORAS SOBRE LA POROSIDAD DE ESPUMAS DE ALUMINIO FABRICADAS
POR INFILTRACIÓN.

Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica.

Presenta:

Christian Cuitlahuac Reyes Olivo

Director de Tesis:

Dr. Luis Béjar Gómez.

Codirector:

Dr. Ismeli Alfonso López

Morelia, Mich. Marzo 2020



Agradecimientos.

A continuación, me gustaría expresar mi agradecimiento a las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto con su colaboración y apoyo durante la realización de este.

Primeramente, quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida durante la realización del programa de maestría. También a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, de manera especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica por la oportunidad de formar parte de su programa de posgrado. De igual manera al Instituto de Investigaciones en Materiales Unidad Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme realizar mi programa de maestría como estudiante adjunto, agradeciendo también el uso de las instalaciones a ambas instituciones para la realización de este proyecto de tesis. Agradezco igualmente el apoyo financiero de los proyectos UNAM PAPIIT IN102719 y SEP-CONACYT 285215.

Agradezco profundamente al Dr. Ismeli Alfonso López y al Dr. Luis Béjar Gómez, por la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo, por compartir su experiencia y conocimientos, así como por su amistad y el incondicional apoyo moral, económico, académico y personal recibido a lo largo de mis estudios de maestría y sin los cuales la realización del proyecto no hubiera sido posible.

Al M.C. Eliezer Hernández Mecinas por el apoyo para la realización de las pruebas mecánicas.

A la Universidad Técnica Federico Santa María y de manera especial al Dr. Luis Pérez Pozo por permitirme realizar una estancia de investigación en dicha institución bajo su asesoría, así como por el acceso y uso de las instalaciones de la universidad. Agradezco también al Dr. Claudio Aguilar Ramírez por su apoyo durante el congreso SAM CONAMET 2019.

A mis amigos y compañeros del equipo de trabajo de materiales metálicos, Juan Carlos Carranza García, Luis Enrique Carranza García, Bertha Casas Herrera y Centli Guerrero Caro; por su apoyo, amistad y asesoría durante la realización del proyecto.

A mis amigos del Instituto de Investigaciones en Materiales, Carlos Corona y Saúl Villareal. Y de manera muy especial a mis amigas Tania Aguilar García y Selene Aguilar Campos por su incondicional apoyo y amistad durante más de dos años, desde los procesos de admisión hasta el día de hoy.

A mi amigo Eduardo Delgado Cortés quien ha sido mi amigo por muchos años y que me apoyó en diferentes etapas del proyecto.

Finalmente, quiero dar un gran agradecimiento a mi familia, quienes con su apoyo y confianza me han guiado durante toda mi vida para llegar hasta el lugar donde estoy ahora. A mi madre María Guadalupe Olivo Valdés por confiar en mí, por el gran esfuerzo que represento pagar mis estudios, por sus desvelos y preocupaciones, por haberme educado con valores, por darme siempre buenos ejemplos y enseñarme a no claudicar a pesar de las adversidades que se puedan presentar. A mi hermana Marcela Reyes Olivo por su constante apoyo y preocupación, por enseñarme a confiar siempre en Dios y por apoyar a mi madre en mi formación. A mi sobrina Monserrat Tello Reyes por ser una gran motivación para trabajar y dar mi mejor esfuerzo en todo lo que hago, así como por sus palabras de aliento y compañía durante toda mi maestría.

Contenido

Abstract.....	I
Resumen.....	I
Introducción.....	II
Objetivos.....	IV
Objetivo General.....	IV
Objetivos Específicos.....	IV
Hipótesis.....	V
Justificación.....	VI
I. Marco Teórico.....	1
1.1. Materiales Porosos.....	1
1.1.1. Tipos de materiales porosos.....	2
1.1.2. Metales porosos.....	4
1.2. Espumas metálicas.....	4
1.2.1. Estructura.....	4
1.3. Propiedades de las espumas metálicas.....	5
1.3.1. Densidad relativa.....	6
1.3.2. Propiedades mecánicas.....	6
1.3.3. Propiedades Térmicas.....	12
1.3.4. Propiedades Eléctricas.....	13
1.3.5. Propiedades Acústicas.....	13
1.4. Procesos de fabricación de espumas metálicas.....	13
1.4.1. Método de infiltración o colada por método de partículas espaciadoras.....	14
1.4.2. Procesos con metal en estado líquido.....	17
1.4.3. Procesos con metal en estado sólido.....	19
1.4.4. Deposición de vapor.....	22
1.4.5. Deposición electroquímica.....	22
1.5. Aplicaciones de espumas metálicas.....	23
1.5.1. Aplicaciones estructurales.....	23
1.5.2. Absorción de impactos.....	24
1.5.3. Control acústico y térmico.....	24
1.5.4. Otras aplicaciones.....	25

1.6. Aluminio	26
1.6.1. Propiedades y características generales.	27
1.6.2. Aleaciones de aluminio, tipos y designación.....	27
1.7. Fractalidad.....	30
1.7.1. Formas fractales clásicas.	31
1.7.2. Dimensión fractal o de Hausdorff.	32
1.7.3. Teoría fractal en el análisis de espumas metálicas.	33
1.7.4. Método de Box Counting.	36
1.8. Diseño de experimentos.	37
1.9. Método de elementos discretos.	38
1.10. Método de elementos finitos.....	40
1.10.1. Etapas para la solución de problemas.....	42
1.10.2. Software de simulación ANSYS.	43
II. Metodología Experimental.....	44
2.1. Elaboración de modelos físicos.	44
2.1.1. Modelo matemático para la determinación del empaquetamiento de partículas espaciadoras.....	46
2.2. Modelo computacional.	47
2.2.1. Modelado de Espumas.	48
2.2.2. Simulación computacional.	49
2.2.3. Modelos matemáticos para la determinación del Módulo de Young de espumas.	53
2.3. Fabricación de espumas metálicas.....	54
2.3.1. Partículas espaciadoras.	54
2.3.2. Aleación Base.	55
2.3.3. Equipo de fabricación.....	55
2.3.4. Fusión e infiltración.	56
2.4. Caracterización estructural.	57
2.4.1. Medición de densidad y porosidad.	57
2.4.2. Medición del espesor de pared.....	58
2.5. Caracterización mecánica.....	58
2.6. Medición de la dimensión fractal.....	59
III. Análisis y discusión de resultados.	61
3.1. Modelación física del empaquetamiento de partículas.....	61

3.2. Diseño de experimentos.	65
3.3. Modelación de Espumas.	66
3.3. Resultados obtenidos mediante la simulación por FEM para las espumas.	68
3.4. Espumas de aluminio experimentales.	75
3.4.1. Porosidad.....	81
3.4.2. Densidad.....	82
3.4.3. Espesor de pared.....	85
3.4.4. Caracterización mecánica.....	86
3.4.5. Dimensión fractal.	92
3.5. Análisis comparativo.	95
3.5.1. Porosidad.....	95
3.5.2. Módulo de Young.	97
IV. Conclusiones.	100
V. Recomendaciones.	102
VI. Referencias.....	103

Índice de Figuras.

Figura 1. Clasificación de poros de acuerdo con su accesibilidad y forma.....	2
Figura 2. Clasificación de materiales porosos de acuerdo con el material de la matriz.....	3
Figura 3. Espumas metálicas de poro abierto y cerrado: A) Poro abierto. B) Poro cerrado. [1], [11]	3
Figura 4. Materiales porosos de tipo 2D y 3D	3
Figura 5. Elementos estructurales de espumas metálicas.....	5
Figura 6. Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elastomérica sometida a compresión...	7
Figura 7. Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elástico-plástica sometida a compresión	8
Figura 8. Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elástico-frágil sometida a compresión.	8
Figura 9. Gráfico de la relación módulo de Young-Densidad relativa para una espuma AlSi12	10
Figura 10. Curvas esfuerzo deformación a compresión para tres espumas metálicas diferentes	11
Figura 11. Proceso de colada con partículas espaciadoras.....	16
Figura 12. Imagen de microscopía electrónica de barrido (MEB) de una espuma de aluminio fabricada utilizando granos de sal común (NaCl) como espaciadores.....	16
Figura 13. Ejemplos de Espumas fabricadas por espumado directo	17
Figura 14. Ejemplos de procesos con metal líquido.....	19
Figura 15. Ejemplos de espumas fabricadas por la ruta de metal sólido.....	21
Figura 16. Espumas fabricadas con métodos de deposición	22
Figura 17. Uso de espumas metálicas como reforzantes de estructuras.....	23
Figura 18. Aplicación de espumas metálicas en la industria ferroviaria para la absorción de impactos.	24
Figura 19. Ejemplos de aplicaciones para control acústico y térmico	25
Figura 20. Ejemplos de otras aplicaciones de espumas metálicas.....	26
Figura 21. Clasificación típica de las aleaciones de aluminio.....	28
Figura 22. Ejemplos de fractales en la naturaleza	30
Figura 23. Curva de Koch	31
Figura 24. Alfombra de Sierpinski.....	32
Figura 25. Esponja de Menger	32
Figura 26. Relación Dimensión fractal-Esfuerzo de compresión.....	34
Figura 27. Comparación de modelos Competer Aided Design (CAD) con espumas reales	35
Figura 28. Dimensión fractal en la morfología de poros.....	35

Figura 29. Dimensión fractal en la relación de tamaño entre poros.....	36
Figura 30. Dimensión fractal en la relación de tamaño entre poros.....	36
Figura 31. Uso del método de box counting para medición de dimensión fractal	37
Figura 32. Tipos de contacto entre partículas de un sistema.....	39
Figura 33. Discretización de figuras geométricas simples	40
Figura 34. Tipos de elemento finito por su dimensión.....	41
Figura 35. Diferentes configuraciones de nodos para un elemento lineal.....	41
Figura 36. Aplicación del FEM al análisis de espumas metálicas	42
Figura 37. Secuencia de llenado del recipiente	45
Figura 38. Llenado del volumen sin ocupar	45
Figura 39. Posición de los centros de partículas generados durante la simulación DEM	48
Figura 40. Proceso de modelado CAD de las espumas de aluminio	49
Figura 41. Ejemplo de Modelo CAD espuma metálica.....	50
Figura 42. Geometría del elemento SOLID 187.	51
Figura 43. Configuración de carga y soportes para análisis estructural	52
Figura 44. Detalles de las condiciones de frontera.....	52
Figura 45. Desplazamiento máximo obtenido en el eje z para un modelo computacional.	53
Figura 46. Dispositivo de infiltración	56
Figura 47. Proceso de inyección de argón durante el proceso de infiltración	57
Figura 48. Medición del espesor de pared.....	58
Figura 49. Esquema de las probetas para ensayo de compresión.....	59
Figura 50. Proceso de medición de la dimensión fractal.....	60
Figura 51. Resultados de modelación física R=2.....	62
Figura 52. Resultados de modelación física R=3	62
Figura 53. Resultados de modelación física R=4	62
Figura 54. Dependencia empaquetamiento-fracción de finas	62
Figura 55. Dependencia empaquetamiento-fracción de partículas gruesas.....	63
Figura 56. Modelos físicos con R=2.	63
Figura 57. Modelos físicos con R=3.	64
Figura 58. Modelos físicos con R=4.	64
Figura 59, Diagrama de Pareto para el empaquetamiento.....	65
Figura 60. Gráfico de efectos principales.....	66
Figura 61. Modelo computacional R=2, C=2.....	67
Figura 62. Modelo computacional R=4, C=2.....	67

Figura 63. Modelo computacional R=2, C=6.....	68
Figura 64. Modelo computacional R=4, C=10.....	68
Figura 65. Simulación computacional para un modelo R=2, C=6	69
Figura 66. Simulación computacional para un modelo R=4, C=8	69
Figura 67. Porosidad obtenida con modelo computacional.	70
Figura 68. Esquema de empaquetamiento ideal vs real	70
Figura 69. Variación del empaquetamiento con respecto al volumen porcentual de partículas finas en una mezcla bimodal.....	71
Figura 70. Espesor de Pared Modelos Computacionales.	72
Figura 71. Módulos de Young obtenidos en la simulación computacional.	73
Figura 72. Relación Porosidad-Módulo de Young.....	74
Figura 73. Efecto del espesor de pared sobre el Módulo de Young.....	74
Figura 74. Espumas R=2, C=1:6, F=0.42.....	75
Figura 75. Espumas R=4, C=1:2, F=0.03.....	76
Figura 76. Espumas R=4, C=1:4, F=0.06.....	76
Figura 77. Espumas R=4, C=1:6, F=0.09.....	76
Figura 78. Espumas R=4, C=1:8, F=0.11.....	77
Figura 79. Espumas R=4, C= 1:10, F=0.14.....	77
Figura 80. Espumas R=4, C=1:12, F=0.15.....	77
Figura 81. Celda unitaria espuma R=2, C=1:6, F=0.42	78
Figura 82. Celda unitaria espuma R=4, C=1:2, F=0.03	79
Figura 83. Celda unitaria espumas R=4, C=1:4, F=0.06.....	79
Figura 84. Celda unitaria espumas R=4, C=1:6, F=0.08.....	79
Figura 85. Celda unitaria espuma R=4, C=1:8, F=0.11	80
Figura 86. Celda unitaria espuma R=4, C=1:10, F=0.14.	80
Figura 87. Celda unitaria espuma R=4, C=1:12, F=0.15.	81
Figura 88. Porosidad obtenida en las espumas de aluminio reales.....	82
Figura 89. Densidad obtenida en las espumas de aluminio.....	83
Figura 90. Comparativa Porosidad-Densidad para Espumas R=2	84
Figura 91. Comparativa Porosidad-Densidad para Espumas R=4	84
Figura 92. Espesores de pared espumas reales.....	85
Figura 93. Comparativa Módulo de Young-Porosidad para espumas R=2.....	87
Figura 94. Comparativa Módulo de Young-Porosidad para diferentes relaciones de tamaños.	87
Figura 95. Resultados de ensayos de compresión.	88

Figura 96. Dependencia Porosidad-Módulo de Young para Espumas Experimentales.....	89
Figura 97. Dependencia Porosidad-Espesor de Pared para Espumas Experimentales.....	89
Figura 98. Curvas esfuerzo-deformación para espumas R=2.....	90
Figura 99. Curvas esfuerzo-deformación para espumas R=4.....	91
Figura 100. Comparativa Dimensión Fractal-Porosidad. Espumas R=2.....	93
Figura 101. Comparativa Dimensión Fractal-Porosidad. Espumas R=4.....	93
Figura 102. Comparativa Dimensión Fractal-Módulo de Young para espumas R=2.	94
Figura 103. Comparativa Dimensión Fractal-Módulo de Young para espumas R=2.	94
Figura 104. Comparativa de porosidad para espumas R=2.....	96
Figura 105. Comparativa de porosidad para espumas R=4.....	96
Figura 106. Comparativa de Módulos de Young para espumas R=2.....	98
Figura 107. Comparativa de Módulos de Young para espumas R=4.....	98
Figura 108. Error Porcentual para el módulo de Young de Espumas R=2.	99
Figura 109. Error Porcentual para el módulo de Young de Espumas R=4.	99

Índice de Tablas.

Tabla 1. Clasificación de Banhart para los procesos de fabricación de espumas metálicas.....	14
Tabla 2. Medios de disolución más comunes.....	15
Tabla 3. Series de aleación de aluminio por forja.....	29
Tabla 4. Series de aleación de aluminio por fundición.....	29
Tabla 5. Dimensiones topológicas para elementos de simetría básicos.....	33
Tabla 6. Esferas utilizadas para la modelación física.....	45
Tabla 7. Datos para análisis multinivel.....	46
Tabla 8. Relaciones de cantidad y tamaño para los modelos CAD.....	49
Tabla 9. Parámetros de mallado.....	50
Tabla 10. Relación de espumas metálicas fabricadas.....	54
Tabla 11. Composición química aleación utilizada 332 (en % en peso).....	55
Tabla 12. Resultados de la modelación física.....	61
Tabla 13. Resultados de la modelación computacional.....	66
Tabla 14. Resumen de espumas fabricadas.....	75
Tabla 15. Resultados de pruebas mecánicas.....	86
Tabla 16. Resumen de propiedades obtenidas de los gráficos esfuerzo-deformación.....	91
Tabla 17. Resultados obtenidos de dimensión fractal para las espumas de aluminio reales.....	92

Abstract.

The effect of space holder particles fractal distribution on the porosity of aluminum foams fabricated by infiltration method is studied in the following thesis work. Computational modeling and simulation were used in order to estimate foams mechanical behavior. Obtained results were later validated comparing them with the obtained from experimental aluminum foams fabricated using NaCl grains as space holder particles. Models and real foams were designed using two different grain size mixtures, combining a size ratio $R=2$ with quantity ratios $C= 1:1, 1:2, 1:4, 1:6$; and size ratio $R=4$ with quantity ratios $C=1:2, 1:4, 1:6, 1:8, 1:10, 1:12$. Additionally, Young modulus was estimated for computational models using the simulation software ANSYS 19.0. Obtained results were also validated comparing them with experimental the Young modulus. Besides, fractal dimension was measured applying the box counting method with ImageJ image analyzer software.

Maximum observed porosity was obtained for the foam with combination $R=4$ and $C=8$, with a value of 67.39%, this foam also showed the lowest Young modulus and the highest fractal dimension, reaching 0.36 GPa and 1.83 respectively. It was concluded that fractal dimension is directly related with porosity and Young modulus, since increasing fractal dimension leads to an increment in porosity and a drop in Young modulus values.

Computational models showed excellent Young modulus estimations, being more accurate than the obtained with mathematical models used as reference.

Resumen.

El siguiente trabajo consistió en analizar el efecto de las partículas espaciadoras sobre la porosidad de espumas de aluminio fabricadas por el método de infiltración sobre partículas espaciadoras mediante el uso de la modelación y simulación computacional para la estimación del comportamiento mecánico de las espumas, cuyos resultados se validaron posteriormente comparándolos con la porosidad y propiedades mecánicas de espumas de aluminio reales fabricadas utilizando granos de NaCl como partículas espaciadora. Los modelos y espumas metálicas se realizaron utilizando mezclas de partículas espaciadoras de dos tamaños diferentes, combinando la relación de tamaño $R=2$ en con las relaciones de cantidad $C= 1:1, 1:2, 1:4$ y $1:6$; and la relación de tamaño $R=4$ con las relaciones de cantidad $C=1:2, 1:4, 1:6, 1:8, 1:10$ y $1:12$. Adicionalmente se calculó el módulo de Young para los modelos computacionales simulando un ensayo de compresión mediante el software de simulación ANSYS ver. 19.0 y se validaron los resultados obtenidos comparándolos con los obtenidos en pruebas mecánicas reales. Además, se determinó la dimensión fractal de las espumas reales utilizando el método de box counting a través del software de análisis de imágenes ImageJ.

La máxima porosidad observada se obtuvo en la espuma con $R=4$ y $C=8$ obteniendo un valor de 67.39%, igualmente para esta espuma se logró obtener el menor módulo de Young con un valor de 0.36 GPa y la máxima dimensión fractal obteniendo un valor máximo de 1.83. De lo anterior y del resto de experimentos se concluyó que la dimensión fractal guarda una relación directa con la porosidad y el módulo de Young, a medida que se observa una mayor dimensión fractal la porosidad aumenta y el módulo de Young disminuye.

El modelo computacional mostró una excelente estimación del módulo de Young en comparación con los obtenidos para los modelos matemáticos usados como referencia.

Palabras Clave: Materiales Porosos, Espumas metálicas, Método de Infiltración, Método de Elemento Finito, Simulación Computacional.

Introducción.

En la actualidad la ciencia y la tecnología constituyen una parte fundamental en la vida del ser humano, los grandes avances logrados en las diferentes áreas de ingeniería han permitido el desarrollo a gran escala de diferentes tipos de industrias como la aeroespacial, automotriz, naval, de construcción, entre otras, las cuales enfrentan constantes desafíos y retos, que demandan cumplir con requerimientos cada vez más complejos, generando una creciente necesidad por materiales avanzados que puedan combinar propiedades de manera eficiente para satisfacer las demandas de ingeniería y tecnología.

Las espumas metálicas son materiales conformados por una matriz de un metal o aleación que contiene una fracción de poros llenos de gas distribuida a lo largo de su estructura. Estos materiales han captado el interés de la investigación científica y tecnológica durante los últimos años debido a la combinación única de propiedades que pueden lograrse al combinar una estructura porosa con un metal o aleación, obteniendo materiales ligeros con una buena relación resistencia-peso, elevada rigidez y buena resistencia mecánica; además de tener ventajas sobre los materiales porosos cerámicos y poliméricos como la buena conductividad eléctrica y térmica. Por ello, las espumas metálicas se consideran materiales de gran versatilidad con un amplio rango de aplicaciones, por ejemplo, el aligeramiento y reforzamiento de estructuras, la absorción de impactos, control térmico y acústico, etc.

La porosidad es la propiedad clave en las espumas metálicas ya que de ella dependerán sus propiedades. Dentro de la gran cantidad de procesos de fabricación disponibles en la actualidad, el Método de Infiltración sobre Partículas Espaciadoras, destaca por permitir un gran control sobre el número y la cantidad de poros dentro de la espuma, en este proceso un metal o aleación líquida se vierte sobre un volumen de partículas, quedando inmersas dentro del material metálico para ser removidas posteriormente y obtener un material con poros. Considerando lo anterior, las partículas espaciadoras son el factor clave en el proceso de infiltración y su distribución determina las características de la fase porosa (volumen, interconectividad, número y tamaño de poros) y por consiguiente las propiedades resultantes en la espuma metálica.

El aluminio y sus aleaciones, principalmente aquellas con altos contenidos de silicio, constituyen un material ideal para la fabricación de espumas metálicas por infiltración debido a su elevada fluidez,

pero además por sus propiedades características como su baja densidad, no toxicidad, reciclabilidad, no inflamabilidad, paramagnetismo, resistencia a la corrosión etc.

Aunque la investigación relacionada con las espumas metálicas ha tenido un repunte desde la segunda mitad del siglo pasado, aun se consideran como materiales relativamente nuevos, por lo cual su estudio y caracterización tienen una gran relevancia. En el caso específico de las espumas fabricadas por infiltración entender y describir los efectos de la distribución de las partículas espaciadoras sobre la porosidad es de vital importancia para controlar la porosidad de manera eficiente y por consecuencia las propiedades de la espuma.

El uso de herramientas de modelado y simulación computacional como el Método de Elemento Discreto (DEM) y Método de Elemento Finito (FEM) han demostrado ser de gran utilidad para la predicción de las propiedades mecánicas de las espumas metálicas como los realizados por Sathurusinghe y col. [1] y Pérez y col.[2]. Además, dada la complejidad de la estructura porosa de la espuma, el uso de fractales para su descripción ha sido de gran utilidad para describir la estructura de las espumas y poder encontrar correlaciones con sus propiedades como en los estudios realizados por Wang y col. [3] .

En este trabajo se planea investigar el efecto de la distribución de las partículas espaciadoras sobre la porosidad de espumas fabricadas por el método de infiltración haciendo uso de mezclas de partículas espaciadoras de dos tamaños diferentes y variando la proporción de mezclado para cada tamaño. Lo anterior se realizará simulando las mezclas de partículas y la porosidad obtenida para cada una de ellas mediante el uso de un modelo físico como una primera aproximación al problema y posteriormente utilizando la metodología combinada DEM-FEM, propuesta por Pérez y col.[2]. Ambos modelos serán validados posteriormente mediante la comparación con espumas de aluminio reales que serán fabricadas utilizando mezclas de granos de NaCl como partícula espaciadora. Cabe mencionar que este trabajo se apoya en los realizados previamente dentro de este equipo de trabajo por Pérez y col.[2], Carranza, J.[4] y Carranza, L. [5].

Objetivos.

Objetivo General.

Determinar el efecto de la distribución fractal de las partículas espaciadoras sobre las propiedades de espumas de aluminio obtenidas por infiltración.

Objetivos Específicos.

1. Analizar los diferentes tipos de espumas metálicas y sus métodos de obtención.
2. Analizar sus propiedades y diferentes aplicaciones.
3. Estudiar diferentes posibilidades de espumas de acuerdo con distribuciones fractales de la porosidad.
4. Analizar el efecto de la distribución fractal de las partículas espaciadoras sobre el empaquetamiento.
5. Elaborar un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de la porosidad de acuerdo con la distribución fractal de las partículas espaciadoras.
6. Fabricar espumas metálicas utilizando diferentes distribuciones fractales de espaciadores.
7. Caracterizar las espumas metálicas obtenidas.
8. Determinar el efecto de la porosidad de las espumas sobre sus propiedades mecánicas.

Hipótesis.

1. Es posible modificar, de manera significativa, la porosidad de una espuma metálica mediante la inclusión de distribuciones fractales de poros.
2. Es posible encontrar un modelo que prediga el efecto de las partículas espaciadoras sobre la porosidad resultante de las espumas.
3. La distribución e interconexión de las porosidades, incluyendo la parte fractal, influye de manera significativa sobre las propiedades mecánicas de una espuma metálica.

Justificación.

Debido a la combinación única de propiedades que presentan, las espumas metálicas tienen un amplio rango de aplicaciones en diferentes ámbitos de la industria, por ejemplo, la automovilística, aeroespacial, ferroviaria, estructural, entre otras. Y a medida que se incrementa el interés y la demanda de las espumas metálicas la necesidad de conocer a fondo sus características, propiedades y aplicaciones crece, debido a que cada día se requiere de un mejor control y optimización de los procesos de fabricación que ya existen, así como el desarrollo de otros nuevos, con vistas a mejorar la calidad de las espumas metálicas y además a seguir desarrollando su potencial en nuevas aplicaciones.

El estudio de la relación propiedad-estructura dentro de las espumas metálicas es de gran importancia pues se ha comprobado ambas guardan una fuerte relación, de tal manera que el conocimiento y control de los factores que afectan la estructura es absolutamente necesario para garantizar la calidad del material final.

I. Marco Teórico.

1.1. Materiales Porosos.

Los materiales porosos han estado presentes en la naturaleza prácticamente desde que se originó el planeta Tierra en muy diversas formas desde rocas y minerales hasta sustancias como huesos, coral, madera, corcho, entre otras. Se caracterizan por contener cavidades de distintas formas dentro de su estructura, las cuales están llenas con un fluido, ya sea un líquido o un gas.

Dentro de la estructura de un material poroso se distinguen principalmente dos componentes principales, la matriz que conforma “el esqueleto”, es decir, la parte sólida del material y una red de poros. [6]

Los poros dentro de un material pueden clasificarse en base a diferentes criterios dentro de los principales se encuentra la accesibilidad, la cual tiene que ver con la interconexión y la manera en que los poros se comunican entre sí o con la superficie y su morfología, pudiendo ser:

- Abiertos: cuando se comunican la superficie externa del material o con otros poros.
- Cerrados: cuando no se comunican con la superficie externa del material o con otros poros.
- Ciegos: cuando tienen comunicación con la superficie externa del material solo por un extremo.
- Canal: Cuando se comunican con la superficie externa del material por dos o más extremos.

Otro de los criterios más importantes es la forma, de acuerdo con la cual los poros pueden clasificarse en:

- Cilíndrica abierta o ciega.
- Forma de botella.
- Forma de embudo.
- Rugosidad. [7]

La Figura 1 muestra un esquema representativo de los diferentes tipos de poros.

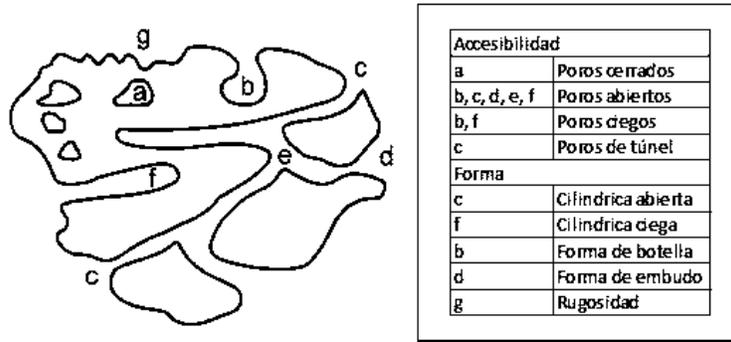


Figura 1. Clasificación de poros de acuerdo con su accesibilidad y forma. [8]

Los poros además pueden clasificarse en regulares cuando describen una forma geométrica como por ejemplo poros esféricos, poliédricos, cuadrados, circulares, hexagonales, entre otros, dependiendo si el arreglo es bidimensional o tridimensional; o irregulares cuando no describen una forma geométrica definida.

1.1.1. Tipos de materiales porosos.

Existen diversas clasificaciones para describir los materiales porosos, dependiendo de diferentes características del propio material. Pueden clasificarse por el material de la matriz en metales, cerámicos, polímeros o compuestos (Figura 2), por la interconectividad de sus poros pueden clasificarse en materiales de poro abierto o de poro cerrado (Figura 3), dependiendo del arreglo que forman los poros pueden clasificarse como materiales de red bidimensional también llamados de tipo panel (2D) o tridimensional (3D) (Figura 4). Existen otras clasificaciones utilizadas en casos específicos, por ejemplo, la clasificación por el tamaño poros, la cual se divide en materiales microporosos cuando el diámetro de los poros es menor de 2 nm, mesoporosos cuando está entre 2 y 50 nm; y macroporosos a partir de 50 nm, se enfoca principalmente en materiales cerámicos con tamaños de poro nanométrico y rara vez se utilizan en espumas fabricadas por infiltración, debido a que estas tienen poros de tamaño macroscópico.

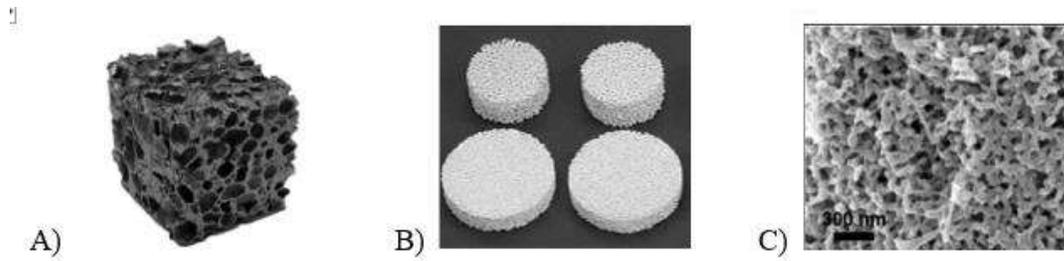


Figura 2. Clasificación de materiales porosos de acuerdo con el material de la matriz. A) Metal poroso: espuma de acero. B) Cerámico poroso: filtro de alúmina para purificación de líquidos y gases. C) Polímero poroso: membrana de LPE también utilizada como filtro para purificación. [8]– [10]

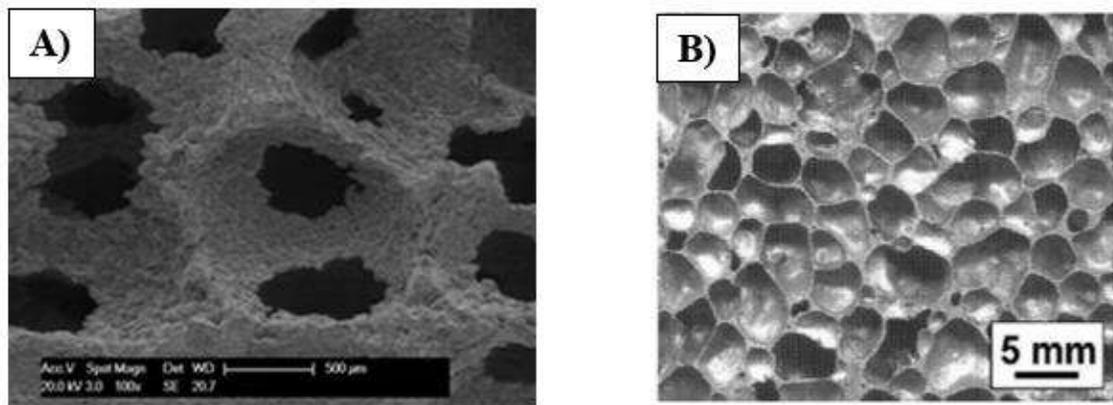


Figura 3. Espumas metálicas de poro abierto y cerrado: A) Poro abierto. B) Poro cerrado. [1], [11]

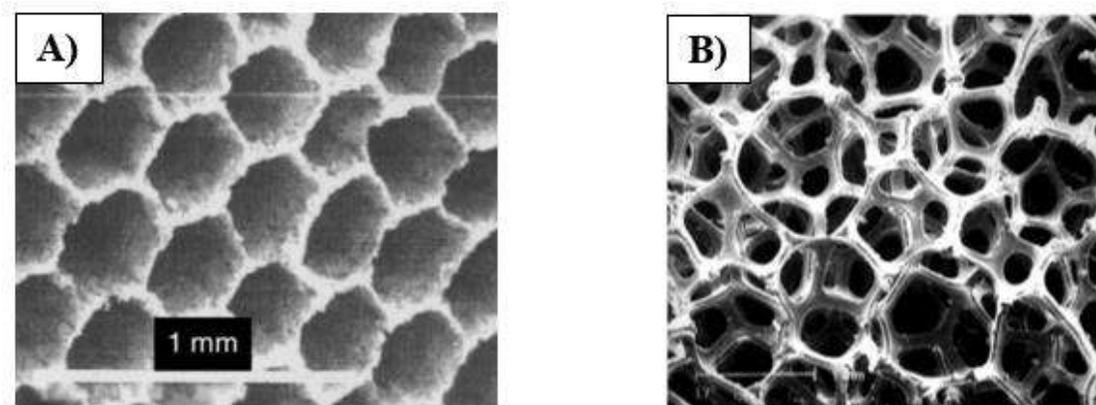


Figura 4. Materiales porosos de tipo 2D y 3D. A) Estructura de hierro tipo 2D . B) Esponja de níquel con arreglo 3D. [6]

1.1.2. Metales porosos.

La combinación de las propiedades de los materiales metálicos (como la maleabilidad, ductilidad, conductividad eléctrica, soldabilidad, etc.) con aquellas resultantes de una estructura porosa (rigidez, baja densidad, elevada área superficial) hacen de los metales porosos materiales de gran versatilidad que pueden ser útiles en gran cantidad de aplicaciones en diferentes industrias como la aeroespacial, automotriz, estructural, generación de energía, entre otras.

Comparados con otros materiales porosos, los metales y aleaciones presentan ventajas importantes como la conducción térmica y eléctrica, muestran mayor resistencia mecánica que los polímeros, y mejor absorción de energía que los cerámicos debido a su capacidad de deformarse plásticamente. [12]

1.2. Espumas metálicas.

Las espumas metálicas se consideran un caso especial de metal poroso y se definen como estructuras celulares de metal que contienen una gran fracción volumétrica de poros llenos de gas, los cuales pueden ser cerrados o abiertos [13], como se mostró en la Figura 3.

1.2.1. Estructura.

Como su nombre lo indica la estructura de una espuma metálica se caracteriza por tener huecos (poros) distribuidos a lo largo de una fase sólida, el rango de porcentual de poros dentro de una espuma metálica es muy amplio y puede ir desde porcentajes muy bajos de aproximadamente 20-30% como los observados en espumas fabricadas mediante sinterización de polvos, hasta porcentajes muy altos pudiendo alcanzar porosidades de 90% en espumas fabricadas por métodos como la deposición de vapor, entre otros. [6], [13]

Una de las principales características estructurales de las espumas metálicas es su naturaleza celular, es decir, que el material está formado por celdas que pueden tener diferentes morfologías y que pueden estar aisladas o interconectadas entre ellas según el tipo de material. Un material de tipo celular se define como un ensamblaje de celdas prismáticas o poliédricas agrupadas de tal modo que forman mallas bidimensionales o tridimensionales y rellenan un plano o espacio. [14]

La distribución y morfología de los poros son también de gran importancia pues de ellas depende el comportamiento isotrópico del material, típicamente la distribución de la fase porosa dentro de una

espuma metálica suele ser aleatoria pero uniforme a lo largo de toda la estructura. En cuanto a la morfología de los poros las espumas metálicas suelen presentar un tamaño y forma homogénea en todo el material, idealmente deben describir una forma geométrica bien definida, sin embargo, como ya se mencionó antes los poros pueden adquirir formas irregulares.

Existen algunos elementos estructurales característicos de las espumas metálicas, tanto para las de celda abierta, como para las de celda cerrada [15], aunque la fracción o porcentaje de poros en la espuma es la característica estructural de mayor influencia sobre las propiedades del material, elementos estructurales como el espesor de pared, tamaño de celda, entre otros, también son de importancia, la Figura 5 muestra ejemplos de los elementos estructurales más importantes.

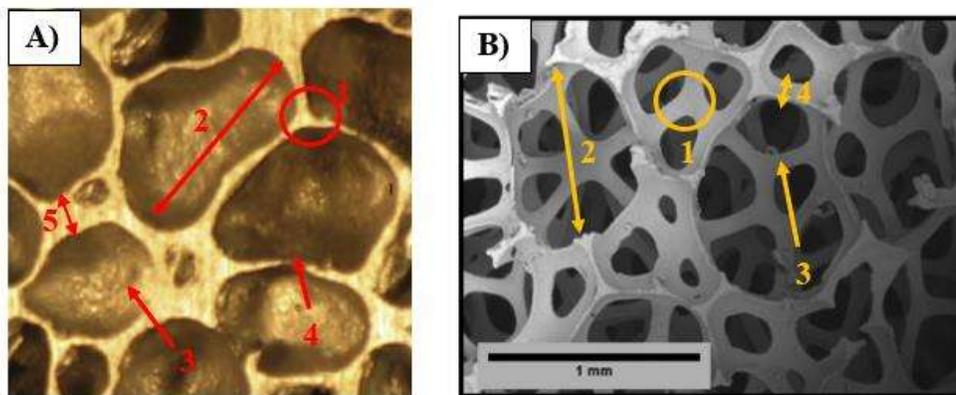


Figura 5. Elementos estructurales de espumas metálicas. A) Celda cerrada: a.1) Nodo; a.2) Tamaño de celda; a.3) Pared de celda; a.4) Borde; a.5) Espesor de pared. B) Celda Abierta: b.1) Nodo; b.2) Tamaño de celda; b.3) Pared de celda; b.4) Espesor de pared. [16], [17]

1.3. Propiedades de las espumas metálicas.

Las propiedades finales de las espumas metálicas están definidas principalmente por dos factores: el primero es el metal o aleación que conforma la fase continua de la espuma y el segundo es la estructura. Idealmente las propiedades del material base deberían conservarse una vez que fue procesado para obtener la estructura porosa, sin embargo, la porosidad tiene una gran influencia sobre dichas propiedades, por lo que a su vez la densidad toma gran relevancia pues funge como indicador de que tan porosa es una espuma, de tal manera que, a medida que esta cambia las propiedades también lo hacen. [18]

1.3.1. Densidad relativa.

Para entender mejor el efecto de la densidad sobre las propiedades de las espumas metálicas es de suma importancia poder relacionar las propiedades con la densidad del material, por tanto el concepto de densidad relativa adquiere gran relevancia, ya que esta se define como la relación entre la densidad de la espuma y la densidad del material base denso (sin poros) [19], dado que al aumentar la fracción volumétrica de poros la densidad de la espuma metálica es menor, la densidad relativa entonces, nos permite saber cómo cambian las propiedades de la espuma en función del incremento o disminución de la porosidad, lo anterior se expresa matemáticamente como:

$$\bar{\rho} = \rho^* / \rho_s \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde $\bar{\rho}$ es la densidad relativa, ρ^* es la densidad del material poroso y ρ_s es la densidad del material sin poros. De acuerdo con el modelo de Ashby Gibson la gran mayoría de las propiedades pueden describirse en función de la densidad relativa de acuerdo con la expresión: [20]

$$\frac{P^*}{P_s} = \omega \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde P^* representa una propiedad cualquiera de la espuma metálica, P_s representa la misma propiedad para el material denso, ω es una constante y n un exponente fijo para dicha propiedad

1.3.2. Propiedades mecánicas

Las espumas metálicas tienen geometrías complicadas comparadas con los materiales densos por tanto su comportamiento mecánico es distinto al de estos últimos y depende en gran medida de las características de la estructura porosa. Típicamente las espumas metálicas son materiales con gran capacidad de absorción de energía y se caracterizan por resistir altas deformaciones, aproximadamente del 60 al 70%. [19]

El estudio de las propiedades mecánicas de las espumas metálicas se ha centrado principalmente en ensayos bajo esfuerzos de compresión, esto se debe a que la mayoría de las aplicaciones estructurales

en las que se usan estos materiales se encuentran sometidos a dicho tipo de cargas, además de que la geometría de las espumas hace complicado realizar ensayos que requieren de sistemas de sujeción, sin embargo, también se han realizado estudios utilizando pruebas de tensión, fatiga, torsión, impacto, etc. Existe un comportamiento de compresión típico para cualquier espuma sometida a una fuerza de compresión, dicho comportamiento consiste en tres etapas principales, en una etapa inicial se observa un comportamiento lineal que representa la parte elástica del material, la cual llega a su límite cuando se alcanza esfuerzo de *plateau* (*meseta*) σ_{pl}^* , esta etapa se caracteriza porque en ella inician a doblarse las paredes de las celdas. Una vez que se alcanza el esfuerzo de Plateau el material comienza a ceder y da inicio la etapa de la deformación plástica, en ella las paredes de las celdas de la espuma empiezan a colapsar, esta etapa es fácilmente identificable en un diagrama esfuerzo deformación en forma de una meseta, zona en la cual se aprecia una deformación muy alta a un esfuerzo bajo que en algunos casos se mantiene prácticamente constante. Por último, en la etapa de densificación, el colapso de las celdas provoca que el material se comprima de tal manera que adopta nuevamente una forma densa, de tal manera que en esta etapa se requerirá de un esfuerzo mucho mayor para poder continuar incrementando la deformación en el material. Dicho la anterior, es importante destacar que, aunque las espumas exhiben un comportamiento típico, este suele variar ligeramente de acuerdo con el tipo de espuma que se está analizando se distinguen tres comportamientos principales, las espumas elastoméricas, las espumas elástico-plásticas y las espumas elástico-frágiles, las Figuras 6-8 muestran cada uno de estos comportamientos, así como las diferentes etapas para cada uno.

