**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**
**VALPARAÍSO-CHILE**

# "Estudio numérico del efecto de la interfase Cu-Fe sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto de Cu reforzado con esferas huecas de Fe"

**MIRIAM EMELY VILLALOBOS JERIA**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**
**INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

| | |
|---|---|
| **PROFESOR GUÍA:** | **DR. ING. LUIS PÉREZ P.** |
| **PROFESOR CORREFERENTE:** | **DR. ISMELI ALFONSO LÓPEZ** |

**DICIEMBRE 2017**

# Agradecimientos

Para empezar, quiero agradecer a mi familia, a mi madre por su cariño, apoyo y compresión, por enseñarme a tener paciencia y que el esfuerzo vale la pena siempre. A mi padre, mi mayor ejemplo, por creer en mí, por su entrega infinita y apoyo en cada etapa de mi vida. A mis hermanos Constanza y Luis, por estar conmigo en todo este periodo, espero poder ser un ejemplo en sus vidas y seguir teniendo esta maravillosa relación.

Al Prof. Luis Pérez Pozo, quien me guio para realizar este trabajo, por su ayuda y disponibilidad de resolver cualquier duda, además de entregarme valiosos conocimientos. Por su paciencia infinita, por sus impecables correcciones, y que por a pesar de que la vida le ha colocado inconvenientes, él siempre está para sus alumnos. También a mi profesor correferente Ismeli Alfonso, por sus importantes aportes desde México, por sus correcciones y disponibilidad de su tiempo en mi trabajo.

También agradecer a mi gran amor Fabian, quien estuvo conmigo en cada tropiezo y en cada triunfo, en cada buena o mala decisión. Por su apoyo incondicional, tanto para la realización de este trabajo como para todo ámbito de mi vida, gracias por darme tantos momentos de alegría y estar conmigo siempre.

Por último, a todos mis amigos, compañeros que pasaron durante los años y que de alguna u otra manera aportaron en este trayecto llamado universidad, llenándolos de risas y buenos momentos.

# Resumen

En este trabajo de título se estudia numéricamente el efecto de la interfase Cu-Fe sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto por una matriz de cobre con esferas huecas de hierro, mediante el método de elementos finitos.

Con el desarrollo se busca plantear una alternativa para determinar una microestructura que optimice el comportamiento de este material en términos de módulo de elasticidad, reduciendo así los costos asociados a su estudio y desarrollo experimental.

Las espumas metálicas corresponden a cuerpos sólidos que poseen espacios huecos distribuidos a lo largo del material, pueden ser de poros abierto o cerrado. En la práctica los defectos que se forman de las paredes de los poros de una espuma de poro cerrado reducen las propiedades en comparación con los valores medidos por la espuma de célula abierta. Eliminar estos defectos podría mejorar su rendimiento en gran cantidad para bajas densidades. En el caso de las espumas sintácticas la porosidad se logra cuando se añaden esferas huecas, por lo que las celdas son cerradas, siendo imposible la interconexión de poros. Con este tipo de espumas se logra disminuir de manera importante la densidad de un material, manteniendo o incluso pudiendo mejorar las propiedades mecánicas del material compacto. Por tal motivo sus propiedades mecánicas son mucho mejores que las presentes para una espuma convencional.

Por otro lado, el cobre además de ser uno de los productos de exportación de Chile, es un material de gran interés en la ingeniería por sus propiedades mecánicas. Esto ha llevado a la búsqueda de aplicaciones y desarrollo de nuevos materiales en base a cobre como las espumas de cobre producidas mediante el proceso de pulvimetalurgia, que se

caracteriza por su baja densidad y alta absorción de energía al impacto. Sus aplicaciones van de intercambiadores de calor y almacenamiento de energía. Sin embargo, por su morfología de poros abiertos posee desventajas en su comportamiento mecánico.

Para este trabajo se analiza el comportamiento mecánico de espumas sintácticas de cobre con la incorporación de esferas huecas de hierro bajo diferentes condiciones de trabajo. Para esto, se modelan probetas de cobre en 3D con incorporación de esferas huecas y otras sin ellas, variando porosidad y tamaño de la geometría para fines comparativos.

Para analizar el efecto que tiene la interfase matriz-esferas en el sistema Cu-Fe se toma en cuenta que el tamaño de la interfase se relaciona con el espesor de la pared de las esferas huecas. Usando, así como indicador del tamaño de la interfase al espesor de cada esfera hueca, y así, estudiar el efecto de la interfase en las espumas sintácticas. Se realizan simulaciones para 4 espesores diferentes, donde las probetas son sometidas y analizadas con el fin de apreciar el comportamiento mecánico a medida que se genera mayor interfase.

En base a los resultados obtenidos, es posible concluir que el tamaño de la interfase Cu-Fe varía según el espesor de las esferas huecas de Fe y que el tamaño de esta interfase influye levemente en los resultados, de tal manera que a mayor espesor de esferas mayores son la interfase y el módulo elástico.

Por otro lado, el módulo de Young disminuye a medida que aumenta el porcentaje de porosidad. Por último, se aprecia que el tamaño de RVE no influye en las propiedades mecánicas de cada simulación.

# Abstract

In this work title numerically, we study the effect of the Cu-Fe interface on the mechanical properties of a material composed of a copper matrix with hollow spheres iron by the finite element method.

With the development seeks to offer an alternative to determine a microstructure to optimize the behavior of this material in terms of modulus of elasticity, thus reducing the costs associated with study and experimental development.

Metal foams correspond to solid bodies having voids distributed throughout the material, can be open or closed pores. In practice defects that form the walls of the pores of a closed-cell foam reduced properties compared to measure by the open cell foam values. Eliminate these defects could improve their performance in large quantities for low densities. In the case of syntactic foams porosity is achieved when hollow spheres added, so that the cells are closed, making it impossible interconnecting pores. With this type of foam is achieved substantially lower density material, while maintaining or even can improve the mechanical properties of compact material.

On the other hand, copper as well as being one of the export products of Chile, it is a material of great interest in engineering for their mechanical properties. This has led to the search for and development of new applications based on copper materials such as copper foams produced by the process of powder metallurgy, which is characterized by its low density and high impact energy absorption. Its applications range of heat exchangers and energy storage. However, open pore morphology has disadvantages in their mechanical behavior.

For this work the mechanical behavior of syntactic foams of copper by incorporating hollow spheres iron under different working conditions is analyzed. To this, copper samples are modeled 3D incorporating hollow spheres with and some without varying porosity and geometry size for comparative purposes.

To analyze the effect of the interface matrix-spheres in the Cu-Fe system is considered that the size of the interface is related to the wall thickness of the hollow spheres. Using and size indicator interfacial thickness of each hollow sphere, and thus study the effect of the interface in syntactic foams simulations for four different thicknesses, where the samples are submitted and analyzed to assess the mechanical behavior as more interface is generated is performed.

Based on the results obtained, one can conclude that the size of the Cu-Fe interface varies according to the thickness of the hollow spheres of Fe and the size of this interface, affects slightly on the results, so that a greater thickness larger spheres are the interface and elastic modulus.

Furthermore, the Young's modulus decreases with increasing the percent porosity. Finally, we see that the RVE size does not affect the mechanical properties of each simulation.

# Índice general

Agradecimientos ..... I

Resumen ..... II

Abstract ..... IV

Índice general ..... VI

Índice de figuras ..... XI

Índice de tablas ..... XVII

Simbología ..... XX

1. Introducción ..... 1

2. Objetivos ..... 3

2.1 Objetivos generales ..... 3

2.2 Objetivos Específicos ..... 3

3. Antecedentes ..... 4

3.1 Sólidos celulares ..... 4

3.1.1 Estructura ..... 5

3.2 Espumas metálicas ..... 6

3.2.2 Fabricación ..... 7

3.2.3 Aplicaciones ..... 13

3.2.3.1 Intercambiadores de Calor ..... 13

3.2.3.2 Industria automotriz ..... 14

3.2.3.3 Industria aeroespacial ..... 15

3.2.3.4 Construcción de barcos ..... 15

3.2.3.5 Estructuras livianas ..... 16

3.3 Espuma sintáctica de matriz metálica ..... 17

3.3.1 Partículas huecas ..... 18

3.3.2 Métodos de síntesis para espumas sintácticas ..... 20

3.3.3 Microestructura ..... 21

3.3.4 Propiedades mecánicas ..... 23

3.3.5 Aplicaciones ..... 24

3.4 Espumas de cobre ..... 25

3.5 Homogenización ..... 27

3.5.1 Homogenización micro-mecánica de espumas sintácticas ..... 29

3.5.2 Homogenización numérica ..... 31

3.6 Método de elementos finitos ..... 32

3.6.1 Introducción ..... 32

3.6.2 Discretización ..... 32

3.6.3 Mallado ..... 34

3.6.4 Calidad del mallado ..... 35

3.7 Estudios relacionados ..... 38

3.7.1 Efecto de la interfaz en espumas sintácticas ..... 42

3.7.2 Interfaz Cu-Fe ..... 44

4. Análisis MEF de espumas sintácticas de Cu reforzadas con esferas de Fe. **¡Error! Marcador no definido.**

4.1 Simulación ..... 49

4.1.1 Geometrías ..... 51

4.1.2 Propiedades del material ..... 55

4.1.3 Mallado ..... 56

4.1.3.1 Mallado de esferas ..... 58

4.1.4 Condiciones de contorno ..... 60

4.2 Cálculo de propiedades mecánicas para las espumas sintácticas de matriz de Cu reforzadas con esferas hueca de Fe. ..... 63

4.3 Resultados ..... 64

4.3.1 Simulación ..... 64

4.3.2 Cálculos ..... 65

4.4 Análisis de Resultados ..... 71

5. Efecto de la interfase Cu-Fe en espumas sintácticas de Cu reforzadas con esferas Fe. ..... 72

5.1 Desarrollo ..... 73

5.1.1 Mallado ..... 73

5.2 Resultados ..... 74

6. Conclusiones ..... 77

7. Trabajos Futuros ..... 78

8. Referencias ..... 79

9. Anexos ..... 86

9.1 Mallado ..... 86

9.2 Resultados de las simulaciones ..... 96

# Índice de figuras

Figura 1. Comparación entre un a) sólido celular y un b) material poroso ..... 4

Figura 2. Solido celular bidimensional. ..... 5

Figura 3. Sólido celular tridimensional de Cobre ..... 5

Figura 4. Espuma de aluminio de poro abierto fabricada en molde de yeso por infiltración de aluminio fundido en una espuma polimérica ..... 6

Figura 5. Espuma de aluminio de poro cerrado ..... 7

Figura 6. Esquema del método de espumante de líquido por inyección de gas ..... 8

Figura 7. Esquema del proceso de fabricación por inyección de gas ..... 9

Figura 8. Planchas de espuma de dos diferentes densidades y tamaños de celda producidas mediante el método de inyección de gas (muestra: Hydro Aluminium, Noruega) ..... 10

Figura 9. Esquema del método de espumado de líquidos con agentes soplantes ..... 11

Figura 10. Espuma metálica obtenida mediante método Gasar ..... 12

Figura 11. Fabricación de espuma por sinterización de mezcla de polvos metálicos. 12

Figura 12. Bomba de calor con espuma metálica ..... 13

Figura 13. (a) Prototipos de amortiguadores de choques basados en extrusiones de Al con relleno de espuma de aluminio. (b) Caja de impacto con espuma de aluminio de dos densidades. (c) Prototipo de soportes de motor BMW con núcleo de espuma metálica ..... 14

Figura 14. Cono espacial ..... 15

Figura 15. Paneles de Aluminio y Estructuras paneles de abeja de aluminio ..... 16

Figura 16. Placa sándwich de acero con núcleo de espuma ..... 16

Figura 17. Espuma sintáctica ..... 17

Figura 18. Micrografía óptica de micro balones de vidrio ..... 19

Figura 19. Ceno esferas de cenizas volantes sobre un sustrato ..... 20

Figura 20. MMSFs de aluminio ..... 22

Figura 21. Ejemplo de espuma de Cobre de poro abierto ..... 26

Figura 22. Escalas de homogenización ..... 27

Figura 23. Cuerpo macroscópico con tres posibles microestructuras: matriz con inclusiones elípticas, agregando poli cristalino y laminado periódico..... 28

Figura 24. Elemento de volumen representativo (RVE)..... 29

Figura 25. Resolución del problema de una inclusión sometida a la transformación representada por el tensor (ЄT), Eshelby..... 30

Figura 26. Problemas similares a Eshelby relevantes para las técnicas de homogeneización..... 31

Figura 27. Proceso de discretización..... 33

Figura 28. Procedimiento de elementos finitos ..... 34

Figura 29. Malla de elementos finitos utilizada en la simulación del comportamiento de materiales compuesto-reforzados con fibras continuas, Nakamura & Suresh (1993) ..... 35