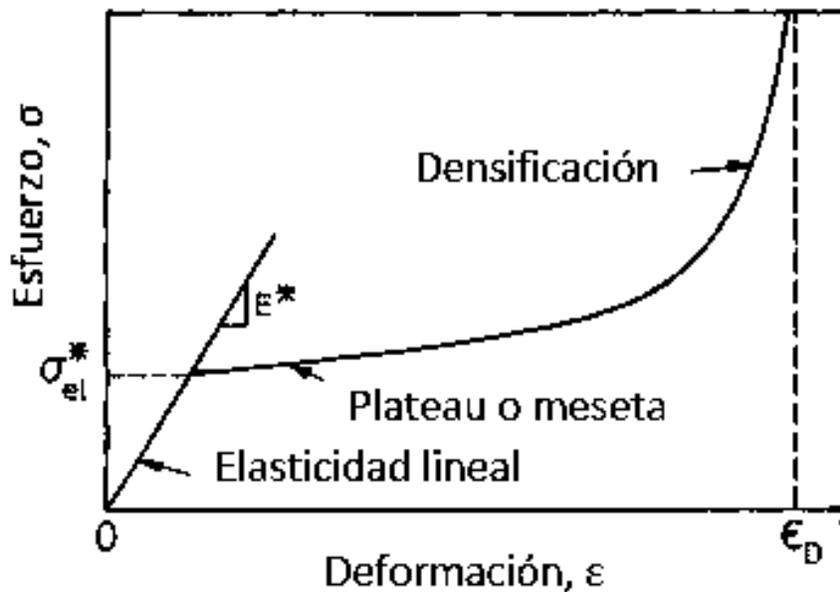


Figura 6. Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elastomérica sometida a compresión.

[21]

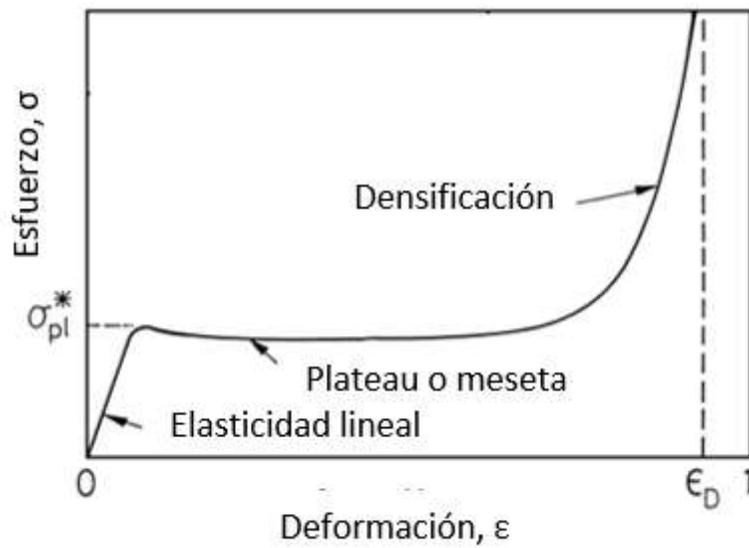


Figura 7. Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elástico-plástica sometida a compresión. [21]

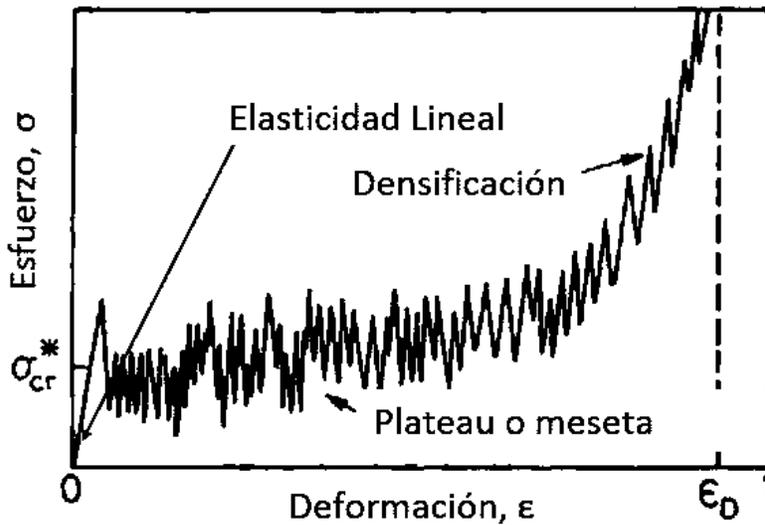


Figura 8. Curva esfuerzo deformación típica de una espuma elástico-frágil sometida a compresión. [21]

De lo anterior puede observarse que las espumas elastoméricas no muestran una zona de cedencia, por el contrario, mantienen un comportamiento elástico no lineal ya que en la zona de Plateau las paredes sufren un pandeamiento, pero este sigue exhibiendo un comportamiento elástico hasta alcanzar la zona de densificación. Por otro lado, en el caso de las espumas elástico-plásticas cuyo

comportamiento es característico de las espumas metálicas se observa una zona de cedencia elástica y una región de Plateau mejor definida caracterizada por exhibir una deformación plástica en la que se observa una elevada deformación a un esfuerzo casi constante. Por último, en las espumas elástico-frágiles se observa un comportamiento caracterizado por una región de Plateau con un comportamiento irregular porque durante esta etapa de la deformación y a diferencia de los otros dos tipos de comportamiento, las paredes de las celdas se fracturan en lugar de doblarse o deformarse dada la rigidez de la espuma, continuando así hasta alcanzar la etapa de densificación. A continuación, se describirán brevemente algunas de las propiedades mecánicas más importantes.

1.3.2.1. Módulo de Young.

El módulo elástico o de Young es una de las constantes elásticas más importantes, ya que nos permite relacionar el esfuerzo aplicado con la deformación observada dentro de la zona elástica de un material.

Como ya se mencionó previamente muchas de las propiedades de las espumas metálicas dependen fuertemente de la densidad, y el módulo de Young no es la excepción, para calcularlo se deben tener en cuenta las relaciones existentes entre esta propiedad y la densidad relativa. Los mecanismos de deformación varían de acuerdo con la estructura de las espumas metálicas. En las espumas de poro abierto la deformación se da en los bordes de las celdas, los cuales se doblan generando una deflexión en el material, realizando un análisis dimensional de esta deflexión es posible calcular el Módulo de Young, utilizando la relación de la Ec. 3 se puede relacionar el módulo de Young con la densidad relativa de la siguiente manera: [21]

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde C_1 es una constante relacionada con la geometría de las celdas. Las espumas de poro cerrado responden de diferente manera ante la carga inicial, pues en ellas la deformación no solo causa el doblez en los bordes de las celdas, sino que además las paredes de las celdas se extienden por efecto de la carga, por tanto, es necesario agregar un término adicional a la Ec. 3: [21]

$$\frac{E^*}{E_s} = c_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + c'_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (\text{Ec. 4})$$

Como se puede ver en las Ecs. 3 y 4 a medida que la densidad de la espuma es mayor su densidad relativa es más cercana a 1, podemos deducir entonces, que a mayor porosidad el módulo de Young es menor, la Fig. 9 muestra un gráfico que relaciona el módulo de Young con la densidad relativa.

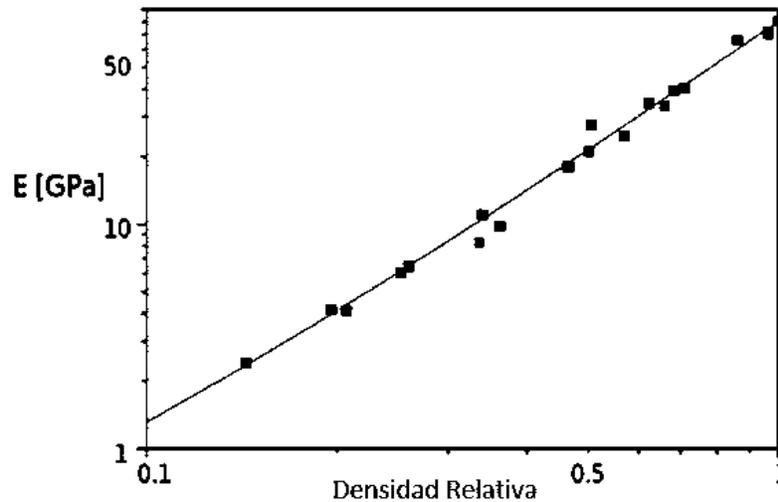


Figura 9. Gráfico de la relación módulo de Young-Densidad relativa para una espuma AlSi12. Se observa un incremento con tendencia lineal, a medida que la densidad relativa se acerca a 1 el módulo de Young incrementa. [22]

1.3.2.2. Esfuerzo de meseta.

El esfuerzo de meseta o Plateau es una de las propiedades más importantes, ya que dicho esfuerzo indica el punto en el cual las celdas inician a colapsar producto de la deformación plástica. Al igual que el módulo de Young, el esfuerzo de Plateau se puede expresar en función de la densidad relativa a través de relaciones matemáticas, las cuales dependen nuevamente del mecanismo de deformación que se presenta en la espuma de acuerdo con la estructura abierta o cerrada de los poros. En las espumas de poro abierto el material comienza a ceder en los bordes de las celdas que fueron deformados durante la deformación plástica, lo cual puede expresarse en función de la densidad relativa mediante la Ec. 5 [21], [22]

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = c_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde σ_{pl}^* es el esfuerzo de Plateau, σ_{ys} es el esfuerzo de cedencia, y C_3 es una constante relacionada con la geometría de las celdas. En las espumas de poro cerrado la cedencia se presenta en los bordes

y además en las caras de las celdas por lo que la Ec. 6 se modifica para incluir el término correspondiente. [21], [22]

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = c_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + c_3' \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

1.3.2.3. Absorción de energía.

Las espumas metálicas tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de energía cinética sin necesidad de introducir grandes esfuerzos en el material. Son capaces de mantener un esfuerzo constante durante la etapa de Plateau. Esto se debe a que la estructura porosa de la espuma es altamente isotrópica la cual permite que las cargas aplicadas se distribuyan de manera uniforme a lo largo de todo el material además de que el colapso de las celdas genera un efecto de amortiguamiento. [18] La energía total absorbida puede definirse como el área bajo la curva de un diagrama esfuerzo deformación a compresión como se muestra en la Figura 10, en este caso las tres espumas analizadas tienen diferentes densidades, de acuerdo con el gráfico podemos deducir entonces que a mayor densidad relativa se requiere un esfuerzo de meseta mayor para absorber la misma cantidad de energía. [23]

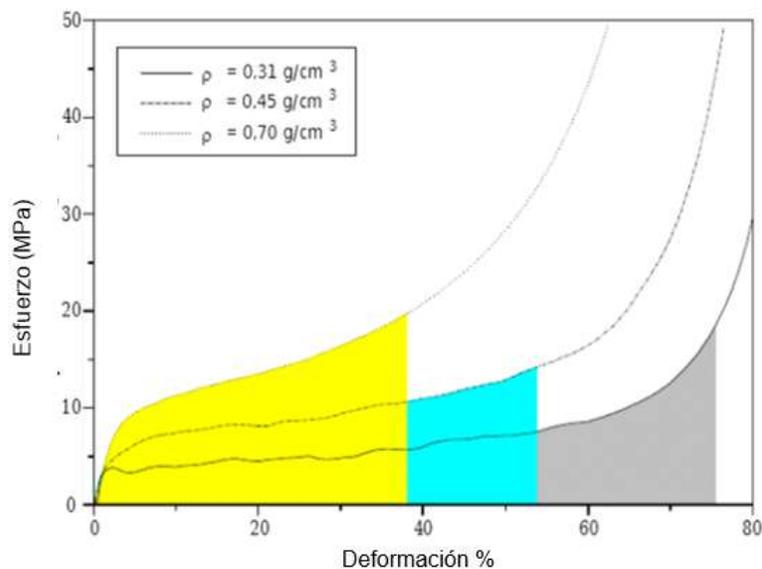


Figura 10. Curvas esfuerzo deformación a compresión para tres espumas metálicas diferentes. Las áreas bajo la curva desde la carga inicial hasta el inicio de la etapa de densificación representan la energía absorbida. Cabe mencionar que para las tres curvas la cantidad de energía absorbida es igual. [22]

Estudios recientes han encontrado que el incremento en la irregularidad de las celdas lleva a un incremento en el esfuerzo de meseta mejorando la capacidad de absorción de energía en la espuma. [24]

1.3.2.4. Deformación de Densificación.

La deformación de densificación es una propiedad mecánica de las espumas metálicas, tiene gran importancia debido a que es el porcentaje de deformación en el cual el material pasa de ser un material poroso a uno denso debido a que las celdas han colapsado completamente, y por tanto a partir de aquí se requerirá un esfuerzo mucho mayor para poder seguir deformándolo.

1.3.3. Propiedades Térmicas.

En lo referente a las propiedades térmicas, las espumas metálicas conservan del metal o aleación base algunas de las más importantes como el punto de fusión, el calor específico y el coeficiente de expansión térmico.

Sin embargo, no todas las propiedades térmicas dependen del material base de la espuma, la estructura porosa también influye de manera importante en el flujo de calor a lo largo de la estructura. Aunque en cuestión de aislar el calor, las espumas metálicas no logran competir con aquellas fabricadas a base de cerámicos o polímeros [25]; sin embargo, los metales y sus aleaciones presentan una ventaja pues manipulando la estructura de la espuma y con la selección de un material adecuado no solo son útiles como aislantes, sino que además pueden utilizarse como conductores de calor pudiendo aplicarse como disipadores.

Los fenómenos de transporte de calor se ven afectados a medida que disminuye la densidad y aumenta la porosidad, al igual que con las propiedades mecánicas la morfología de los poros es de gran importancia, en las espumas de poro cerrado el flujo de calor tiene que filtrarse a través de la red de celdas, de tal manera que la conducción no tiene la misma eficiencia que en un material continuo y la radiación entre las paredes de las celdas se ve obstaculizada debido a la gran cantidad de estas a lo largo del material. Por otro lado, las estructuras con poros abiertos suelen tener mejor conductividad del calor, debido a que en este caso las celdas no están aisladas unas de otras permitiendo que el gas fluya a lo largo del material, facilitando el fenómeno de convección. [26], [27]

1.3.4. Propiedades Eléctricas.

Propiedades como la resistividad y la conductividad eléctrica son bastante sensibles a los defectos en los materiales densos y, por tanto, aunque las propiedades eléctricas de una espuma dependen principalmente de la matriz de la que están fabricadas, la fase porosa tiene un efecto importante sobre ambas propiedades, la conductividad disminuye a medida que la porosidad aumenta y por el contrario en el caso de la resistividad, esta incrementa a medida que la porosidad aumenta. [26], [28]

1.3.5. Propiedades Acústicas.

Las ondas de sonido se propagan mejor en medios continuos, de tal manera que la estructura porosa de las espumas metálicas las vuelve un material de gran utilidad en el manejo acústico debido a que tienen la capacidad absorber las ondas acústicas mediante la disipación de las mismas a través de diferentes tipos de interacción entre el fluido contenido en la fase porosa de la espuma (en este caso aire) y la fase metálica, dichas interacciones son producto de las vibraciones de las ondas sonoras. El tipo de respuesta de las espumas metálicas a estímulos sonoros recae fuertemente en las características de la estructura. [29]

1.4. Procesos de fabricación de espumas metálicas.

El auge de la investigación en el campo de los materiales porosos y en concreto sobre las espumas metálicas durante el siglo pasado llevó al desarrollo de diferentes procesos para la manufactura de estas. En la actualidad existen diferentes formas de clasificar los procesos de fabricación, sin embargo, la propuesta por Banhart [30] es una de las más utilizadas, debido a que ésta separa los diferentes procesos en cuatro grupos basándose en el estado en el que se encuentra el material metálico del cual se fabricarán las espumas, es decir, si se encuentra en forma de iones, líquida, sólida o de vapor. Cada uno de estos grupos principales contiene a su vez diferentes procesos de fabricación, en los cuales varía principalmente el método por el cual se consigue introducir poros en la matriz metálica. En este capítulo se describirán de manera breve los diferentes procesos de fabricación, la Tabla 1 muestra la clasificación de los diferentes procesos de fabricación y el grupo al que pertenecen.

Tabla 1. Clasificación de Banhart para los procesos de fabricación de espumas metálicas. [31]

Procesos de fabricación de espumas metálicas.			
Metal Líquido	Metal Sólido	Vapor de metal	Iones de metal
Espumado directo con gas	Sinterizado de esferas huecas	Deposición de vapor	Deposición electroquímica
Agentes espumantes	Gas atrapado		
Gasars	Espumado de Slurries		
Fusión de polvos	sinterizado de polvos		
Infiltración de partículas espaciadoras	Extrusión		
Espumado por spray	Sinterizado a reacción.		

1.4.1. Método de infiltración o colada por método de partículas espaciadoras.

Ya que el método de infiltración será utilizado en el desarrollo experimental de este trabajo se describirá de manera separada de los demás, este proceso entra en la clasificación de metal líquido. Como tal el proceso parte de un baño metálico, el cual es vaciado sobre un volumen de partículas de diferentes tipos que reciben el nombre de “partículas espaciadoras” o simplemente “espaciadores”, como su nombre lo indica estas partículas tienen la función de crear espacio entre el metal fundido que se va infiltrando entre los huecos que quedan entre ellas, de modo que una vez que el metal solidifique estas quedan inmersas en él y posteriormente sean eliminadas por diferentes métodos para obtener un material con poros. Existen muchas variantes del proceso dependiendo del tipo de partículas espaciadoras que se utilizan, del método que se utiliza para remover dichas partículas, entre otros factores.

Las partículas espaciadoras son el factor fundamental dentro de este proceso y por tanto la selección de las mismas es de capital importancia, es necesario conocer las características fundamentales a tomar en cuenta para una correcta selección, siendo las más importantes la capacidad para resistir la temperatura de fusión del metal a utilizar, ser fácilmente removibles después de que termine el proceso de solidificación y no generar reacciones químicas que afecten de manera negativa las propiedades del material metálico, existen casos en los que las partículas espaciadoras no se eliminan y permanecen dentro de la matriz metálica, en cuyo caso el material recibe el nombre de espuma sintáctica. Dentro de los espaciadores más comunes se encuentran la sal común (NaCl), carbamida, esferas huecas de alúmina, sacarosa, magnesio, acero, entre otros. La Tabla 2 muestra ejemplos de partículas espaciadoras y algunas de sus principales características. [32]

Tabla 2: Partículas espaciadoras más comunes.

Partícula espaciadora	Criterio de selección
Hidrógeno carbonato de amonio	Baja temperatura de descomposición
Carbamida	Altamente soluble en agua.
Sacarosa	Soluble en agua, biocompatible
Cloruro de Sodio	Soluble en agua, biocompatible
Magnesio	Biocompatible, buenas propiedades mecánicas
Acero	Buenas propiedades mecánicas.

La disolución es el método común para la eliminar las partículas espaciadoras y que además será el utilizado en el desarrollo experimental de este trabajo, la Tabla 3 muestra un listado de algunas de las partículas espaciadoras más comunes y el solvente utilizado para su eliminación [32].

Tabla 3. Medios de disolución más comunes. [32]

Partícula espaciadora	Solvente
Carbamida	Agua, Hidróxido de Sodio
Cloruro de sodio	Agua
Dextrina de almidón de maíz	Agua
Sacarosa	Agua
Magnesio	Ácido clorhídrico
Acero inoxidable	Ácido acético

Es de suponer que se debe seleccionar un solvente que no resulte agresivo químicamente para el material metálico del cual se fabricará la espuma. La adición de los espaciadores puede variar de acuerdo con el proceso, algunos pueden añadirse al metal fundido. Otras variantes del proceso tienen que ver con la forma en la que se vacía el metal, este puede ser vaciado por la parte superior sobre una preforma, colocado en estado sólido sobre la preforma para que el proceso de fusión se lleve sobre ella o inyectado por la parte inferior del molde. Las espumas que se obtienen por este método suelen ser de poro abierto con porosidades máximas de 80%, el proceso suele presentar ventajas como un buen control del tamaño y distribución de los poros, lo cual a su vez se logra

controlando el tamaño de partícula y distribución de los espaciadores. Por otro lado, puede presentar complicaciones, el más común es el llenado incompleto de la preforma, por lo que en ocasiones es necesario utilizar vacío o un gas a presión para evitar este problema. [30]

La Fig. 11 muestra un esquema básico del método de colada utilizando partículas espaciadoras y la Fig. 12 muestra un ejemplo de una espuma fabricada por dicho método, el método de infiltración es la variante de dicho método que será utilizado en el desarrollo experimental de este trabajo y se describirá a detalle más adelante en la sección correspondiente.

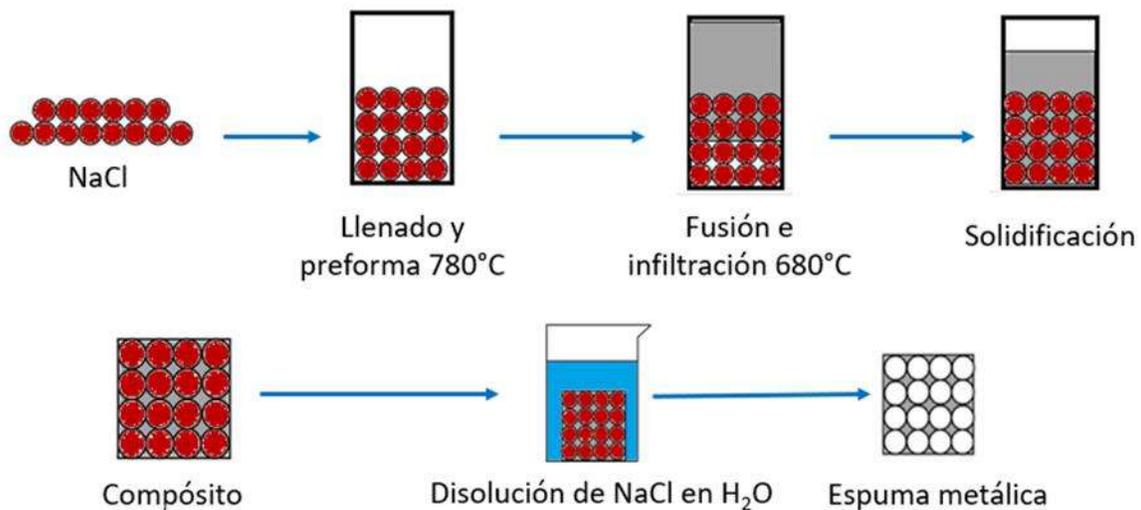


Figura 11. Proceso de colada con partículas espaciadoras. [30]

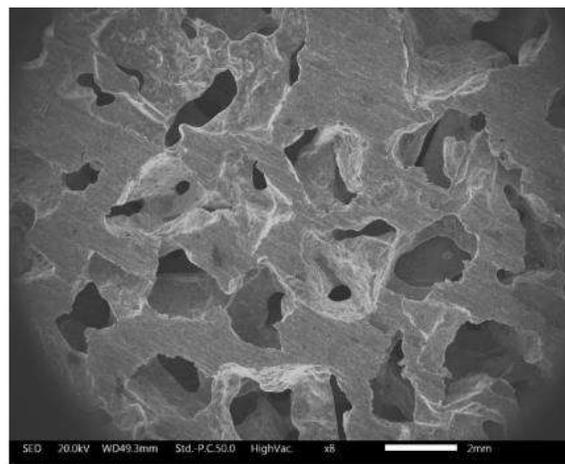


Figura 12. Imagen de microscopía electrónica de barrido (MEB) de una espuma de aluminio fabricada utilizando granos de sal común (NaCl) como espaciadores. [4]

1.4.2. Procesos con metal en estado líquido.

En los procesos con metal líquido los poros se forman cuando el metal se encuentra en dicho estado, existen diversas maneras de generar los poros desde la inyección directa de gas, hasta el tomar ventaja de reacciones químicas e invariantes, también existen métodos de colada en los que para formar los poros se requiere de fabricar moldes sobre los cuales se realiza el vaciado de metales y aleaciones fundidas. A continuación, se presentan algunos de los más importantes.

1.4.2.1. Espumado directo con gas o agentes espumantes.

En este proceso se forman burbujas directamente en un metal o aleación en estado líquido a través de la inyección de un gas o usando compuestos químicos que se descomponen a alta temperatura, una vez que concluye el espumado el metal se enfría y las burbujas quedan atrapadas en la matriz metálica formando poros. En el caso del proceso por inyección de gas comúnmente se utilizan gases como dióxido de carbono, oxígeno y gases inertes. Por otro lado, en el caso de los agentes espumantes el compuesto más utilizado es el Hidruro de Titanio TiH_2 en concentraciones de 1 a 2% mientras se agita el baño metálico. Ambos métodos requieren de partículas sólidas como refuerzo en el baño metálico las cuales incrementan la viscosidad de este, evitando que las burbujas alcancen la superficie rápidamente y permitiendo que la espuma se estabilice hasta el proceso de solidificación. Los dos procesos se usan principalmente con aluminio y sus aleaciones debido a su buena resistencia a la corrosión en presencia de gases que contienen oxígeno, las espumas fabricadas con este método pueden alcanzar porosidades en un rango de 80 a 90% y densidades de 0.18 a 0.24 g/cm³, como los ejemplos mostrados en la Fig. 13. [26], [30], [33], [34]

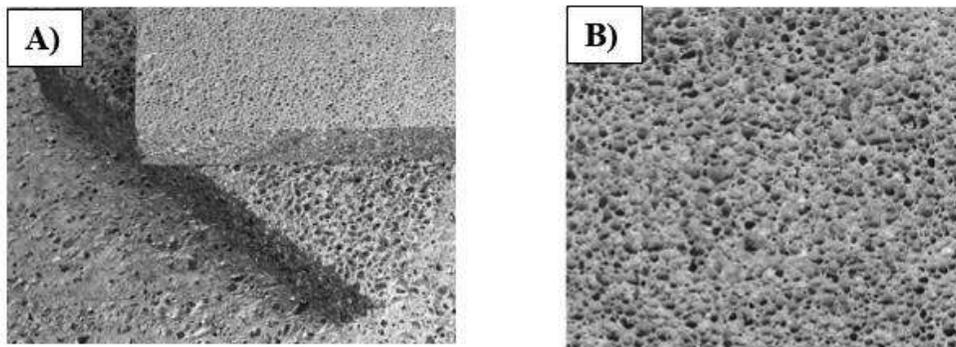


Figura 13. Ejemplos de Espumas fabricadas por espumado directo. A) Espumado con gas. B) Espumado con agentes espumantes. [30], [35]

1.4.2.2. Método GASARS.

El método de GASARS aprovecha la reacción eutéctica que se da cuando el hidrogeno se disuelve en ciertos metales para fabricar espumas metálicas, fundiendo un metal o aleación en una atmósfera de hidrogeno a alta presión en un crisol, generalmente 50 atm. Una vez que la mezcla es homogénea se realiza un vaciado a un molde previamente calentado para realizar la solidificación de manera ordenada. La solidificación en este proceso es de tipo direccional y los poros que se obtienen presentan una morfología alargada de forma cilíndrica con diámetros que van de los 10 μm hasta 300 mm, alcanzando porcentajes de porosidad en un rango de 5 a 75%. [36]

1.4.2.3. Fusión de polvos compactos.

Este proceso se basa en el uso de la pulvimetalurgia para la fabricación de precursores solidos de un metal o aleación y un agente espumante (Generalmente TiH_2) en concentraciones de 1%, los cuales son sometidos posteriormente a un calentamiento a una temperatura cercana a la de fusión del metal de partida para provocar el espumado, liberando gas y forzando a la fase metálica a expandirse dando forma a la espuma metálica, un ejemplo de estas espumas se muestra en la Fig. 14.A. Este proceso es más adaptable a las aleaciones de aluminio, también se puede utilizar en aceros, aleaciones de zinc, latón, entre otros. [30], [31], [37]

1.4.2.4. Colada por inmersión con espumas poliméricas.

Este método utiliza una espuma de un material polimérico de poro abierto (generalmente poliuretano), la cual se rellena con una suspensión de partículas de materiales resistentes a altas temperaturas como polvos cerámicos de mulita, yeso o carbonato de calcio; posteriormente se remueve la espuma de material polimérico por medio de un calentamiento dejando un molde de material resistente a la temperatura sobre el cual se realiza el vaciado del metal obteniendo la espuma metálica con una estructura equivalente a la de la polimérica utilizada inicialmente cuando el molde sea retirado mediante técnicas diversas, por ejemplo, mecánicamente golpeando la espuma para fracturarlo o utilizando agua a presión. En algunas ocasiones el llenado del molde no se realiza de manera completa por gravedad y es necesario aplicar presión sobre el metal fundido. Por medio de este proceso se pueden obtener espumas con tamaños de poro de 1 a 5 mm y densidades relativas de hasta 0.05, como la mostrada en la Fig. 14.B. [30]

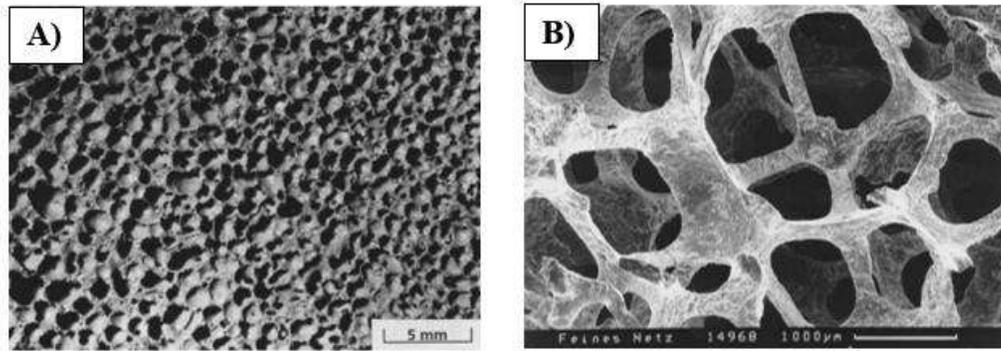


Figura 14. Ejemplos de procesos con metal líquido. A) Fusión de polvos compactos. B) Colada por inmersión con espumas poliméricas. [30]

1.4.2.5. Espumado por Espray

Este proceso utiliza un baño metálico, el cual es depositado sobre un substrato a través de un atomizador que continuamente rocía pequeñas gotas de metal, a medida que las gotas se van depositando se iniciara un crecimiento para fabricar un material con una forma predeterminada como tubos, planchones o palanquillas, el espumado se dará inyectando polvos de compuestos químicos que liberen grandes cantidades de gas al entrar en contacto con el metal fundido por ejemplo Carbonato de Bario ($BaCO_3$) para aleaciones cobre estaño ($CuSn_6$) de acuerdo a Kelley y col. U óxido de silicio (SiO_2) para acero al carbono de acuerdo con Banhart y col. [30] De tal manera que a medida que el agente espumante se va depositando de manera simultánea con las gotas de metal se da la reacción de liberación de gas y se forma una mezcla de metal líquido con burbujas dispersas en su interior, que va solidificando paulatinamente.

1.4.3. Procesos con metal en estado sólido.

Las rutas de proceso en estado sólido se basan en el uso de la metalurgia de polvos y el uso de técnicas de sinterización. Generalmente los procesos que entran en esta categoría se diferencian por la forma del material de partida que puede utilizarse en polvo o esferas huecas, otros procesos utilizan preformas o suspensiones con partículas sólidas. Dada la gran variedad de procesos, las espumas que pueden fabricarse por la ruta de metal sólido son de diferentes tipos pudiendo obtener materiales de poro abierto, cerrado e incluso combinación de ambos, así como rangos de porosidad y densidad muy amplios dependiendo del método de fabricación. A continuación, se describen algunos de los procesos más importantes en esta categoría.

1.4.3.1. Sinterizado de esferas huecas

Como su nombre la espuma metálica, se forma utilizando un proceso de sinterizado para lograr la consolidación de una estructura porosa mediante la unión de las esferas de metal huecas. Las esferas huecas pueden fabricarse por diferentes métodos, por ejemplo, recubriendo esferas poliméricas utilizando deposición de química, eléctrica o suspensiones de polvos metálicos con aglutinantes, posteriormente las esferas poliméricas se eliminan por temperatura. [30] El sinterizado se aplica utilizando presión para compactar las esferas aumentando la superficie de contacto entre ellas y temperatura para favorecer procesos difusivos entre las paredes de las esferas vecinas de manera que estas queden unidas, como se muestra en la Fig. 15.A.

1.4.3.2. Gas atrapado

En este proceso se fabrica un precursor metálico realizando una compactación de polvos durante la cual se permite que pequeños volúmenes de gas queden atrapados dentro del mismo, posteriormente el precursor es sometido a un tratamiento térmico para expandir el gas atrapado liberando presión y forzando al mismo tiempo al material metálico a expandirse también dando forma a la espuma metálica, para el procesamiento final que puede incluir maquinado, corte y soldadura. Este proceso se utiliza en la fabricación de espumas de titanio, principalmente en superaleaciones TiAl6V4 [38]

1.4.3.3. Espumado de slurries (suspensiones).

El término Slurries hace referencia a una mezcla líquida con partículas en suspensión, en el caso de las espumas metálicas las partículas en suspensión son polvos metálicos. Este proceso inicia con la preparación de la suspensión, la cual contiene un agente espumante y algunos aditivos que ayudan a mejorar la viscosidad, posteriormente se realiza un mezclado y vaciado de la mezcla a un molde, para terminar con un calentamiento para activar el espumante liberando y expandiendo el gas, al mismo tiempo que se lleva a cabo la sinterización de los polvos metálicos y la evaporación del vehículo de suspensión, formando la espuma. Se utiliza principalmente con aleaciones de níquel, hierro y cobre. [29]

1.4.3.4. Prensado sobre materiales espaciadores.

Este proceso es una variante del método de espaciadores con metal líquido que se revisa a detalle en la Sección 5.5.1 pero en este caso con polvos metálicos como material de partida y utilizando un proceso de sinterizado y para lograr la consolidación de la espuma se requiere de un proceso de sinterizado para consolidar el material. Primeramente, se añaden los polvos metálicos mezclándolos con las partículas espaciadoras o agregándolos sobre una preforma, después se realiza la

compactación de la mezcla generalmente por compresión isostática, continuando con el proceso de sinterización y la eliminación de los espaciadores por disolución o temperatura. [39], [40] Los criterios para seleccionar un material espaciador son los mismos que para el proceso de infiltración por vía líquida.

1.4.3.5. Sinterizado de polvos o fibras

Este método involucra una ruta de proceso sencilla que consiste en preparar y mezclar los polvos, un proceso de compactación y sinterizado, igual que procesos anteriores el mezclado puede incluir aglutinantes y el proceso de compresión más utilizado es la compresión isostática. Este proceso es aplicable a una gran cantidad de metales y aleaciones principalmente el bronce y los aceros inoxidables obteniendo porosidades de 20 a 50%, sin embargo, no es recomendable para aleaciones de aluminio por la capa de óxido que se genera en la superficie de este durante el sinterizado. Procesos recientes y novedosos utilizan fibras en lugar de polvos. La Fig. 15.B y 15.C muestran ejemplos para ambos casos. [41]

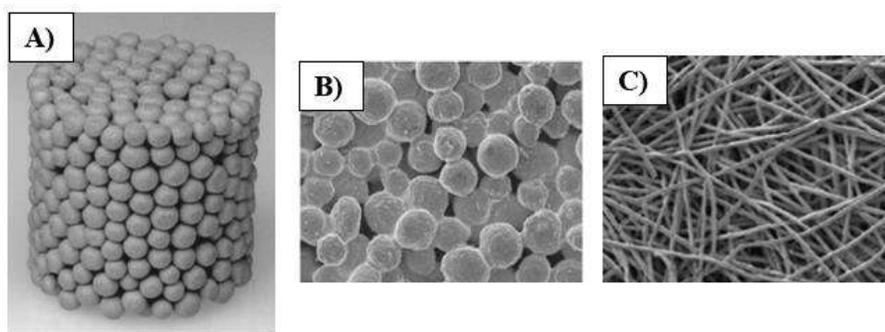


Figura 15. Ejemplos de espumas fabricadas por la ruta de metal sólido. A) Sinterizado de esferas huecas. B) Sinterizado de polvos. C) Sinterizado de fibras. [29], [30], [42]

1.4.3.6. Otros procesos.

Además de los ya mencionados existen otros procesos, por ejemplo, el uso de mezclas de polvos metálicos con aglutinantes poliméricos los cuales se mezclan y son sometidos a un proceso de extrusión en el cual se les da la forma deseada y finalmente se sinterizan para eliminar el aglutinante y unir los polvos metálicos dejando una estructura con una porosidad de 50% aproximadamente.

Otra técnica consiste en un proceso de sinterizado a reacción en el cual se usan mezclas de polvos las cuales generan reacciones químicas mediante las cuales se genera la consolidación de la espuma metálica, por ejemplo, titanio y aluminio, hierro y aluminio, entre otras.