Figura 30. Aumento de la suavidad en el mallado de un elemento..... 36

Figura 31. a) Relación de aspecto deseada contrapuesta con b) un elemento que no cumple las características..... 36

Figura 32. Formas de Celdas en una malla. ..... 37

Figura 33. Imagen de microscopio óptico en a) baja y b) alta ampliación. ..... 39

Figura 34. Esquema de la cámara de infiltración. ..... 40

Figura 35. Probetas estudiadas a una compresión del 50% ..... 41

Figura 36. Curva Esfuerzo vs Deformación. ..... 41

Figura 37.(a) Modelo trifásico con espuma sintáctica con interfaz imperfecta. (b) Aproximación de la capa de resorte lineal de la imperfección de la interfaz con t<<a [ ..... 43

Figura 38. Representación esquemática de las regiones discretas en el límite heterogéneo de la interfase Cobre/Hierro ..... 46

Figura 39. Migración del cobre fundido al hierro sólido a temperaturas que van de 1100°C a 1400°C ..... 47

Figura 40. Cantidad de espesor que penetra el Cu en el hierro sólido. ..... 48

Figura 41. Ventana principal de la simulación. ..... 50

Figura 42. Diagrama del procedimiento de la simulación. ..... 51

Figura 43. Geometrías de espumas sintácticas. ..... 52

Figura 44. Geometrías de espumas convencionales. ..... 53

Figura 45. Especificaciones de mallado. ..... 57

Figura 46. Mallado para espumas con a) esferas y b) poros. ..... 58

Figura 47. Especificaciones método de triángulos..... 59

Figura 48. Características de mallado para esferas huecas de hierro. ..... 59

Figura 49.Condición de desplazamiento de la cara inferior de la probeta. ..... 60

Figura 50. Restricciones para cara inferior. ..... 61

Figura 51. Condición de desplazamiento remoto en la cara superior. ..... 61

Figura 52. Detalle de la condición de desplazamiento remoto. ..... 62

Figura 53. Detalle de la fuerza de reacción..... 62

Figura 54. Fuerza de reacción para probetas con 44% de porosidad y 8 $mm$ de tamaño. a) Probeta con esferas y b) probeta con poros..... 65

Figura 55. Gráfico para el estudio del comportamiento del Módulo de Young versus la porosidad para probetas de 8 $mm$, con esferas y con poros..... 68

Figura 56. Gráfico para el estudio del comportamiento del Módulo de Young versus la porosidad para probetas de 9 $mm$, con esferas y con poros..... 69

Figura 57. Gráfico para el estudio del comportamiento del Módulo de Young versus la porosidad para probetas de 10 $mm$, con esferas y con poros..... 69

Figura 58. Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de los distintos tamaños de espuma con esfera hueca. ..... 70

Figura 59. Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de los distintos tamaños de espuma con poros. ..... 70

Figura 60. Detalle de la modificación en el espesor. ..... 73

Figura 61. Comportamiento en la variación de espesores de esferas para probetas de diferente porosidad y tamaño de 8 $mm$. ..... 74

Figura 62. Comportamiento en la variación de espesores de esferas para probetas de diferente porosidad y tamaño 9 $mm$. ..... 75

Figura 63. Comportamiento en la variación de espesores de esferas para probetas de diferente porosidad y tamaño 10 $mm$. ..... 75

Figura 64. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma a). ..... 86

Figura 65. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma b). ..... 87

Figura 66. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma c). ..... 88

Figura 67. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma d). ..... 89

Figura 68. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma e). ..... 90

Figura 69. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma f). ..... 91

Figura 70. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma g). ..... 92

Figura 71. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma h). ..... 93

Figura 72. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma i). ..... 94

Figura 73. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma j). ..... 95

# Índice de tablas

Tabla 1. Calidad de malla respecto a su factor de asimetría. ..... 37

Tabla 2. Características de microesferas Globomet. ..... 39

Tabla 3. Características de las geometrías cilíndricas utilizadas. ..... 54

Tabla 4. Características para las microesferas. ..... 55

Tabla 5. Propiedades del Cobre. ..... 55

Tabla 6.Propiedades del Hierro. ..... 56

Tabla 7.Resumen de resultados para espumas sintácticas de Cu con esferas huecas de Fe. ..... 66

Tabla 8. Resumen de resultados para geometrías con poros. ..... 67

Tabla 9. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma a). ..... 86

Tabla 10. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma b). ..... 87

Tabla 11. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma c). ..... 88

Tabla 12. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma d). ..... 89

Tabla 13. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma e). ..... 90

Tabla 14. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma f). ..... 91

Tabla 15. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma g)..... 92

Tabla 16. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma h)..... 93

Tabla 17. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma i)..... 94

Tabla 18. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma j)..... 95

Tabla 19. Resultados de las fuerzas de reacción de probetas de 8 mm..... 96

Tabla 20. Resultados de la fuerza de reacción en probetas de 9 mm..... 97

Tabla 21. Resultado de la fuerza de reacción de probeta 10 mm..... 99

Tabla 22. Resumen de cálculos probeta de 8 mm..... 101

Tabla 23. Resumen de cálculos probeta 9 mm..... 101

Tabla 24. Resumen de cálculos probeta 10 mm..... 102

# Simbología

$\rho$: Densidad Relativa.

Al: Aluminio.

Cu: Cobre.

Fe: Hierro.

E: Modulo de Young.

MEF: Método de elementos finitos.

MMFS: Espuma sintáctica de matriz metálica.

GM: Globomet.

$\varepsilon$: Deformación.

$\sigma$: Esfuerzo.

GPa: Gigapascal.

MPa: Megapascal.

# 1. Introducción

Las espumas metálicas corresponden a cuerpos sólidos que poseen espacios huecos distribuidos a lo largo del material, que pueden ser de poros abiertos o cerrados, por lo que presenta múltiples ventajas debido a su baja densidad en combinación con buenas propiedades mecánicas, térmicas y acústicas. Por otra parte, estas pueden ser fabricadas a través de diferentes técnicas según el estado del metal al inicio del proceso, es decir, por vía sólida, vía liquida o deposición [1].

Debido a sus características, las espumas metálicas pueden ser empleadas en diversos campos tecnológicos. Sus propiedades físicas y químicas hacen que éstas sean atractivas para aplicaciones industriales que requieran estructuras livianas, filtros para absorber energía, implantes óseos, industria automotriz, entre otros [2].

En la práctica los defectos que se forman en las paredes de los poros de una espuma de poro cerrado reducen las propiedades medidas en comparación con los valores medidos por las espumas de célula abierta. Las eliminaciones de estos defectos podrían mejorar su rendimiento en gran cantidad para bajas densidades. Un método innovador para incorporar la porosidad es el uso de partículas huecas como material de relleno. Las espumas sintácticas son compuestos que incorporan partículas huecas en una matriz en que la porosidad encerrada dentro de la capa fina de partícula conduce a una baja densidad sin disminuir las propiedades mecánicas [3].

Por otro lado, el cobre es el principal producto de exportación del país, ha despertado un interés ingenieril por sus propiedades tanto físicas, mecánicas, químicas y biológicas. Entre sus propiedades de mayor interés se destacan: antimicrobianas, su resistencia a la corrosión, conductividad térmica y eléctrica. Esto ha llevado a la creciente búsqueda de nuevas aplicaciones y el desarrollo de nuevos materiales en base

de cobre, entre ellos las espumas de cobre, material que se caracteriza por su baja densidad y alta absorción de energía al impacto, además de alta permeabilidad [4].

Sin embargo, las espumas de cobre presentan desventajas que podrían mejorar, entre ellas; resistencia mecánica, distribución de poros, control del tamaño, poros interconectados, coalencia, etc. A raíz de lo anterior, se propone incorporar esferas huecas de hierro a una espuma de cobre, lo cual pretende mejorar las propiedades mecánicas sin afectar sus propiedades físicas. No obstante, el estudio de la adición de esferas huecas a espumas de otros materiales ha sido reciente, por esto, se requiere una elevada cantidad de ensayos, métodos de fabricación, medición de porosidad y ensayos de compresión para poder desarrollar un análisis del comportamiento mecánico de las espumas sintácticas. Además, tener en consideración el efecto que posee la interfase entre el material de la matriz y las esferas huecas para los ensayos.

En este trabajo de titulación se estudia el efecto del sistema Cu-Fe en la interface de espumas sintácticas de cobre con esferas huecas de Fe, mediante simulaciones numéricas a través del método de elementos finitos.

# 2. Objetivos

## 2.1 Objetivos generales

El objetivo general de este trabajo es estudiar numéricamente, mediante el método de elementos finitos (MEF), el efecto de la interfase Cu-Fe sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto de una matriz de cobre reforzado con esferas huecas de hierro. Con el desarrollo de este trabajo se busca plantear una alternativa para determinar una microestructura que optimice el comportamiento de este material en términos de módulo de elasticidad, reduciendo así los costos asociados a su estudio y desarrollo experimental.

## 2.2 Objetivos Específicos

Para cumplir el propósito antes señalado se deben abordar los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un modelo 3D del material de cobre reforzado con esferas huecas de hierro en estudio.
- Caracterizar numéricamente el material compuesto utilizando un software comercial como herramienta de análisis.
- Estudiar la información disponible acerca de la interfase Cu-Fe.
- Desarrollar el espesor de pared de esferas huecas como indicador para cuantificar el efecto de la interfase Cu-Fe sobre las propiedades mecánicas del material en estudio.
- Analizar los resultados obtenidos para diferentes distribuciones y características de las esferas huecas de Fe.

Presentar las conclusiones del trabajo desarrollado

# 3. Antecedentes

## 3.1 Sólidos celulares

Un sólido celular puede definirse como aquel formado por una red de celdas poliédricas o poligonales unidas entre sí formando mallas bidimensionales o tridimensionales [5]. Una de las características principales es su densidad relativa ($\rho$) definida como la fracción entre la densidad del material y la densidad del sólido macizo. En general, se llama sólido celular cuando la densidad relativa es menor a 0,3 y sólido poroso cuando esta densidad es mayor a 0,3. En la Figura 1 se muestra gráficamente la comparación en 2 dimensiones de un sólido celular y de material poroso.

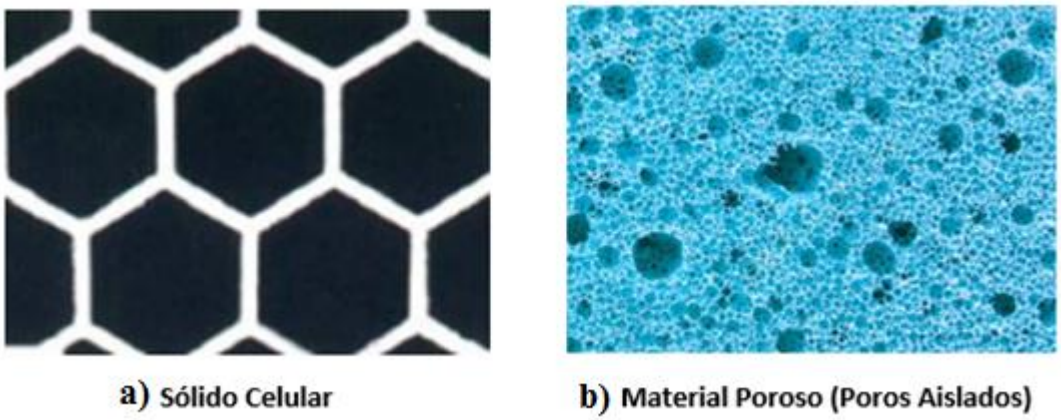


Figura 1. Comparación entre un a) sólido celular y un b) material poroso [5].

Según su origen los sólidos celulares se pueden clasificar en: natural (madera, corcho, esponja, coral, hueso) y en artificial (espumas, poliuretano, polietileno, pan, etc.).

### 3.1.1 Estructura

Los sólidos celulares se pueden dividir según su estructura en:

- Células bidimensionales, en que las paredes celulares tienen un patrón común como el caso de los paneles de abeja mostrado en la Figura 2.
- Células tridimensionales, como se muestra la Figura 3 en que las paredes celulares tienen orientaciones aleatorias en el espacio, entre estas células existe la distinción entre células cerradas, es decir que cada célula está sellada por sus vecinos por caras de tipo membrana, y en las que están abiertas, en donde las células se interconectan entre sí.

Figura 2. Solido celular bidimensional.

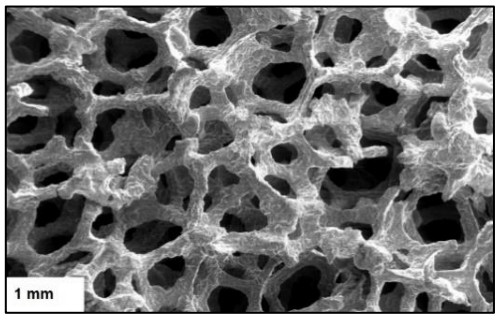


Figura 3. Sólido celular tridimensional de Cobre [5].

## 3.2 Espumas metálicas

Las espumas metálicas constituyen una relativamente nueva clase de material, están formados por una estructura porosa compuesta de una matriz metálica sólida y células llenas de algún gas. Éstas corresponden a un caso particular de los sólidos celulares y que, como tales, poseen características específicas que lo distinguen. Su atractivo se resume a que poseen bajas densidades en combinación con buenas propiedades mecánicas, térmicas y acústicas.

La mayor parte de la estructura de una espuma metálica está formada por poros que pueden ser abiertos (interconectados) y cerrados en que cada poro se encuentra separado entre sí. En las Figuras 4 y 5 se muestran espumas de aluminio con poros abierto y cerrado respectivamente.

Actualmente, las más estudiadas son las espumas de aluminio, por su combinación de propiedades físicas y mecánicas tales como la rigidez junto a un bajo peso específico. Pero también se encuentran disponibles estudios sobre espumas de diferentes metales como níquel, cobre, titanio, zinc [6].

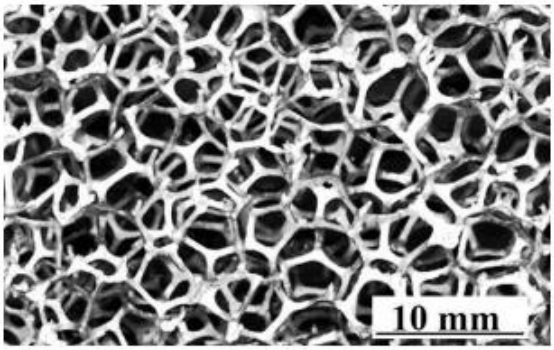


Figura 4. Espuma de aluminio de poro abierto fabricada en molde de yeso por infiltración de aluminio fundido en una espuma polimérica [6].

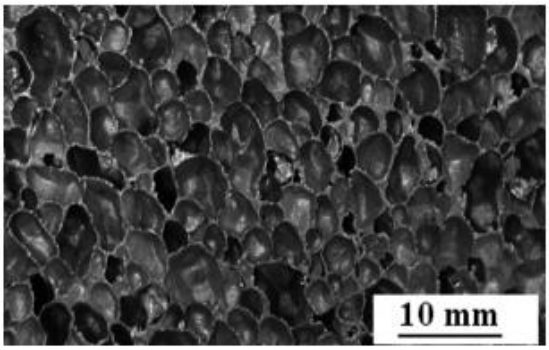


Figura 5. Espuma de aluminio de poro cerrado [6].

Las características de una espuma metálica dependen directamente de los siguientes parámetros:

- *Porosidad*: La porosidad está definida como el volumen vacío de la muestra porosa dividido por el volumen total de la misma muestra. A mayor porosidad de la muestra su masa disminuye.
- *Tamaño de poro*: Corresponde al diámetro de una de las caras de un dodecaedro que se utiliza para aproximar cada uno de los poros en una espuma metálica. Debido a que el tamaño de cada uno de los poros en una espuma metálica no es homogéneo, se toma un promedio estadístico de la muestra.
- *Densidad de poro*: La densidad de poro es por lo general la cantidad de poros por pulgada contados de forma lineal.

### 3.2.2 Fabricación

Existen diversos métodos para la fabricación de espumas metálicas. Dentro de los más comunes se encuentra; el espumado de líquidos por inyección de gas, espumado de líquidos con agentes espumantes, solidificación eutéctica de solidos-gas, y metalúrgica de polvos [1].

El proceso de espumante mediante inyección de gas es uno de los más fáciles implementados en aleaciones de Al, ya que posee una baja densidad y no se oxida tanto cuando es expuesto al aire o a otros gases con oxígeno. El Al puro o aleación es fundida y se añade entre 5-15% en peso de partículas de cerámicas (carburo de silicio, alúmina o magnesia) para incrementar la viscosidad. Posteriormente es espumado por la inyección de gases (aire, nitrógeno o argón) utilizando impulsores rotatorios o soplantes vibratorios, se produce una mezcla viscosa que flota en la superficie del líquido formando una masa uniforme de burbujas de gas en el metal fundido (Figura 6). La presencia de partículas en el líquido hace que la espuma sea relativamente estable. En la Figura 7 se muestra un esquema del proceso mencionado.

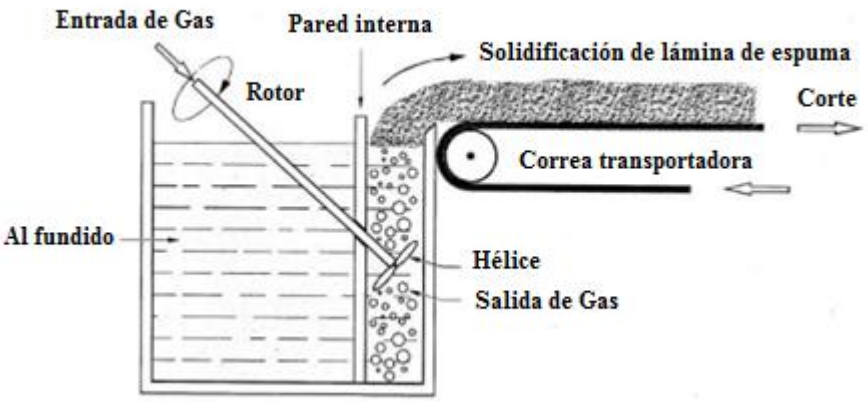


Figura 6. Esquema del método de espumante de líquido por inyección de gas [2].

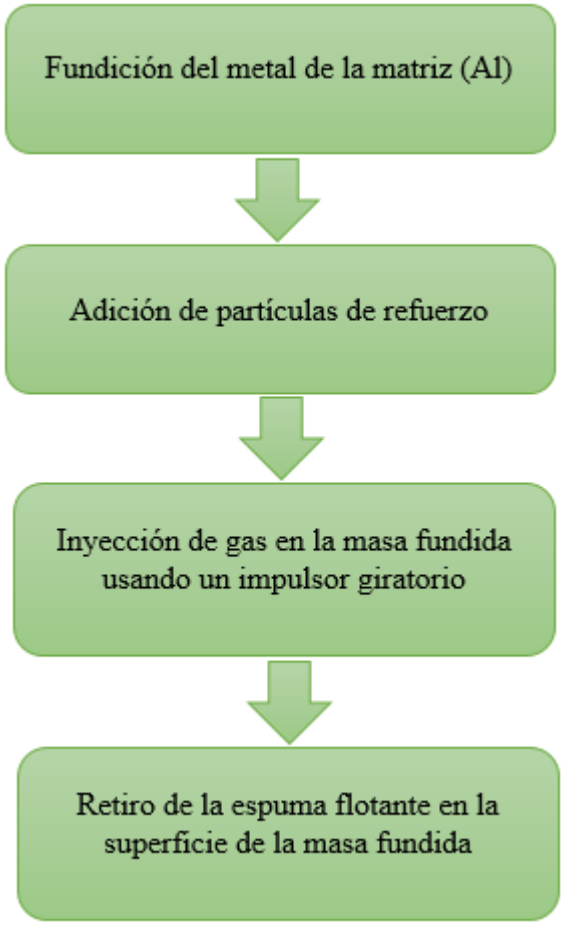


Figura 7. Esquema del proceso de fabricación por inyección de gas [1].

La extracción y solidificación de la espuma permite obtener planchas continuas de longitud y espesores variables. Un ejemplo de espumas fabricadas por el método de inyección de gas se presenta en la Figura 8.

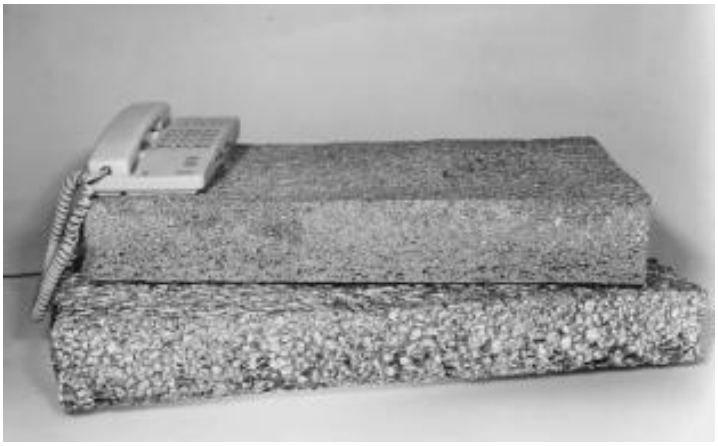

Figura 8. Planchas de espuma de dos diferentes densidades y tamaños de celda producidas mediante el método de inyección de gas (muestra: Hydro Aluminium, Noruega) [2].

El segundo método que mencionar es Alporas [7], consiste en agregar el metal fundido mediante un agente espumante o compuesto, que al descomponerse a una determinada temperatura emite un gas que inicia el proceso de espumado. Usando un agente espumante sólido es posible dispersar el gas uniformemente a lo largo del metal fundido, dando lugar a un mayor control sobre la localización y tamaño de los poros, de forma que puedan obtenerse pequeños y con una distribución más uniforme. El proceso requiere aumentar la viscosidad del metal para impedir que las burbujas de gas floten, se unan o escapen al exterior. Esto se logra mezclando polvos o fibras en el metal fundido.

La Compañía de Alambre Shinko desarrolla el método Alporas, mezclando aproximadamente 1,5% de Ca o Mg en una fundición de aluminio a 680°C, para aumentar su viscosidad. Después que la viscosidad alcanza el valor deseado se agrega 1,6 % de $TiH_2$, el cual libera gas (hidrógeno) y titanio que entra en solución sólida. Esto provoca la espumación del aluminio fundido con porosidades entre 84 y 95%, tamaños de poro promedio de 2 a 10 $mm$ y densidades típicamente entre 0,18 y 0,24 $g/mm^3$. Posteriormente es enfriado para luego fabricar piezas de dimensiones 2050 ×

650 × 450 $mm$ y de un peso superior a 160 $Kg$. Dicho proceso se muestra gráficamente en la Figura 9.

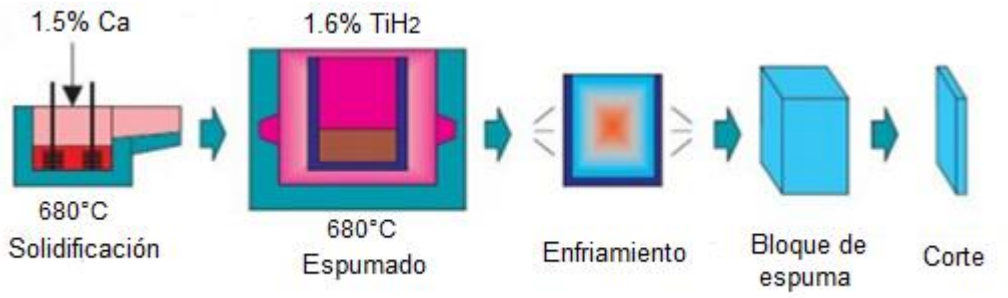


Figura 9. Esquema del método de espumado de líquidos con agentes soplantes [8].

El siguiente método es la solidificación eutéctica de solidos-gas, también llamado "GASAR", (termino desarrollado en la Academia Estatal de Metalurgia de Ucrania, en 1993, que *significa reforzado con gas*). El proceso utiliza el metal fundido para producir un material espumable (precursor), donde el hidruro de titanio, al elevar la temperatura, produce una capa de óxido de titanio en la superficie, que limita la permeabilidad al hidrógeno. El hidruro es entonces, mezclado en el aluminio fundido (agregando las partículas de carburo de silicio para aumentar la viscosidad); la capa de óxido en las partículas del hidruro de titanio actúa como una barrera para retardar su descomposición dentro del metal líquido durante un tiempo suficiente para que disperse dentro de la fundición. Esto produce un precursor ligeramente poroso hecho de metal, agente espumante y carburo de silicio que puede ser cortado y almacenado [8].

La Figura 10 muestra un ejemplo de espuma obtenida mediante este proceso, donde se puede apreciar que se generan poros alargados y orientados en la dirección de solidificación.

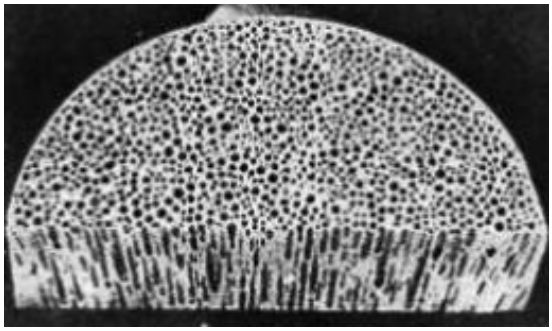

Figura 10. Espuma metálica obtenida mediante método Gasar [8].