1.4.4. Deposición de vapor.

En este método se usa un metal o aleación en estado gaseoso el cual se deposita sobre un precursor generalmente un polímero como las espumas de poliuretano. Se realiza en un cámara de vacío permitiendo la condensación del vapor metálico sobre la preforma formando una capa de metal sobre la superficie de esta, cuyo espesor dependerá del tiempo de tratamiento, posteriormente se realiza un proceso de enfriamiento y finalmente se elimina el precursor polimérico mediante procesos químicos o térmicos para obtener la espuma metálica. Con este método pueden obtenerse espumas de poro abierto con densidades en el rango de 0.2 a 0.6 g/cm³ y tamaños de poro de 100 a 300 μm. [26], [43]

1.4.5. Deposición electroquímica.

En este método también se realiza la deposición metal sobre precursores poliméricos, los cuales son removidos en etapas posteriores del proceso, en este caso el metal se encuentra en forma de iones y ya que los polímeros son materiales no conductores se requiere aplicar un recubrimiento conductor como el grafito por medio de suspensiones o utilizando técnicas de sputtering. Los iones metálicos se depositan mediante un proceso de galvanoplastia y posteriormente mediante un tratamiento térmico se realiza la eliminación del precursor polimérico para obtener el producto final. Los materiales más utilizados en este método son el níquel, aleaciones cromo-níquel y cobre. La Fig. 16 muestra ejemplos de espumas fabricadas con ambos métodos de deposición. [38]

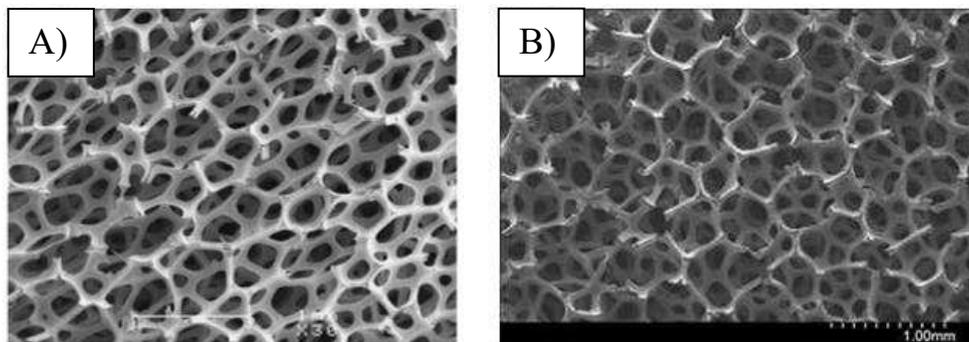


Figura 16. Espumas fabricadas con métodos de deposición. A) Deposición de vapor. B) Deposición electroquímica. [30], [43]

1.5. Aplicaciones de espumas metálicas.

Como ya se mencionó antes, las espumas metálicas son materiales con propiedades únicas que no pueden encontrarse en los materiales densos destacando sobre todo su baja densidad, rigidez, su capacidad como aislante acústico y térmico, su elevada capacidad de absorber energía, entre otras. Todo esto ha hecho que diferentes industrias muestren interés en estos materiales, principalmente la aeronáutica y la automotriz. En esta sección se revisarán algunas de las aplicaciones más comunes de estos materiales.

1.5.1. Aplicaciones estructurales.

La baja densidad y rigidez de las espumas metálicas las vuelve materiales con gran potencial para reforzar y aligerar estructuras, por ello industrias como la automotriz, aeronáutica, naval y de construcción, tienen gran interés en estos materiales, principalmente aquellas con estructuras de poro cerrado y fabricadas a partir de aleaciones de aluminio, titanio y acero.

El aligeramiento de estructuras generalmente busca el ahorro de combustible en medios de transporte y en algunos casos mejorar la precisión en componentes automatizados que se encuentran en constante movimiento, por ejemplo, los sistemas de deslizamiento en equipos de maquinado.

En lo relativo al uso de espumas como reforzante de estructuras, generalmente se aplican como relleno en componentes sometidos a compresión ya que la estructura porosa ayuda a distribuir la carga, permitiendo alargar el tiempo de vida útil del componente, por ejemplo, en los brazos de las grúas o en los chasis de los autos, como se muestra en la Fig. 17.

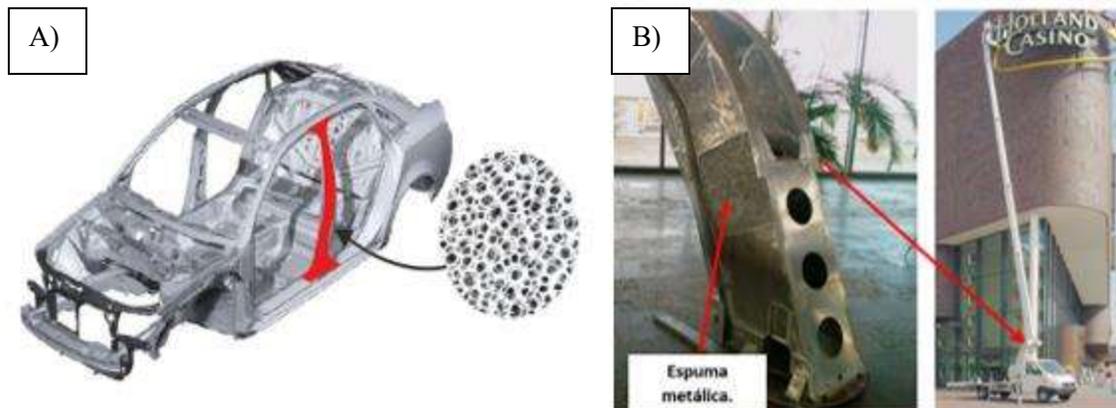


Figura 17. Uso de espumas metálicas como reforzantes de estructuras. A) Refuerzo del chasis de un auto. B) Refuerzo del brazo de una grúa. [25], [44]

1.5.2. Absorción de impactos.

La capacidad de las espumas para lograr altos porcentajes de deformación hace de ellas materiales con alta capacidad de absorción de impactos, esto debido a que logran distribuir una gran cantidad de energía cinética a lo largo de su estructura ayudando en la desaceleración de una fuerza de impacto por ejemplo en las colisiones. Actualmente esta característica es explotada principalmente por la industria automotriz y ferroviaria para brindar mayor seguridad a sus usuarios y reducir el costo de los daños materiales en accidentes, marcas automotrices de renombre como FIAT, Citroën, Ferrari y Audi han desarrollado investigación científica implementando sistemas de absorción componentes en puertas, chasis, entre otros componen-tes. Por otro lado, en el caso de la industria ferroviaria, las espumas se usan para reforzar las cabinas de pasajeros con paneles tipo sándwich con núcleos de espumas de aluminio (Fig. 18). [25], [44], [45]

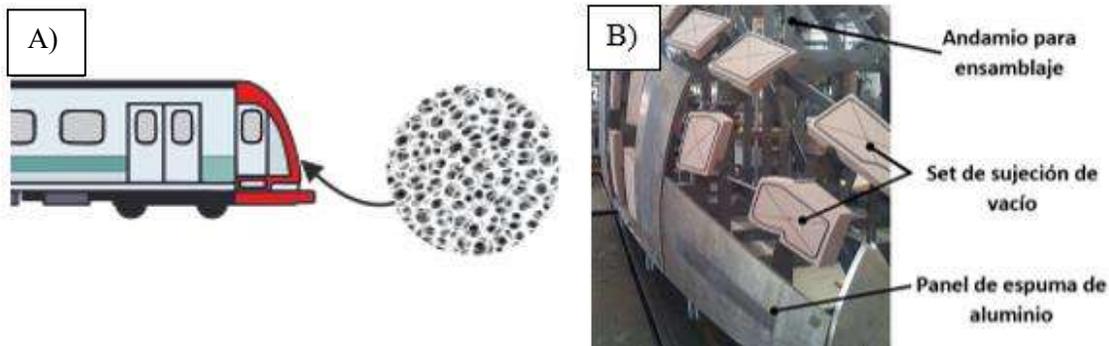


Figura 18. Aplicación de espumas metálicas en la industria ferroviaria para la absorción de impactos. A) Esquema representativo de una cabina. B) Montaje de paneles de espuma en una cabina real. [44], [45]

1.5.3. Control acústico y térmico.

El sonido y el calor son energías que están presentes en muchos aspectos de la vida, por tanto, controlarlas es de vital importancia, desde aplicaciones sencillas en la vida cotidiana hasta algunas altamente especializadas, las espumas metálicas son materiales altamente aptos para el control de ambas energías

En el caso del sonido la disipación del mismo a través de la estructura porosa permite atenuarlo, lo cual resulta útil para aplicaciones que requieren aislar sonidos fuertes y que no se proyecten al

exterior, por ejemplo, carreteras y talleres de maquinaria pesada; así como en aquellas que se requiere mejorar la acústica de un espacio determinado evitando que el sonido escape del mismo y al mismo tiempo reduciendo el sonido del exterior como en las arenas deportivas, auditorios, oficinas y cafeterías.

En relación a la energía térmica la naturaleza conductora de los metales y aleaciones, hace que las espumas fabricadas con ellos no muestren una capacidad aislante al nivel de los cerámicos o los polímeros, sin embargo, al introducir poros en su estructura la conductividad decrece permitiendo controlar el transporte de calor pudiendo ralentizar la conducción de calor a valores mínimos otorgando versatilidad a las espumas en aplicaciones que requieren tanto bajas como altas conductividades, por ejemplo intercambiadores de calor para dispositivos electrónicos como LEDs y computadoras, e incluso utensilios de cocina. Ejemplos de lo anterior pueden observarse en la Fig. 19.

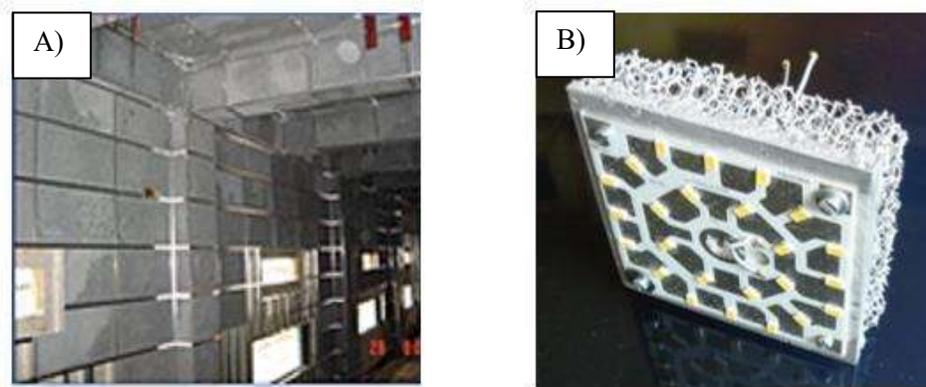


Figura 19. Ejemplos de aplicaciones para control acústico y térmico. A) Uso de paneles para aislamiento de sonido en una estación del metro Do dong en Corea del sur. B) Intercambiador de calor de una lámpara LED. [25], [46]

1.5.4. Otras aplicaciones.

Las aplicaciones antes descritas son las más comunes para las espumas metálicas sin embargo existen algunas más como las que se ejemplifican a continuación.

La elevada área superficial de las espumas metálicas las vuelve materiales con gran eficiencia para generar reacciones químicas y por tanto ideales para la fabricación de electrodos por ejemplo para la fabricación de baterías ácidas reemplazando las rejillas de plomo por espumas también de plomo. [47]

Además de lo anterior la gran superficie de contacto que ofrecen las espumas puede usarse para fabricar catalizadores.

Las espumas con diámetro de poro muy pequeño son de gran utilidad en los procesos de filtrado para la descontaminación de gases y líquidos, así como en el control del flujo de estos pudiendo fabricar dispositivos que superan en confiabilidad a otros de uso común como las válvulas micrométricas.

La elevada área superficial de las espumas metálicas las hace materiales ideales para usarse como catalizadores en reacciones químicas, aunque no pueden competir con la gran superficie de contacto que ofrecen los cerámicos, las espumas de aluminio podrían ser materiales sustitutivos ya que presentan ductilidad y alta conductividad térmica, además de que son altamente resistentes a la corrosión. Estos elementos podrían utilizarse, por ejemplo, para eliminar los grupos funcionales “NO” de los humos de combustión en las centrales de producción de energía eléctrica. [18]

Otro de los usos que se les da comúnmente a las espumas metálicas es el de absorción de vibraciones mecánicas, debido a que poseen elevadas frecuencias naturales de resonancia, pudiendo por tanto reducir el intervalo de vibraciones. Algunos ejemplos de las aplicaciones antes mencionadas se muestran en la Fig. 20.

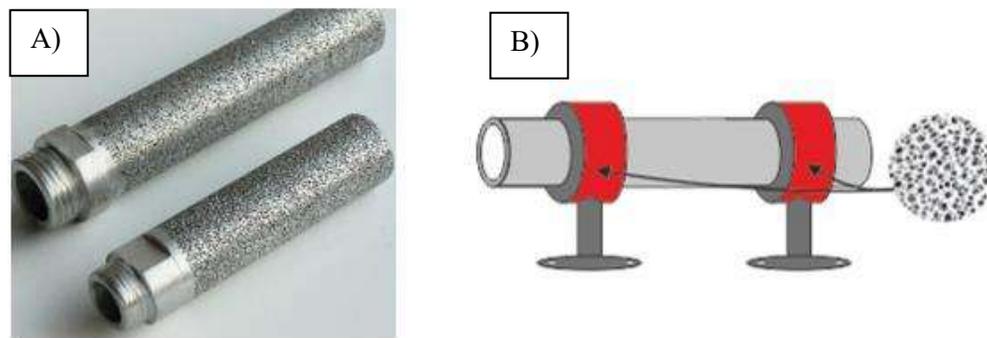


Figura 20. Ejemplos de otras aplicaciones de espumas metálicas. A) Filtro de aire de espuma de aluminio utilizado en vehículos. B) Esquema de soportes para la absorción de vibraciones en tubería. [48], [49]

1.6. Aluminio.

El aluminio es uno de los elementos más abundantes en el planeta, el tercero más común en la corteza terrestre se obtiene de la bauxita, y es uno de los metales más versátiles debido a sus buenas propiedades mecánicas, químicas, etc. Dependiendo del tipo de aleación se pueden obtener

propiedades como buena relación resistencia mecánica-peso, alta resistencia a la corrosión y buena conductividad eléctrica y térmica; además de contar con las propiedades mecánicas distintivas de los metales como la maleabilidad, plasticidad, ductilidad, etc. Algunas de ellas siendo superiores que las de otros metales y aleaciones como algunos grados de acero. [50]

1.6.1. Propiedades y características generales.

El aluminio tiene una densidad de 2.70 g/cm^3 siendo uno de los materiales metálicos más ligeros, aunque en estado puro no posee alta resistencia mecánica con los elementos de aleación adecuados puede alcanzar resistencias superiores al acero estructural con solo la tercera parte de su peso. [50]

Es resistente a la corrosión, debido a la alta reactividad del aluminio este tiende a pasivarse con el oxígeno del ambiente formando una capa protectora contra la oxidación. Con los elementos de aleación adecuados las aleaciones de aluminio son capaces de resistir la corrosión en ambientes agresivos como el agua salada, así como un amplio rango de agentes químicos. Es un material no magnético, no tóxico, con buenas propiedades de reflexión de la luz, impermeable e inodoro. [51], [52]

A diferencia de otros metales y aleaciones, el aluminio tiene una gran ventaja en cuestión de formabilidad, ya que puede ser trabajado en caliente y en frío, además de que con los elementos aleantes adecuados aumenta su fluidez en estado líquido lo que lo convierte en un material muy adecuado para fabricar piezas por fundición, esta propiedad es de gran importancia para el método de infiltración que se utilizará en este trabajo y que será descrito a detalle posteriormente.

Presenta una buena conductividad térmica tres veces superior a la del acero siendo un buen material para aplicaciones que requieren tanto de calentamiento como enfriamiento. Es buen conductor eléctrico y aunque no supera la conductividad de otros materiales como el cobre, al ser más ligero puede alcanzar valores de conductividad superiores si se comparan sus conductividades con respecto a una base de peso equivalente. [50], [53]

1.6.2. Aleaciones de aluminio, tipos y designación.

La versatilidad de propiedades del aluminio antes mencionada no se encuentra en el material en estado puro y está dada por los elementos de aleación, tratamientos térmicos y el trabajado mecánico.

Las aleaciones de aluminio se clasifican principalmente en dos grandes grupos en base al proceso por el cual se fabricaron, en un grupo aquellas que son fabricadas a través del proceso de forja y en el otro las que se manufacturan por fundición. El diagrama de la Fig. 21 muestra la clasificación típica de las aleaciones de aluminio.

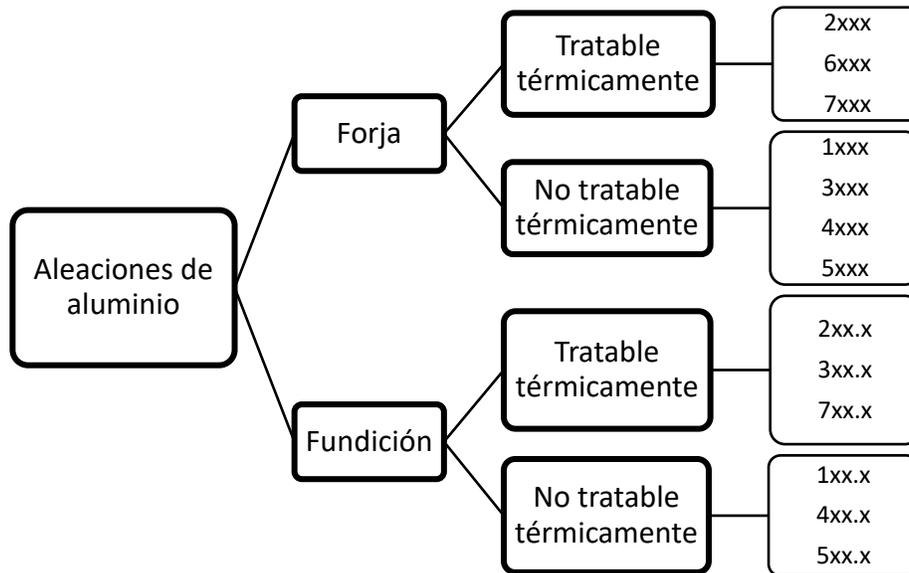


Figura 21. Clasificación típica de las aleaciones de aluminio. [54]

1.6.2.1. Aleaciones Forjadas.

Como su nombre lo indica estas aleaciones son fabricadas a base de un proceso en el que se aprovecha la plasticidad del aluminio para darle la forma deseada a través de la aplicación de una fuerza de compresión. De acuerdo a la ASTM las aleaciones de aluminio forjadas se nombran en base a un sistema de cuatro dígitos donde el primero de estos indica el principal elemento de aleación y la serie a la que pertenece; el segundo dígito indica una modificación específica en la aleación y los últimos dos son números arbitrarios para identificar una aleación específica, excepto en el caso de las aleaciones de serie 1 en la cual los últimos dígitos indican el porcentaje mínimo de aluminio por arriba del 99%. [55] La Tabla 4 muestra las diferentes series de aleaciones de aluminio forjadas de acuerdo a la denominación ASTM así como el elemento(s) aleante(s) correspondientes para cada una.

1.6.2.2. Aleaciones por Fundición.

A diferencia de las aleaciones por forja, las aleaciones por fundición se nombran utilizando un sistema de 3 dígitos y un decimal, donde el primer dígito representa el principal elemento de aleación y nos dice la serie a la que pertenece; el segundo y tercero son números arbitrarios que se utilizan para

designar una aleación específica; y el número que se encuentra a la derecha del punto decimal indica si es una fundición (.0) o un lingote (.1 o .2). La Tabla 5 muestra las designaciones para las aleaciones por fundición y el elemento aleante principal de acuerdo con el primer dígito de la aleación. [56]

Tabla 4. Series de aleación de aluminio por forja. Se muestra el elemento de aleación principal correspondiente a los dígitos que ocupan la primera posición. [56]

Series de aleación	Principal elemento aleante
1xxx	99% Aluminio mínimo
2xxx	Cobre
3xxx	Manganeso
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio y Silicio
7xxx	Zinc
8xxx	Otros Elementos

Tabla 5. Series de aleación de aluminio por fundición. Se muestra el elemento de aleación principal correspondiente a los dígitos que ocupan la primera posición. [56]

Series de aleación	Principal elemento aleante
1xx. X	99% Aluminio mínimo
2xx. X	Cobre
3xx. X	Silicio y cobre o manganeso
4xx. X	Silicio
5xx. X	Magnesio
6xx. X	Serie no utilizada
7xx. X	Zinc
8xx. X	Estaño
9xx. X	Otros elementos

Entre las aleaciones para fundición más importantes para la fabricación de materiales con secciones transversales delgadas y espesores variables está las de la serie 300, lo cual es favorecido por el alto

contenido de Si, que aumenta la porosidad. Estas aleaciones Al-Si-Cu se utilizan en monoblocks, pistones, y otras aplicaciones que requieran propiedades intermedias. En la obtención de espumas por infiltración también se han utilizado.

1.7. Fractalidad.

El concepto de fractal fue enunciado por el matemático polaco Benoit Mandelbrot, la palabra fractal viene del latín *fractus* que significa irregular o quebradizo [55]. Un fractal es un cuerpo o forma geométrica irregular que puede subdividirse en partes más pequeñas siendo cada una de estas partes una copia a escala más pequeña del cuerpo o figura original, a esto se le conoce como autosimilitud. [57]

Los fractales están presentes en todas partes, la naturaleza misma muestra varios ejemplos como las ramas de los árboles, las hojas de las plantas, los relieves de las montañas, los rayos e incluso en los sistemas de organismos vivos como los vasos capilares, tubos intestinales, redes neuronales, etc. Las réplicas del cuerpo o forma original pueden ser idénticas formando así un fractal lineal caracterizado por un simple cambio en la variación de sus escalas hasta el infinito (Fig. 22.A); por otro lado, cuando además de cambiar la escala las formas se distorsionan y cambian se generan fractales complejos o no-lineales (Fig. 22.B). La autosimilitud es entonces, exacta en las formas fractales lineales o regulares y estadística en las no-lineales o caóticas. [4]

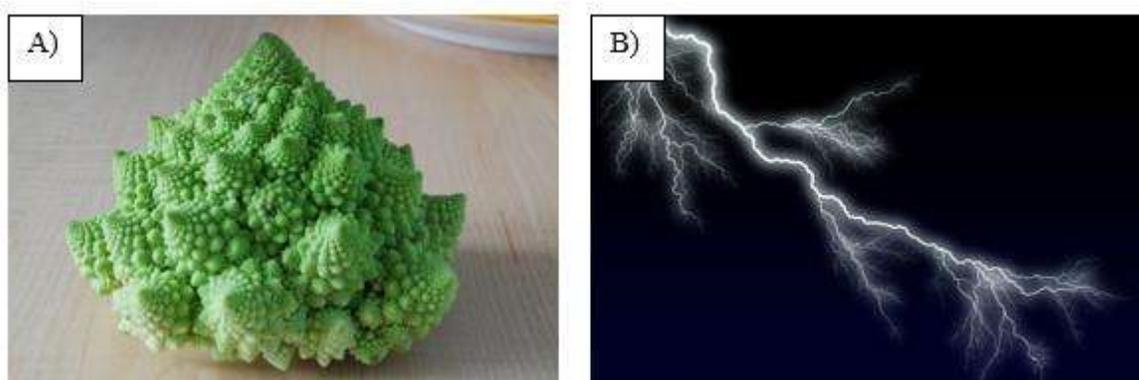


Figura 22. Ejemplos de fractales en la naturaleza. A) Brócoli Romanesco. B) Rayo. [58], [59]

Dada la gran cantidad de formas naturales que presentan fractalidad, este concepto es cada vez más utilizado para describir fenómenos de todo tipo desde análisis en el comportamiento de la bolsa de valores hasta descripción de turbulencias en flujos. [55] En el caso de los materiales la fractalidad se ha utilizado en la descripción de la estructura y propiedades de estos, hablando específicamente de las espumas metálicas su estructura compleja formada por poros de diferentes tamaños, los cuales se distribuyen de diferentes formas representan un sistema complejo que puede tratarse como un fractal para describir características como el área superficial específica, fracción volumétrica, forma y distribución de los poros. [60]

1.7.1. Formas fractales clásicas.

A lo largo de la historia de la matemática fractal, diferentes científicos y matemáticos desarrollaron formas geométricas, los cuales mediante la repetición sucesiva de un conjunto de operaciones geométricas mostraban las características de los cuerpos fractales como la autosimilitud, cada repetición de un conjunto de operaciones simétricas recibe el nombre de paso o iteración. Los modelos clásicos son importantes ya que permiten visualizar como se generan las formas fractales y sus características de las formas geométricas fractales.

1.7.1.1. Curva de Koch.

Esta forma fractal inicia con una línea recta que se divide en tres partes iguales, después se reemplaza el segmento central por dos líneas una a 60° y otra a 120° a recta original, repitiendo estas operaciones de manera sucesiva se obtienen la curva de Koch como se muestra en la Fig. 23.

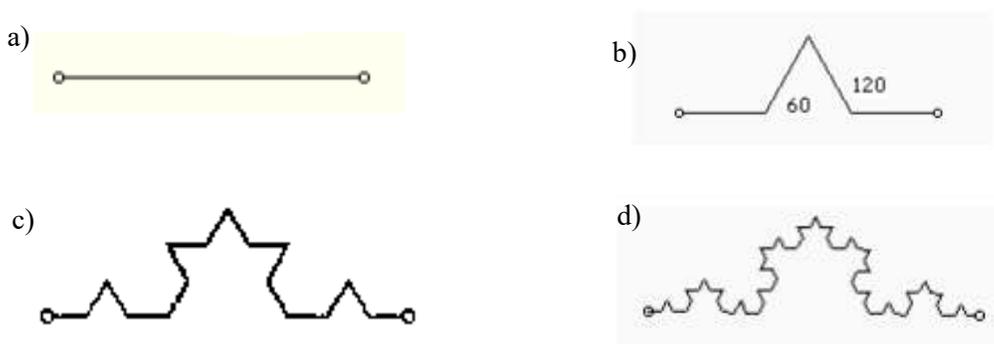


Figura 23. Curva de Koch. [61]

1.7.1.2. Alfombra de Sierpinski.

Se forma partiendo de un cuadrado común que se divide en nueve cuadrados iguales, y retirando posteriormente el cuadrado del centro, la consecutiva repetición de estas operaciones permite formar la alfombra de Sierpinski como se observa en la Fig. 24.

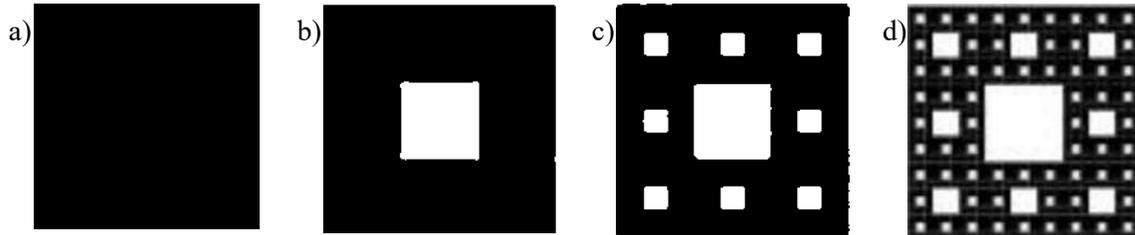


Figura 24. Alfombra de Sierpinski. [62]

1.7.1.3. Esponja de Menger.

Es una figura geométrica fractal en la cual se parte de un cubo ordinario en el cual cada una de sus caras se divide en nueve recuadros iguales y retirando el recuadro central de manera sucesiva. Como se muestra en la Fig. 25.

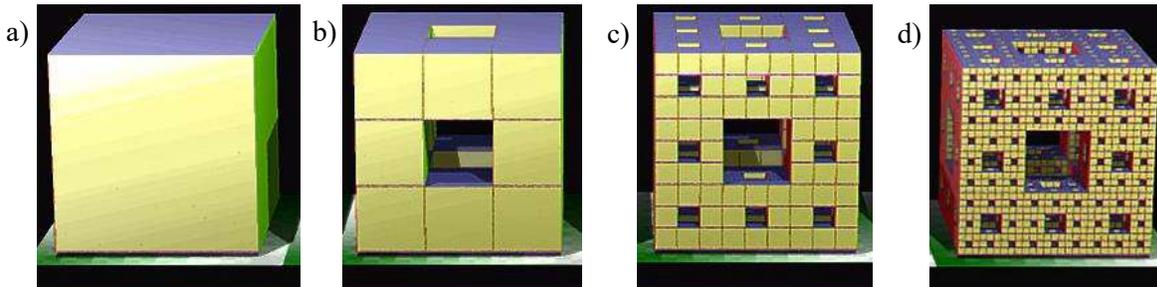


Figura 25. Esponja de Menger. [63]

1.7.2. Dimensión fractal o de Hausdorff.

Las figuras geométricas comunes provenientes de la geometría euclidiana pueden ser descritas haciendo uso del típico espacio tridimensional, en otras palabras, podemos describirlas en función del largo, alto y ancho de sus dimensiones. Por ejemplo, una línea es una figura de una dimensión ya que solo tiene longitud, un cuadrado es una figura de dos dimensiones ya que podemos medir largo y ancho; y un cubo de tres porque además de su largo y ancho, podemos medir también su altura. Henri Poincaré definió lo anterior como dimensión topológica, si las fronteras de una figura están delimitadas por puntos esta será unidimensional, si están definidas por curvas la figura es bidimensional y si las fronteras están delimitadas por superficies la figura será tridimensional,

adicionalmente Poincaré introdujo valores numéricos para cada una de las dimensiones, así como para el caso de que el espacio este vacío o solo exista un punto en el como se muestra en la Tabla 6. [64]

Tabla 6. Dimensiones topológicas para elementos de simetría básicos. [64]

<i>Conjunto vacío</i>		<i>dimensión topológica D = -1</i>
<i>Punto</i>		<i>dimensión topológica D = 0</i>
<i>Segmento</i>		<i>dimensión topológica D = 1 (1D)</i>
<i>Cuadrado</i>		<i>dimensión topológica D = 2 (2D)</i>
<i>Cubo</i>		<i>dimensión topológica D = 3 (3D)</i>

En el caso de la geometría fractal, lo anterior no aplica de la misma manera, ya que se considera que las formas geométricas fractales no tienen valores de dimensión “D” enteros, es decir que podemos encontrar, por ejemplo, formas fractales con valores D=1.5, para entender el por qué debemos citar primero el concepto de dimensión fractal introducido por Hausdorff que la definía como: “Una propiedad de un objeto que nos indica su capacidad para rellenar el espacio que lo contiene, y puede tomar valores continuos en el espacio de los números reales, entre 0 y 3”. Adicionalmente introdujo también la definición matemática del concepto como lo muestra la Ec. 7: [64]

$$D = \frac{\log N}{\log \left(\frac{l}{p}\right)} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde D es la dimensión fractal, N es la cantidad de unidades que forman el objeto, l es la altura del objeto y p es la altura de las unidades que forman el objeto. A partir de esta ecuación es posible observar por qué la dimensión fractal puede tomar valores decimales.

1.7.3. Teoría fractal en el análisis de espumas metálicas.

Previamente se ha mencionado ya, que las propiedades de las espumas metálicas recaen fuertemente en las características de su estructura, por tanto, poder describirla de manera precisa es de vital importancia, sin embargo una de las características de las espumas metálicas es precisamente la complejidad de la misma, la teoría fractal es de gran ayuda en la descripción de estructuras y geometrías complejas, principalmente mediante el uso de la dimensión fractal, la cual puede relacionarse con diferentes propiedades de las espumas, logrando así describir de manera más precisa

el efecto de la estructura sobre las mismas, un ejemplo de esto es el estudio realizado por Wang y col. [3] en el cual se estudió la relación entre la dimensión fractal y diferentes propiedades como la porosidad (Ec. 8) y el esfuerzo de compresión (Ec. 9) a través de las expresiones matemáticas en espumas metálicas fabricadas a base de polvos obteniendo la relación que se ilustra en la Fig. 26. [3]

$$\theta = M \left(1 + \frac{1}{D} \right) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde; θ es la porosidad, D es la dimensión fractal, ϕ es la porosidad superficial y M un coeficiente.

$$\sigma_c = a(1 - \exp(k(D - b))) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde σ_c es el esfuerzo de compresión y; a , k y b son coeficientes correlativos.

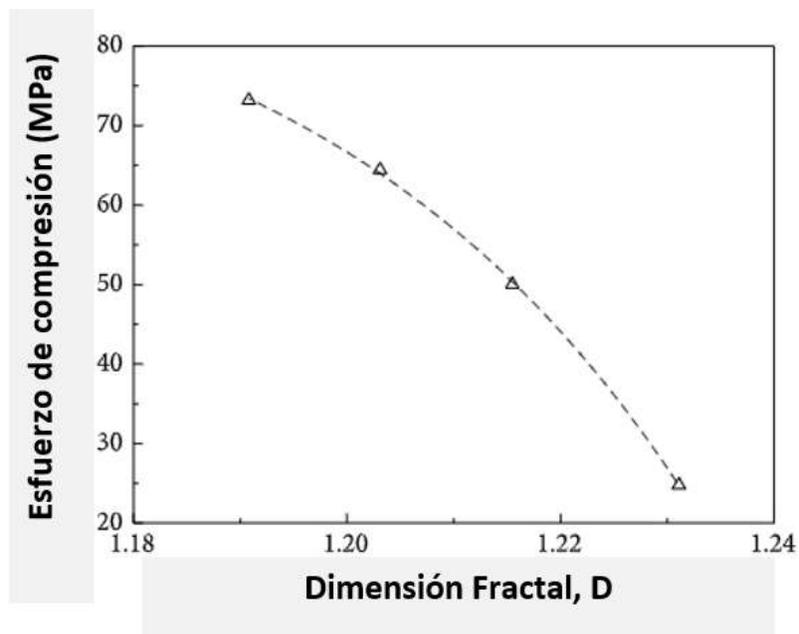


Figura 26. Relación Dimensión fractal-Esfuerzo de compresión. [3]

Pérez y col. [2] realizaron un estudio tratando la distribución de la porosidad como fractal en espumas de titanio fabricadas por el método de espaciadores, con el objetivo de comparar modelos realizados con el método de elementos finitos con espumas reales, como se muestra en la Fig. 27.

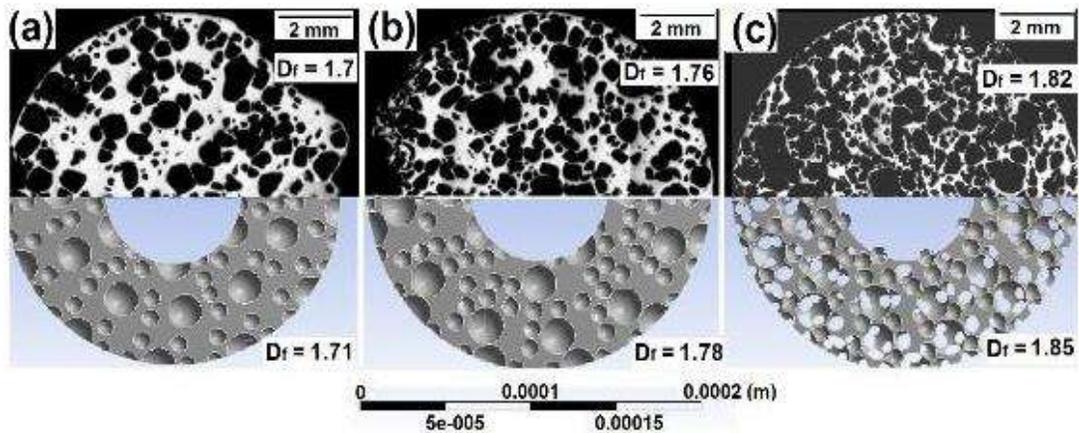


Figura 27. Comparación de modelos Competer Aided Design (CAD) con espumas reales. [2]

Como se puede observar en la Fig. 27, la porosidad de las muestras aumenta de izquierda a derecha al igual que la dimensión fractal, por lo que, a mayor porosidad, mayor dimensión fractal, coincidiendo con los resultados del estudio realizado por Wang y col. [3].

En el caso de las espumas metálicas la dimensión fractal es un parámetro útil que nos permite saber el comportamiento de la relación de tamaños y cantidades, entre poros grandes y pequeños, así como la morfología de estos. En el caso de la morfología partamos de la sección transversal de un poro ideal que describe una circunferencia perfecta (ver Fig. 28.a) su dimensión fractal será 2 ya que es un área delimitada por una curva, a medida que las fronteras de un poro muestren mayor irregularidad con respecto a una circunferencia perfecta, su dimensión fractal será menor de 2 pero mayor que 1 ya que sigue delimitando un área (ver Fig. 28.b)



Figura 28. Dimensión fractal en la morfología de poros. Donde D es la dimensión fractal.

Por otro lado, en el caso de las relaciones de tamaño entre los poros pequeños y los grandes, a medida que la relación de tamaños “R” es mayor, la dimensión fractal será mayor como se muestra en la Fig. 29.

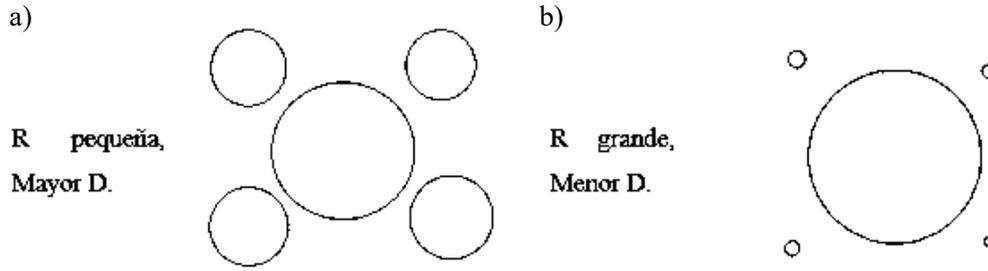


Figura 29. Dimensión fractal en la relación de tamaño entre poros. [4]

Por último, en el caso de la relación de cantidades entre poros grandes y pequeños, a medida que la diferencia de cantidades entre ambos tamaños “C” sea mayor, la dimensión fractal será mayor como se muestra en la Fig. 30.

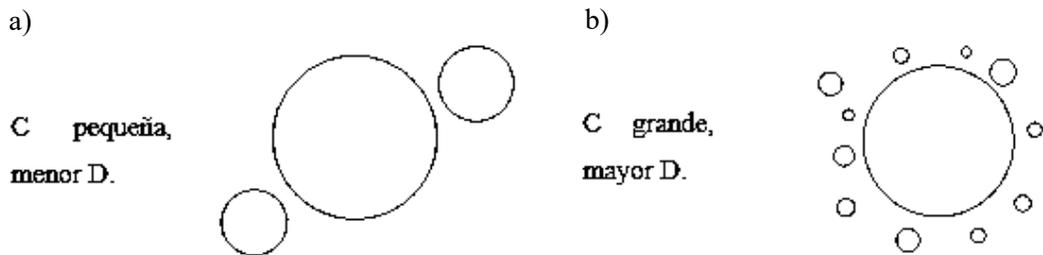


Figura 30. Dimensión fractal en la relación de tamaño entre poros. [4]

1.7.4. Método de Box Counting.

Observando la gran influencia de la dimensión fractal sobre las propiedades de las espumas, la medición de la misma es de suma importancia, aunque existen varios métodos para medirla, el método de *Box Counting* se considera como el más práctico, este se basa en el uso de una malla (cuadrícula) la cual se traza sobre una figura de la cual se quiere obtener su dimensión fractal, dicha cuadrícula está formada por pequeños cuadrados de tamaño “r” (ver Fig. 31.A), después se realiza el conteo de los cuadrados que contienen una parte de la figura, el número de estos cuadrados se denota como N(r), este proceso se repite utilizando cuadrados de tamaño cada vez más pequeño de manera que la dimensión fractal puede expresarse como se muestra en la Ec. 10. [65]

$$d_{box} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log \left(\frac{1}{r}\right)} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde d_{box} es la dimensión fractal, dado que no es posible realizar el cálculo en la práctica es necesario realizar una aproximación, esto se hace realizando varias mediciones con mallas lo más estrechas posibles, y graficando en el eje de las ordenadas los valores de $\log N(r)$ y en el eje de las abscisas los de $\log(1/r)$ obtenidos para cada iteración, obteniendo un gráfico como el de la Fig. 31.B.