Otro método de fabricación es el de metalúrgica de polvos. El proceso comienza con la mezcla de polvos con un agente espaciador, luego la mezcla es compactada obteniendo un producto denso semiacabado. Posteriormente se realiza un tratamiento térmico a temperaturas cercanas al punto de fusión de los polvos, así se descompone el agente espaciador y se libera el gas que forma los poros (Figura 11). Esa técnica aparte de servir para el aluminio se utiliza para otros metales y aleaciones como estaño, plomo, latón y oro los cuales también pueden ser espumados.

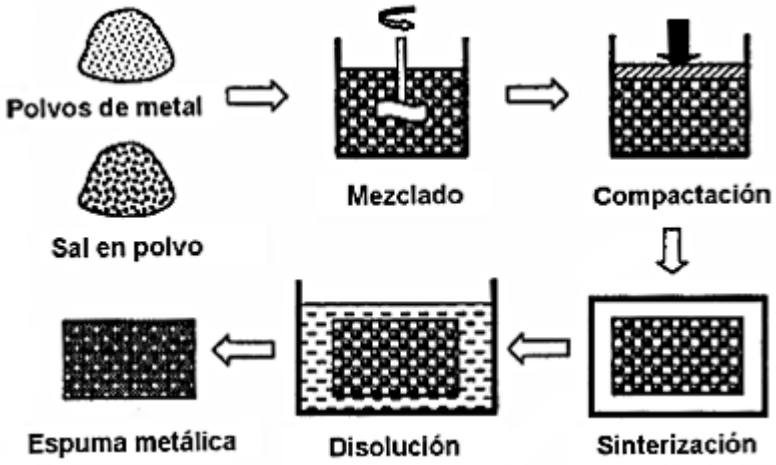


Figura 11. Fabricación de espuma por sinterización de mezcla de polvos metálicos [9].

### 3.2.3 Aplicaciones

Las espumas metálicas tienen una combinación de propiedades que las hacen atractivas para numerosas aplicaciones ingenieriles. Las espumas de poro cerrado se distinguen por presentar mayor rigidez y buen aislamiento acústico [2], se usan comúnmente en aplicaciones estructurales mientras que las de poros abiertos presentan buenas propiedades para aplicaciones específicas en donde se requiere que un fluido fluya a través de la estructura, como filtros, separadores, intercambiadores de calor, etc. A continuación, se detallan algunas aplicaciones de las espumas metálicas.

#### 3.2.3.1 Intercambiadores de Calor

Las espumas de aluminio y cobre [4] pueden utilizarse como intercambiadores de calor por su alta conductividad. Para este caso las espumas deben tener porosidad abierta. Los gases o líquidos pueden recibir o ceder calor fluyendo por la espuma previamente calentada o enfriada. Debido a la porosidad abierta la caída de presión puede minimizarse.

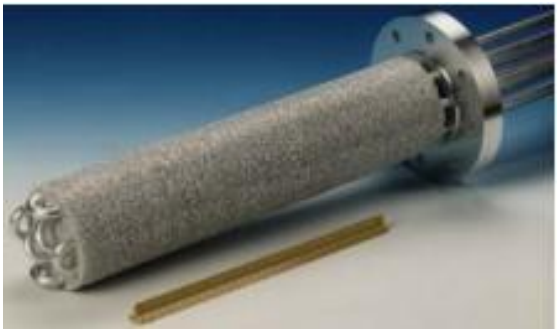

Figura 12. Bomba de calor con espuma metálica [9].

### 3.2.3.2 Industria automotriz

Las espumas de aluminio presentan buenas propiedades frente a un amplio rango de esfuerzos, se deforman proporcionalmente a la carga soportada y la absorción de energía es aproximadamente isotrópica. Frente a los impactos las espumas de aluminio tienen un mejor comportamiento que las espumas poliméricas, debido a su mayor deformabilidad, presentando un bajo índice de rebote en situaciones de choque dinámico, evaluado en menos de un 3 %, frente al 15 % de las espumas de poliuretano [10]. Las espumas de aluminio se están utilizando en diferentes partes de vehículos de BMW y Audi, donde han supuesto un aligeramiento estructural del 30% (según pruebas de BMW), además de reforzar la seguridad debido a los absorbentes de impacto y la mejoría del índice NVH (ruido, vibración y rigidez) [11]. Al sustituir componentes fabricados tradicionalmente en acero por espumas de aluminio no solo se reduce el peso en un 25 %, sino que, además, se aumenta la rigidez en un 700 %. En la Figura 13 se muestran partes fabricadas con espumas de aluminio en la industria automotriz.

Figura 13. (a) Prototipos de amortiguadores de choques basados en extrusiones de Al con relleno de espuma de aluminio. (b) Caja de impacto con espuma de aluminio de dos densidades. (c) Prototipo de soportes de motor BMW con núcleo de espuma metálica [12].

### 3.2.3.3 Industria aeroespacial

En tecnología espacial, se desarrolla el uso de espumas de aluminio como elementos que sean capaces de absorber impactos para el aterrizaje de los vehículos espaciales y como refuerzo para estructuras de carga en satélites, remplazando materiales que presentan problemas en ambientes adversos en el espacio (cambios de temperatura, vacío, etc.) [2].

La Figura 14 muestra la estructura tipo sándwich de un cono espacial y las direcciones de carga ensayadas.

Figura 14. Cono espacial [2].

### 3.2.3.4 Construcción de barcos

Los barcos de pasajeros modernos pueden estar enteramente construidos a partir de aleaciones de aluminio: paneles de aluminio y estructuras de panales de abeja de aluminio (ver Figura 15). Además, debido a la baja densidad que las espumas metálicas

presentan, se experimenta sustituir las placas de acero de los buques, y con ello, reducir su peso hasta un 30%.

Figura 15. Paneles de Aluminio y Estructuras paneles de abeja de aluminio [13-14].

### 3.2.3.5 Estructuras livianas

La Figura 16 muestra estructuras tipo sándwich que están constituidas por dos revestimientos unidos a un cuerpo central ligero. Dan como resultados un panel de gran rigidez y peso. Estas estructuras livianas tienen aplicaciones en vehículos, atenuación de ruidos, sistemas de protección contra incendios etc.

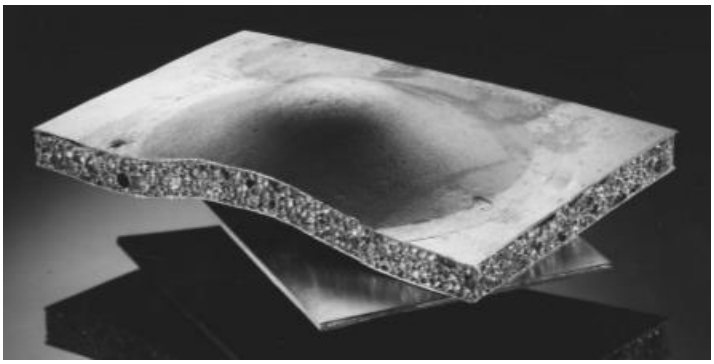

Figura 16. Placa sándwich de acero con núcleo de espuma [2].

## 3.3 Espuma sintáctica de matriz metálica

Las espumas metálicas de célula abierta alcanzan propiedades mecánicas cercanas a las predicciones teóricas, mientras que las de celda cerrada exceden de las de celda abierta. En la práctica los defectos que se forman de las paredes de los poros de una espuma de poro cerrado reducen las propiedades medidas en comparación con los valores medidos por las espumas de célula abierta. Las eliminaciones de estos defectos podrían mejorar su rendimiento en gran cantidad para bajas densidades. Un método innovador para incorporar la porosidad en materiales es el uso de partículas huecas como relleno.

Las partículas huecas se unen para formar una espuma porosa, los espacios intersticiales del conjunto se llenan con un material de unión, un metal que sea de baja temperatura de fusión, a tal material se le denomina espuma sintáctica de matriz metálica (MMSFs) (ver Figura 17).

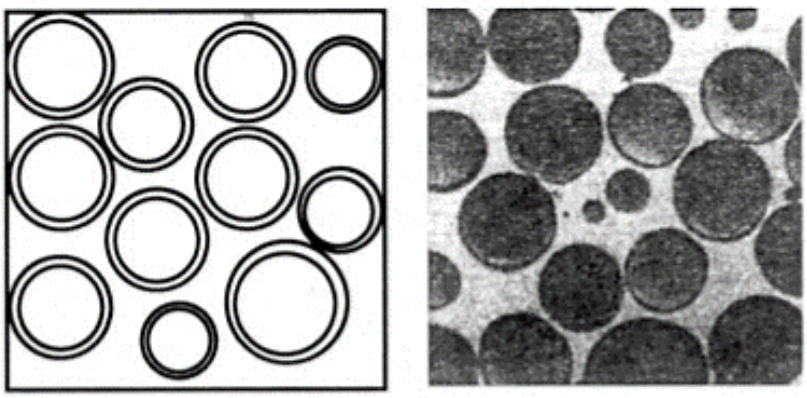

Figura 17. Espuma sintáctica [3].

Las espumas sintácticas de matriz metálica son compuestos que incorporan partículas huecas en una matriz, en que la porosidad encerrada dentro de la capa fina de partícula conduce a una baja densidad sin grandes disminuciones en las propiedades mecánicas.

Las MMSFs proporcionan una microestructura capaz de mejorar las propiedades de las estructuras metálicas, conduciendo a materiales porosos que tienen un módulo elástico y una resistencia significativamente mayor que las espumas convencionales, ya que se genera un mayor control en el tamaño, en la morfología de poros y coalecencia. Además, permite una mejor distribución de esfuerzos debido a su forma esférica y aumento en la rigidez de las paredes celulares de la espuma.

El material de la matriz es generalmente Al, pero también hoy en día se estudian matrices de hierro [15], magnesio [16], Zn [17] y Ti [18].

### 3.3.1 Partículas huecas

Las partículas huecas pueden ser fabricadas a partir de una gama de materiales. Una de las más comunes son las de cerámica de paredes finas que son beneficiosas en la síntesis de las espumas sintácticas de baja densidad. Actualmente se encuentran disponibles numerosos tipos de partículas de cerámicas huecas que se pueden utilizar para este fin. Aparte de la modificación de la propiedad mecánica, su uso proporciona una mayor estabilidad dimensional al compuesto reduciendo el coeficiente de expansión térmica.

Existen dos tipos de partículas huecas ampliamente utilizados en la síntesis de espumas sintácticas. El primer tipo son los micro balones, que son microesferas huecas de alta calidad que se producen comercialmente y tienen propiedades controladas como

diámetro, distribución de tamaño, grosor de pared. Estas partículas pasan por control de calidad tales como presión a niveles para la fractura y eliminación de partículas más débiles y defectuosas, flotación o clasificación de aire para seleccionar solo las intactas de baja densidad y tamaños dados. Además de micro balones de cerámica existen de vidrio (Figura 18), Además de los materiales de relleno ya mencionados se fabrican esferas huecas de cerámicas de óxido de mixto [19,20], metálicas [19], Sic [21], Perlita [22].

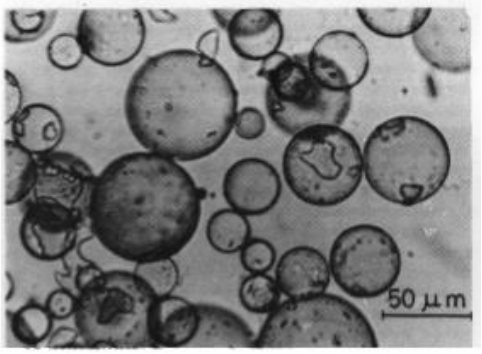


Figura 18. Micrografía óptica de micro balones de vidrio [23].

Las segundas partículas de uso común son las ceno esferas de ceniza volante (Figura 19) las cuales se producen durante el proceso de combustión del carbón y es un subproducto de desechos industriales. La incorporación de ceno esferas en los metales puede conducir a ahorros sustanciales en el costo de materias primas y reducir la contaminación que se genera en la producción de metales como el aluminio, que consume mucha energía en su producción. Las partículas de cenizas volantes tienen predominantemente $SiO_2$, $Al_2O_3$ y $Fe_2O_3$ en su estructura.

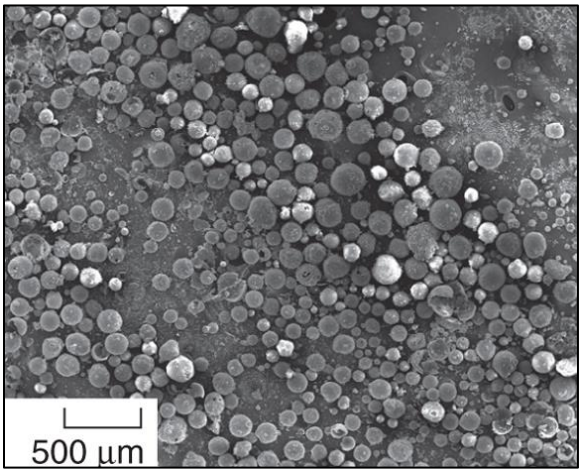


Figura 19. Ceno esferas de cenizas volantes sobre un sustrato [24].