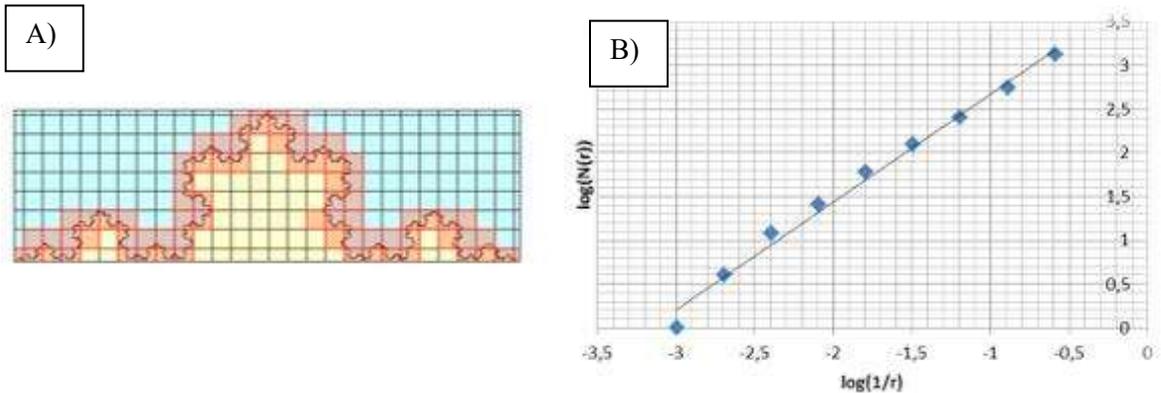


Figura 31. Uso del método de box counting para medición de dimensión fractal. A) Mallado sobre una curva de Koch en rojo aparecen los recuadros que contienen un fragmento de la curva. B) Ajuste lineal para un gráfico de iteraciones para el método box counting. Donde cada punto representa un conteo con una malla de diferente tamaño. [66], [67]

Como se puede observar a medida que se realizan más conteos con mallas cada vez más pequeñas la curva exhibe un comportamiento lineal de tal manera que la dimensión fractal puede calcularse de manera aproximada como la pendiente de la curva, por lo general este cálculo se ayuda de software especializado en el análisis de imágenes para poder obtener resultados precisos.

1.8. Diseño de experimentos.

En el desarrollo de proyectos e investigaciones científicas, la experimentación juega un papel clave, pues a través de ella es posible verificar hipótesis o principios científicos. Los resultados de un experimento dependerán de diversas variables, las cuales se clasifican en dos tipos principales, las de entrada también llamados factores y las de salida denominadas como respuesta. No todos los factores que tienen influencia sobre un experimento tienen el mismo peso, es decir, que algunas afectan en mayor medida que otras.

El diseño de experimentos es una metodología que ayuda a investigar los efectos de las variables de entrada sobre una variable de salida al mismo tiempo. Esto se lleva cabo mediante una serie de pruebas, en las cuales se realizan cambios intencionales en las variables de entrada y posteriormente se recolectan datos sobre el efecto de dichos cambios sobre la variable de salida, permitiendo saber qué factores influyen y cuantificar dicha influencia. [68]

STATGRAPHICS Centurion es una herramienta de análisis de datos que combina una amplia gama de procedimientos analíticos con extraordinarios gráficos para proporcionar un entorno integrado de análisis que puede ser aplicado en cada una de las fases de un proyecto. El software cuenta con una extensión llamada DDE (diseño de experimentos) en el cual se puede determinar que variable de un proceso tiene mayor impacto en el producto final. [5]

1.9. Método de elementos discretos.

El método de elementos discretos o DEM por sus siglas en inglés (Discrete Element Method) es un conjunto de métodos numéricos utilizados para simular y analizar el comportamiento de sistemas conformados por partículas independientes, por ejemplo, moléculas o granos de arena. Se considera un método intuitivo en el cual las partículas individuales del sistema colisionan entre sí y con otras superficies durante una simulación dinámica. [69], [70]

DEM se basa en las ecuaciones de movimiento rotacional (Ec. 11) y traslacional (Ec. 12) de las partículas y considera también las fuerzas de amortiguamiento para evitar vibraciones de las partículas sin contacto para así disipar la energía cinética. [71]

$$m\ddot{u}_i = F_i \quad (\text{Ec. 11})$$

$$I_i\dot{\omega}_i = T_i \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

- u =desplazamiento del centro del elemento.
- \ddot{u} =aceleración del centro del elemento.
- ω =velocidad angular
- $\dot{\omega}$ = aceleración angular,
- m =masa del elemento

- I =momento de inercia
- F y T =sumatoria de fuerzas y momentos aplicados al elemento.

Además del movimiento de las partículas individuales la interacción entre ellas también es importante para el DEM, dichas interacciones están dadas por el contacto entre las partículas individuales del sistema, distinguiéndose dos tipos principales de contacto entre ellas en el primero existe contacto entre las partículas pero al ser rígidas estas no presenta deformación como se observa en la Fig. 32.A Por otro lado está el contacto entre partículas deformables las cuales al entrar en contacto se ven afectadas en sus dimensiones reduciendo la distancia entre sus centros como se muestra en la Fig. 32.B, en el caso de este tipo de interacción el DEM utiliza aproximaciones como el que se observa en la Fig. 32.C permitiendo la penetración entre las partículas de tal manera que pueda simularse el comportamiento generado por la deformación.

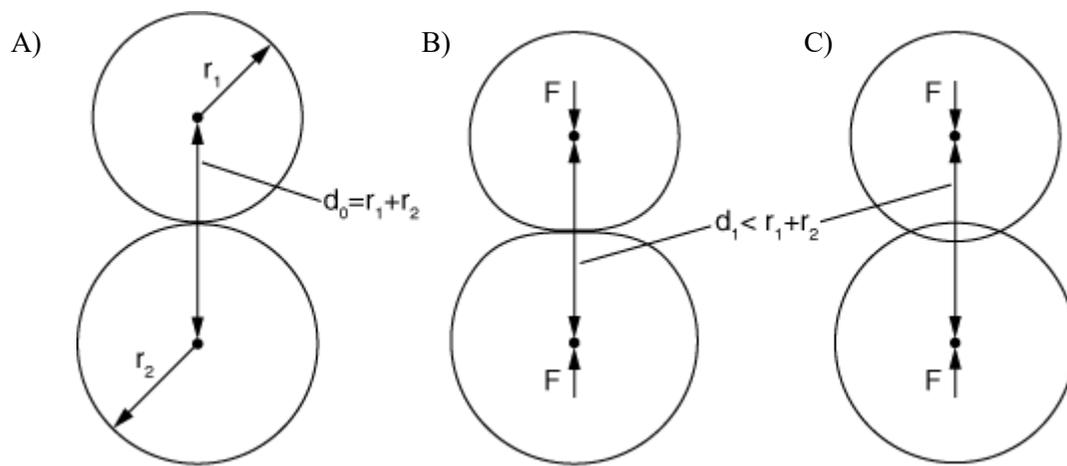


Figura 32. Tipos de contacto entre partículas de un sistema. A) Contacto de partículas rígidas sin deformación, B) Contacto de partículas deformables. C) Aproximación mediante DEM. [70]

Ya que en el método de fabricación de espumas metálicas por infiltración la porosidad depende en gran medida de la distribución de las partículas espaciadoras, el DEM constituye una excelente opción para simular las condiciones de mezclado de estas y las interacciones entre ellas.

1.10. Método de elementos finitos.

Gran cantidad de fenómenos de todo tipo pueden describirse o modelarse mediante el uso de ecuaciones diferenciales, sin embargo, a medida que la complejidad de un problema incrementa se vuelve cada más complicado utilizar un método analítico clásico para su resolución y encontrar soluciones exactas a un problema representa una mayor dificultad. Debido a lo anterior los métodos de soluciones aproximadas son de gran utilidad en la solución de estos problemas.

Dentro de los métodos numéricos el método de elementos finitos destaca en aplicaciones de tipo estructural por ser bastante eficaz al momento de modelar formas y geometrías complejas, y aunque requiere del apoyo de software especializado, hoy en día hay una gran cantidad disponible.

El método de elemento finito es una técnica numérica que soluciona de manera exacta o aproximada un sistema de ecuaciones que modela algún problema determinado, este método requiere que el problema se encuentre definido en un espacio geométrico o dominio que sirva de base para poder dividir dicho problema en un número finito de partes o elementos pequeños, únicos y que pueden ser o no ortogonales, esto recibe el nombre de discretización. El conjunto de estas pequeñas divisiones formará una red o malla, un ejemplo se observa en la Fig. 33. [72]

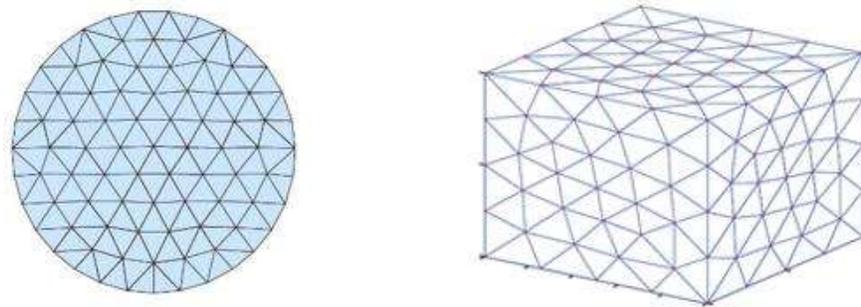


Figura 33. Discretización de figuras geométricas simples. [73], [74]

Dado que el problema es discretizado en elementos, la solución aproximada o exacta del mismo será la suma de todas las partes, por tal motivo la unión entre estas es de gran importancia, es aquí donde entra el concepto de nodos o nudos, estos son puntos que se encargan de delimitar los elementos que conforman un dominio y de conectarlos entre sí. Los elementos de un dominio estarán sometidos a condiciones de contorno que son las variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema, por ejemplo, cargas, desplazamientos, temperaturas, etc. por otro lado tenemos las incógnitas que son las variables que se desea conocer en el sistema. [75]

Dependiendo del tipo de problema el dominio puede discretizarse utilizando diferentes tipos de elementos, dependiendo de la forma que más se ajusta al dominio que quiere modelarse, se utilizan elementos de tipo 1D, 2D o 3D como se muestran en la Fig. 34, por ejemplo, una viga puede modelarse utilizando elementos 1D, mientras que una superficie requerirá elementos 2D y un volumen elementos 3D.

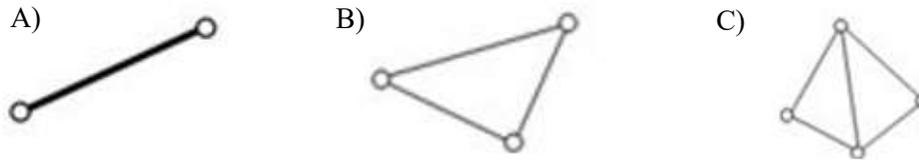


Figura 34. Tipos de elemento finito por su dimensión. A) 1D, B) 2D, C) 3D. [76]

En un mismo elemento finito se pueden aplicar diferentes configuraciones de nodos, para modelar geometrías más complejas, a medida que se incrementa el número de nodos que definen un elemento las funciones que definen el problema son de orden mayor como se muestra en la Fig. 35.



Figura 35. Diferentes configuraciones de nodos para un elemento lineal. [77]

El método de elementos finitos es de gran importancia en el análisis mecánico y de estructuras para analizar la deformación de una pieza o elemento bajo una serie de condiciones de contorno aplicadas, en este caso suelen ser las fuerzas externas y restricciones de movimiento. Las incógnitas del problema están representadas por el desplazamiento de los nodos y en base a ellos podemos calcular las incógnitas de interés como, las tensiones, deformaciones, etc. A través de las funciones de aproximación es posible relacionar los desplazamientos de cada punto del elemento finito con el desplazamiento de los nodos, simplificando así las ecuaciones diferenciales del problema y convirtiéndolas en ecuaciones lineales finitas que pueden solucionarse mediante métodos algebraicos para cada uno de los elementos del dominio, la suma de las ecuaciones lineales de todos los elementos finitos da lugar a un sistema de ecuaciones para todo el dominio de tal manera que es posible obtener

una solución aproximada para el desplazamiento de cada nodo del problema y, por extensión de cualquier punto, empleando las funciones de aproximación. [75]–[77]

Dada la complejidad de la estructura de las espumas metálicas, el método de elementos finitos es ideal para determinar y modelar las propiedades mecánicas de las espumas metálicas, utilizando software de diseño asistido por computadora para generar espumas con diferentes densidades y distribuciones de poros, las cuales son posteriormente sometidas al análisis de elementos finitos, generalmente el análisis se centra en pequeños volúmenes o celdas unitarias representativos de la espuma metálica, la Fig. 36 muestra un ejemplo de la definición y mallado de una celda unitaria en un estudio realizado por Sathurusinghe y col. [1] para estimar las propiedades elásticas de espumas aluminio. Existen algunos trabajos sobre el uso combinado de DEM-FEM, donde primeramente mediante DEM se generan las coordenadas de las esferas que se ubican en los sitios correspondientes a los poros, para acto seguido generar la geometría total porosa utilizando FEM.

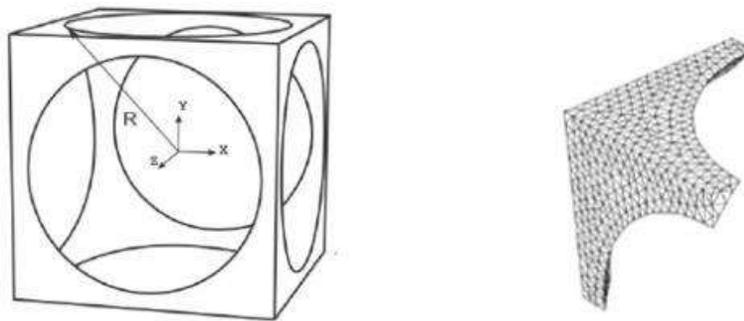


Figura 36. Aplicación del FEM al análisis de espumas metálicas. A) celda unitaria propuesta. B) Mallado de la celda unitaria. [1]

1.10.1. Etapas para la solución de problemas.

Existen ciertas etapas en el método de elementos finitos que se utilizan indistintamente en la solución de problemas, la etapa de preproceso, etapa de cálculo y la etapa de postproceso, cada una de las cuales a su vez se subdivide en pasos.

Etapa de preproceso:

- Dibujo del modelo.
- Selección del tipo de elementos a emplear.

- Selección de los materiales a emplear.
- Asignación de elemento y propiedades de materiales a los diferentes componentes del modelo.
- Mallado de los componentes.
- Aplicación de las cargas exteriores.
- Aplicación de las condiciones de contorno.

Etapa de cálculo:

- Selección del tipo de cálculo a realizar.
- Configuración de los parámetros de cálculo.
- Inicio del cálculo.

Por último, en la etapa de postproceso en esta etapa se representa la solución del problema. [78]

1.10.2. Software de simulación ANSYS.

ANSYS es un paquete de software desarrollado por la compañía homónima con más de 40 años de experiencia en el ramo, se define como un software que ayuda a encontrar soluciones a problemas de ingeniería a través de la teoría de los elementos finitos para estructuras y de los volúmenes finitos para fluidos.

Se utiliza para cálculos estáticos y resuelve problemas lineales y no lineales para estructuras, transferencia de calor, dinámica de fluidos, problemas acústicos y electromagnéticos. [79]

Dentro de las principales tareas del programa se encuentran:

- Construir o importar modelos de estructuras, productos, componentes o sistemas.
- Aplicar cargas al elemento creado.
- Estudiar las respuestas físicas, tales como niveles de esfuerzo, distribuciones de temperatura o campos electromagnéticos.
- Optimizar diseños existentes.
- Realizar pruebas virtuales sobre componentes en etapa de diseño. [4]

II. Metodología Experimental.

2.1. Elaboración de modelos físicos.

Este trabajo se enfoca principalmente en analizar el efecto de la distribución de las partículas espaciadoras sobre la porosidad de las espumas de aluminio. En este caso particular la distribución se estudió utilizando mezclas bimodales (con dos tamaños de partícula diferentes) utilizando tres parámetros de control para describir la distribución de las partículas:

- Relación de tamaños “R”: representa el número de veces que el diámetro de la partícula gruesa “D” es mayor que el diámetro de la partícula fina “d” en la mezcla de ambos tamaños y se define como $R=D/d$.
- Relación de cantidades “C”: representa el número de partículas finas por cada partícula gruesa dentro de la mezcla y que a su vez corresponde a una fracción de partículas finas “F”, se define como $C= (\# \text{ de partículas finas}/\# \text{ de partículas gruesas})$.
- Fracción de finas “F”: representa la fracción volumétrica que ocupan las partículas finas dentro de la mezcla.

Se elaboraron modelos físicos para simular el empaquetamiento de las partículas espaciadoras en una espuma metálica real, de tal manera que fuese observable el efecto de utilizar mezclas bimodales, variando la cantidad de partículas finas por cada partícula gruesa.

Lo anterior se realizó utilizando dos recipientes diferentes de volumen conocido (dependiendo de los tamaños de partícula a utilizar) los cuales se llenaron utilizando esferas de dos tamaños de partícula diferentes, una gruesa de diámetro mayor “D” y una fina de diámetro menor “d”.

Cada modelo físico corresponde a una combinación R-C, es decir una relación de tamaño y una relación de cantidad, dado que cada relación “C” representa una fracción “F” específica dicha combinación puede expresarse a su vez como una combinación R-F, es decir una relación de tamaños y una fracción de partículas finas. Ya que es más práctico controlar el número partículas que la fracción volumétrica de las mismas en una mezcla, los modelos inicialmente se definen como una combinación R-C y posteriormente se calcula fracción volumétrica “F” correspondiente obteniendo la combinación R-F correspondiente.

Para la elaboración de los modelos físicos se utilizaron esferas de unicel, acrílico y ABS, cuyas características se describen en la Tabla 7. En cada modelo el llenado del recipiente se realizó colocando capas intercaladas de partículas gruesas y finas permitiendo acomodo aleatorio (Fig. 37), llenando la mayor cantidad posible de volumen del recipiente, siempre respetando R-C correspondiente para cada modelo, las relaciones de tamaños R utilizadas fueron $R = 2, 3$ y 4 ; mientras que en el caso de las relaciones de cantidad “C” se incrementó paulatinamente el número de partículas finas por cada grande de manera que se pueda encontrar el valor máximo de empaquetamiento.

Tabla 7. Esferas utilizadas para la modelación física.

No de esfera	Material	Diámetro (mm)	Volumen
1	Acrílico	1	0.29
2	Poliestireno	2	2.36
3	Poliestireno	3	7.95
4	PVC	0.5	0.04

Una vez concluido el llenado de las partículas, se utilizó arena fina de tal manera que esta ocupara el volumen restante del recipiente (Fig. 38).

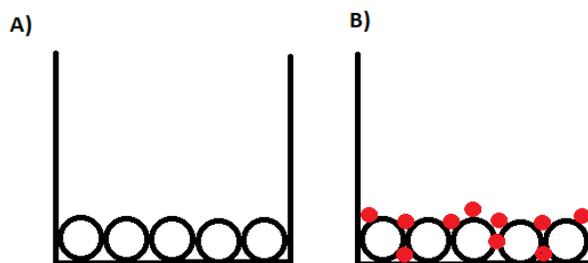


Figura 37. Secuencia de llenado del recipiente A) Capa de partículas gruesas, B) Capa de partículas finas.



Figura 38. Llenado del volumen sin ocupar.

Posteriormente se realizó la medición de la fracción de volumen ocupada por las esferas y la arena para determinar el empaquetamiento utilizando la Ec. 13, el empaquetamiento a su vez representa la porosidad en una espuma real.

$$\text{Empaquetamiento} = \frac{\text{Volumen de partículas}}{\text{Volumen de partículas} + \text{Volumen de arena}} \times 100 \quad (\text{Ec. 13})$$

Los resultados obtenidos de los modelos físicos se analizaron utilizando el software de análisis de datos Statgraphics Centurion XIV, con el objetivo de observar el efecto de las variables involucradas sobre el empaquetamiento pudiendo determinar qué variables influyen y en qué medida. Para dicho análisis se diseñó un experimento de tipo factorial multinivel utilizando “R” y “F” como variables experimentales, y el empaquetamiento como variable de respuesta. Se utilizaron las 3 relaciones de tamaño propuestas inicialmente y para cada una de ellas 5 fracciones de partículas finas: 0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4; así como los resultados experimentales para el empaquetamiento correspondientes a cada combinación R-F, la Tabla 8 muestra los datos ingresados a la interfaz de datos del software.

Tabla 8. Datos para análisis multinivel.

Relación de Tamaño	Fracción de partículas finas	Empaquetamiento
Numérico	Numérico	Numérico
2.0	0.1	61.10
3.0	0.0	60.26
2.0	0.3	62.91
2.0	0.2	62.05
3.0	0.4	62.41
4.0	0.0	60.32
4.0	0.1	68.54
4.0	0.3	64.97
4.0	0.2	67.57
2.0	0.4	60.8
3.0	0.1	61.50
2.0	0.0	60.32
3.0	0.2	65.31
4.0	0.4	64.08
3.0	0.3	63.29

2.1.1. Modelo matemático para la determinación del empaquetamiento de partículas espaciadoras.

En el presente trabajo también se utilizaron diferentes modelos para comparar los resultados obtenidos, en el caso de los modelos físicos descritos en la Sección 2.1 se utilizó un modelo

matemático desarrollado en el trabajo de investigación citado en la Ref. [5] en el cual se determina el empaquetamiento para mezclas de partículas binarias en base al modelo matemático de Larrard utilizado en mezclas de concreto (Ec. 14) y al modelo matemático de Chang y Meidani, el cual utiliza una serie de ecuaciones (Ec. 15 a Ec. 18) para determinar el empaquetamiento de la mezcla de partículas

$$\gamma = \frac{\beta_i}{1 - \left(1 - \beta_i + w(r)\beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right)y_j - \left(1 - \frac{l(r)\beta_i}{\beta_j}\right)y_j} \quad (\text{Ec. 14})$$

- Donde: γ_i = densidad de empaquetamiento de la mezcla, β_i = densidad de empaquetamiento del componente i, β_j = densidad de empaquetamiento del componente j, $l(r)$ = efecto de separación por inserción, $w(r)$ = efecto de pared, y_i = fracción de volumen sólido ocupado por el componente i, y_j = fracción de volumen sólido ocupado por el componente j, r = razón de tamaño de partículas.

$$\hat{e}_1 = e_1 - [(1 + e_1)y_2 - l(r)(1 + e_2)y_2] \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\hat{e}_2 = e_2 - [e_2y_1 - w(r)e_2y_1] \quad (\text{Ec. 16})$$

$$e = \text{Max} (\hat{e}_1 \hat{e}_2) \quad (\text{Ec. 17})$$

$$e = \frac{1}{\gamma} - 1 \quad (\text{Ec. 18})$$

- Donde: \hat{e}_1 y \hat{e}_2 = relaciones de vacío; e_1 y e_2 = mínima relación de vacíos; $l(r)$ = efecto de separación por inserción; $w(r)$ = efecto de pared, e = valor máximo de las relaciones de vacío; y_1 = fracción de partículas gruesas; y_2 = fracción de partículas finas; γ = densidad de empaquetamiento de la mezcla.

2.2. Modelo computacional.

Se realizó un modelo computacional para la predicción de la porosidad y el módulo de Young de las espumas de aluminio siguiendo el método combinado DEM-FEM propuesto en la Ref. [71]. Ya que las espumas metálicas pueden considerarse un arreglo de varias celdas unitarias de poros que se replican de manera uniforme a lo largo de toda la matriz metálica, el análisis de su estructura y propiedades puede realizarse utilizando elementos de volumen representativo (EVR), es decir, que puede analizarse solo una fracción del volumen total de la espuma siempre y cuando dicho elemento conserve las características y propiedades del material original. En el caso de la simulación por

elementos finitos el uso de EVR permite simplificar el problema, ya que a medida que el dominio o volumen que quiere simularse sea mayor, requerirá de una mayor capacidad de cómputo para poder encontrar una solución.

2.2.1. Modelado de Espumas.

En una primera etapa se realizó el modelado de las espumas realizando una simulación utilizando el software de elemento discreto LIGGGHTS, en dicha simulación, una cantidad de partículas esféricas correspondientes a cada una de las relaciones de tamaño y cantidad mostradas más adelante en la Tabla 9 colisionan dentro de un volumen de control generando posiciones aleatorias en distintos instantes de tiempo, obteniendo las coordenadas de los centros de partícula como se puede observar en la Fig. 39.

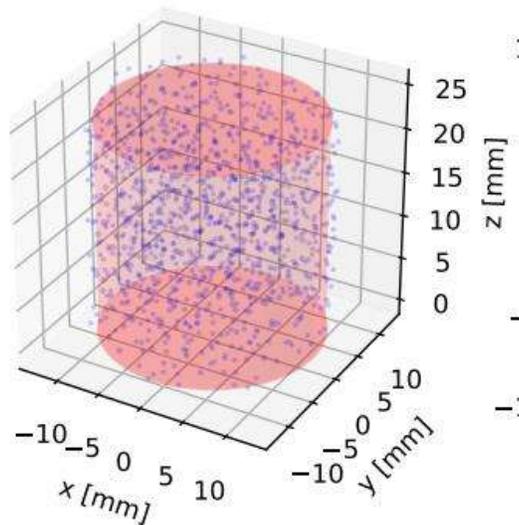


Figura 39. Posición de los centros de partículas generados durante la simulación DEM. [71]

Con la información de los centros de partícula se generó un código JavaScript que posteriormente se ejecutó en el asistente CAD (Computer Aided Design) DesignModeller del software ANSYS ver. 19.0, mediante dicho código se genera el sólido correspondiente al volumen de control y en

operaciones subsecuentes se extrae el volumen de material perteneciente a las partículas espaciadoras como se observa en la Fig. 40

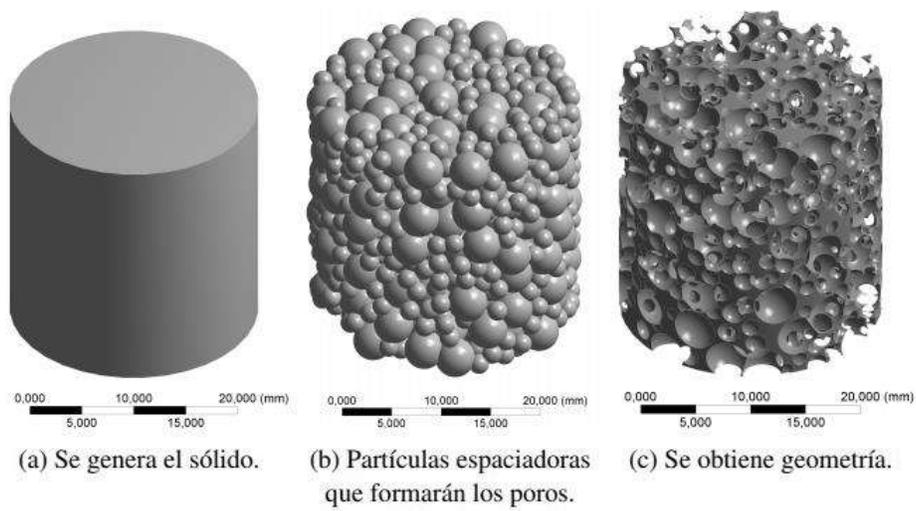


Figura 40. Proceso de modelado CAD de las espumas de aluminio. [71]

Tabla 9. Relaciones de cantidad y tamaño para los modelos CAD.

	R	C	F
Modelo 1	2	1	0.11110
Modelo 2	2	2	0.20000
Modelo 3	2	4	0.33000
Modelo 4	2	6	0.42000
Modelo 5	4	2	0.03030
Modelo 6	4	4	0.05880
Modelo 7	4	6	0.08570
Modelo 8	4	8	0.1100
Modelo 9	4	10	0.1400
Modelo 10	4	12	0.1500

2.2.2. Simulación computacional.

Una vez creada la geometría, se realizó la simulación computacional utilizando el asistente de simulación *Mechanical* del programa ANSYS Ver. 19.0, un ejemplo de las geometrías obtenidas se observa en la Fig. 41.

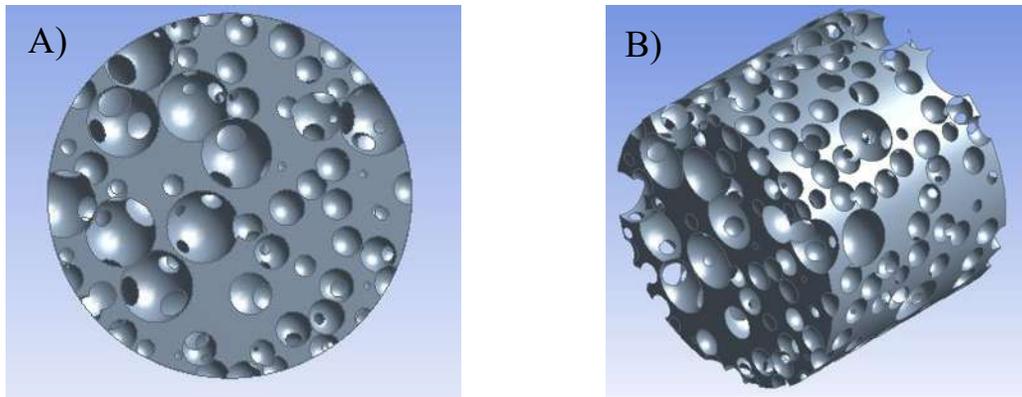


Figura 41. Ejemplo de Modelo CAD espuma metálica. A) Vista superior. B) Vista isométrica

2.2.2.1. Mallado del modelo CAD.

El mallado de las geometrías se realizó utilizando los parámetros que se muestran en la Tabla 10, utilizando el elemento utilizado para el mallado fue el SOLID187, cuya geometría se muestra en la Fig. 42. Es un elemento de tipo tridimensional, está definido por un total de 10 nodos, cada uno con tres grados de libertad y se caracteriza por poseer plasticidad, hiperelasticidad, creep, endurecimiento por deformación, gran deflexión y capacidad de deformación. Debido a que tiene un desplazamiento de tipo cuadrático se considera un elemento que se adapta bien a geometrías complejas. [80]

Tabla 10. Parámetros de mallado.

Parámetro	Valor o selección
Relevancia	2
Centro de relevancia	Fino
Suavizado	Alto
Transición	Lenta
Centro del ángulo de expansión	Medio

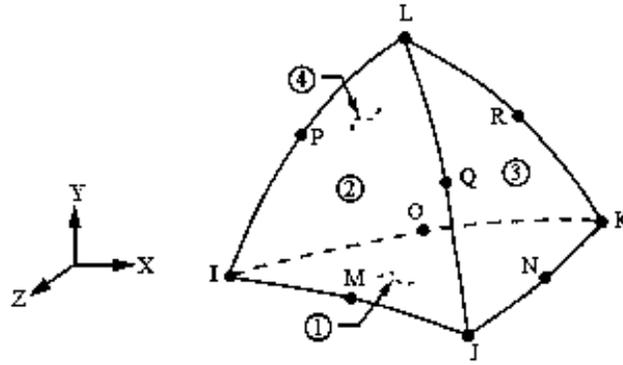


Figura 42. Geometría del elemento SOLID 187.

2.2.2.2. Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera se configuraron para simular un ensayo de compresión uniaxial, colocando una presión en la cara superior de la espuma en dirección z (Fig. 43.A), simulando así la deformación longitudinal durante un ensayo de compresión. Para determinar el valor de la presión a aplicar se tomó como base una carga de 10KPa, sin embargo, ya que esta carga no se aplica sobre el área total de la cara de la espuma sino solamente sobre el área ocupada por la fase metálica, es necesario determinar el valor equivalente de presión correspondiente a esta área. Es decir que, si la carga base de 10KPa se considera para el área circular total de la cara de la espuma, solo la fracción proporcional al área de la fase metálica se aplica sobre ella, a esta fracción proporcional se le denominó como “Presión efectiva” y se calculó mediante la Ec. 19.

$$Presión\ efectiva = \frac{10\ KPa * \text{Área de la Fase Metálica}}{\text{Área circular total de la cara}} \quad (Ec. 19)$$

Adicionalmente en la cara contraria se colocó una restricción de movimiento utilizando un soporte fijo (Fig. 43.B) y se utilizó un desplazamiento remoto sobre la cara donde se aplica la presión de modo que todos los componentes de esta se desplacen de manera simultánea en el eje z. Se utilizaron las condiciones elástica y lineal para los materiales.

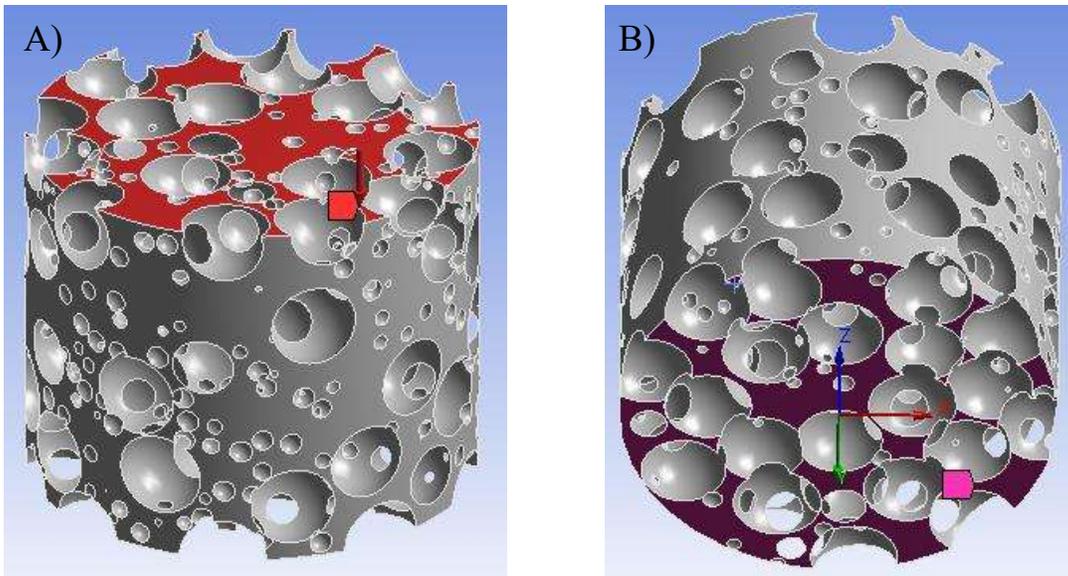


Figura 43. Configuración de carga y soportes para análisis estructural. A) Carga aplicada, B) Soporte Fijo.

A)

Definition	
Type	Pressure
Define By	Normal To
Magnitude	1.e-002 MPa (ramped)
Suppressed	No

B)

Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

Figura 44. Detalles de las condiciones de frontera. A) Presión aplicada. B) Soporte Fijo.

2.2.2.3. Solución.

Del análisis configurado previamente con las condiciones de frontera ya mencionadas se pretende obtener el desplazamiento máximo sobre el eje z, para ello se configuró una solución en el software ANSYS para obtener dicho desplazamiento como se muestra en la Fig. 45.

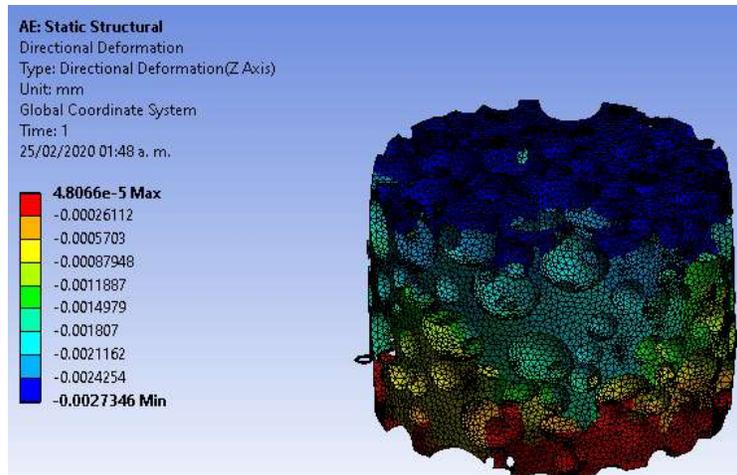


Figura 45. Desplazamiento máximo obtenido en el eje z para un modelo computacional.

2.2.2.4. Cálculo del módulo de Young.

Con las fuerzas de reacción obtenidas de las simulaciones computacionales fue posible calcular el módulo de Young utilizando la Ec. 20

$$E = Pz \left(\frac{L_0}{D_{m\acute{a}x}} \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

- E: Módulo de Young.
- Pz: Presión aplicada sobre la cara superior de la espuma.
- L₀: Longitud inicial del modelo.
- D_{máx}: Desplazamiento máximo en el eje z

2.2.3. Modelos matemáticos para la determinación del Módulo de Young de espumas.

Se seleccionaron tres modelos matemáticos para determinar el módulo de Young de una espuma metálica en base la densidad relativa de la misma y el módulo de Young metal base con el fin de usarlos como valores de referencia y compararlos con los resultados experimentales de las simulaciones computacionales y los ensayos mecánicos reales. Los modelos seleccionados se muestran en las Ecuaciones 21 a 23 y son: Modelo de Zhu (Ec. 21), Modelo de Warren y Kraynik (Ec. 22) y Modelo de Gan (Ec. 23).

$$E = \frac{1.009E_s\rho^2}{1 + 1.514\rho^2} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$E = \frac{E_s\rho^2(11 + 4\rho)}{10 + 31\rho + 4\rho^2} \quad (\text{Ec. 22})$$

$$E = \frac{E_s\rho^2}{1 + 6\rho} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde: E es el módulo de Young de la espuma; E_s es el módulo de Young del metal base; ρ es la densidad relativa

2.3. Fabricación de espumas metálicas.

2.3.1. Partículas espaciadoras.

Para validar los modelos se fabricaron espumas metálicas reales, utilizando granos de cloruro de sodio (NaCl) como partícula espaciadora, debido a que su temperatura de fusión (801°C) es mayor que la del aluminio (660°C), además de que una vez concluido el proceso de fabricación pueden eliminarse fácilmente disolviéndose en agua. Mediante un proceso de tamizado se obtuvieron granulometrías de 1, 2 y 4 mm de tal manera que se puedan obtener relaciones de tamaño aproximadas a 2 y 4.

Tabla 11. Relación de espumas metálicas fabricadas.

Código De Espuma	Relación de tamaño	Relación de cantidad
E-1	2	1:6
E-2	4	1:2
E-3	4	1:4
E-4	4	1:6
E-5	4	1:8
E-6	4	1:10
E-7	4	1:12

Cabe mencionar que en el caso de las espumas con relación de tamaño $R=2$ solo se consideró la relación de cantidades 1:6 debido a que los casos para relación de cantidad 1:2 y 1:4 ya se estudiaron previamente en este grupo de trabajo y se tomaran en cuenta los resultados obtenidos.

2.3.2. Aleación Base.

La aleación de aluminio 332, que tiene como principal elemento aleante al silicio en el rango del 8.5 al 10.5%, se caracteriza por tener una alta fluidez, resistencia a altas temperaturas, buena conductividad térmica, resistencia al desgaste, además de ser una aleación altamente soldable. La alta fluidez la vuelve ideal para fabricación de piezas por fundición y en este caso específico para la fabricación de espumas por infiltración pues gracias a ello se logra un mejor llenado de la preforma de NaCl, el uso más común de esta aleación es la fabricación de pistones para motores automotrices, sin embargo, su rango de aplicaciones es bastante amplio desde cancelería y equipo deportivo hasta electrodos para soldadura. Para el desarrollo de este trabajo la aleación en cuestión se obtuvo mediante el reciclaje de cabezas de motores automotrices, la Tabla 12 muestra la composición química real de la aleación obtenida mediante un análisis EDS en investigaciones previas dentro del grupo de trabajo.

Tabla 12. Composición química aleación utilizada 332 (en % en peso). [4]

Elemento	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	Total
%Peso	0.01	83.37	10.21	0.13	0.1	0.95	1.15	0.01	3.25	0.81	0.01	100
%Atómico	0.01	86.8	10.21	0.08	0.06	0.48	0.58	0.01	1.43	0.35	0	100

2.3.3. Equipo de fabricación.

El equipo de fabricación para el proceso de infiltración utilizado se compone de una cámara de infiltración de forma cilíndrica fabricada de acero inoxidable 316-L dentro de la cual se colocan las partículas espaciadoras y la aleación a utilizar para llevar a cabo el proceso de fusión e infiltración, adicionalmente el dispositivo utiliza una boquilla de inyección de gas la cual se utiliza para crear presión sobre el baño metálico de tal manera que este pueda infiltrarse entre los huecos de las partículas espaciadoras. Este dispositivo está en solicitud de patente, con número MX/a/2017/010803. La Fig. 46 muestra una imagen del equipo y sus partes, así como el horno de resistencias marca PREFINSA utilizado durante el proceso de fusión e infiltración.