### 3.3.2 Métodos de síntesis para espumas sintácticas

Se utilizan tres métodos de síntesis para espumas sintácticas: la infiltración a presión, fundición en agitación y metalurgia de polvos. Estos sistemas tienen ventajas y limitaciones según el material y composición del sistema.

En la infiltración a presión se prepara una red de partículas envasadas de forma suelta y se coloca en un molde aplicando ya sea a alta presión o vacío o combinados ambos para llenar los espacios intersticiales y formar el componente de espuma sintáctica en forma de red. Las ventajas de este método están en la síntesis de espumas con una fracción alta de porosidad (hasta un 70% en volumen). Como limitación se encuentra el uso de alta presión para la infiltración de la masa fundida que conduce la fractura de las partículas, y la dificultad para sintetizar a una fracción de volumen baja. Castro y Nutt [25,26]. Produjeron MMSFs de acero rellenadas con esferas de cerámicas fabricadas por infiltración de presión por gravedad y presión mecánica.

El segundo proceso es de agitación, la masa fundida se agita con un impulsor de alto cizallamiento y se añade lentamente las partículas. Este proceso se lleva a cabo en una fundición convencional y requiere muy poca infraestructura nueva. Su bajo costo y la fácil implementación da como resultado un uso generalizado de la fundición por agitación para la síntesis de espumas sintácticas. Sin embargo, la flotación de partículas de baja densidad en este método es una limitación, especialmente para fracciones de volúmenes pequeñas. Por el contrario, en fracciones de alto volumen el proceso de alto cizallamiento conduce a una fractura sustancial en las partículas.

En ocasiones las partículas se recubren con materiales adecuados, incluyendo metales con el fin de humectar con la masa fundida. El recubrimiento tiene también la ventaja de sellar la porosidad en los micro balones huecos y las ceno esferas.

Por último, el método de metalurgia de polvos es versátil por su gran variedad de fracciones en volumen de partículas que se pueden incorporar en materiales compuestos. Incluso en metales reactivos, que no son susceptibles de procesamiento en estado líquido, pueden ser usados en la matriz de la espuma en el proceso de metalurgia de polvos. Las partículas huecas y el polvo de metal de matriz se mezclan juntos, seguido de la compactación y sinterización para obtener espumas sintácticas. El método de metalurgia de polvo tiene la desventaja de que la fractura de partículas huecas sea significativa en altos volúmenes.

### 3.3.3 Microestructura

Las MMSFs tienen una microestructura de dos componentes, material de matriz y partícula huecas. Sin embargo, pueden tener varias fases, por ejemplo, la porosidad atrapada en la aleación de la matriz significa que puede afectar a las propiedades mecánicas. La Figura 20 muestra la microestructura de espumas sintácticas de matriz

de aluminio donde se observa la porosidad generada por el aire atrapado en la aleación de matriz entre las microesferas huecas.

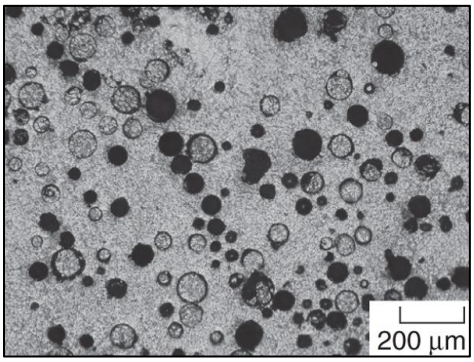


Figura 20. MMSFs de aluminio [24].

Además, se observan diversas reacciones en la interfase partícula-matriz en varias espumas sintácticas [27]. Las reacciones interfaciales en espumas sintácticas de matriz de aluminio pueden dar lugar a diferentes compuestos como el caso del sistema aluminio/ceniza volante, en donde se muestra la presencia de partículas de $AlO_2$ en la interfase generada [28]. Estas reacciones pueden controlarse recubriendo las partículas con metales apropiados y así aumentar sus características de humectación.

Existen varios factores que pueden controlarse en el diseño de una microestructura de espuma sintáctica, que incluye material de matriz y partícula, espesor de pared de partícula, diámetro y fracción de volumen, y tratamiento térmico del material compuesto. Todos estos factores afectan a las propiedades de compresión, así como a la densidad del material compuesto.

### 3.3.4 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de las MMSFs dependen principalmente: del material utilizado en la matriz, de la fracción volumétrica, del tamaño y distribución de las partículas huecas y del método de fabricación para las mismas [22,29].

Lehmhus & Weise et al. [15] Investigan el comportamiento mecánico de espumas sintácticas de microesferas de vidrio huecas con matriz de hierro bajo comprensión cuasi estática y alta velocidad de deformación en donde se obtiene que el límite de elasticidad de las espumas sintácticas es mayor en comparación con el material de la matriz. Las MMFS de hierro muestran tener una resistencia especifica más alta que la aleación de matriz sola, mejorando significativamente las propiedades mecánicas de estas.

Además, en la investigación de Dung D. Luong [30], se analizan los límites de elásticos de espumas sintácticas de alúmina hueca con matriz de aluminio, lo que muestra claramente que las MMSFs poseen ventajas sobre las matrices de aluminio, específicamente las que contienen ceno esferas de ceniza volante.

Por otro lado, se ha llegado a la conclusión que el tamaño de las esferas huecas dentro de la matriz tiene un efecto en las propiedades mecánicas, al reducir el tamaño de esferas huecas hay más esferas, por lo que la fase o material de las esferas, que es más resistente, hace que aumente la resistencia del material, pues hay menos cantidad de matriz, que tiene menos resistencia [31].

### 3.3.5 Aplicaciones

Las MMSFs se han desarrollado para estructuras ligeras que requieren una alta resistencia y capacidad de absorción de energía. La capacidad de amortización de las espumas sintácticas de 6061Al/cenizas volantes es mucho mayor que una aleación matriz de Al igual que los compuestos por la aleación Al-Si/cenizas volátiles, lo cual es beneficioso en aplicaciones automotrices, para la fabricación de rotores de freno en automóviles y cubiertas diferenciales [32, 33]. Además, se sugiere su uso en zonas de absorción de energía de choque [34].

Las construcciones de tipo sándwich para estructuras livianas corresponden a otra aplicación para las espumas sintácticas. Además de variar la relación de radios de esferas y densidades del núcleo de espuma, el comportamiento de flexión de los compuestos de sándwich se ha mejorado mediante modificaciones adecuadas de material y estructura en el núcleo de espuma sintáctica. El mantenimiento de un mayor porcentaje de esferas en el centro y un porcentaje menor en las capas externas de un compuesto de sándwich da como resultado una mayor rigidez [35].

Por otro lado, el uso de esferas de vidrio hace más resistente la espuma sintáctica comparada con la espuma convencional, así que es utilizada como refuerzo estructural, agente de flotabilidad, aislante y material para el termo conformado. La combinación ideal de resistencia alta y baja densidad convierten a las esferas de vidrio en un aditivo para las espumas sintácticas utilizadas en los módulos de flotación, boyas y bloques de flotación para vehículos submarinos. Cuando las esferas de vidrio se formulan con resina, la espuma sintáctica resultante tiene una relación de alta resistencia a la densidad para proporcionar la máxima flotación de la red en una profundidad especificada [36].

## 3.4 Espumas de cobre

Las espumas de cobre se caracterizan por tener baja densidad y alta absorción de energía al impacto, además de alta permeabilidad. Son producidas fundamentalmente por el proceso de pulvimetalurgia, que permite fabricar piezas de formas complejas, a partir de polvos finos de metales que, tras su compactación y al ser sometidos a altas temperaturas, se les da una forma determinada.

La espuma de cobre aprovecha las propiedades antibacterianas del metal para reducir las bacterias en las industrias alimenticias. Igualmente, las espumas de cobre también poseen más aplicaciones, las cuales se encuentran en el área de la transferencia de calor y almacenamiento de energía [4].

Un estudio realizado por Vadwala [37] describe el comportamiento del intercambio de energía de la cera de parafina comparada con el mismo escenario, pero añadiendo una espuma metálica de cobre de poro abierto y de alta porosidad (95%). Los resultados indican un incremento de transferencia de calor de entre 16 a 18 veces mayor que en condiciones normales. Otro ejemplo es el señalado en el estudio de Rezaey [38], el cuál expone cómo aprovechar la combustión del metano, que no puede ser utilizado o transportado, y que es producido en el proceso de refinamiento de petróleo y gas. Es así como, mediante la utilización de espumas metálicas de cobre de poro abierto (Figura 21) en un intercambiador de calor, se busca obtener energía de una situación no provechosa.

Figura 21. Ejemplo de espuma de Cobre de poro abierto [38].

Sin embargo, las espumas de cobre de poros abierto requieren más concentración para un comportamiento mecánico aceptable. Goodal et al. [39] investiga la variación en respuesta mecánica de espumas metálicas respecto a la porosidad y morfología de poros. Muchas de estas propiedades estructurales se podrían controlar seleccionando los parámetros adecuados.

Para este trabajo de título se propone mejorar las espumas de cobre, incorporando esferas huecas de hierro, lo que pretende obtener la porosidad adecuada, con celdas cerradas y siendo imposible la interconexión entre poros. Con este tipo de espumas se logra disminuir de manera importante la densidad del material, mejorar la distribución en los poros, tener un control en el tamaño y morfología, manteniendo o incluso mejorando las propiedades mecánicas del material compacto. Por esto sus propiedades mecánicas son mejores que las presentes para la espuma de cobre convencional.

## 3.5 Homogenización

La tarea de caracterizar los materiales heterogéneos es abrumadora, es por esto que se incorpora la hipótesis de continuidad de un material, esta hipótesis implica una idealización considerando el material real como un medio continúo. De aquí viene el concepto de homogenización, el cual idealiza el material heterogéneo como un medio donde cada una de las fases que lo conforman se asumen como homogéneas e isotrópicas, a una escala en que se puedan estimar sus propiedades. Este permite modelar las estructuras más complejas usando un modelo especial que facilita los estudios de su estructura. [40].

Para analizar la estructura compleja de forma exacta del material, es necesario construir un modelo especial de forma certera. Para lograr esto en varias dimensiones se realiza una escala dimensional que normalmente se divide en subescalas. La macro escala en donde representa el total de la estructura, la segunda es la micro-escala la cual describe la microestructura no homogénea, además para lograr una diferenciación más fina se utiliza la meso-escala, que es un punto medio entre las dos anteriores, donde no hay homogeneidades singulares. La Figura 22 representa las tres escalas de homogeneidad.

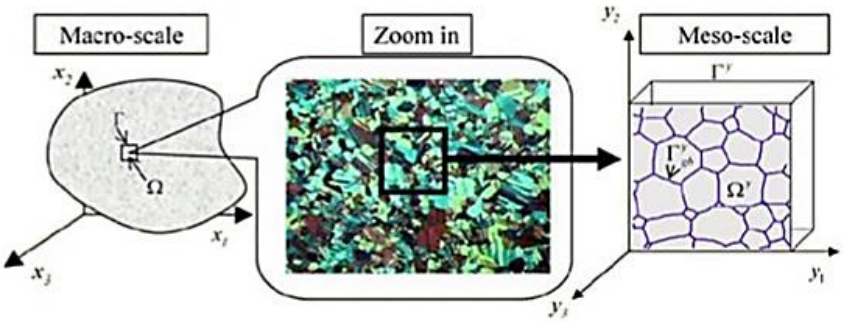


Figura 22. Escalas de homogenización [40].

Además, conviene distinguir entre materiales de estructura periódicas y no periódicas. Se llama periódico cuando su estructura está compuesta por una repetición sistemática de algún patrón. En caso contrario se le llama no periódico como muestra la Figura 23.

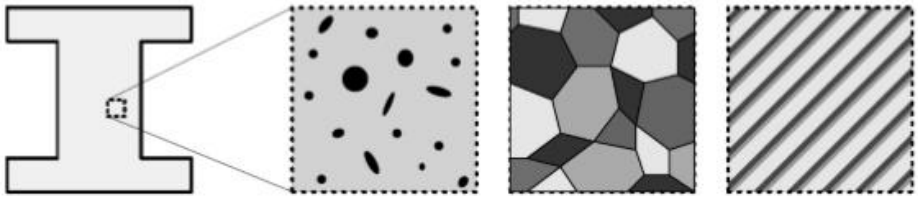

Figura 23. Cuerpo macroscópico con tres posibles microestructuras: matriz con inclusiones elípticas, agregando poli cristalino y laminado periódico [41].

Un concepto clave que será útil mencionar utilizado en las técnicas de homogenización es:

*Elemento de volumen representativo (RVE):* Representa un cuerpo de reemplazo reducido en escala comparado con la micro escala real, contiene todas las no homogeneidades relevantes, es el volumen que es capaz de representar mejor la estructura compleja del material como se indica en a Figura 24.

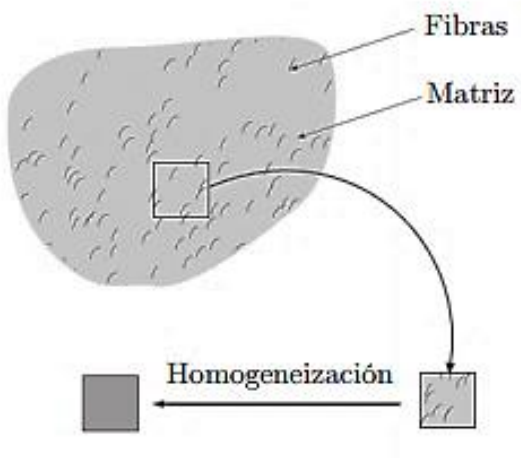


Figura 24. Elemento de volumen representativo (RVE).

### 3.5.1 Homogenización micro-mecánica de espumas sintácticas

La mayor parte de los modelos de campo medio para materiales polifásicos están basados en el análisis de Eshelby [42], sobre el comportamiento elipsoidal en un medio elástico. Considerando un sólido indefinido y homogéneo con propiedades elásticas dadas por el tensor ($\boldsymbol{Lm}$), en su interior existe una región ($\boldsymbol{\Omega}$) que cambia de forma y genera tensiones en la región y en el resto del sólido. El campo tensional es generalmente complicado. Sin embargo, es posible encontrar una solución analítica cuando la región que sufre la transformación tiene forma elipsoidal y una deformación uniforme. La Figura 25 ilustra el problema mediante un conjunto de operaciones de corte y soldadura. (a) Se extrae la inclusión del sólido y se deforma libremente una magnitud representada por el tensor ($\boldsymbol{\epsilon^T}$)**.** La tensión en la inclusión y el resto del solido es nula. (b) Se aplica la tensión necesaria para regresar a su forma original. (c) Una vez que esté en la posición inicial, la inclusión se puede introducir en el hueco original y soldar con el resto del sólido, retirando las tensiones hasta llegar a una deformación de equilibrio en la inclusión ($\boldsymbol{\epsilon^C}$).

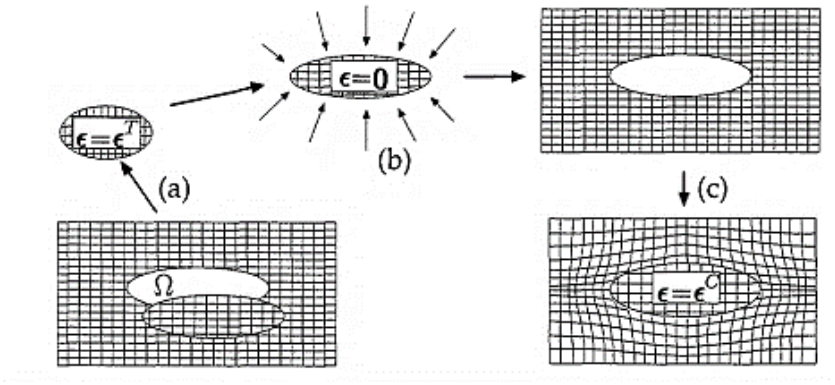


Figura 25. Resolución del problema de una inclusión sometida a la transformación representada por el tensor ($\epsilon^T$), Eshelby [42].

Sin embargo, para el caso de las espumas sintácticas se requiere el uso de técnicas más sofisticadas que las utilizadas para las espumas metálicas. Esta consiste en estimaciones obtenidas eligiendo una forma esférica para la inclusión en vez de elíptica para "el problema de Eshelby". Se considera dos posibles patrones representativos. El primero es de esfera compuesta cuyo problema de Eshelby se denomina modelo de cuatro fases y se aprecia en la Figura 26(a), la segunda es la inclusión hueca que se denomina modelo trifásico y se representa en la Figura 26(b). La forma de los campos de desplazamiento que resuelven los problemas similares a Eshelby sometido a límites puramente volumétricos [43].

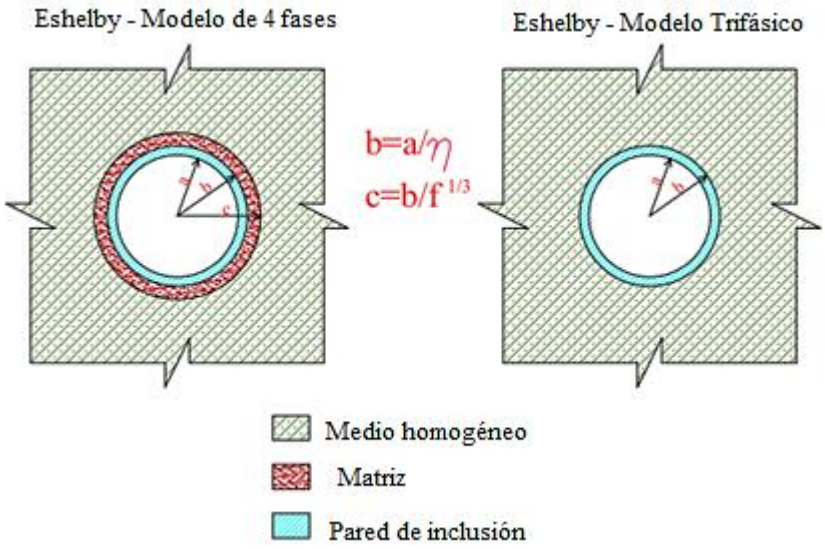


Figura 26. Problemas similares a Eshelby relevantes para las técnicas de homogeneización [43].

### 3.5.2 Homogenización numérica

En la homogenización numérica el RVE es modelado y simulado generalmente a través del método de elementos finitos (MEF). Usando esta técnica se puede obtener respuesta del material en el punto macroscópico correspondiente a través del promedio del volumen sobre el RVE.

Al momento de la simulación se procede de la siguiente manera: la macroestructura se somete a deformación, mediante el método de elemento finitos, se calculan los esfuerzos a los cuales se someten los RVE, los cuales permiten obtener respuesta al comportamiento macro de la probeta [44].

## 3.6 Método de elementos finitos

### 3.6.1 Introducción

El método de elementos finitos(MEF) [45], corresponde a un procedimiento que se utiliza para aproximar las soluciones de ecuaciones diferenciales parciales en diversos problemas de ingeniería que involucran gran complejidad. Algunas de las áreas en donde más se utiliza este método están relacionados con problemas como: análisis estructural, mecánica de fluidos, transferencia de calor, etc. Está pensado emplearse en computadoras con el fin de resolver un problema físico en geometrías complicadas, por lo que no es sencillo obtener una solución analítica.

La solución analítica de un problema se entiende como una expresión matemática que entrega valores para una incógnita. Para encontrar este tipo de solución es necesario resolver ecuaciones diferenciales ordinarias o en derivadas parciales. Cuando se trabaja con superficies complejas, encontrar dicha expresión suele ser difícil. El MEF permite plantear el problema por medio de una serie de ecuaciones simultáneas. Se basa en construir un objeto mediante bloques pequeños y manejables.

### 3.6.2 Discretización

El cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, se divide en una serie de subdominios o elementos no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también llamada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes sí

pertenecen al mismo elemento finito, además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos.

El planteamiento de las ecuaciones para cada uno de los elementos, y su posterior resolución simultánea, permite resolver el problema para el cuerpo como un todo. Sin embargo, al discretizar el cuerpo se obtiene un valor aproximado para la incógnita buscada, la precisión del método va en directa relación con la cantidad de elementos utilizados para modelar el cuerpo. En la Figura 27 se muestra el proceso de discretización. El procedimiento general para el análisis mediante el método de elementos finitos [46] se muestra en la Figura 28.

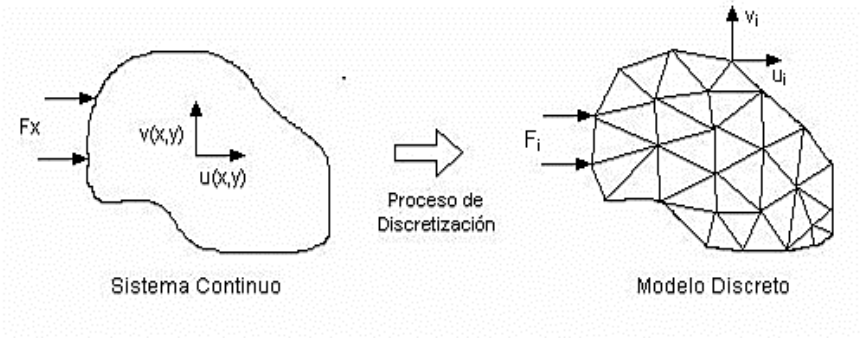


Figura 27. Proceso de discretización [41].

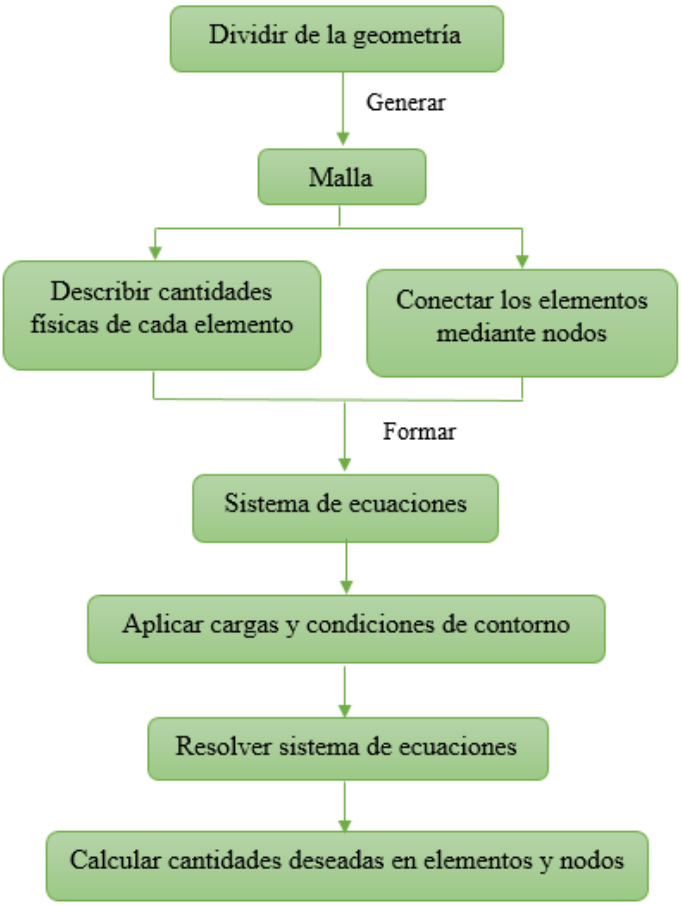


Figura 28. Procedimiento de elementos finitos [40].

### 3.6.3 Mallado

El concepto de mallado se refiere al resultado de discretizar el dominio de interés. La discretización genera una suerte de red que enlaza los elementos con los nodos, la Figura 29 muestra un ejemplo de mallado. La densidad de esta red (malla) depende directamente del número de elementos en que se divide el dominio en estudio, es decir, será más densa a mayor número de elementos en que se discretiza el dominio. La cantidad de elementos utilizados afecta la exactitud de los resultados obtenidos.

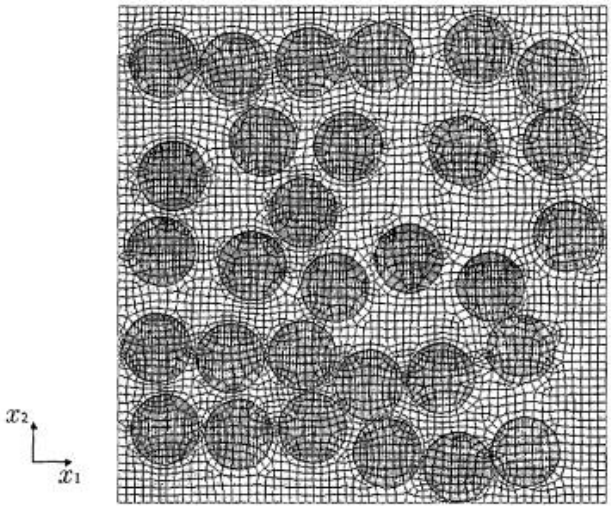


Figura 29. Malla de elementos finitos utilizada en la simulación del comportamiento de materiales compuesto-reforzados con fibras continuas, Nakamura & Suresh (1993) [47].

Las fibras se encuentran orientadas en la direccion perpendicular al plano $X_1X_2$. Además, esta técnica permite conocer los valores locales de la tensión y deformación.