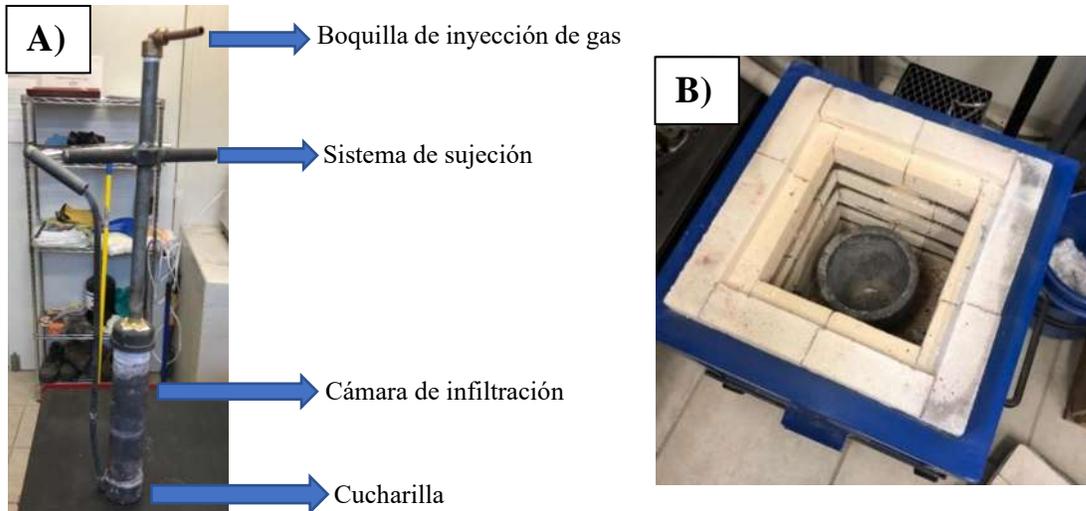


Figura 46. Dispositivo de infiltración. A) Partes del dispositivo. B) Horno de fusión.

2.3.4. Fusión e infiltración.

Para esta etapa se realizó el llenado de la cámara de infiltración con las partículas espaciadoras siguiendo el mismo procedimiento de llenado que en los modelos físicos, alternando capas de partículas finas y gruesas, posteriormente sobre las partículas espaciadoras se colocaron cilindros de la aleación 332 y se inició la etapa de fusión llevando el horno a una temperatura de 700°C y manteniéndola hasta observar que la infiltración se completaba. Se fabricaron dos espumas cilíndricas de 10 cm de altura por 5 de diámetro para cada una de las combinaciones de “R” y “C” mostradas en la Tabla 11. Para completar la infiltración se utilizó gas argón, inyectándolo de manera gradual iniciando con un flujo inicial de 10 ft³/h haciendo incrementos graduales de 10 ft³/h hasta alcanzar 50 ft³/h con un tiempo de permanencia de 45 segundos para cada incremento (Ver Fig. 47). Una vez concluida la infiltración la espuma fue sometida a un proceso de enfriamiento al aire hasta completar la solidificación de la aleación. Para finalizar el proceso se realizó la disolución de las partículas espaciadoras sumergiendo la espuma en un recipiente con agua por un tiempo de 5 horas.

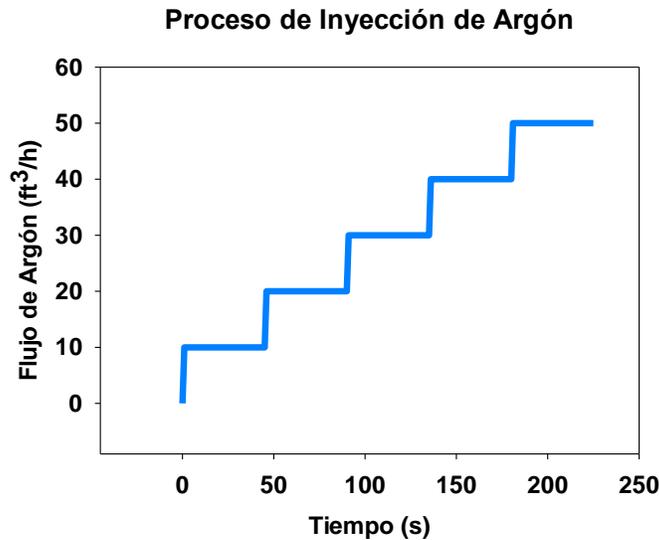


Figura 47. Proceso de inyección de argón durante el proceso de infiltración

2.4. Caracterización estructural.

La caracterización estructural consistió en la observación y análisis de la estructura de las espumas metálicas obtenidas usando técnicas de microscopía óptica (MO) y estereoscopia, en el caso de MO se utilizó un equipo Labomed modelo Med 400, en el caso de estereoscopia se utilizó un equipo MOTIC SMZ-168-BP. Además de los análisis microscópicos también se realizaron mediciones de densidad, porosidad y espesor de pared que se describen a detalle a continuación.

2.4.1. Medición de densidad y porosidad.

La densidad se calculó en base a la definición clásica que se muestra en la ecuación 6.3 cortando muestras de 5.3 cm de diámetro y una altura aproximada de 3 cm, posteriormente se obtuvo el volumen y finalmente se realizó el pesado de la muestra para obtener su masa y poder realizar el cálculo con la Ec. 24.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

- ρ : Densidad.
- m : Masa.
- v : Volumen.

En cuanto al porcentaje de porosidad se obtuvo utilizando la densidad de la espuma metálica en cuestión y la densidad de aleación de aluminio, siguiendo la Ec. 25 propuesta por Wang y col. [81], utilizándola primero en espumas de densidad y porosidad conocidas fabricadas en trabajos previos para corroborar y posteriormente utilizando los datos obtenidos de las espumas reales:

$$\%Porosidad = \frac{Densidad\ del\ aluminio - Densidad\ de\ la\ espuma}{Densidad\ del\ aluminio} \times 100 \quad (Ec. 25)$$

2.4.2. Medición del espesor de pared.

La medición del espesor de pared se realizó para las espumas reales y para los modelos elaborados con diseño asistido por computadora (CAD), utilizando el software de análisis de imágenes ImageJ y el asistente CAD Design Modeller de la paquetería de software ANSYS respectivamente, esto debido a que para las espumas reales fue necesaria la captura de imágenes, mientras que en el caso de los modelos CAD la medición puede realizarse directamente en el software. Para ello se trazaron líneas diametrales sobre las caras de las espumas metálicas y se midieron los segmentos correspondientes a cada una de las paredes que atraviesan cada una de las líneas diametrales y posteriormente obtener un valor promedio de espesor de pared, en cada una de las caras de las espumas se trazaron diez líneas de manera aleatoria, la Fig. 48 muestra un ejemplo de la medición del espesor de pared.

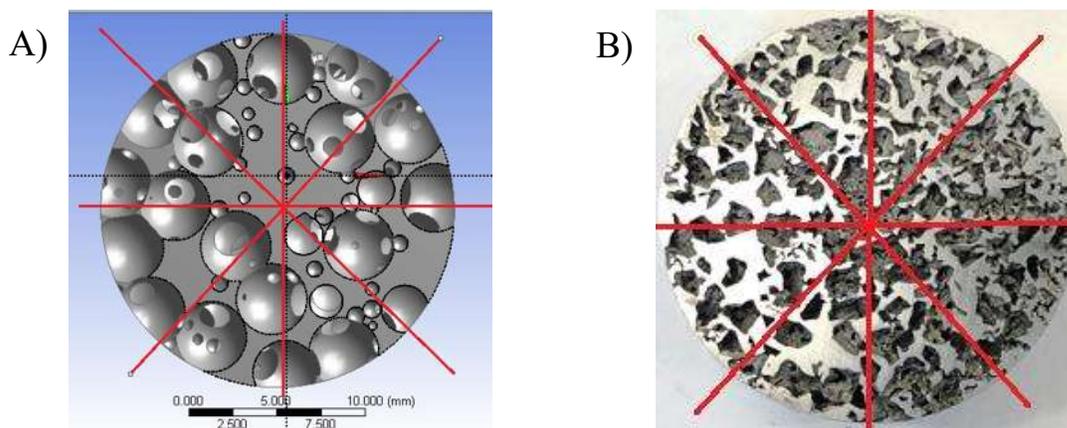


Figura 48. Medición del espesor de pared. A) Modelo computacional. B) Espuma real.

2.5. Caracterización mecánica.

La caracterización mecánica se realizó mediante ensayos de compresión isostática, las pruebas conducidas se realizaron de acuerdo con la norma ASTM E9-09 “Standard Test Methods of

Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature” utilizando una velocidad de deformación de 0.5 mm/min, las dimensiones de las probetas utilizadas se muestran en la Fig. 49, para conseguir dichas dimensiones las espumas obtenidas fueron sometidas a un proceso de maquinado. De los ensayos en cuestión se pretende obtener el módulo de Young y observar la variación de este en función de la porosidad y las relaciones de tamaños y cantidad.

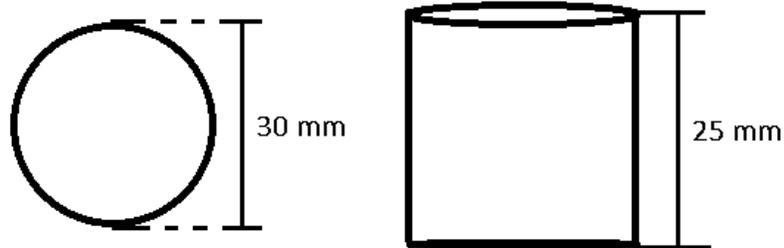


Figura 49. Esquema de las probetas para ensayo de compresión.

2.6. Medición de la dimensión fractal.

La dimensión fractal se midió mediante el análisis de imágenes de las espumas metálicas reales obtenidas, primeramente, se obtuvieron fotografías digitales de las caras de las espumas, posteriormente utilizando el software de acceso libre *ImageJ* Ver. 1.52a, se cargaron las imágenes correspondientes a las diferentes espumas fabricadas. Utilizando la interfaz del software es posible manipular el brillo y contraste de las espumas metálicas de tal manera la fase porosa sea distinguible de la matriz de aluminio, una vez alcanzadas las condiciones deseadas se utilizó la herramienta “Threshold”, la cual permite resaltar gráficamente la fase porosa mediante el uso de un sombreado (Ver Fig. 50.B), definiendo así la fracción porosa en la espuma y permitiendo al software enfocarse en esta para realizar la medición de la dimensión fractal. Con la fase porosa correctamente definida el software realiza una aproximación gráfica como se muestra en la Fig. 50.C y calcula de manera automática la dimensión fractal utilizando el método del conteo de cajas.

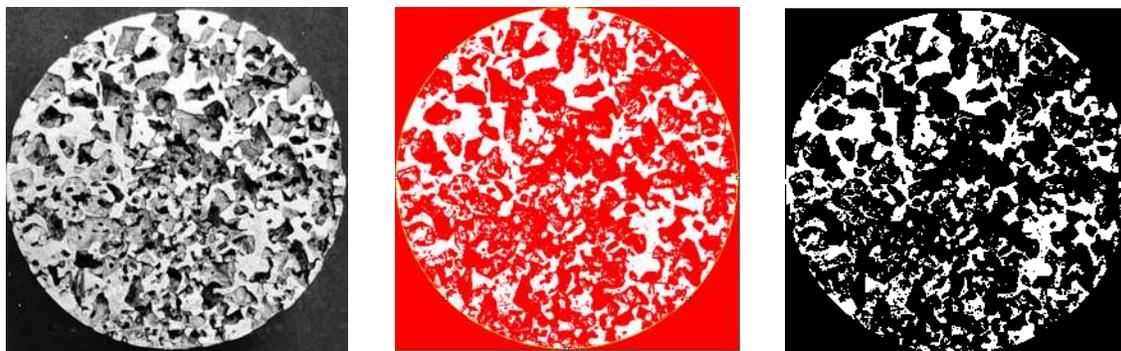


Figura 50. Proceso de medición de la dimensión fractal. A) Espuma real. B) Sombreado de la fase porosa. C) Aproximación gráfica generada por el software.

III. Análisis y discusión de resultados.

3.1. Modelación física del empaquetamiento de partículas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el empaquetamiento (en %) de partículas espaciadoras, que en una segunda etapa serán las encargadas de generar la porosidad. Por tal motivo estos resultados de empaquetamiento corresponderán a la porosidad resultante en las espumas. Los resultados de la modelación física se muestran en la Tabla 13, se observa el empaquetamiento obtenido para las diferentes relaciones de tamaño y cantidad, así como la fracción de partículas finas correspondiente.

Tabla 13. Resultados de la modelación física.

R=2			R=3			R=4		
C	F	Empaquetamiento	C	F	Empaquetamiento	C	F	Empaquetamiento
0	0	60.32	0	0	60.26	0	0	60.32
1:1	0.11	61.1	1:2	0.07	61.05	1:2	0.03	62.16
1:2	0.2	62.05	1:3	0.1	61.5	1:4	0.06	64.73
1:3	0.27	62.91	1:4	0.13	63.33	1:6	0.09	66.78
1:4	0.33	62.33	1:6	0.18	66.59	1:8	0.11	68.54
1:5	0.4	60.8	1:7	0.21	65.31	1:9	0.12	70.4
			1:12	0.31	63.29	1:10	0.14	68.59
			1:18	0.4	62.41	1:16	0.2	67.57
						1:27	0.3	64.97
						1:40	0.38	64.08

Se pudo observar una tendencia al incremento en el empaquetamiento máximo a medida que se incrementaba la relación de tamaños, también se observó que a medida que se incrementa la cantidad de partículas finas el empaquetamiento alcanza un valor máximo a una determinada relación de cantidades a partir de la cual inicia a disminuir. Lo anterior puede apreciarse en las Figuras 51 a 53, que muestran los gráficos individuales para cada una de las relaciones de tamaño R. Posteriormente se analizaron los gráficos en conjunto, como se observa en la Fig. 54 y pudo apreciarse que a medida que R es mayor, el valor máximo de empaquetamiento se encuentra en valores de F cada vez menores.

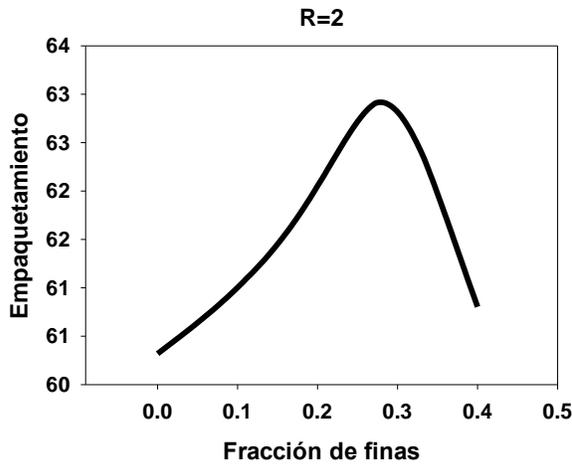


Figura 51. Resultados de modelación física R=2

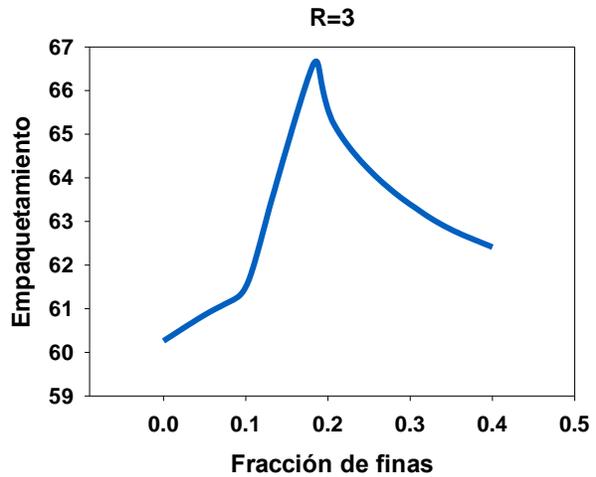


Figura 52. Resultados de modelación física R=3

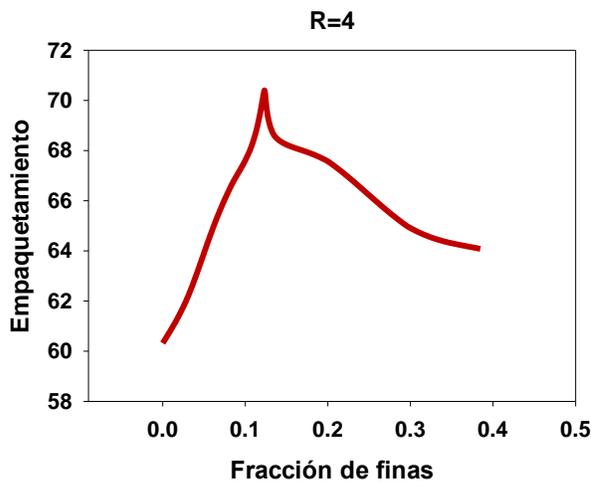


Figura 53. Resultados de modelación física R=4

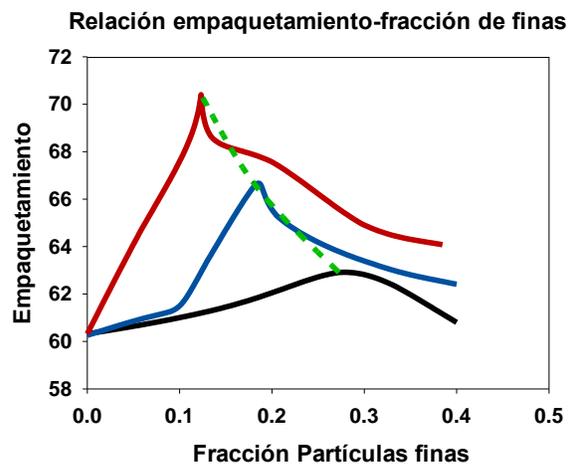


Figura 54. Dependencia empaquetamiento-fracción de finas

El comportamiento observado en la Fig. 54 es muy similar al reportado por Groot y Stoyanov citado en la Ref. [82], en el cual el empaquetamiento máximo exhibe igualmente un corrimiento con respecto al eje de las abscisas encontrándose cada vez a una fracción de partículas finas menor a medida que aumente R, como se muestra en la Fig. 55. Cabe mencionar que existe una pequeña diferencia ya que Groot y Stoyanov grafican la fracción de partículas gruesas en lugar de la de finas en el eje de las abscisas.

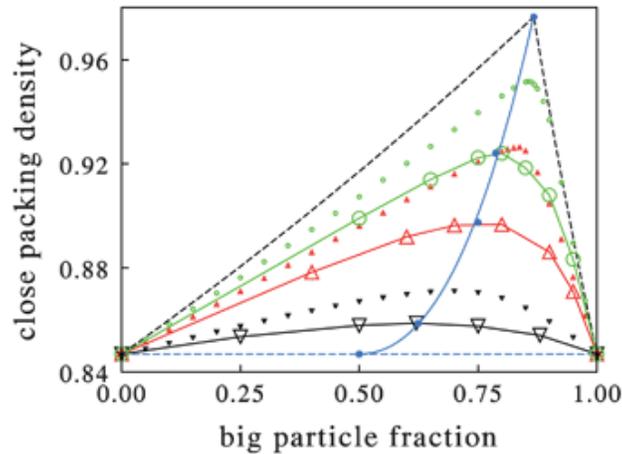


Figura 55. Dependencia empaquetamiento-fracción de partículas gruesas. [82]

Se determinó que el comportamiento del empaquetamiento es ascendente inicialmente ya que las partículas finas van ocupando los espacios vacíos que se forman entre las partículas gruesas sin embargo, dado que el volumen a ocupar siempre es el mismo se llega a una determinada relación de cantidades en la que para poder seguir incrementando el número de partículas finas por cada gruesa es necesario extraer partículas gruesas del volumen de control, a medida que se tienen que extraer cada vez más partículas gruesas para cumplir con las relaciones de cantidad el volumen que puede ocupar la mezcla es cada vez menor ya que aunque se tiene un número mayor de partículas finas estas no logran ocupar el mismo volumen que las partículas gruesas, esta tendencia se hace más notoria a medida que las relaciones de tamaño de la mezcla son mayores ya que cada vez se requieren de un mayor número de partículas finas para igualar el volumen de una gruesa. La Fig. 56 a 58 muestran imágenes de los modelos físicos.

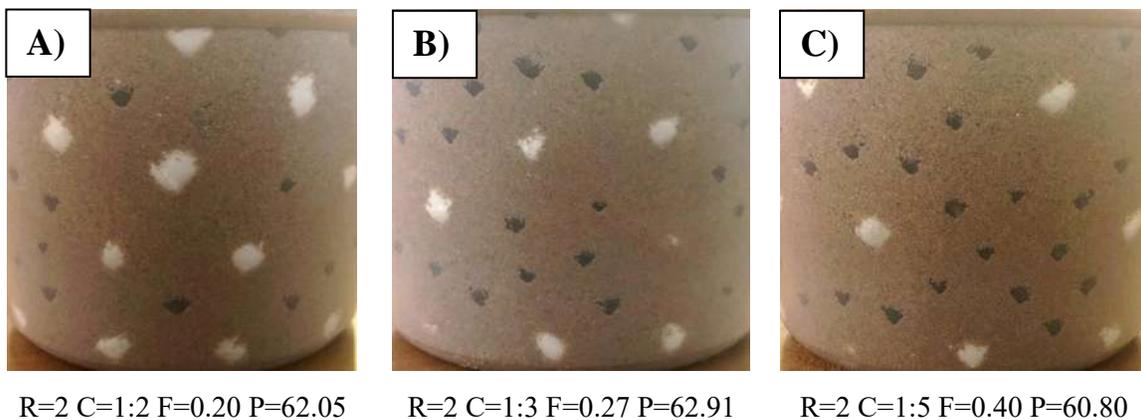


Figura 56. Modelos físicos con R=2.

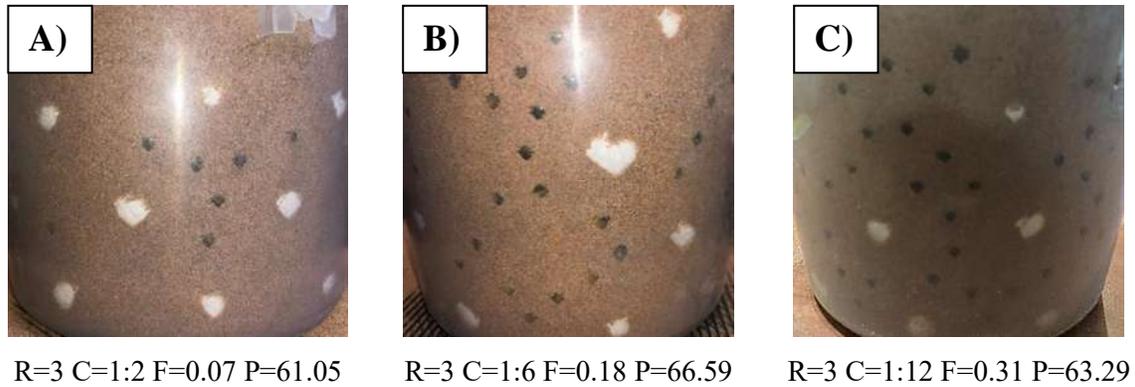


Figura 57. Modelos físicos con R=3.

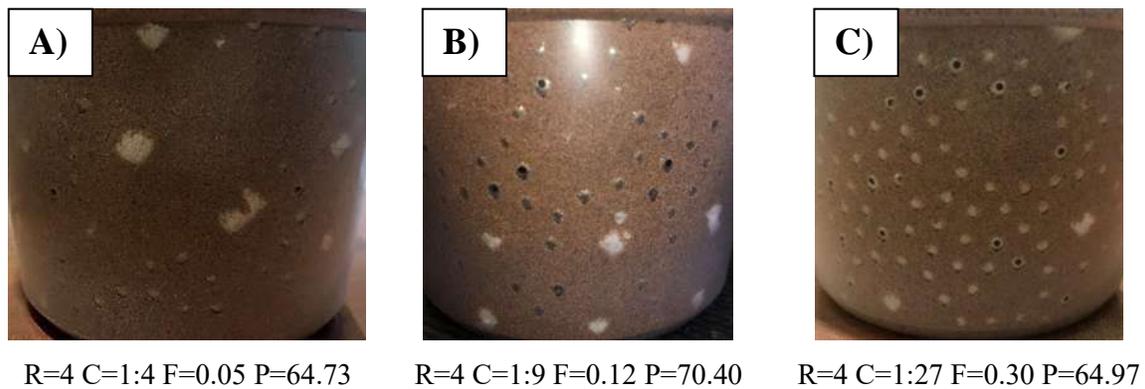


Figura 58. Modelos físicos con R=4.

Analizando las imágenes de los modelos físicos pudo observarse que el empaquetamiento máximo se obtiene en aquellas relaciones de cantidad en las cuales las partículas finas forman hileras de aproximadamente una partícula de espesor entre las capas de partículas gruesas como en las Fig. 56.B, 57.B y 58.B, a medida que se incrementa la relación de cantidades las hileras de partículas finas aumentan su espesor formando grandes cúmulos entre las capas de partículas gruesas y disminuyendo así el empaquetamiento del modelo como se observa en las Fig. 56.C, 57.C y 58.C. Estos resultados están acordes con la bibliografía, donde se reporta que la máxima porosidad para espumas obtenidas por infiltración utilizando partículas espaciadoras es de cerca del 70%. Quizás pueda obtenerse mayor empaquetamiento aumentando la relación de tamaños entre partículas, pero en esta investigación se demostró que las condiciones de mezclado son críticas ya que las partículas pequeñas encuentran espacios entre las grandes y se van al fondo del mezclado, lo cual también se corresponde con lo reportado en la Ref. [83].

3.2. Diseño de experimentos.

El análisis realizado demostró que las variables F, R y la combinación de ambas tienen efecto sobre el empaquetamiento final de una mezcla de partículas. Esto queda demostrado por el Diagrama de Pareto mostrado en la Fig. 59 en el cual puede observarse que la variable R es la que tiene mayor efecto sobre el empaquetamiento.

Producto del análisis se obtuvo también un gráfico de efectos principales que como su nombre lo indica muestra el efecto de las variables sobre el empaquetamiento de acuerdo al valor que toman, este gráfico sirvió para corroborar el comportamiento resultante de la modelación física que se describe en el Gráfico de la Fig. 54, pues de acuerdo a él se puede apreciar que el incremento en R permite obtener valores de empaquetamiento mayor, mientras que al aumentar F se obtienen empaquetamientos cada vez mayores hasta alcanzar un empaquetamiento máximo a partir del cual el empaquetamiento decrece si F sigue aumentando, la Fig. 60 muestra el gráfico de efectos principales.

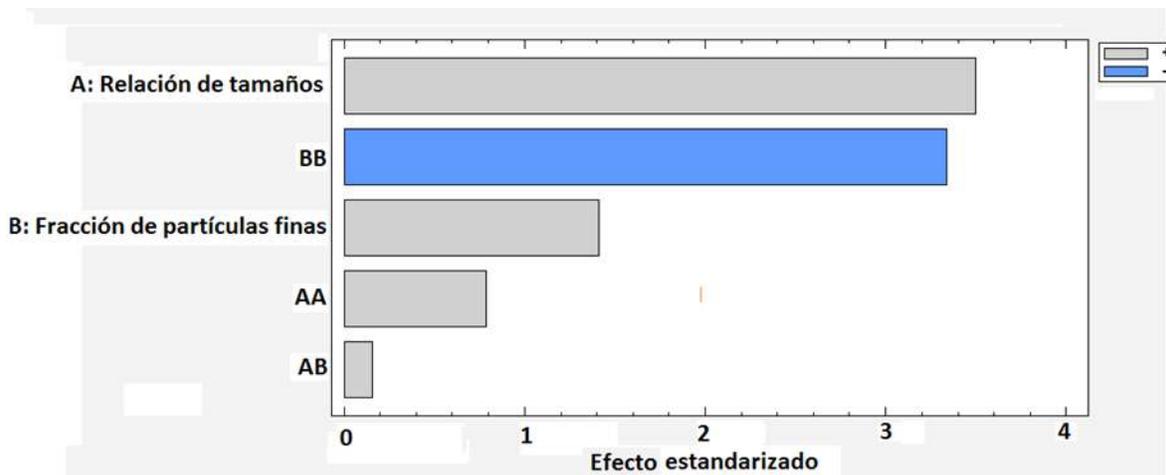


Figura 59, Diagrama de Pareto para el empaquetamiento.

La ecuación de regresión obtenida, que se muestra a continuación, permitiría obtener el empaquetamiento para cualquier caso, siempre que se cuente con los valores de las relaciones de cantidades y tamaños.

$$\gamma = 61.26 - 2.56R + 36.5857F + 0.712R^2 + 0.59RF - 85.2143F^2 \quad (\text{Ec. 26})$$

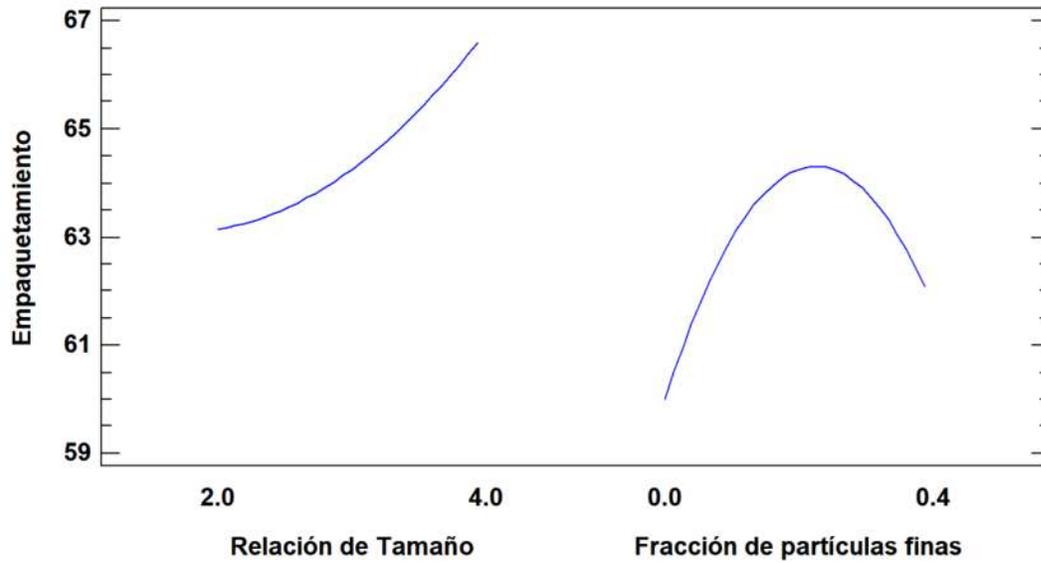


Figura 60. Gráfico de efectos principales.

3.3. Modelación de Espumas.

Se obtuvieron modelos de espumas con porosidad abierta e interconectada, en la Tabla 14, se muestran los resultados obtenidos en los modelos computacionales DEM-FEM. Se presentan la porosidad (en %) y los módulos de Young estimados, incluyendo el relativo, calculado en base al módulo de Young del aluminio (70 GPa).

Tabla 14. Resultados de la modelación computacional.

MODELO	R	C	F	E(GPa)	E/Eo	Porosidad
Modelo 1	2	1	0.11	1.9100	0.0272	63.07
Modelo 2	2	2	0.2	0.8000	0.0114	66.43
Modelo 3	2	4	0.33	0.2800	0.004	65.80
Modelo 4	2	6	0.42	1.4700	0.021	64.53
Modelo 7	4	2	0.03	0.7253	0.0103	65.52
Modelo 6	4	4	0.06	0.7050	0.0100	66.86
Modelo 5	4	6	0.09	0.7381	0.0105	65.72
Modelo 8	4	8	0.11	0.7308	0.0104	65.99
Modelo 9	4	10	0.14	0.7701	0.0110	64.46
Modelo 10	4	12	0.15	0.7157	0.0102	66.044

Las Fig. 61 a 64 muestran ejemplos de los modelos computacionales obtenidos, se muestran la cara superior, la vista lateral y ejemplos de celdas unitarias para diferentes relaciones R y C. Cabe mencionar que en el modelo computacional la presencia de celdas unitarias se dio principalmente en las caras laterales, por ello se realizó la búsqueda en dichas caras. También mediante la observación a mayores aumentos de las celdas unitarias es posible ver con mayor claridad la interconectividad de los poros en cada modelo.

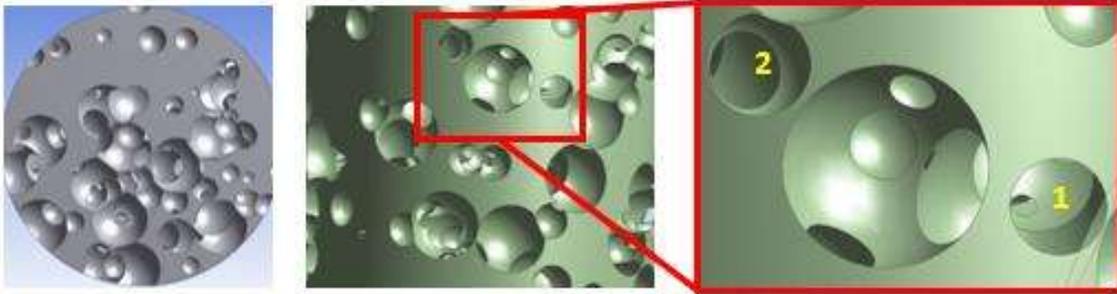


Figura 61. Modelo computacional R=2, C=2.

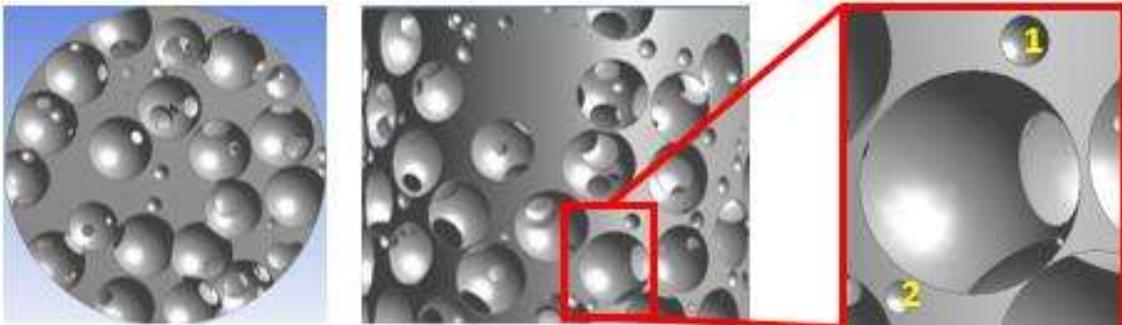


Figura 62. Modelo computacional R=4, C=2.

En las Figs. 61 y 62 pueden observarse dos ejemplos de modelos computacionales con diferente relación de tamaños, R=2 y R=4 respectivamente para la misma relación de cantidades C=2, es posible apreciar la diferencia de tamaños a pesar de que la celda unitaria consiste en un poro grande rodeado por dos pequeños para ambos casos.

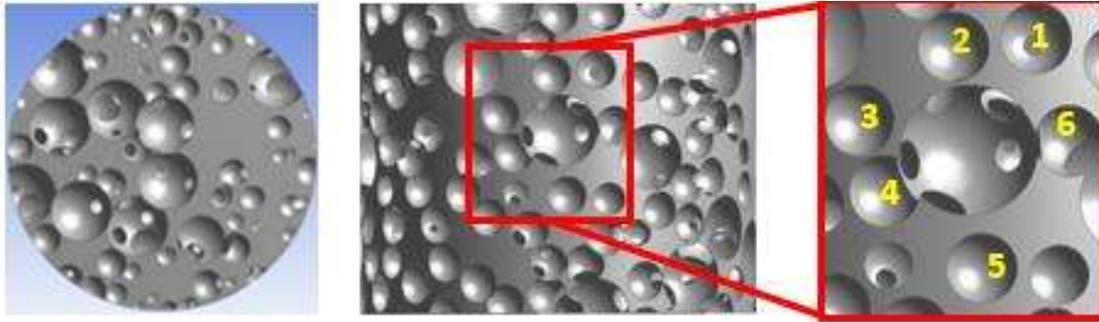


Figura 63. Modelo computacional R=2, C=6.

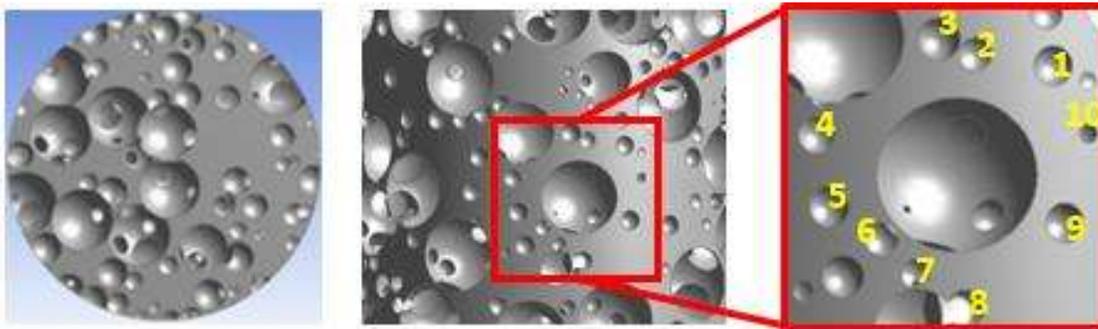


Figura 64. Modelo computacional R=4, C=10.

En el caso de las Figs. 63 y 64 se pueden observar dos modelos computacionales con relaciones de cantidad mayores. La Fig. 63 muestra una espuma y su correspondiente celda unitaria, para una relación de tamaños $R=2$ y de cantidades $C=1:6$, es decir un poro grande con 6 poros pequeños rodeándolo. Por otro lado, la Fig. 64 muestra una espuma $R=4$ con $C=1:10$, igualmente es posible observar el número correspondiente de poros rodeando a uno grande, nuevamente la diferencia de tamaños para cada relación de tamaños es notoria.

3.3. Resultados obtenidos mediante la simulación por FEM para las espumas.

Las Figs. 65 y 66 muestran ejemplos de un modelo computacional con su correspondiente mallado y el desplazamiento máximo obtenido mediante las condiciones de simulación descritas en el desarrollo experimental de este trabajo.