### 3.6.4 Calidad del mallado

**Suavidad:** Para representar de mejor manera el dominio a estudiar, la malla se debe concentrar en los cambios de superficie, debe haber mayor cantidad de elementos por volumen en donde existe cambios de cara en el cuerpo para tener una buena calidad. La Figura 30 grafica por medio del recuadro punteado de color rojo el aumento de suavidad de la malla en esa área.

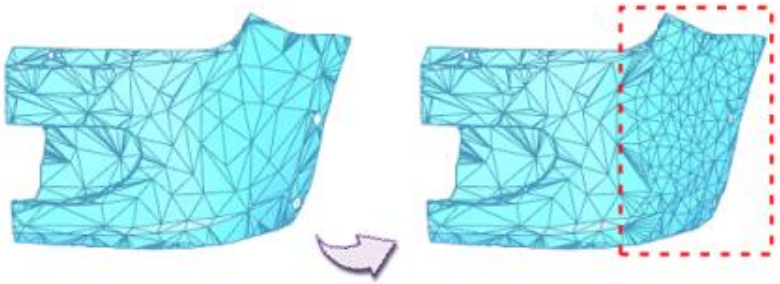

Figura 30. Aumento de la suavidad en el mallado de un elemento [48].

**Relación de Aspecto:** Se define, para un elemento determinado, como la razón entre la arista más larga y la más corta del mismo. Un valor igual a la unidad representa que todas las aristas del elemento son de la misma longitud [49].

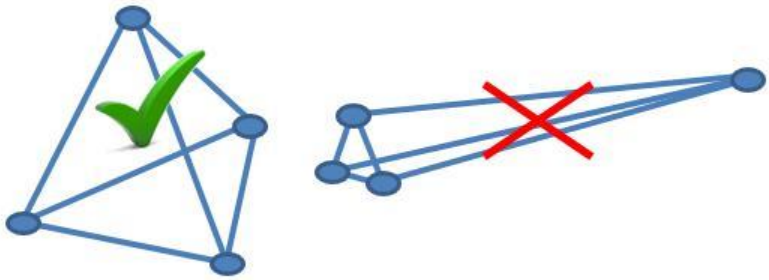

Figura 31. a) Relación de aspecto deseada contrapuesta con b) un elemento que no cumple las características. [50]

**Calidad de elementos:** Se compara la forma de las celdas de la malla de un sólido, es un factor que va de 0 y 1, siendo 1 la mejor representación de la forma de la celda y 0 la peor. En la Figura 32 se aprecia las formas de mallar que entrega el software.

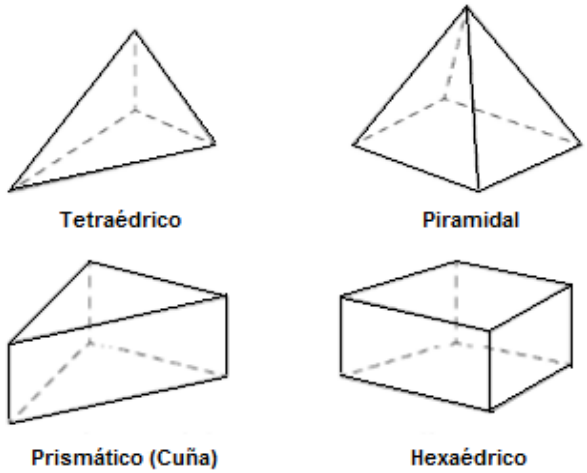


Figura 32. Formas de Celdas en una malla.

## Asimetría

Los valores se encuentran de 0 a 1, con valores cercanos a 0 el elemento es más asimétrico lo que indica una buena calidad. La Tabla 1 muestra la calidad de malla según la medida de la asimetría (skewness).

Tabla 1. Calidad de malla respecto a su factor de asimetría.

| Skewness(S) | Calidad de malla |
|---|---|
| **1** | Degenerada |
| **1>S>0.9** | Mediocre |
| **0.9>S>0.75** | Pobre |
| **0.75>S>0.5** | Mas o menos |
| **0.5>S>0.25** | Buena |
| **0.25>S>0** | Excelente |
| **0** | Perfecta |

**Calidad Ortogonal**

Se mide entre 0 y 1 donde 1 es el mejor resultado. Para el cálculo de este se utilizan 3 vectores por cada cara del elemento; el vector normal (**A**), el vector que apunta desde el centroide de la celda a cada uno de los centroides de las caras de la celda (**B**) y el vector que apunta desde el centroide de la celda a los centroides de las celdas adyacentes (**C**). El factor se determina usando la expresión (1) para cada cara [50].

$$\text{Calidad Ortogonal} = \text{Mín.}\ \{\frac{\mathbf{A}*\mathbf{B}}{|\mathbf{A}||\mathbf{B}|}\ ,\frac{\mathbf{A}*\mathbf{C}}{|\mathbf{A}||\mathbf{C}|}\} \qquad (1)$$

## 3.7 Estudios relacionados

Este capítulo consiste en estudiar el trabajo de A.Szlancsik et al.[51] en el cual se analiza el comportamiento en compresión de espumas metálicas sintácticas con matriz de aluminio reforzadas con esferas huecas de hierro. Se realiza una comparación entre datos obtenidos en ensayos de compresión y simulaciones mediante elementos finitos. Para esto se desarrollan 4 tipos de espumas sintácticas mediante la técnica de infiltración por gas inerte de baja presión. Las matrices generadas son aleaciones de Al, además se utilizan esferas huecas puras de Fe Globomet (GM) (suministradas por Hollomet GnbH, Dresden Alemnania) [19], la Tabla 2 resume las características de las esferas utilizadas.

Tabla 2. Características de microesferas Globomet.

| Microesferas | Características |
|---|---|
| **Material** | Fe |
| **Diámetro** | 1,92 ± 0,07 mm |
| **Espesor de pared** | 23 ± 0,6 lm |
| **Densidad** | 0,093 $gcm^3$ |

La Figura 33 muestra una fotografía macro típica y una imagen SEM sobre las superficies de las esferas huecas.

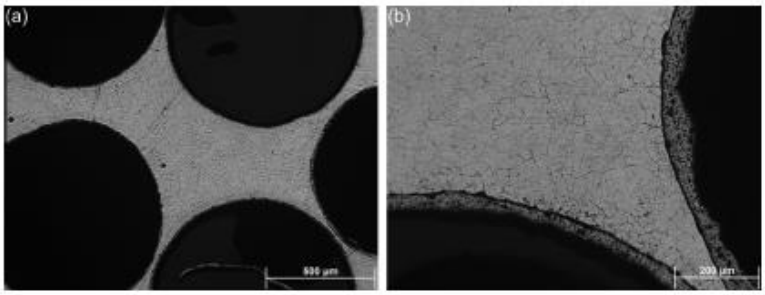


Figura 33. Imagen de microscopio óptico en a) baja y b) alta ampliación.

En el proceso de infiltración que se utiliza para el desarrollo de las probetas, consiste en la fabricación de un molde especial (Figura 34), el molde es recubierto por una capa delgada de grafito (Formkote T-50, Everlube Products, Pechtree City, GA), posteriormente se llena a la mitad con las esferas huecas, las cuales se fijan en posición mediante una red de acero inoxidable 316 L y luego son colocadas en un horno (Lindberg/ Blue M) para precalentar a 300°C durante 0,5 h.

El material de la matriz se funde a su temperatura de fusión en un horno de inducción Power-Track 15-96. Posteriormente, el material fundido se vierte en el

molde donde se encuentran las esferas para inyectar el gas inerte (Ar) en el sistema a través de un reductor a una presión de infiltración de 400[ KPa].

Para poder romper el flujo de gas se coloca entre medio una placa de acero. Para retirar el gas entre las esferas se utiliza una esterilla de $Al_2O_3$. Después de la solidificación y enfriamiento se abre el molde y por medio de fresado se elimina el bloque.

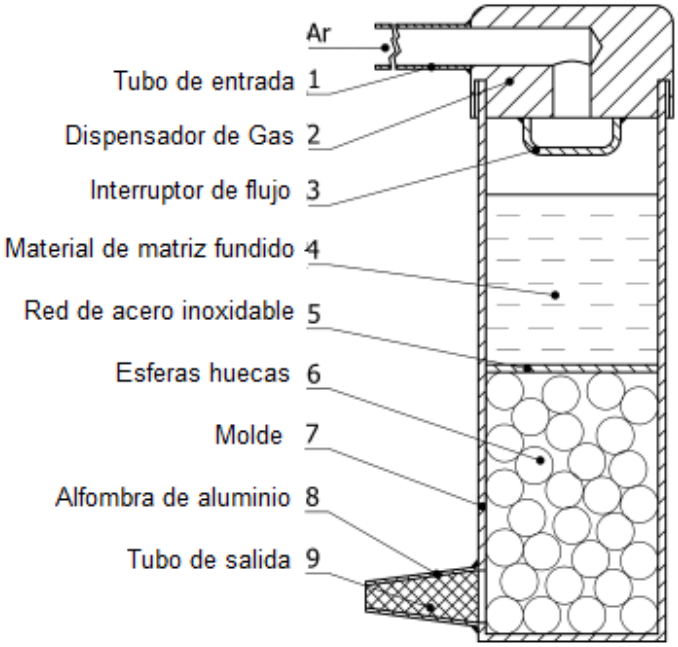


Figura 34. Esquema de la cámara de infiltración.

Mediante la incorporación de esferas huecas de Fe se producen MMSFs en que las propiedades mecánicas se pueden hacer variar dentro de amplios intervalos mediante la aplicación de diferentes materiales de matriz de aleaciones de Al y tratamientos térmicos.

Para el análisis MEF, se crea una geometría con una distribución aleatoria de esferas, con las mismas dimensiones, porosidad y propiedades mecánicas de la probeta real. Tanto el modelo virtual como la probeta física son sometidas a un ensayo de compresión hasta el 50% de su altura (Figura 35) y los resultados son graficados en las curvas de Esfuerzo vs Deformación de la Figura 36.

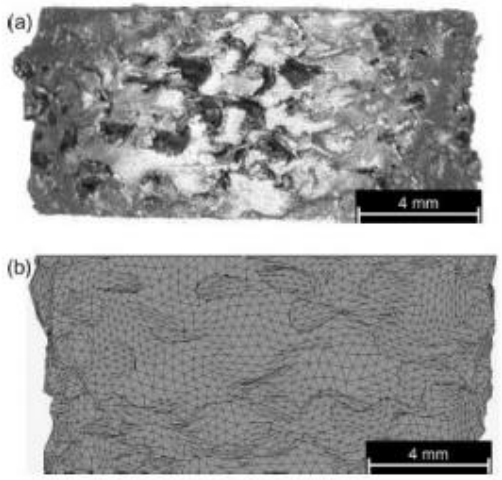


Figura 35. Probetas estudiadas a una compresión del 50%
a) Real b) Simulación MEF (51).

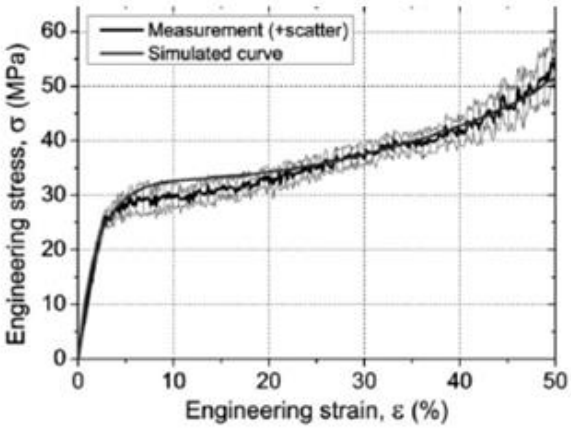


Figura 36. Curva Esfuerzo vs Deformación.

En resumen, en modelo FEM propuesto a escala completa permite una excelente aproximación a los valores medidos para las MMSFs de aluminio en compresión libre. Estos valores están comprendidos dentro del 5% en el caso de las propiedades características y dentro del 10% para toda la curva. Además, las curvas de Esfuerzo vs Deformación ingenieril registradas muestran una alta plasticidad y una región de meseta larga de ascenso lento que asegura una gran capacidad de absorción de energía.

### 3.7.1 Efecto de la interfaz en espumas sintácticas

Además, de los estudios relacionados ya mencionados cabe destacar que se han publicado artículos con el fin de encontrar el efecto de la interfase que se produce entre el material de matriz y las partículas huecas. Se sabe que en diversos materiales las interfases se someten a deslizamiento como en el caso de las fibras de composite reduciendo el módulo de Young. También, que la resistencia de la interfase es especialmente importante en las espumas sintácticas ya que las esferas pueden actuar como diversos vacíos intersticiales si no están unidos a la matriz.