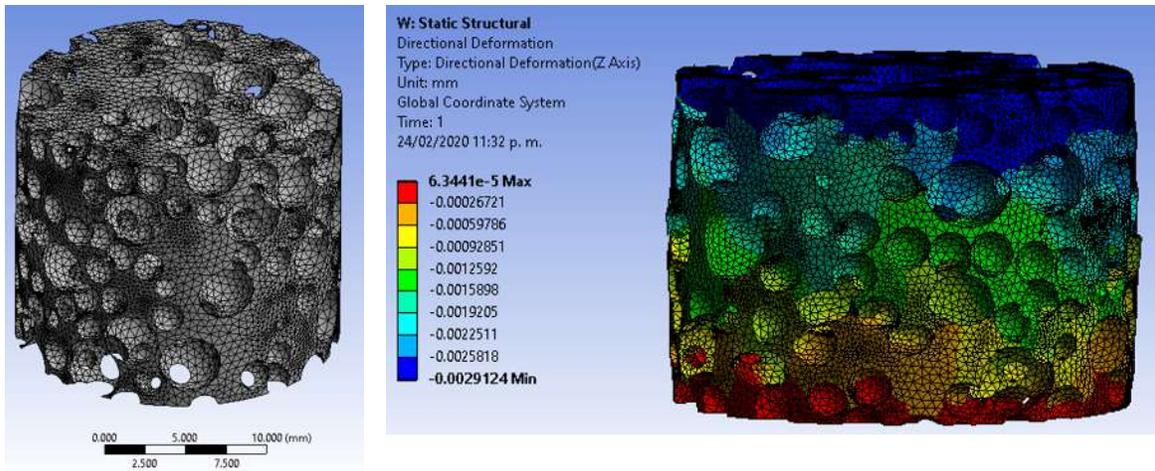


Figura 65. Simulación computacional para un modelo R=2, C=6

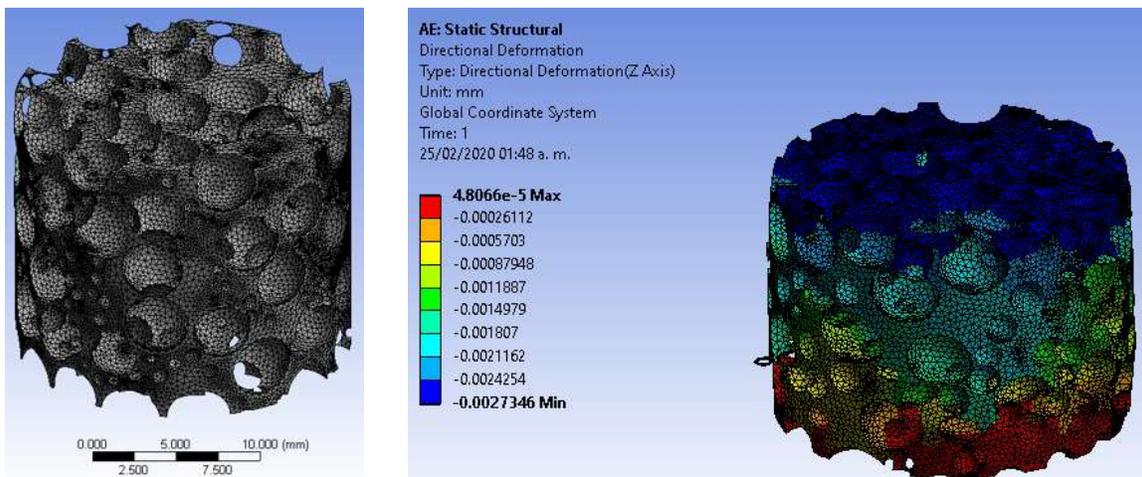


Figura 66. Simulación computacional para un modelo R=4, C=8

La Fig. 67 muestra el gráfico de los resultados de la porosidad obtenida en los modelos computacionales. Al igual que en el caso de los modelos físicos, se puede observar una mayor porosidad para el modelo con la relación de tamaños mayor (R=4), igualmente al incrementar la fracción de finas se obtiene un valor de porosidad máximo y posteriormente se inicia la disminución de la porosidad. Se determinó que el comportamiento de la porosidad en los modelos computacionales obedece a las mismas razones que en el caso de los modelos físicos, ya que el volumen a llenar con las partículas es constante, a medida que se incrementa la relación de cantidades la cantidad de partículas gruesas que pueden incluirse en la mezcla es cada vez menor reduciendo la porosidad.

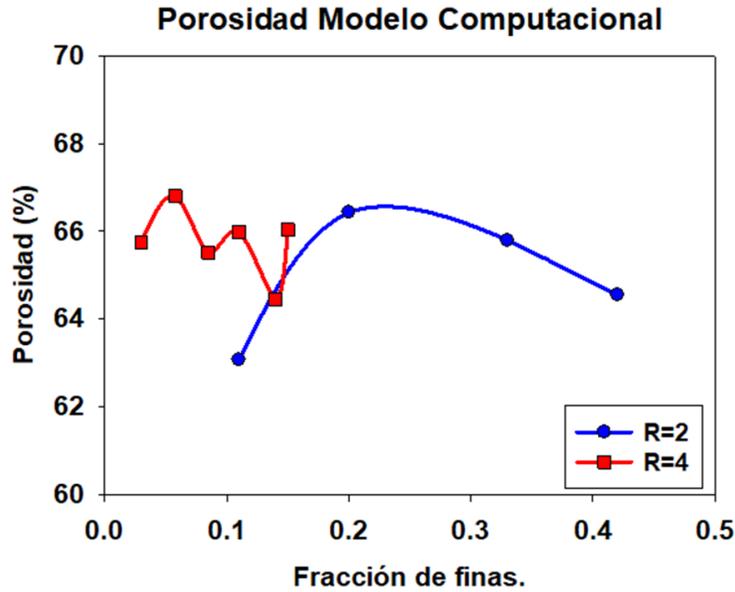


Figura 67. Porosidad obtenida con modelo computacional.

Como puede observarse en la Fig. 67 la porosidad de los modelos R=4 muestra un comportamiento irregular con más de un punto de inflexión a lo largo de la curva en comparación con la porosidad encontrada en los modelos R=2 en los cuales se observa un único punto de inflexión. Se determinó que las fluctuaciones observadas en los modelos con R=4 se deben a que el incremento en la fracción de partículas finas no implica necesariamente un incremento lineal de la porosidad, ya que las interacciones entre las partículas que forman los poros suelen ser complejas y no es posible alcanzar un empaquetamiento ideal como el observado en la Fig. 68.a.

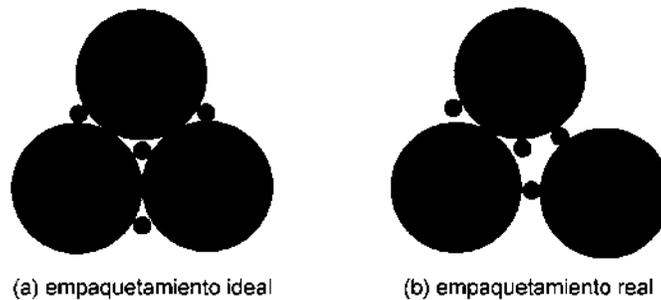


Figura 68. Esquema de empaquetamiento ideal vs real. [83]

Dicho lo anterior, puede establecerse que, aunque un incremento inicial de partículas finas puede generar un mayor empaquetamiento y una mayor porosidad en la espuma de aluminio, es posible que

el acomodo que adoptan las partículas al seguir incrementando dicho parámetro pueda generar empaquetamientos menores de los que se lograron inicialmente. Este resultado puede observarse en el estudio realizado por Kong y Lanutti [84], en el cual puede apreciarse el efecto antes mencionado, como se muestra en la Fig. 69. La curva presentada en esta figura muestra la variación del empaquetamiento en función del volumen de partículas finas para una mezcla bimodal. Como puede observarse el empaquetamiento crece y decrece de manera irregular a medida que se aumenta el porcentaje de partículas finas en la mezcla, y es similar a lo mostrado en la Fig. 61. Para el caso de $R=2$ este comportamiento no se observó debido a que la diferencias entre D “partícula gruesa” y d “partícula fina” es menor y los fenómenos mostrados en la Fig. 69 son menos frecuentes. En los modelos físicos estos fenómenos no se observaron debido a que el arreglo se realizó en capas, para obtener un nivel de empaquetamiento más cercana a la ideal.

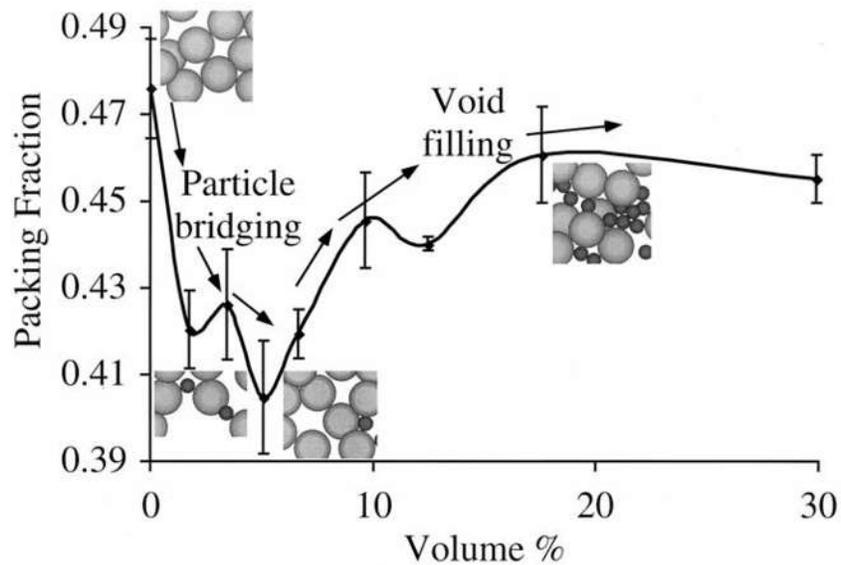


Figura 69. Variación del empaquetamiento con respecto al volumen porcentual de partículas finas en una mezcla bimodal. [84]

Se concluyó que el comportamiento irregular en la porosidad no se presentó en los modelos $R=2$ ya que en estos, el incremento de la relación de cantidades “C” tiene un impacto más significativo sobre la fracción de finas en comparación con los modelos $R=4$, es decir, que mientras para los modelos $R=4$ incrementar la relación de cantidades “C” de dos partículas finas por cada gruesa ($C=2$), a cuatro por cada gruesa ($C=4$) representa apenas un cambio de 0.02 en la fracción volumétrica de partículas finas “F”; el mismo incremento para los modelos $R=2$ representa un cambio de 0.13 en la fracción de partículas finas. De tal manera que para $R=2$ no es posible examinar las fracciones de partículas finas

para los cuales el empaquetamiento se comporta de manera irregular utilizando relaciones de cantidad “C” con valores de números enteros.

En el caso del espesor de pared, se observó una tendencia a disminuir a medida que se incrementa la fracción de partículas finas para ambas relaciones de tamaño, se determinó que esto se debe a que a medida que existen más partículas finas dentro de la mezcla la cantidad de espacio libre entre ellas es cada vez menor obteniendo paredes de poro con espesores cada vez menores, como se muestra en la Fig. 70.

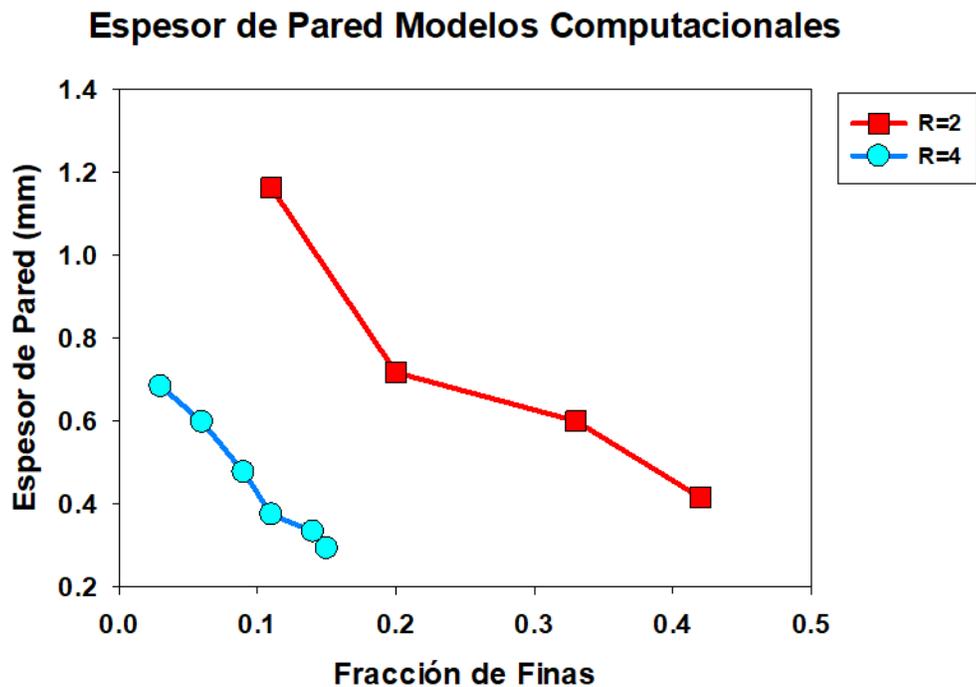


Figura 70. Espesor de Pared Modelos Computacionales.

La Fig. 71 muestra el gráfico de los módulos de Young obtenidos en la simulación computacional. Para R=2 se observó que a medida que la porosidad es mayor el módulo de Young disminuye, llegando a un valor mínimo para la fracción de finas, coincidiendo con la porosidad máxima. En el caso de R=4 el comportamiento no es equivalente, ya que el máximo de módulo de Young sí coincide con el mínimo de porosidad, pero a la inversa no se cumple esto. Una posible causa de este comportamiento podría estar relacionada con los valores de tamaño de pared de poro.

Resultados simulación computacional.

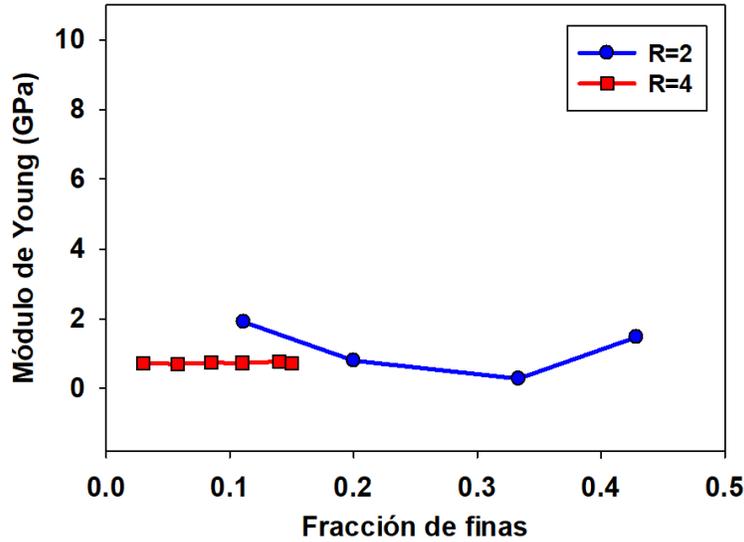


Figura 71. Módulos de Young obtenidos en la simulación computacional.

Las Figs. 72 y 73 muestran la dependencia de E con respecto a la porosidad y al espesor de pared respectivamente. En el caso de las espumas R=2 el módulo de Young muestra una tendencia a disminuir a medida que incrementa la porosidad, alcanzando un valor mínimo, después del cual se observa un cambio en la tendencia y un incremento E. Por otro lado en el caso de los modelos con R=4 no se observó un cambio significativo a medida que se incrementa la porosidad, manteniendo el valor de E constante para los diferentes valores de porosidad.

En el caso del espesor de pared, el módulo de Young de los modelos R=2 presentó una tendencia a disminuir a medida que el espesor de pared es menor, nuevamente se observa la presencia de un valor mínimo, después del cual se aprecia un cambio en la tendencia y un incremento en E. Por otro lado en el caso de R=4 los cambios en el módulo de Young con respecto al espesor de pared no son significativos, observándose un valor prácticamente constante.

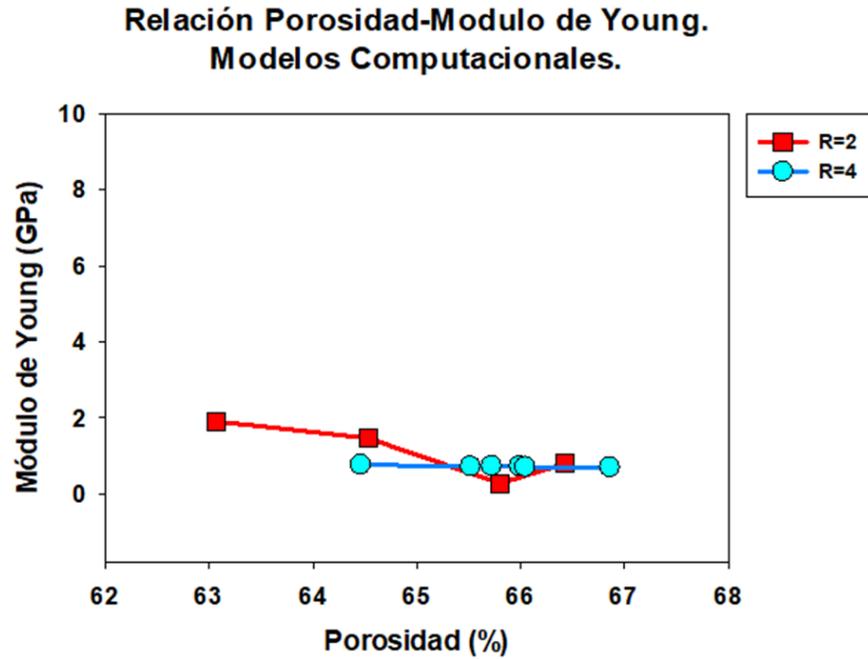


Figura 72. Relación Porosidad-Módulo de Young.

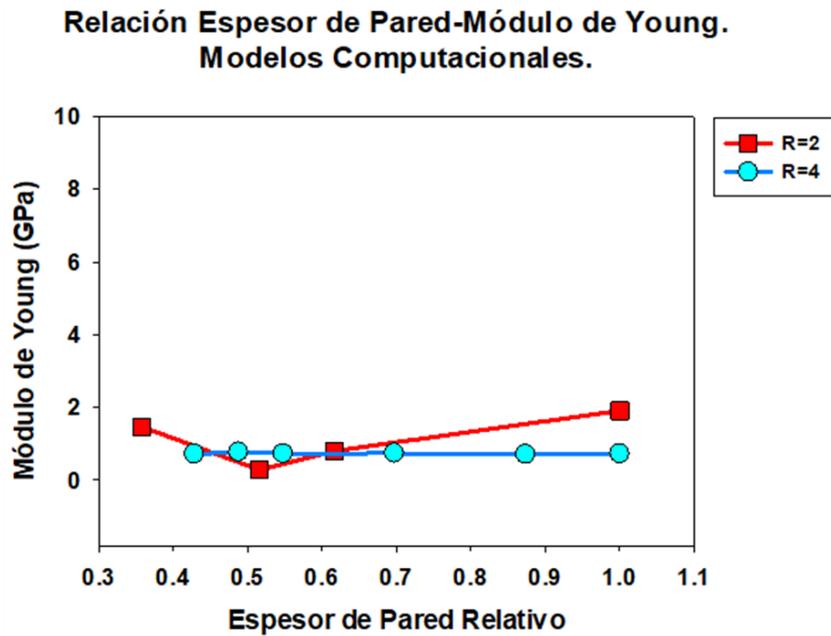


Figura 73. Efecto del espesor de pared sobre el Módulo de Young.

3.4. Espumas de aluminio experimentales.

Los resultados generales de las espumas de aluminio pueden observarse en la Tabla 15, en todos los casos siendo los promedios de tres espumas fabricadas utilizando las mismas condiciones. En las Figuras 74 a 80 se muestran ejemplos de las espumas fabricadas para estas condiciones de R y C.

Tabla 15. Resumen de espumas fabricadas.

R	C	F	Densidad (en g/cm ³)	Porosidad (en %)	Espesor de pared (en mm)
2	1	0.11	1.01	62.59	2
	2	0.2	0.92	65.92	1.63
	4	0.33	0.95	64.81	1.24
	6	0.42	0.93	65.29	0.885
4	2	0.03	0.94	64.92	1.237
	4	0.05	0.9	66.6	0.736
	6	0.08	0.93	65.24	0.653
	8	0.11	0.88	67.39	0.52
	10	0.14	0.97	63.93	0.502
	12	0.15	0.94	65.09	0.516

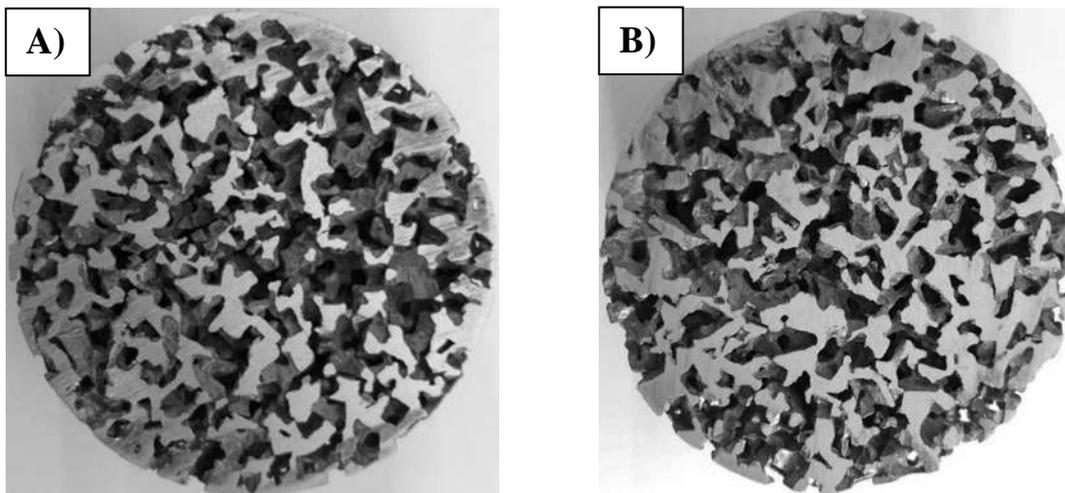


Figura 74. Espumas R=2, C=1:6, F=0.42

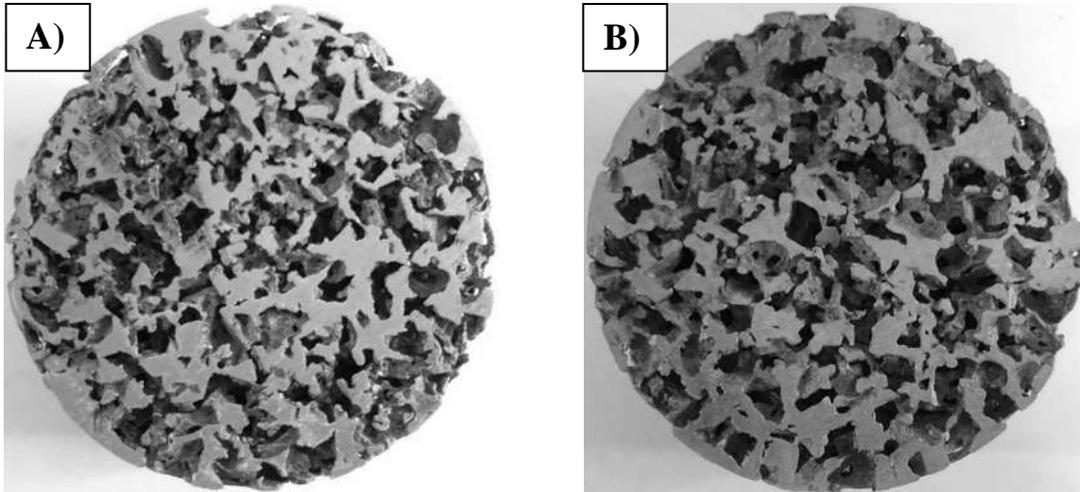


Figura 75. Espumas $R=4$, $C=1:2$, $F=0.03$

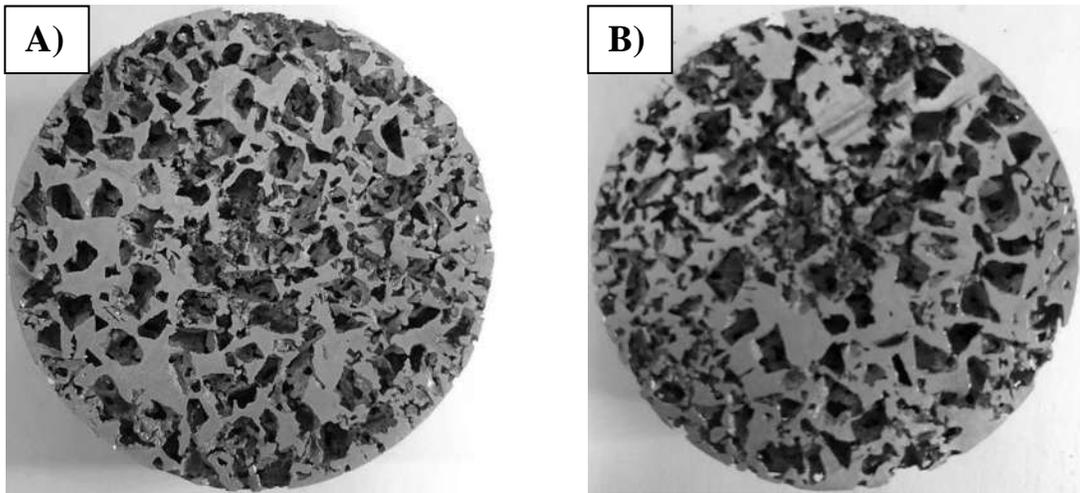


Figura 76. Espumas $R=4$, $C=1:4$, $F=0.06$

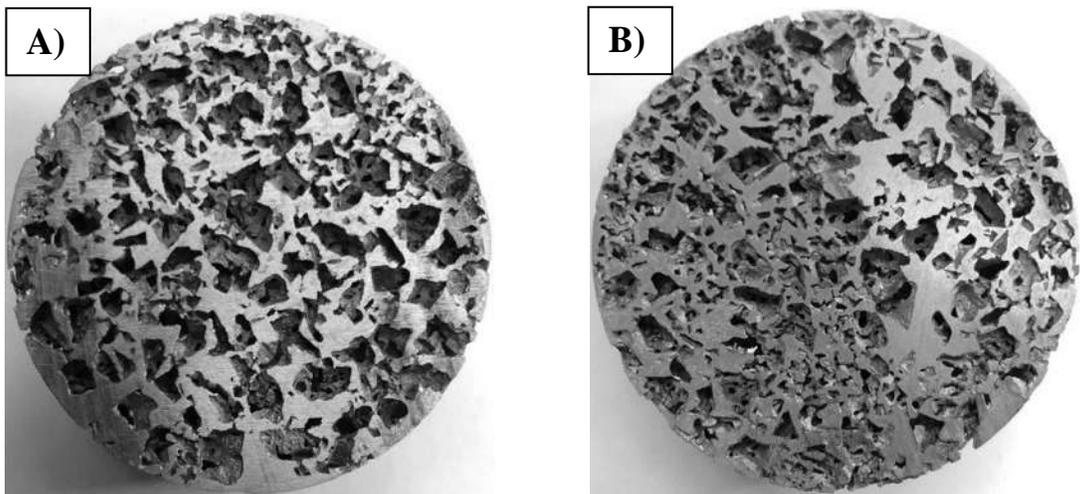


Figura 77. Espumas $R=4$, $C=1:6$, $F=0.09$

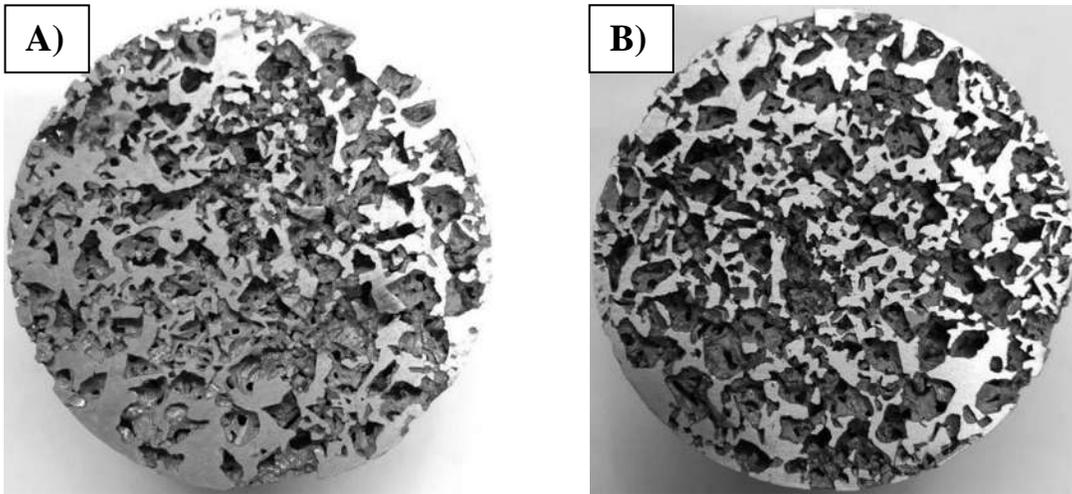


Figura 78. Espumas R=4, C=1:8, F=0.11

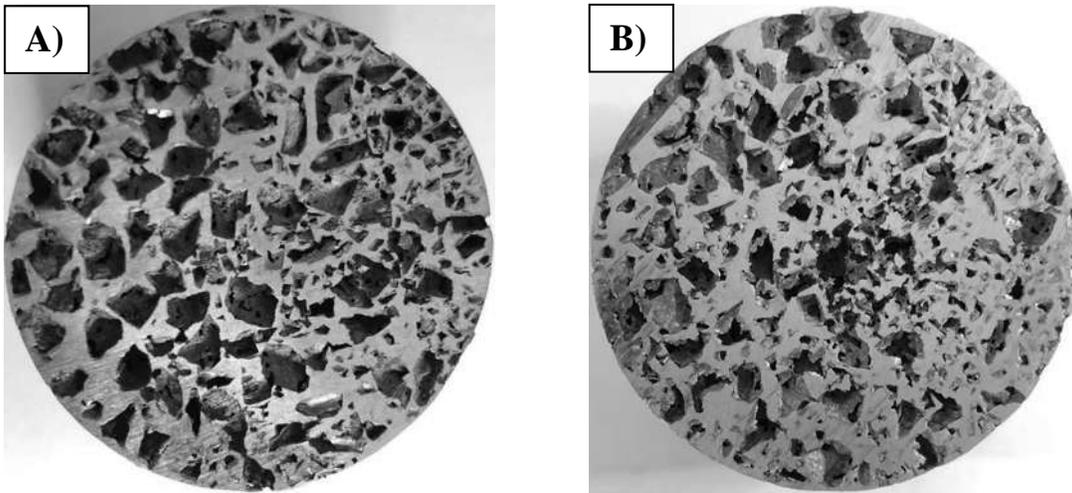


Figura 79. Espumas R=4, C= 1:10, F=0.14

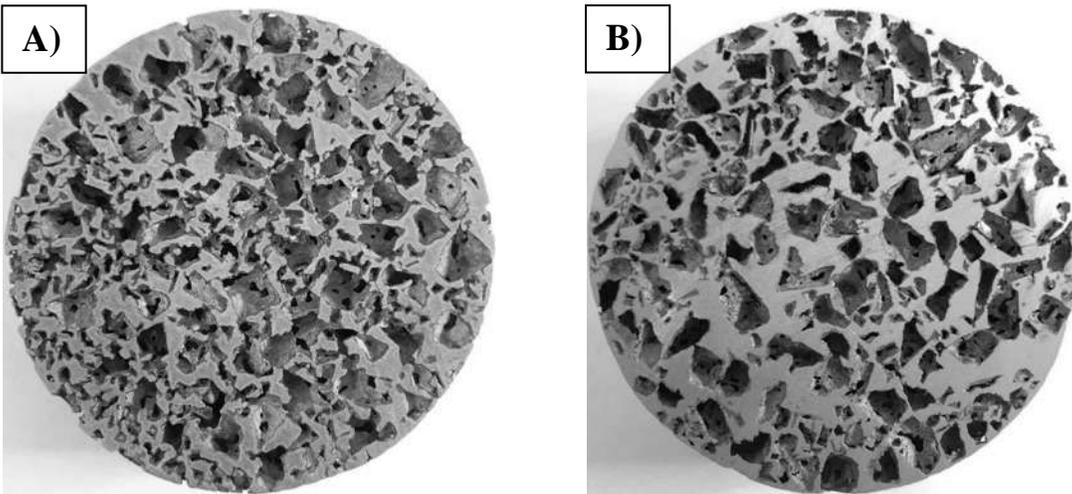


Figura 80. Espumas R=4, C=1:12, F=0.15

Como pudo apreciarse en las figuras anteriores, se obtuvieron espumas con poros interconectados. Del análisis de estas imágenes anteriores es posible observar que la distribución porosa es irregular en las espumas de aluminio en diferentes cortes de esta. En algunas de las muestras puede apreciarse que las partículas espaciadoras se aglomeran en una zona específica de las espumas, por ejemplo, en la Fig. 76.A se observa que los poros finos se aglomeran en el lado derecho de la cara de la espuma mientras que el lado izquierdo presenta muy pocos. Por otro lado, la Fig. 77.B muestra la aglomeración de los poros finos del lado izquierdo y la ausencia de estos en el lado derecho. Esta aglomeración ha sido reportada debido a la problemática que plantea el mezclado.

En las Fig. 81 a 87 se pueden observar con mayor detalle las porosidades obtenidas, incluyendo la interconexión y celdas unitarias características, correspondientes a la relación de cantidades de cada espuma. Por ejemplo, en la Fig. 81 se aprecia una espuma con relaciones de tamaño 2 a 1, y 6 poros chicos por cada poro grande.

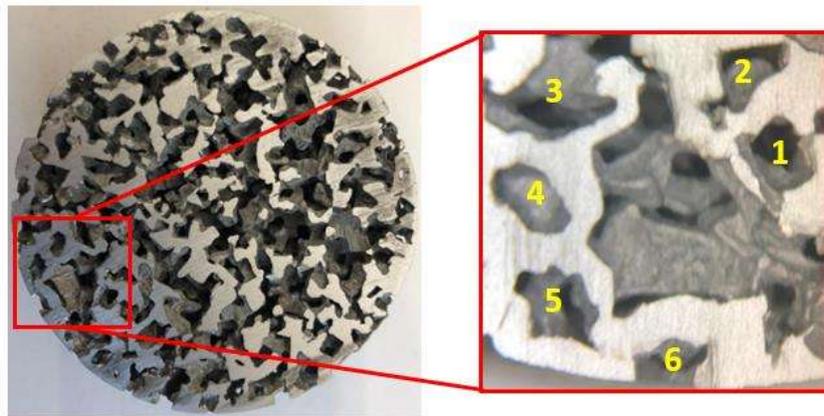


Figura 81. Celda unitaria espuma $R=2$, $C=1:6$, $F=0.42$

Por otra parte, en la Fig. 82 se aprecia la presencia de dos poros pequeños por cada poro grande ($C=2$).

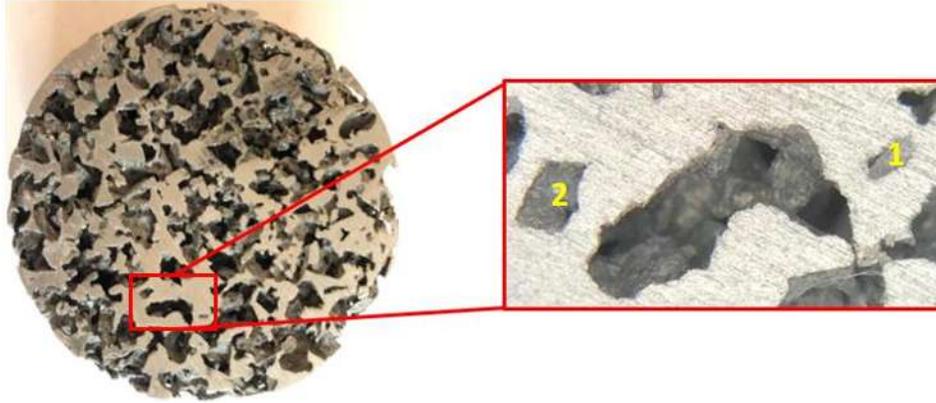


Figura 82. Celda unitaria espuma R=4, C=1:2, F=0.03

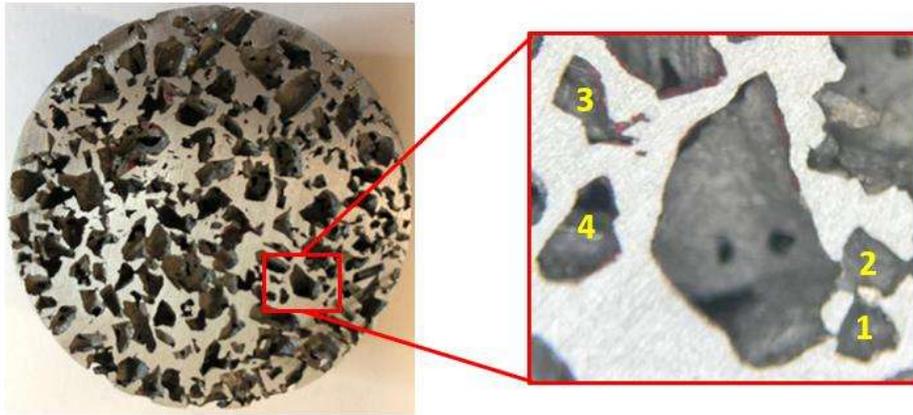


Figura 83. Celda unitaria espumas R=4, C=1:4, F=0.06.

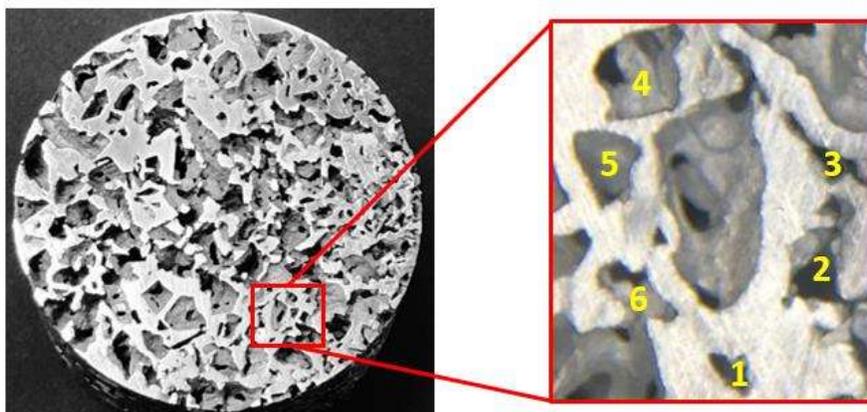


Figura 84. Celda unitaria espumas R=4, C=1:6, F=0.08.

En la Fig. 85 se aprecia uno de los casos extremos, con 8 poros pequeños por cada poro grande, de un tamaño 4 veces mayor. En la Fig. 86 esta relación aumenta a 10 poros pequeños por cada grande, y en la Fig. 87 a 12.

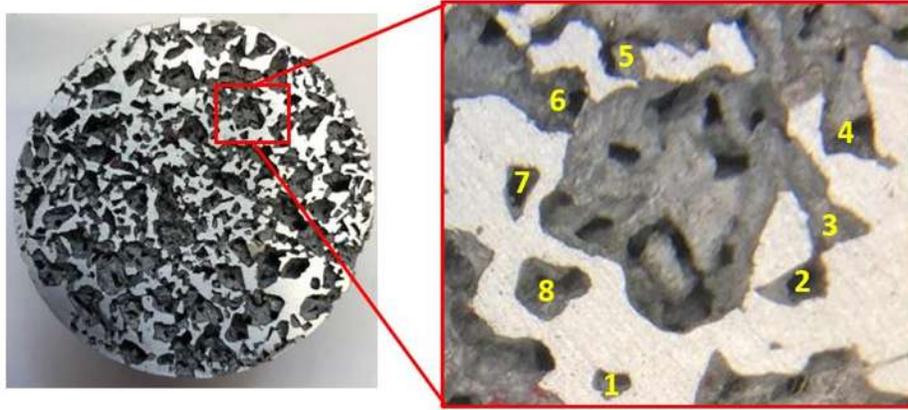


Figura 85. Celda unitaria espuma $R=4$, $C=1:8$, $F=0.11$

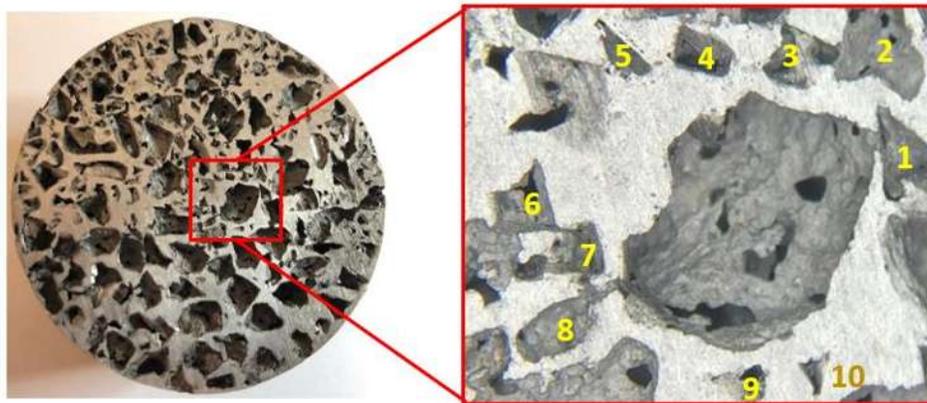


Figura 86. Celda unitaria espuma $R=4$, $C=1:10$, $F=0.14$.

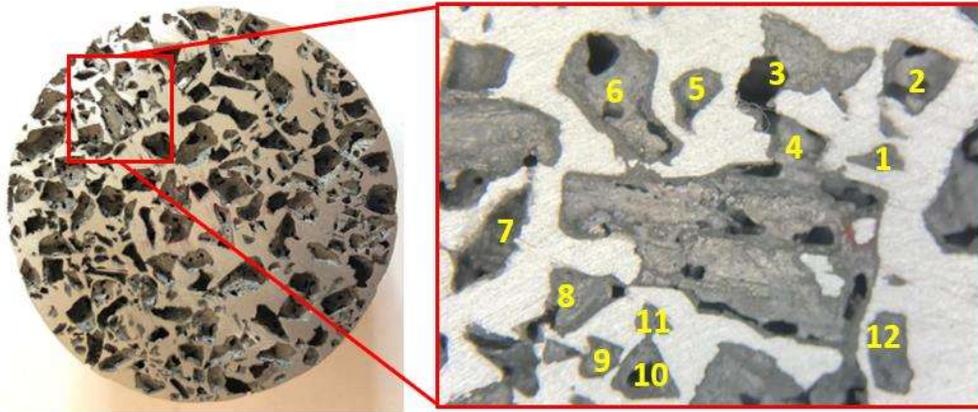


Figura 87. Celda unitaria espuma R=4, C=1:12, F=0.15.

3.4.1. Porosidad.

A diferencia de los modelos físico y computacional, en el caso de las espumas fabricadas experimentalmente ambas relaciones de tamaño mostraron un comportamiento irregular, observándose más de un punto de inflexión en ambas curvas. En el caso de las espumas con relación de tamaños R=2 mostraron un incremento inicial en el porcentaje de porosidad al aumentar la fracción de partículas finas “F”, alcanzado un valor máximo en F=0.2 a partir del cual la porosidad empieza decaer, sin embargo la tendencia a disminuir no se mantiene como en los modelos físico y computacional, ya que se observa un segundo punto de inflexión a partir del cual la porosidad se incrementa de nuevo sin rebasar el valor máximo obtenido en F=0.2. Por otro lado, en el caso de las espumas R=4 la porosidad mostró un comportamiento similar al observado en los modelos computacionales, incrementando y disminuyendo de manera irregular a medida que se incrementa la fracción de partículas finas, alcanzando un valor máximo en una fracción F=0.11, las curvas de ambas relaciones de tamaño se pueden observar en la Fig. 88. Este comportamiento se pudiera atribuir entre otros aspectos al mezclado imperfecto entre las partículas espaciadoras de tamaños y cantidades relativas variadas.

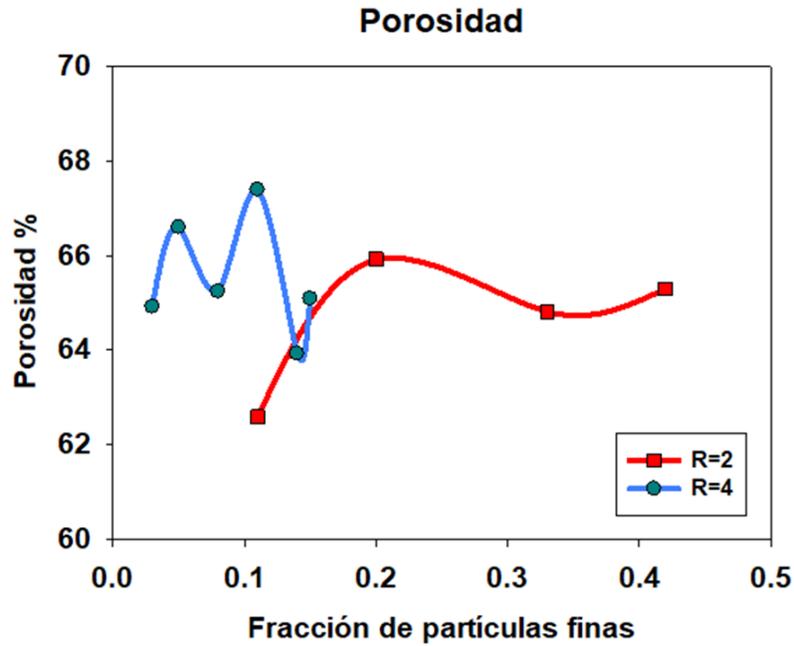


Figura 88. Porosidad obtenida en las espumas de aluminio reales.

Análogamente a los modelos físicos y computacionales al incrementar la relación de tamaños “R” se obtiene mayor porosidad, encontrándose la porosidad máxima en fracciones de partículas finas cada vez menores.

3.4.2. Densidad.

En el caso de la densidad, el incremento de la relación de tamaños tiene el efecto inverso en comparación a la porosidad, es decir, a medida que aumenta R la densidad disminuye y el valor mínimo de densidad se encuentra en una fracción de partículas finas cada vez menor, como se muestra en la Fig. 89.

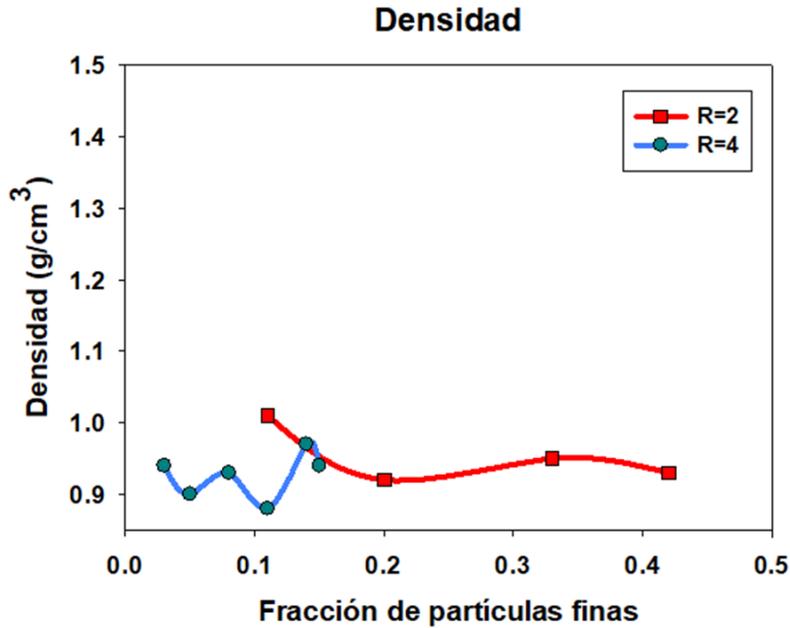


Figura 89. Densidad obtenida en las espumas de aluminio.

La densidad mostró un comportamiento irregular al igual que la porosidad, incrementando y disminuyendo a medida que se aumenta la fracción de partículas finas, sin embargo, a diferencia de la porosidad, los valores de densidad tienden a disminuir, obteniendo los valores de densidad mínimos en los mismos valores de “F” donde la porosidad es máxima y viceversa como se observa en las Figs. 90 y 91, dado que la porosidad y la densidad son propiedades inversamente proporcionales al comparar los gráficos de ambas propiedades con respecto a la fracción de finas puede observar que son reflexiones especulares entre sí.

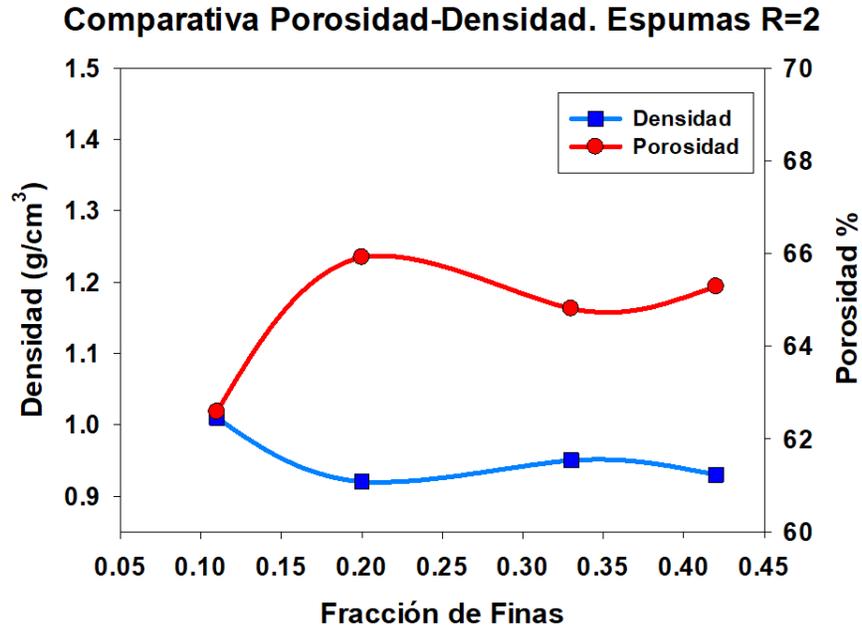


Figura 90. Comparativa Porosidad-Densidad para Espumas R=2

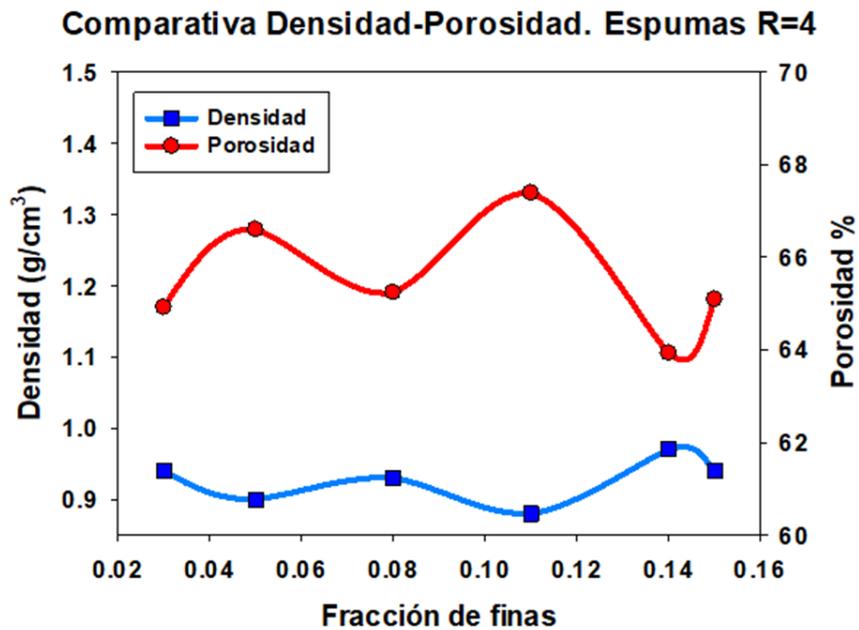


Figura 91. Comparativa Porosidad-Densidad para Espumas R=4

3.4.3. Espesor de pared.

El espesor de pared mostró una tendencia descendente a medida que se incrementa la relación de tamaños, esto se debe a que a medida que las partículas finas tienen un menor tamaño pueden llenar mejor los huecos formados entre las partículas gruesas formando paredes más delgadas una vez que se ha fabricado la espuma de aluminio. Así mismo al incrementar la fracción de finas también se observó una tendencia descendente esto puede explicarse ya que a medida que se tienen más partículas finas en la mezcla estas tienden a agruparse ya sea entre las partículas gruesas o bien formando cúmulos, ocupando el espacio de mejor manera y reduciendo el espacio libre entre ellas, de tal manera que una vez que el metal se infiltra se obtienen paredes de menor espesor, como se muestra en el gráfico de la Fig. 92. Este es un resultado esperado, y causante de las variaciones en porosidades y densidades, ya que sobre estos no solo influye el porcentaje de porosidad, sino también su distribución, siendo el espesor de pared igualmente crítico, sobre todo para porosidades similares.

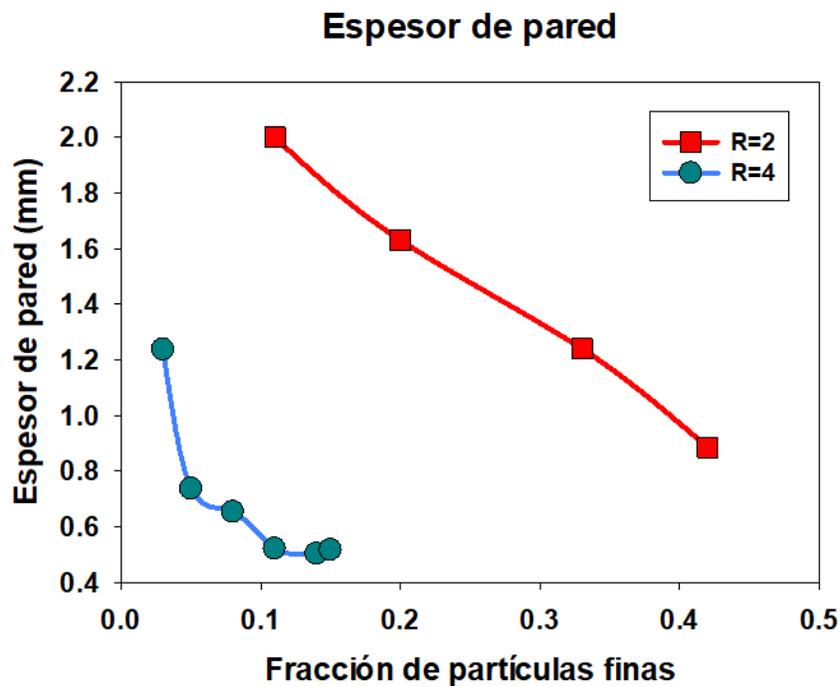


Figura 92. Espesores de pared espumas reales.

3.4.4. Caracterización mecánica.

La Tabla 16 muestra los módulos de Young obtenidos de las pruebas de compresión realizadas. Para el caso de R=2 el módulo de Young mínimo se obtuvo para una fracción de partículas de 0.33, mientras que para las espumas R=4 dicho valor se obtuvo para una fracción finas de 0.11.

Tabla 16. Resultados de pruebas mecánicas.

R	C	F	Porosidad	Módulo de Young Real (GPa)
2	1	0.11	62.59	1.39*
	2	0.2	65.92	0.9*
	4	0.33	64.81	0.38*
	6	0.42	65.29	0.669
4	2	0.03	64.92	0.63
	4	0.05	66.6	0.38
	6	0.08	65.24	0.441
	8	0.11	67.39	0.363
	10	0.14	63.93	0.595
	12	0.15	65.09	0.432

* Estas pruebas mecánicas se habían realizado previamente y los valores se tomaron de la Ref. [4]

En ambas relaciones de tamaño el módulo de Young mostró una tendencia a disminuir, sin embargo, en las espumas con R=2 el valor mínimo del módulo de Young no coincide con la fracción de partículas finas en la que se obtuvo la porosidad máxima, además de que en puntos específicos como F=0.33 el Módulo de Young continúa disminuyendo a pesar de que la porosidad de la espuma es menor para esa misma fracción de partículas finas como se observa en la Fig. 93. Este resultado también depende del espesor de pared.

Comparativa Módulo de Young-Porosidad. Espumas R=2

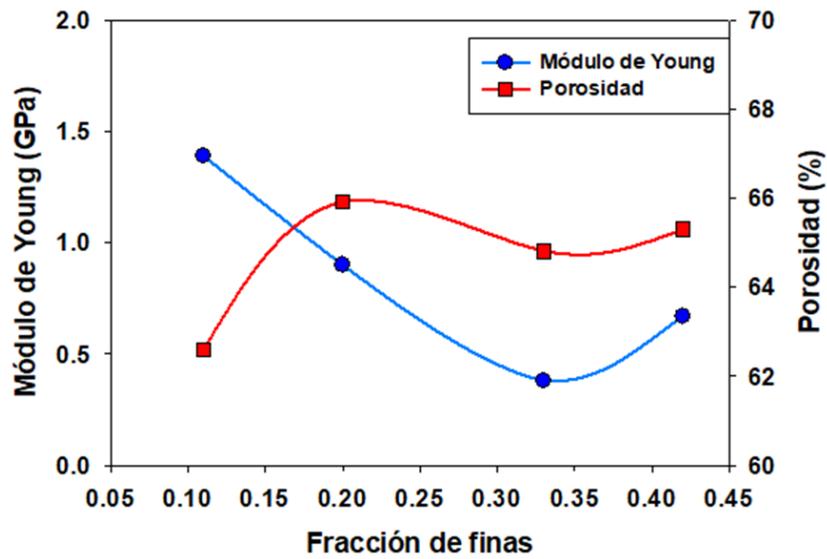


Figura 93. Comparativa Módulo de Young-Porosidad para espumas R=2.

En el caso de las espumas R=4, el comportamiento del Módulo de Young muestra mayor regularidad en relación con la porosidad obtenida en la espuma, ya que a medida que se observa mayor porosidad el módulo de Young obtenido en el ensayo de compresión es menor, adicionalmente en este caso el valor mínimo para el módulo de Young puede encontrarse en el valor de “F” correspondiente a la porosidad máxima. Lo anterior puede observarse en el gráfico de la Fig. 94.

Comparativa Módulo de Young- Porosidad. Espumas R=4

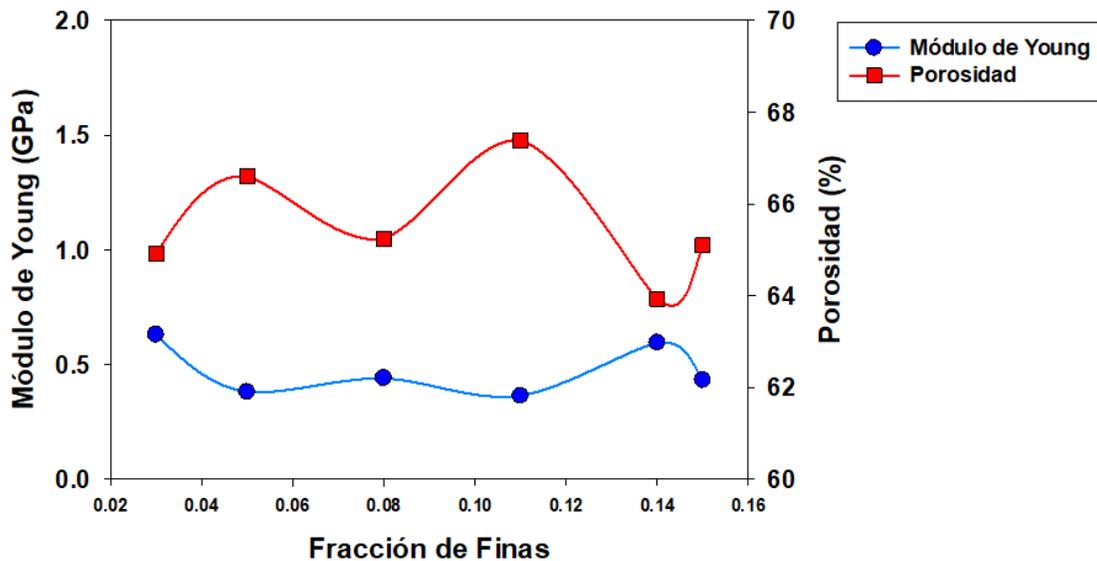


Figura 94. Comparativa Módulo de Young-Porosidad para diferentes relaciones de tamaños.

Análogamente a la porosidad se observó que a medida que se incrementa la relación de tamaños para las partículas espaciadoras el valor mínimo del módulo de Young se encuentra en fracciones de partículas finas cada vez menores como se puede observar en el gráfico de la Fig. 95.

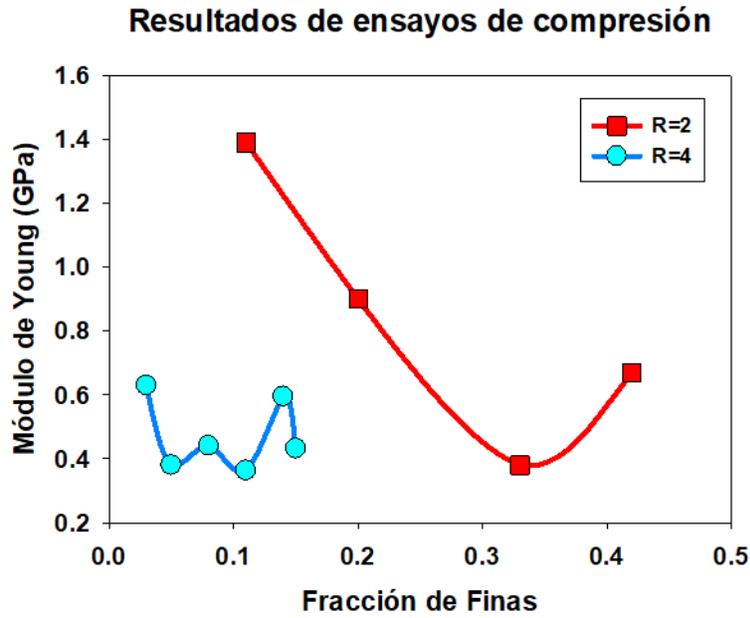


Figura 95. Resultados de ensayos de compresión.

En búsqueda de obtener una mejor relación entre la porosidad y el módulo de Young (E), en las Fig. 96 y 97 se presenta un gráfico ponderado, que incluye el efecto de la porosidad y el espesor de pared sobre E. Para las espumas con relación R=4 el módulo de Young se encuentra para el valor máximo de porosidad máxima, además puede observarse una tendencia de E a disminuir a medida que se incrementa la porosidad, aunque los cambios en E no son significativos. Por otro lado, en el caso de las espumas R=2 la tendencia de E a disminuir con el incremento de porosidad no se mantiene, ya que se alcanza un valor mínimo antes de alcanzar la porosidad máxima. Estos resultados coinciden con lo obtenido previamente.

En el caso del espesor de pared se observa un comportamiento similar al mostrado en los modelos computacionales, para las espumas R=2 la tendencia inicial de E es disminuir a medida que el espesor de pared es menor, alcanzando un valor mínimo y luego incrementando, y para R=4 no se observaron cambios significativos.

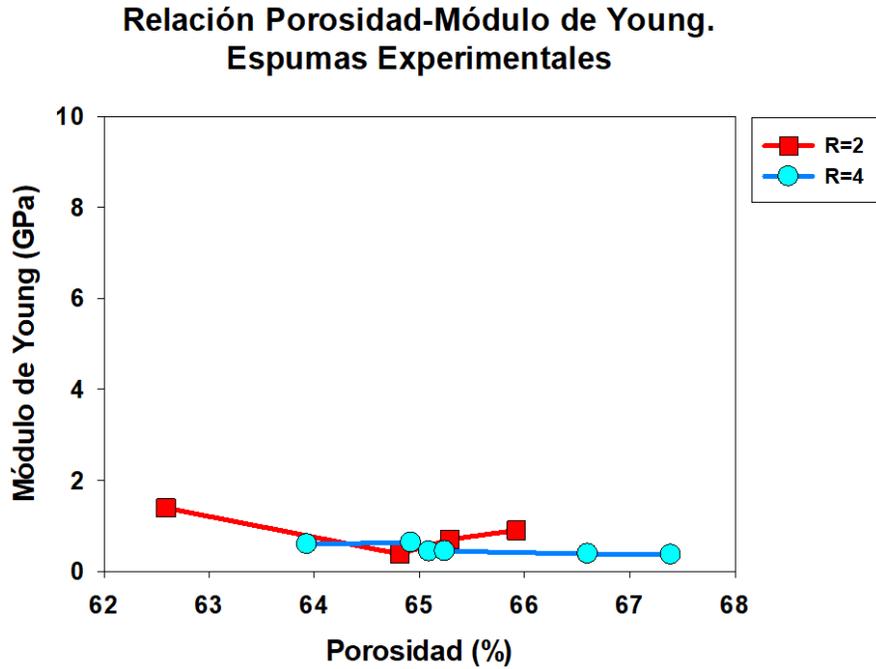


Figura 96. Dependencia Porosidad-Módulo de Young para Espumas Experimentales.

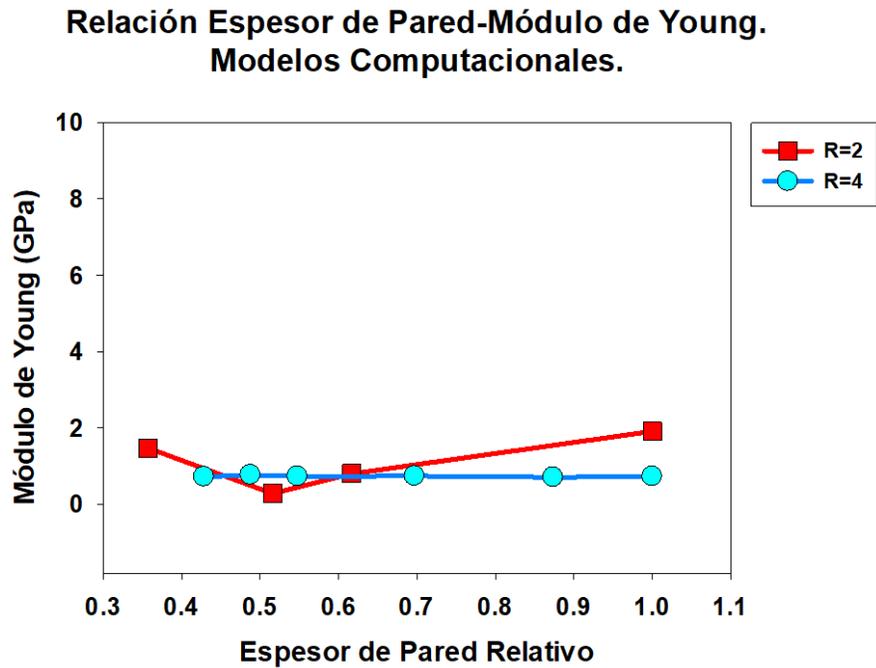


Figura 97. Dependencia Porosidad-Espesor de Pared para Espumas Experimentales.

Las Fig. 98 y 99 muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los ensayos de compresión para las relaciones de tamaño $R=2$ y $R=4$ respectivamente. Todas las curvas muestran las diferentes etapas de la deformación características de las espumas metálicas, describiendo un comportamiento elástico-plástico con una etapa inicial de deformación lineal, seguida de la zona de meseta o Plateau, en la cual se observa un incremento considerable de la deformación a un esfuerzo constante, alcanzando finalmente la etapa de densificación. Como se mencionó anteriormente, el comportamiento mecánico no solo depende de la porosidad, sino también del espesor de pared, por lo que no se encontró una relación directa en estos gráficos.

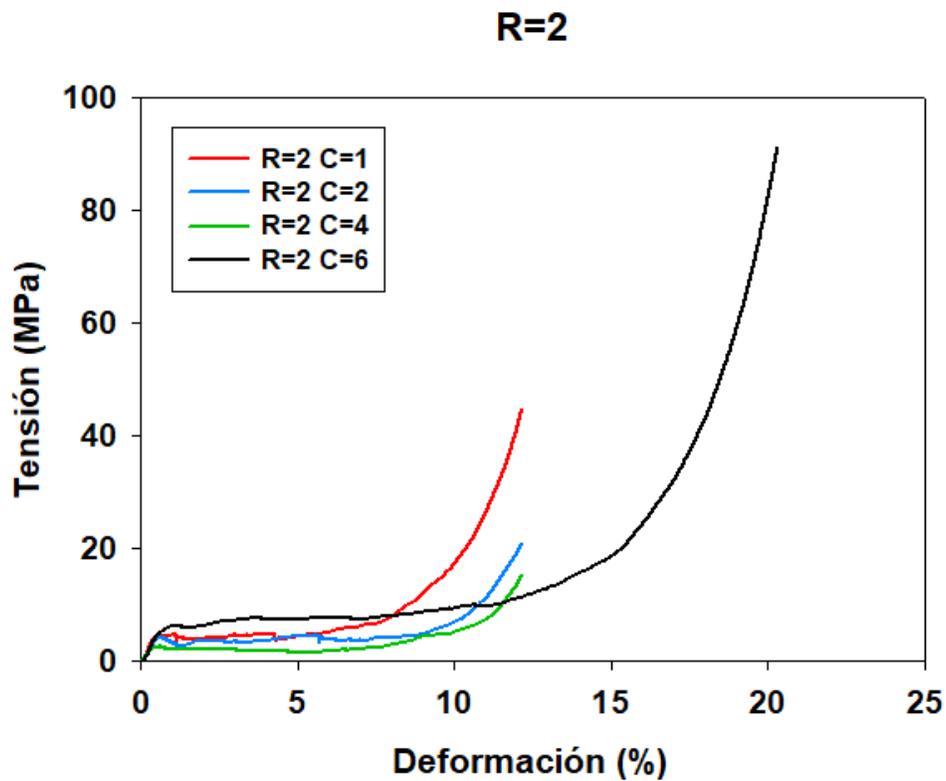


Figura 98. Curvas esfuerzo-deformación para espumas $R=2$.

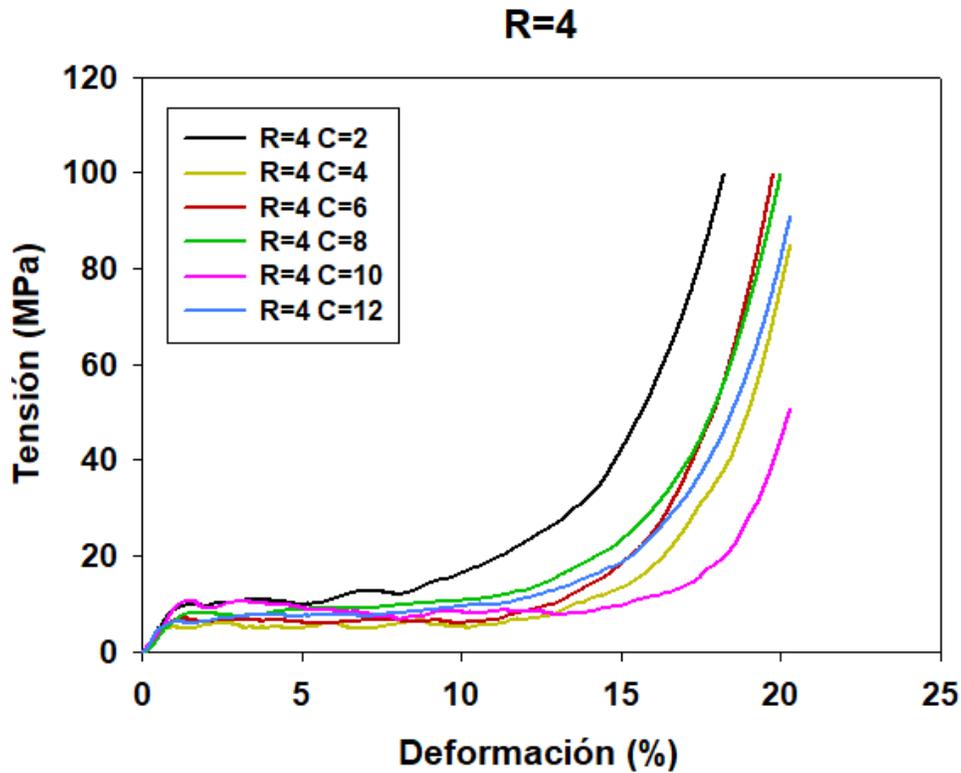


Figura 99. Curvas esfuerzo-deformación para espumas $R=4$.

De las figuras anteriores pudieron determinarse otras propiedades, tales como esfuerzo de fluencia y esfuerzo de densificación. Estos resultados se aprecian en la Tabla 17.

Tabla 17. Resumen de propiedades obtenidas de los gráficos esfuerzo-deformación.

R	C	F	Módulo de Young (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Esfuerzo densificación (MPa)
2	1	0.11	1390	4.42	7.47
2	2	0.20	900	3.49	4.63
2	4	0.33	380	2.18	2.4
2	6	0.42	690	6.25	9.703
4	2	0.03	630	7.2	12.03
4	4	0.06	380	6.08	10.35
4	6	0.09	441	7.25	11.038
4	8	0.11	595	6.48	10.14
4	10	0.14	363	7.79	8.37
4	12	0.15	432	7.306	11.72

De la Tabla 17 es posible observar que tanto el esfuerzo de fluencia como el de densificación están relacionados con el módulo de Young, a medida que E disminuye es posible observar que ambos esfuerzos disminuyen también, coincidiendo los valores mínimos en ambos casos con el mínimo modulo de Young observado.

3.4.5. Dimensión fractal.

La Tabla 18 muestra los resultados obtenidos para la dimensión fractal, mientras que en los gráficos de la Figs. 100 y 101 muestran gráficos que permiten relacionar la dimensión fractal con la porosidad para R=2 y R=4 respectivamente. Se determinó que la dimensión fractal obtenida dependerá directamente de la porosidad, ya que a medida que la porosidad de las espumas aumenta, también incrementa la dimensión fractal.

Tabla 18. Resultados obtenidos de dimensión fractal para las espumas de aluminio reales.

R	C	F	Porosidad (en %)	Dimensión fractal
2	1	0.11	62.59	1.75
2	2	0.2	65.92	1.87
2	4	0.33	64.81	1.81
2	6	0.42	65.29	1.85
4	2	0.03	64.92	1.773
4	4	0.05	66.6	1.790
4	6	0.08	65.24	1.775
4	8	0.11	67.39	1.837
4	10	0.14	63.93	1.795
4	12	0.15	65.09	1.775

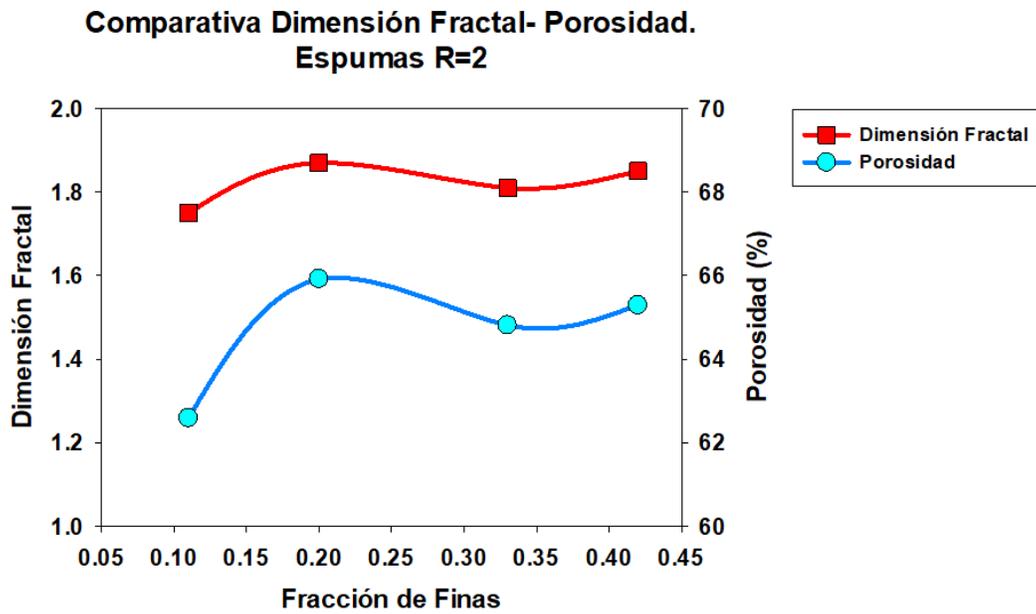


Figura 100. Comparativa Dimensión Fractal-Porosidad. Espumas R=2

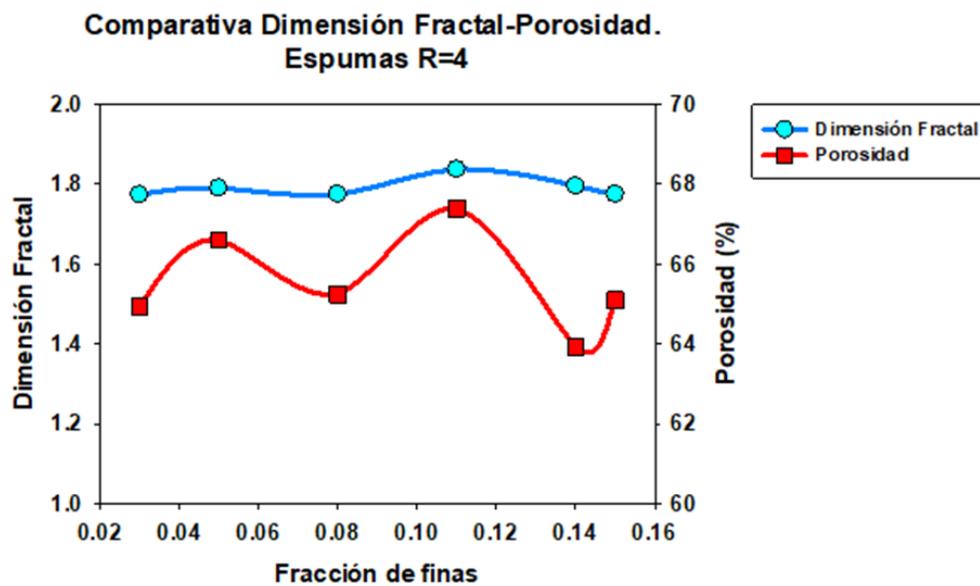


Figura 101. Comparativa Dimensión Fractal-Porosidad. Espumas R=4

También se analizó la relación entre la dimensión fractal y el Módulo de Young, como se muestra en las Fig. 102 y 103.

**Comparativa Dimensión Fractal- Módulo de Young.
Espumas R=2**

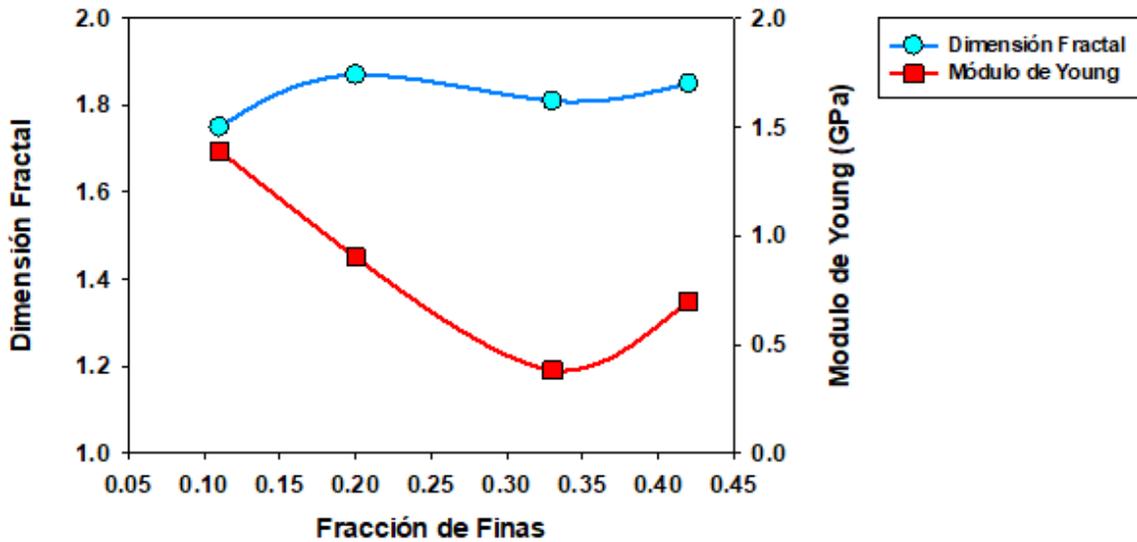


Figura 102. Comparativa Dimensión Fractal-Módulo de Young para espumas R=2.

**Comparativa Dimensión Fractal-Módulo de Young.
Espumas R=4**

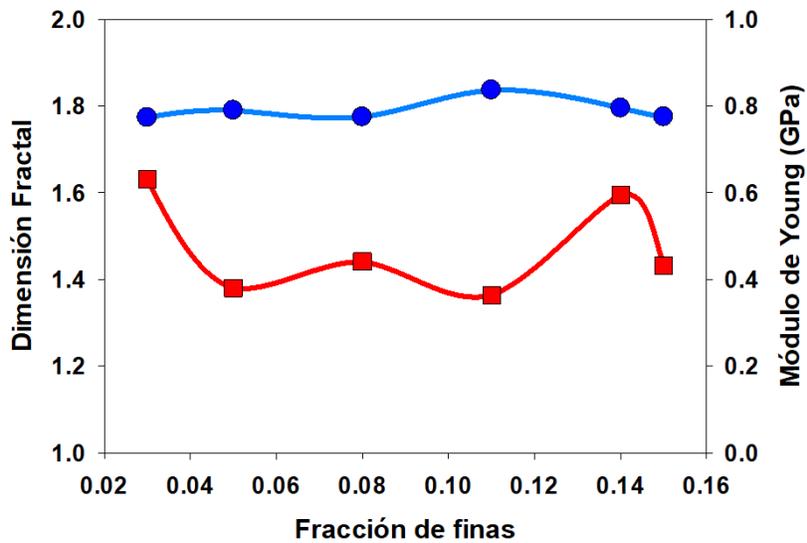


Figura 103. Comparativa Dimensión Fractal-Módulo de Young para espumas R=2.

En el caso de las espumas R=4 pudo observarse un comportamiento inverso con respecto a la porosidad ya que a medida que la dimensión fractal aumenta el módulo de Young disminuye. Por

otro lado, las espumas $R=2$ muestran inicialmente el mismo comportamiento observado en la relación $R=4$, sin embargo, para los valores $F=0.33$ y 0.42 la dimensión fractal disminuye a pesar de que el módulo de Young también lo hace.

3.5. Análisis comparativo.

3.5.1. Porosidad.

Las Fig. 104 y 105 comparan la porosidad obtenida con los diferentes modelos utilizados y las espumas de aluminio experimentales para $R=2$ y $R=4$. Se observó una mejor aproximación a la porosidad de las espumas de aluminio reales mediante el modelo computacional para ambas relaciones de tamaño.

El modelo físico mostró imprecisiones en las dos relaciones de tamaño estudiadas, para el caso de las espumas $R=2$ los valores de porosidad obtenidos se encuentran por debajo de los de las espumas reales, mientras que en el caso de las espumas $R=4$ se observa una sobreestimación de la porosidad real, sin embargo, cabe destacar que el modelo físico logra buenas aproximaciones al predecir la fracción “F” en la cual la porosidad es máxima.

El modelo matemático obtuvo la aproximación menos exacta para la porosidad, observándose una sobre estimación en comparación con la porosidad real para ambas relaciones de tamaño y en el caso específico de $R=4$ siendo aun mayor que la sobre estimación del modelo físico. Aunado a lo anterior el modelo matemático tampoco logró buenas aproximaciones al predecir el valor de “F” donde se obtiene la porosidad máxima. Se determinó que las imprecisiones observadas en el modelo matemático se deben a las condiciones en las que se basan los modelos que se tomaron como base para calcular la porosidad. Por un lado, el modelo de Larrard considera que las partículas empaquetadas se acomodan una por una dentro de la mezcla, mientras que el modelo de Chang y Meidani calcula el empaquetamiento utilizando las relaciones mínimas de vacío entre las partículas, es decir, que se obtiene el valor de empaquetamiento considerando siempre que las partículas se acomodan de tal manera que el espacio entre ellas será mínimo. Dicho lo anterior, es notable el hecho de que ambos modelos matemáticos tienden a buscar un empaquetamiento ideal lo cual no es reproducible en condiciones experimentales.

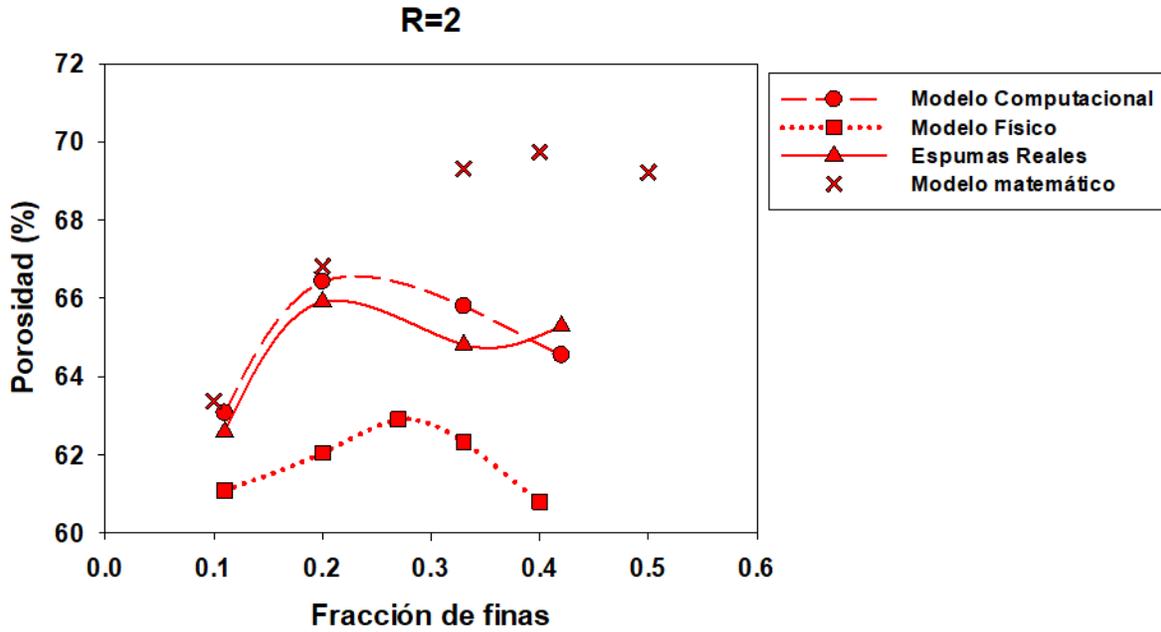


Figura 104. Comparativa de porosidad para espumas R=2.

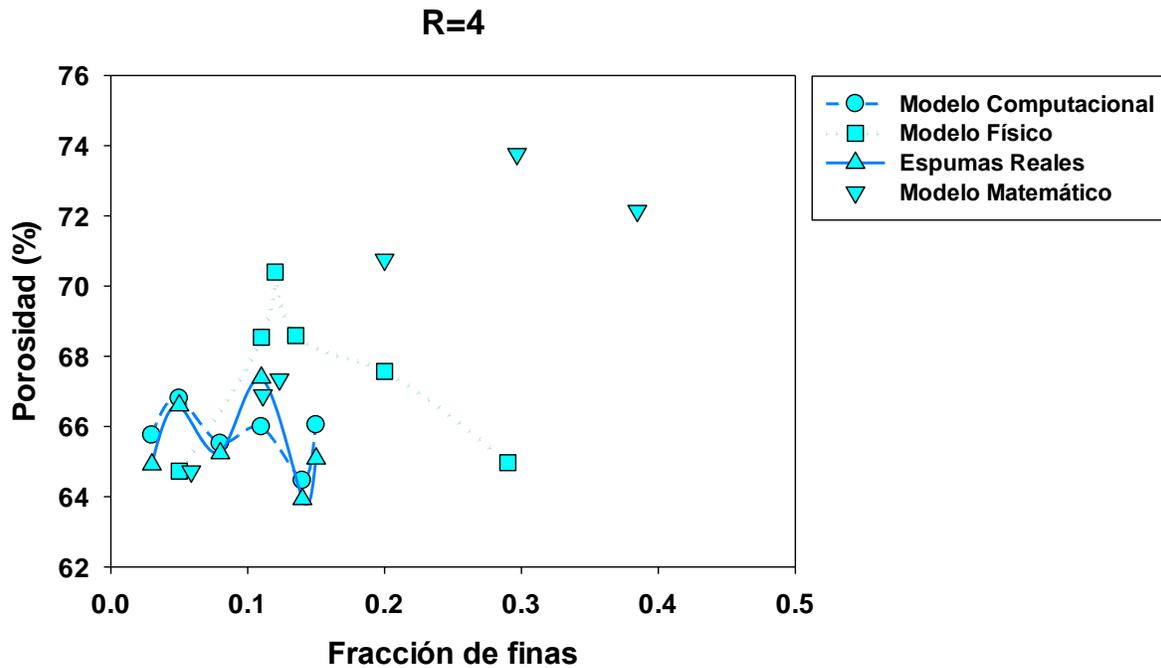


Figura 105. Comparativa de porosidad para espumas R=4

En el caso de las espumas R=2 los modelos físico y computacional no muestran un comportamiento irregular, pudiendo observar un único punto máximo de porosidad y por tanto un solo punto de inflexión a lo largo de la curva, sin embargo, este comportamiento no se repite en las espumas de

aluminio reales ya que la porosidad incrementa y disminuye de manera sucesiva a medida que la fracción de partículas finas aumenta generando más de un punto de inflexión en la curva y un comportamiento que se asemeja más al reportado en la Ref. [84]. Para las espumas R=4 el modelo computacional si presentó un comportamiento fluctuante al igual que las espumas reales, incrementando y disminuyendo de manera sucesiva a medida que se incrementa la fracción de partículas finas, sin embargo, el modelo físico siguió el comportamiento mostrado en las R=2 observándose solo valor máximo a lo largo de la curva y por tanto un único punto de inflexión.

Se determinó que la porosidad de los modelos físicos no mostró un comportamiento fluctuante ya que el acomodo en capas permite una mejor distribución de las partículas, a diferencia de las posiciones aleatorias producto de la simulación por DEM y el mezclado aleatorio de los granos de sal en las espumas reales, de tal manera que en los modelos físicos es posible obtener una distribución de las partículas que se aproxima de mejor manera al empaquetamiento ideal evitando la fluctuación en los valores de porosidad.

3.5.2. Módulo de Young.

Las Fig. 106 y 107 muestran una comparativa de los Módulos de Young obtenidos de las simulaciones FEM y los obtenidos de las pruebas mecánicas con los modelos de referencia citados en la sección 2.2.3 de este trabajo.

Se observó que tanto para las espumas R=2, como para las espumas R=4 el modelo de Kraynik es el que se ajusta mejor a los módulos de Young reales. Aunque la simulación FEM muestra una sobre estimación con respecto a los valores reales, el comportamiento observado en ella es muy similar al obtenido de las pruebas de compresión reales para ambas relaciones de tamaño, siguiendo la tendencia mostrada por los módulos de Young reales a medida que se incrementa la fracción de finas, sin importar si esta es ascendente o descendente.

Las Figs. 108 y 109 muestra el error obtenido para el módulo de Young, tomando como base los valores obtenidos en las pruebas de compresión experimentales, como puede observarse, la simulación computacional logra la mejor precisión en la estimación de E.

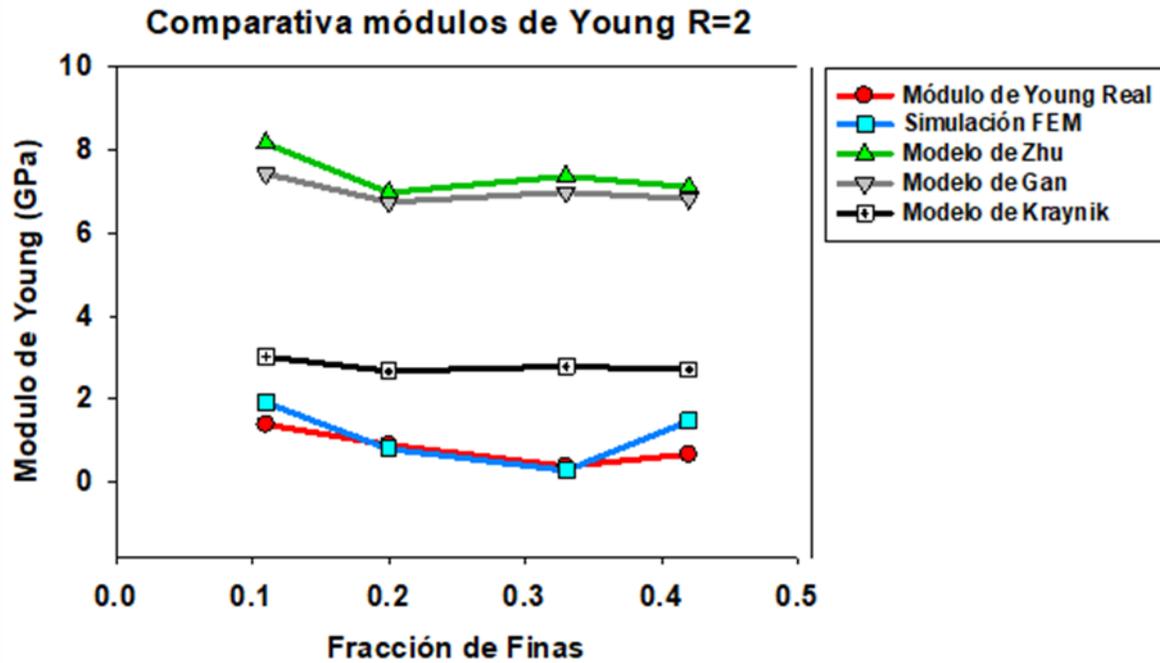


Figura 106. Comparativa de Módulos de Young para espumas R=2

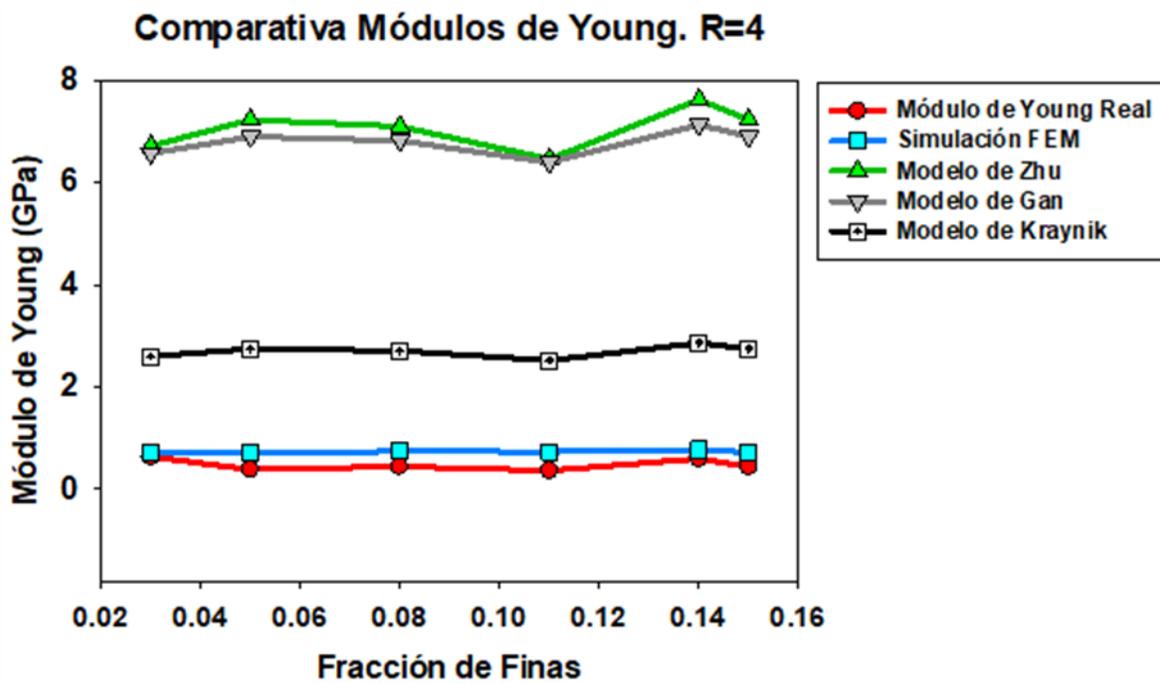


Figura 107. Comparativa de Módulos de Young para espumas R=4.

Modulo de Young. Errores porcentuales para R=2

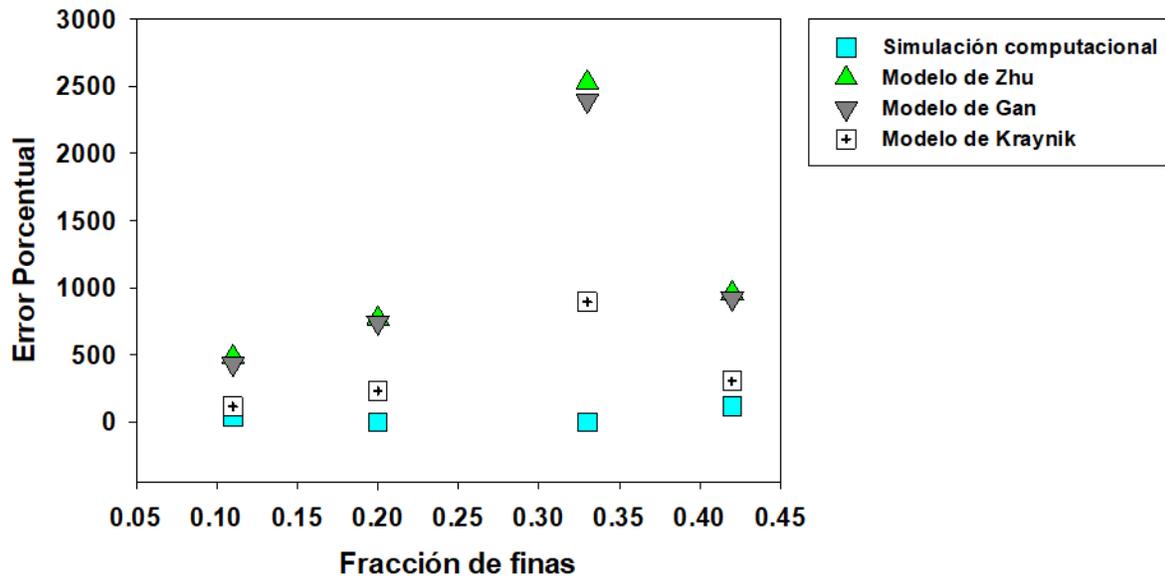


Figura 108. Error Fraccional para el módulo de Young de Espumas R=2.

Modulo de Young. Errores porcentuales para R=4

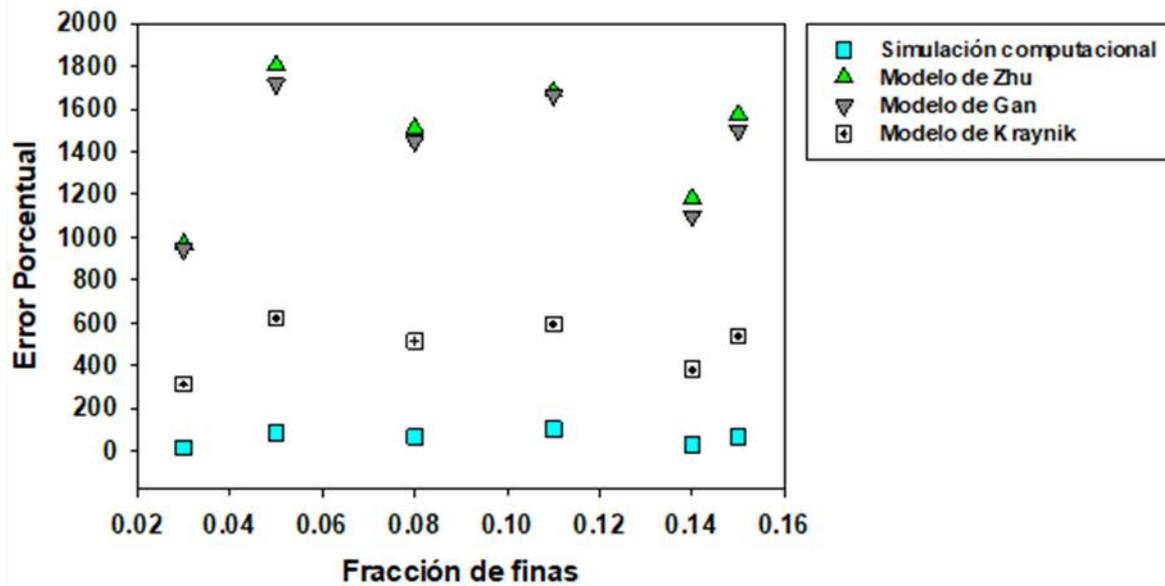


Figura 109. Error Fraccional para el módulo de Young de Espumas R=4.

IV. Conclusiones.

Una vez analizados los resultados obtenidos, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- La distribución de las partículas espaciadoras es un factor de gran relevancia para las espumas fabricadas por infiltración, ya que el valor de porosidad alcanzado dependerá fuertemente de ella.
- El uso de mezclas bimodales con partículas espaciadoras de diferentes tamaños permite mejorar la distribución de la fase porosa en la espuma metálica, pudo comprobarse que incrementar la relación de tamaños “R” entre las partículas finas y gruesas dentro de la mezcla permite obtener porosidades cada vez mayores.
- La distribución de la fase porosa no depende de únicamente de la relación de tamaños “R”, el control de parámetros como la relación de cantidades “C” y su correspondiente fracción de partículas finas “F” son de vital importancia para mejorar la distribución de las partículas espaciadoras y obtener la máxima porosidad para cada relación “R”.
- El incremento en la relación de tamaños “R” y la fracción de partículas finas “F” afectan de manera significativa el espesor de pared observado tanto en las espumas reales como en los modelos CAD utilizados para la simulación por FEM.
- La modelación física constituye un método que funciona bien como una primera aproximación para predecir la porosidad obtenida en una espuma metálica ya que a pesar de mostrar menos precisión que el modelo computacional, logra buenas aproximaciones al predecir los valores de “F” en los cuales se obtiene la porosidad máxima.
- La dimensión fractal demostró ser un parámetro de gran utilidad para describir la estructura porosa dentro de las espumas de aluminio, ya que los valores de dimensión fractal obtenidos dependen directamente del porcentaje de porosidad de la espuma, permitiendo describir la distribución de la fase porosa de manera práctica utilizando un solo valor numérico en lugar de definirla en términos de “R” y “C”.

- El uso de la metodología DEM-FEM demostró ser efectivo en la predicción de la porosidad resultante en las espumas de aluminio, así como en la estimación del módulo de Young debido a que logro mejores aproximaciones que los modelos matemáticos de referencia.

V. Recomendaciones.

Es necesario diseñar un método de mezclado que permita distribuir las partículas espaciadoras de manera uniforme a lo largo de toda la espuma, evitando la aglomeración de las partículas finas en zonas específicas de las espumas de aluminio.

Se requiere establecer condiciones de manufactura estándar para la fabricación de las espumas, por ejemplo, la temperatura de fusión, el flujo y presión de gas, tiempo de disolución de partículas espaciadoras, de tal manera que el proceso de fabricación tenga mayor eficiencia.

El estudio de nuevas condiciones de manufactura que permitan obtener un mayor empaquetamiento de las partículas espaciadoras puede ser de gran interés, ya que permitiría obtener una mayor porosidad a las reportadas hasta ahora utilizando el método de infiltración.

Se requiere realizar más experimentos que permitan determinar de manera efectiva el efecto del espesor de pared sobre las propiedades mecánicas de las espumas de aluminio.

Es importante analizar el método DEM-FEM utilizado para el modelado y simulación de las espumas de aluminio, principalmente en aspectos relacionados con la simulación, como las condiciones de frontera, el mallado del modelo, etc. de tal manera que sea posible predecir el comportamiento mecánico de la espuma con mayor precisión.

VI. Referencias.

- [1] P. Sathurusinge and S. Herath, “Elastic properties of open cell metallic foams using finite element analysis and homogenization technique,” in *45th Institute of Engineers Pakistan convention*, 2012, p. 11.
- [2] L. Pérez, S. Lascano, C. Aguilar, D. Domancic, and I. Alfonso, “Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young’s modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy,” *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 276–283, Oct. 2015.
- [3] J. Z. Wang, J. Ma, Q. B. Ao, H. Zhi, and H. P. Tang, “Review on Fractal Analysis of Porous Metal Materials,” *Journal of Chemistry*, vol. 2015. Hindawi Publishing Corporation, 2015.
- [4] J. C. Carranza, “Efecto de la geometría fractal del sistema poroso sobre el comportamiento a la compresión de espumas metálicas,” Tesis de Maestría. UNAM, 2018.
- [5] L. E. Carranza, “Efecto del arreglo de las partículas espaciadoras sobre la porosidad de espumas metálicas,” Tesis de Pregrado. Instituto Tecnológico de Morelia, 2018.
- [6] P. S. Liu and G. F. Chen, “General Introduction to Porous Materials,” in *Porous Materials*, Elsevier, 2014, pp. 1–20.
- [7] Universitetet i Oslo, “Porous Materials,” *Department of Chemistry.*, 2006. [Online]. Available: <https://www.mn.uio.no/kjemi/english/research/projects/porous-materials/>. [Accessed: 06-Aug-2018].
- [8] S. Chen, M. Bourham, and A. Rabiei, “Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams,” *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 117, pp. 12–22, Dec. 2015.
- [9] Filtec Precision Ceramics Corporation, “Alumina Ceramic Foam Filter for Aluminum Filtration & Casting.” [Online]. Available: <http://www.filtec-corp.com/CF200-Al.html>. [Accessed: 19-Dec-2019].
- [10] University of Minnesota, “Nanoporous Polymer Membrane Fabrication.” [Online]. Available: http://license.umn.edu/technologies/20100133_nanoporous-polymer-membrane-fabrication. [Accessed: 19-Dec-2019].
- [11] A. Kennedy, “Porous Metals and Metal Foams-In search of the Holy Grail,” *AZoM*, 2012. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5940>. [Accessed: 06-

- Aug-2018].
- [12] L. P. Lefebvre, J. Banhart, and D. C. Dunand, “Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 10, no. 9, pp. 775–787, Sep. 2008.
 - [13] P. Khayargoli, V. Loya, L. P. Lefebvre, and M. Medraj, “The impact of microstructure on the permeability of metal foams,” in *The Canadian Society for Mechanical Engineer*, 2004, pp. 220–228.
 - [14] M. Presas Mata, “Comportamiento Mecánico de Materiales Celulares de Carburo de Silicio.,” Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
 - [15] N. Kränzlin and M. Niederberger, “Controlled fabrication of porous metals from the nanometer to the macroscopic scale,” *Materials Horizons*, vol. 2, no. 4. Royal Society of Chemistry, pp. 359–377, 01-Jul-2015.
 - [16] S. Kishimoto, Q. Wang, Y. Tanaka, and Y. Kagawa, “Compressive mechanical properties of closed-cell aluminum foam-polymer composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 64, pp. 43–49, Jun. 2014.
 - [17] L. Tian *et al.*, “Undoped TiO₂ and nitrogen-doped TiO₂ thin films deposited by atomic layer deposition on planar and architected surfaces for photovoltaic applications ,” *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 33, no. 1, p. 01A141, Jan. 2015.
 - [18] J. A. Gutiérrez-Vázquez and J. Oñoro, “Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones,” *Revista de Metalurgia (Madrid)*, vol. 44, no. 5. pp. 457–476, Sep-2008.
 - [19] M. I. Romero, “Desarrollo de un proceso para obtener espumas de aleación A356, mediante la ruta de fundición empleando como agente espumante TiH₂ tratado termicamente.,” Tesis Doctoral. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, 2012.
 - [20] I. A. Irausquín, “Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía,” Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
 - [21] L. J. Gibson, “Mechanical Behavior of Metallic Foams,” *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 191–227, Aug. 2000.
 - [22] C.-J. Yu and J. Banhart, “Mechanical Properties of Metallic Foams,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 49, no. 19–20, pp. 2744–2753, 2012.
 - [23] S. C. Tzeng and W. P. Ma, “A novel approach to the manufacturing and experimental

- investigation of closed-cell Al foams,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 32, no. 5–6, pp. 473–479, Mar. 2007.
- [24] J. Li, G. Ma, H. Zhou, and X. Du, “Energy Absorption Analysis of Density Graded Aluminium Foam,” *Int. J. Prot. Struct.*, vol. 2, no. 3, pp. 333–349, Sep. 2011.
- [25] F. García-Moreno, “Commercial applications of metal foams: Their properties and production,” *Materials*, vol. 9, no. 2. MDPI AG, 2016.
- [26] M. F. Ashby, *Metal foams : a design guide*, 1st Editio. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [27] Y. Amani, A. Takahashi, P. Chantrenne, S. Maruyama, S. Dancette, and E. Maire, “Thermal conductivity of highly porous metal foams: Experimental and image based finite element analysis,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 122, pp. 1–10, Jul. 2018.
- [28] F. G. Cuevas, J. M. Montes, J. Cintas, and P. Urban, “Electrical conductivity and porosity relationship in metal foams,” *J. Porous Mater.*, vol. 16, no. 6, pp. 675–681, Dec. 2009.
- [29] G. J. Davies and S. Zhen, “Metallic foams: their production, properties and applications,” *Journal of Materials Science*, vol. 18, no. 7. Kluwer Academic Publishers, pp. 1899–1911, Jul-1983.
- [30] J. Banhart, “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams,” *Progress in Materials Science*, vol. 46, no. 6. pp. 559–632, 2001.
- [31] B. Cárcel, “Efectos de la estructura celular sobre el comportamiento mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado obtenidas por fusión,” Tesis Doctoral. Univesidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [32] B. Arifvianto and J. Zhou, “Fabrication of metallic biomedical scaffolds with the space holder method: A review,” *Materials*, vol. 7, no. 5. MDPI AG, pp. 3588–3622, 2014.
- [33] E. Abarca, “Síntesis de espumas metálicas de aluminio de celda abierta,” Tesis de Maestría. Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [34] F. Díaz del Castillo, “Espumas metálicas,” *UNAM*, 2009. [Online]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/espumas_metalicas.pdf. [Accessed: 06-Aug-2018].
- [35] CYMAT Technologies Ltd., “Aluminum Foam Cell Panel,” *Arch Daily*, 2017. [Online]. Available: <https://www.archdaily.com/catalog/us/products/10967/aluminum-foam-large-cell->

- panel-cymat-technologies-ltd. [Accessed: 19-Dec-2019].
- [36] V. I. Shapovalov and J. C. Withers, “Hydrogen technology for porous metals (Gasars) production,” in *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, vol. PartF2, Springer Verlag, 2008, pp. 29–51.
- [37] S. W. Youn and C. G. Kang, “Fabrication of foamable precursors by powder compression and induction heating process,” *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 35, no. 4, pp. 769–776, 2004.
- [38] J. Banhart and J. Baumeister, “Production methods for metallic foams,” in *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, 1998, vol. 521, pp. 121–132.
- [39] J. Prajapati, “Metal Foam by Space Holder Technique,” in *3rd International Conference on Recent Development in Engineering Science, Humanities and Management*, 2017, pp. 134–139.
- [40] N. Dukhan, *Metal foams : fundamentals and applications*, 1st ed. DesTech Publications.
- [41] Z. Xi *et al.*, “Progress of application researches of porous fiber metals,” *Materials (Basel)*, vol. 4, no. 4, pp. 816–824, 2010.
- [42] W. Yuan, Y. Tang, X. J. Yang, B. Liu, and Z. P. Wan, “Manufacture, characterization and application of porous metal-fiber sintered felt used as mass-transfer controlling medium for direct methanol fuel cells,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 23, no. 7, pp. 2085–2093, Jul. 2013.
- [43] V. Paserin, S. Marcuson, J. Shu, and D. S. Wilkinson, “CVD Technique for Inco Nickel Foam Production,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 6, no. 6, pp. 454–459, 2004.
- [44] Teachers World Association of Technology, “The practical application of metal foams,” *Engineering Design and Technology*, 2018. [Online]. Available: http://www.technologystudent.com/joints_flsh/metalfoam2.html. [Accessed: 14-Aug-2019].
- [45] S. Rybandt, C. Lies, and T. Hipke, “Train Front Module in Aluminium-foam-sandwich Design,” *Light. Des. Worldw.*, vol. 10, no. 6, pp. 12–17, Dec. 2017.
- [46] Yuan Taida New Material Co., “Foam aluminum products used in indoor the audio project,” *Sicuhuan Yuantaida Non-Ferrous Metals CO. LTD.*, 2011. [Online]. Available: ff. [Accessed: 14-Aug-2019].

- [47] A. Irretier and J. Banhart, “Lead and lead alloy foams,” *Acta Mater.*, vol. 53, pp. 4903–4917, 2005.
- [48] EXXENTIS LTD, “Porous aluminum an option to metal foam,” *EXXENTIS Porous Aluminum*, 2012. [Online]. Available: <http://www.porous-aluminum.com/metal-foam.html>. [Accessed: 14-Aug-2019].
- [49] Admatis Ltd., “Material science, metal foam, aluminium foam application.” [Online]. Available: http://www.admatis.com/eng/metalfoam_application.htm. [Accessed: 20-Dec-2019].
- [50] The Aluminum Association, “Aluminum: The Element of Sustainability,” *The Aluminum Association*, 2011. [Online]. Available: https://www.aluminum.org/sites/default/files/Aluminum_The_Element_of_Sustainability.pdf. [Accessed: 14-Aug-2019].
- [51] J. R. Davis, *ASM Specialty Handbook: Al and Al alloys*, 1st ed. ASM International, 1993.
- [52] Asociación ARPAL, “Usos y propiedades del aluminio,” *Asociación ARPAL*, 2012. [Online]. Available: <http://aluminio.org/2012/06/05/usos-y-propiedades-del-aluminio/>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [53] AZO Materials, “Aluminum-Specifications, Properties, Classification and Classes,” *AZOM*, 2012. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [54] J. I. Rajan, “Development of ultrafine grained A356 aluminum alloy by severe plastic deformation and studies on its deformation behaviour and machinability,” Tesis Doctoral. Indian Institute of Technology Madras, 2017.
- [55] D. Carmona, “Fractales,” *Universidad de las Américas*, 2003. [Online]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lap/carmona_c_dc/capitulo2.pdf. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [56] ALCOTEC, “Understanding the alloys of aluminum,” *ALCOTEC*, 2019. [Online]. Available: <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/techknowledge/understanding-the-alloys-of-aluminum.cfm>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [57] T. Chen and L. Huan, “World of fractal,” *National University of Singapore*, 2018. [Online]. Available: http://www.math.nus.edu.sg/aslaksen/gem-projects/maa/World_of_Fractal.pdf.

- [Accessed: 20-Aug-2019].
- [58] J. R. Melanson, “Fractals in Nature,” *DIY Genius*, 2019. [Online]. Available: <https://www.diygenius.com/fractals-in-nature/>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [59] Web Echoist, “Captivating Fractals Found in Nature,” *Web Echoist*, 2008. [Online]. Available: <https://www.momtastic.com/webechoist/2008/09/07/17-amazing-examples-of-fractals-in-nature/>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [60] G. Pia and U. Sanna, “An intermingled fractal units model to evaluate pore size distribution influence on thermal conductivity values in porous materials,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 65, no. 1–2, pp. 330–336, Apr. 2014.
- [61] Universidad Nacional Autónoma de México, “Curva de Koch y Copo de Nieve,” *Página del Colegio de Matemáticas*, 2019. [Online]. Available: http://prepa8.unam.mx/academia/Colegios/Matematicas/paginacolmate/applets/matematicas_VI_4/Applets_Geogebra/curvadekoch.html. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [62] J. L. Rodríguez, “Proyecto alfombra de Sierpinski,” *Virtual and Manipulative Geometrical and Topological Games*, 2014. [Online]. Available: <https://topologia.files.wordpress.com/2014/06/triptych-sierpinski-carpet-project.pdf>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [63] A. Artacho, “Viaje por el interior de una esponja de Menger,” *Matemáticas Cercanas*, 2014. [Online]. Available: <https://matematicascercanas.com/2014/09/06/viaje-por-el-interior-de-una-esponja-de-menger/>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [64] A. Al-Majdalawi Álvarez, “Fractales,” *Matemáticas en la vida cotidiana*, 2005. [Online]. Available: [https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/images/curiosidades/Trabajo Fractales \(Amir 2006\).pdf](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/images/curiosidades/Trabajo Fractales (Amir 2006).pdf). [Accessed: 20-Dec-2019].
- [65] K. J. Toro Salas, L. F. Murcia Duran, and D. Domínguez Cajeli, “Cálculo de la dimensión fractal de la falla geológica del sur occidente de Colombia,” *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 17, no. 1, pp. 35–45, Jun. 2007.
- [66] J. R. Azor, “Ejemplo de aplicación de la dimensión fractal en medicina,” *Universidad de Mendoza*, 2013. [Online]. Available: http://www.um.edu.ar/catedras/ANASEN/document/fractal/box_counting.pdf. [Accessed:

- 20-Aug-2019].
- [67] C. Carmona, A. Chaghir, and J. J. Espada, “Dimensión fractal; aparición y cálculo mediante el método de box counting,” *Universidad de Extremadura*, 2013. [Online]. Available: <https://www.unex.es/conoce-la-uex/centros/.../1exaequoDimensinFractal>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [68] J. M. Marín, “Introducción al diseño de experimentos,” *Universidad Carlos III de Madrid*, 2006. [Online]. Available: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Disenno/IntroDE.pdf>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [69] X. Weng, “Modeling of complex hydraulic fractures in naturally fractured formation,” *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, vol. 9. Elsevier Ltd, pp. 114–135, 01-Mar-2015.
- [70] Dassault Systemes, “Discrete Element Method,” *Abaqus Analysis User’s Guide*, 2017. [Online]. Available: <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/books/usb/default.htm?startat=pt04ch15s01aus94.html>. [Accessed: 15-Feb-2020].
- [71] P. Pérez, “Caracterización Numérica del efecto de la distribución de partículas espaciadoras y su dimensión fractal sobre el Módulo de Young de espumas de aluminio fabricadas por el método de infiltración,” Tesis de Maestría. Universidad Técnica Federico Santa María, 2019.
- [72] E. Gónzales Déctor, “Determinación del factor de concentración de esfuerzos en una placa con múltiples concentradores de esfuerzo mediante Algor,” *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 10, no. 19, pp. 99–107, 2016.
- [73] W. Li, D. Tan, J. Xu, S. Wang, and Y. Chen, “Finite element based Green’s function integral equation for modelling light scattering,” *Opt. Express*, vol. 27, no. 11, pp. 16047–16057, Mar. 2019.
- [74] G. Aiello, S. Alfonzetti, G. Borzì, S. A. Rizzo, and N. Salerno, “A comparison between hybrid methods: FEM-BEM versus FEM-DBCI,” *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 32, no. 6, pp. 1901–1911, 2013.
- [75] A. Carnicero, “Introducción al método de elementos finitos,” *Instituto de Investigación Tecnológica*. [Online]. Available: https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf. [Accessed:

- 20-Aug-2019].
- [76] C. Rusu, “Why do FEA engineers use 1D, 2D, 3D elements ?,” *FEA for all*, 2015. [Online]. Available: <http://feaforall.com/why-do-fea-engineers-use-1d-2d-3d-elements/>. [Accessed: 21-Dec-2019].
- [77] University of Cambridge, “Finite Element Method - Nodes, elements, degrees of freedom and boundary conditions,” 2016. [Online]. Available: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fem/node.php>. [Accessed: 21-Dec-2019].
- [78] E. Frias Valero, “Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos,” *TDX (Tesis Dr. en Xarxa)*, Nov. 2004.
- [79] Consorci de Serveis Universitaris de Catalunya, “ANSYS,” *CSUC*, 2014. [Online]. Available: <http://www.csuc.cat/es/personal/ansys>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [80] K. Resan, A. Alassadi, M. Al-Waily, and J. Mushin, “Influence of Temperature on Fatigue Life for Friction Stir Welding of Aluminum Alloy Materials,” *Int. J. Mech. Mechatronics Eng. IJMME-IJENS*, vol. 18, no. 02, p. 5, 2018.
- [81] Z. Wang, J. Gao, K. Chang, L. Meng, N. Zhang, and Z. Guo, “Manufacturing of open-cell aluminum foams: Via infiltration casting in super-gravity fields and mechanical properties,” *RSC Adv.*, vol. 8, no. 29, pp. 15933–15939, 2018.
- [82] R. D. Groot and S. D. Stoyanov, “Close packing density and fracture strength of adsorbed polydisperse particle layers,” *Soft Matter*, vol. 7, no. 10, pp. 4750–4761, May 2011.
- [83] P. Y. Julien, Y. Lan, and G. Berthault, “Experiments on stratification of heterogeneous sand mixtures,” *Bull. Soc. géol. Fr.*, vol. 164, no. 5, pp. 649–660, 1993.
- [84] C. M. Kong and J. J. Lannutti, “Effect of Agglomerate Size Distribution on Loose Packing Fraction,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 83, no. 9, pp. 2183–2188, Dec. 2004.