En el trabajo de Marur [53] se estudia la influencia de la interfase en una MMFs entre esferas huecas y matriz, considerando interfaces débiles entre la inclusión (esferas huecas) y la matriz utiliza el enfoque de la homogenización, el cual permite obtener expresiones analíticas para el módulo elástico. Considera que las fases están imperfectamente unidas de modo que las tracciones son proporcionales al desplazamiento. Cada fase se considera lineal elástico, la Figura 37 muestra la imagen de una interfaz imperfecta donde *b* es el radio de la esfera compuesta que contiene una esfera hueca con radio exterior *a* y un radio interior *c*. Por otro lado, el mismo autor presenta en [54] un enfoque muy similar que utilizó un modelo de esfera concéntrica de tres fases para estimar las constantes elásticas efectivas y los resultados se compararon con otras teorías y datos experimentales.

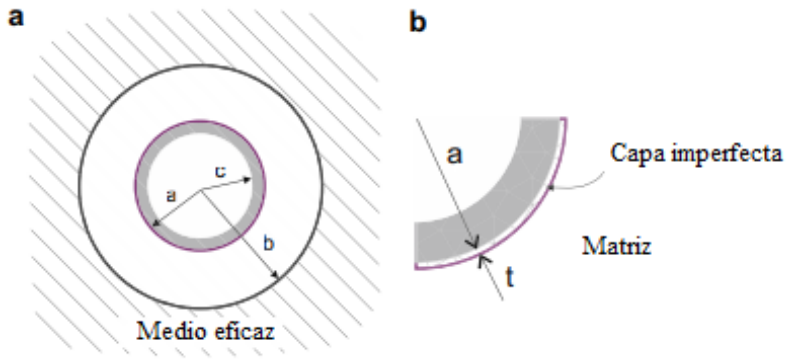


Figura 37.(a) Modelo trifásico con espuma sintáctica con interfaz imperfecta. (b) Aproximación de la capa de resorte lineal de la imperfección de la interfaz con t<<a [53].

Posteriormente, la aplicabilidad de las fórmulas y las conclusiones también fueron confirmadas por métodos numéricos [55].

Porfiri & Gupta [56] se centran en el desarrollo de un modelo para estimar las constantes elásticas de las espumas sintácticas en función del espesor de la pared de las partículas, el tamaño y la fracción de volumen. El modelo se utiliza para predecir el módulo de Young de MMSFs que contienen esferas de una amplia gama de espesor de pared y fracción de volumen.

Un análisis general supone que las esferas están perfectamente unidas al material de la matriz. El comportamiento de una MMSFs está influido por diversos parámetros como el espesor de pared, diámetro de esferas, volumen de fracción, etc. En el caso de una unión perfecta el esfuerzo medio es proporcional a la deformación, la interfase separa las esferas de la matriz, actuando como principal factor de influencia en el comportamiento de las espumas sintácticas.

En el trabajo de Alfonso et al. [57] se estudia espumas de aluminio reforzado con nanotubos de carbono, en donde se evalúa la formación de Al4C3 (compuesto que

se forma entre ambos materiales). Se analiza mediante el método de elementos finitos el efecto de la interfase entre la matriz y el refuerzo usando como indicador la fracción de volumen de los nanotubos de carbono y el espesor del compuesto $Al_4C_3$, logrando analizar el efecto del tamaño de la interfase en el módulo de Young de la espuma sintáctica.

### 3.7.2 Interfaz Cu-Fe

Como el núcleo de este trabajo es analizar el efecto del sistema Cu-Fe en la interfase de las espumas sintácticas estudiadas, es importante mencionar lo que ocurre cuando el cobre fundido (metal que se usa en la matriz de las MMFS), se coloca en contacto con el Fe solido (metal que se usa para las esferas huecas), lo cual sucede al aplicar el método de fabricación mencionado en el apartado 3.7, adecuado para la realización de estas espumas sintácticas [51].

Al interactuar el metal liquido con el sólido se produce una migración del metal liquido hacia el sólido llamado penetración del límite de grano, mientras que ocurre la disolución del metal solido en el líquido. Esto se centra en la migración cinética y microestructura interfacial de reacción liquido/solido considerando temperaturas de 110 a 1400°C [58].

La razón por la que ocurre la penetración del límite de grano se debe a la disminución de energía interfacial del metal fundido/ metal sólido, que se ve afectado por el elemento de aleación en el hierro del metal base.

Tan pronto como el metal fundido hace contacto con el metal sólido, la migración del metal fundido al sólido y la disolución del metal solido al fundido se

producen simultáneamente. Existen tres reacciones básicas que ocurren en la interfaz liquido/solido después de la migración, con la formación de una solución sólida;

- *Difusión de volumen incipiente*: El metal fundido se difunde directamente al sólido. En consecuencia, provoca la formación de una zona de solución solida penetrada por un átomo extraño en la superficie del metal base.

- *Difusión del límite de grano*: El metal liquido se difunde en el metal base a lo largo del límite de grano. Luego, los átomos migran desde el límite de grano hacia la retícula del metal base (efectos de riesgo).

- *Penetración del límite del grano*: El metal fundido se difunde por los límites de grano del metal base. Esta difusión del límite de grano y la reacción de aleación que ocurre en la interfaz liquido /solido bajan la energía interfacial sin superficie, lo que promueve la humectación del límite del grano, produciendo la penetración profunda del metal fundido en el límite de grabo del metal base.

La microestructura interfacial Cu/ Fe se muestra esquemáticamente en la Figura 38, en donde se especifican seis áreas básicas del sistema.

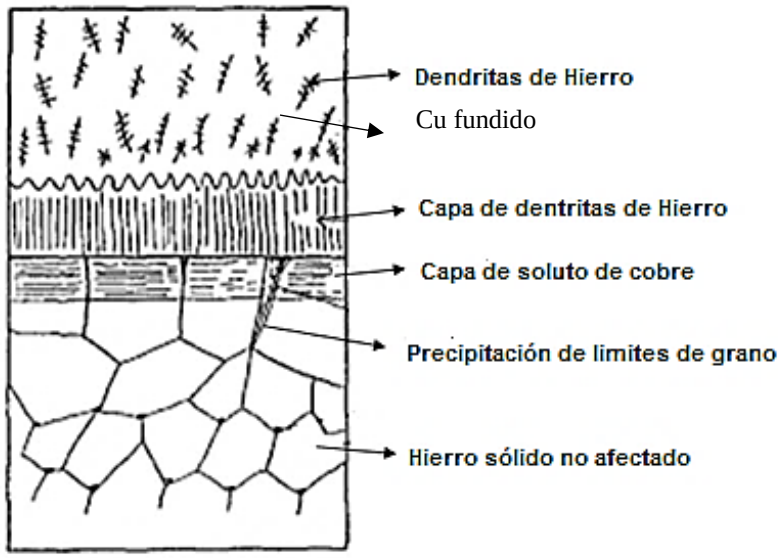


Figura 38. Representación esquemática de las regiones discretas en el límite heterogéneo de la interfase Cobre/Hierro [58]

Además, se forma un espesor de la zona de capa penetrada por el cobre, formada por la migración del cobre fundido a hierro sólido a lo largo de la región interfacial se debe a la difusión directa de la solución sólida. El espesor promedio de esta capa, $W$, después de un seleccionado tiempo $t$, para cada temperatura se muestra en la Figura 38. Se puede apreciar que la profundidad penetrada aumenta parabólicamente con el tiempo de reacción. La tasa de penetración, $dW/dt$ puede ser inversamente proporcional al espesor de la capa de penetración, es decir:

$$\frac{dW}{dt} = Kw\frac{1}{W} \qquad (2)$$

Donde $Kw$ es la constante de velocidad ($cm^2 sec^{-1}$) de penetración a la temperatura seleccionada.

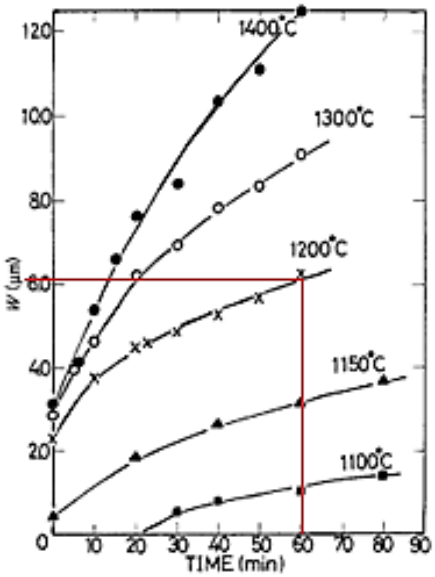


Figura 39. Migración del cobre fundido al hierro sólido a temperaturas que van de 1100°C a 1400°C [58].

Basándose en el proceso de fabricación mencionado en el apartado 3.7 se supone una temperatura de 1200°C del cobre fundido durante 1 hora de solidificación en agua fría, usando el grafico de la Figura 39, se calcula el espesor de la capa de penetración del cobre fundido en el hierro sólido. Se estima un espesor aproximado de 6 [$um$]. Es decir, 0,006 [$mm$] del espesor de hierro de las esferas es lo que penetra en cobre fundido.

La interacción del cobre fundido, es decir, la disolución del hierro sólido en cobre fundido y la penetración del cobre fundido en hierro sólido, ocurre cada vez más al aumentar la temperatura y el tiempo. Como resultado, la mayor interacción da una mayor cantidad de hierro precipitada dentro del cobre durante la solidificación, y capas de reacción más gruesas en la interfaz Cu-Fe. La Figura 40 se muestra la cantidad de espesor que penetra el Cu en el hierro sólido.

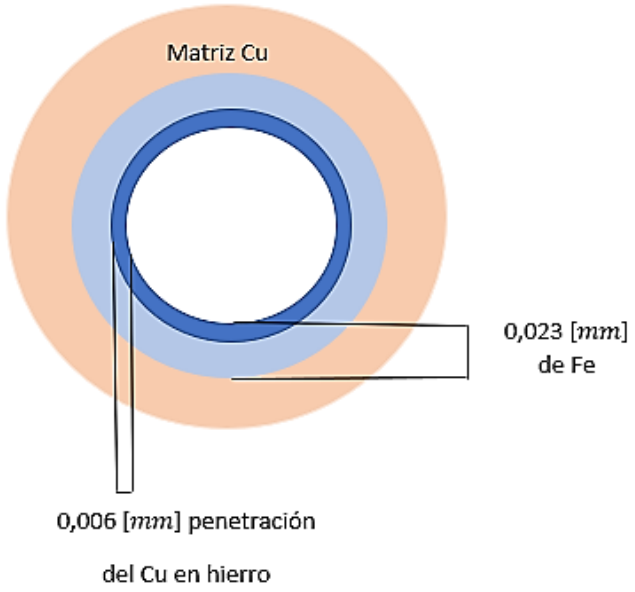


Figura 40. Cantidad de espesor que penetra el Cu en el hierro sólido.

# 4. Metodología

En este capítulo se realiza un trabajo previo mediante elementos finitos para analizar el comportamiento mecánico de espumas sintácticas de matriz de cobre reforzadas con esferas huecas de hierro basándose en los estudios mencionados en el apartado 3.7, se utilizan probetas cilíndricas de prueba haciendo variar parámetros de tamaño y porcentaje de porosidad, modeladas aleatoriamente. Para las esferas huecas de Fe se utilizan las Globomet (GM), las cuales se mantendrán con un espesor constante para todas las simulaciones realizadas.

Adicionalmente, se modelan espumas convencionales de cobre con las mismas características de tamaño y porosidad con el fin de comparar con mayor precisión el comportamiento mecánico que provoca la incorporación de esferas de Fe en la espuma sintáctica de Cu.

## 4.1 Simulación

Como herramienta de simulación se utiliza el software ANSYS, el cual posee una plataforma dinámica que contempla varias aplicaciones, entre ellas: vibraciones, mecánica de fluidos, estática estructural, entre otras.

Para iniciar la simulación se abre la ventana "*static estructural*", la cual se muestra en la Figura 41, posteriormente se inicia cargando la geometría en *"geometry",* en donde se pueden modificar cualquier característica que sea necesaria, ya sea tamaño,

forma etc. En esta sección es donde se modifican las probetas para poder obtener diferentes tamaños de geometría.

Para modificar los materiales de acorde a los requerimientos, se deben definir en *Engineering Data*, para luego ingresar a *Model*, en donde se procede a generar la malla y colocar las condiciones de borde correspondientes para los resultados que se deseen. La Figura 42 muestra un esquema representativo del procedimiento.

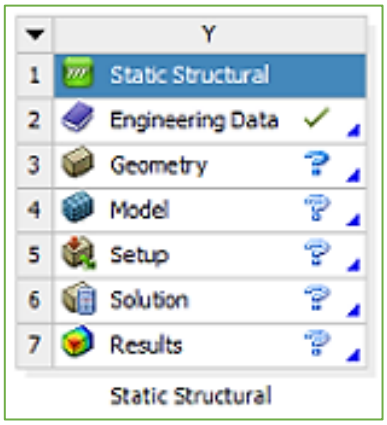


Figura 41. Ventana principal de la simulación.

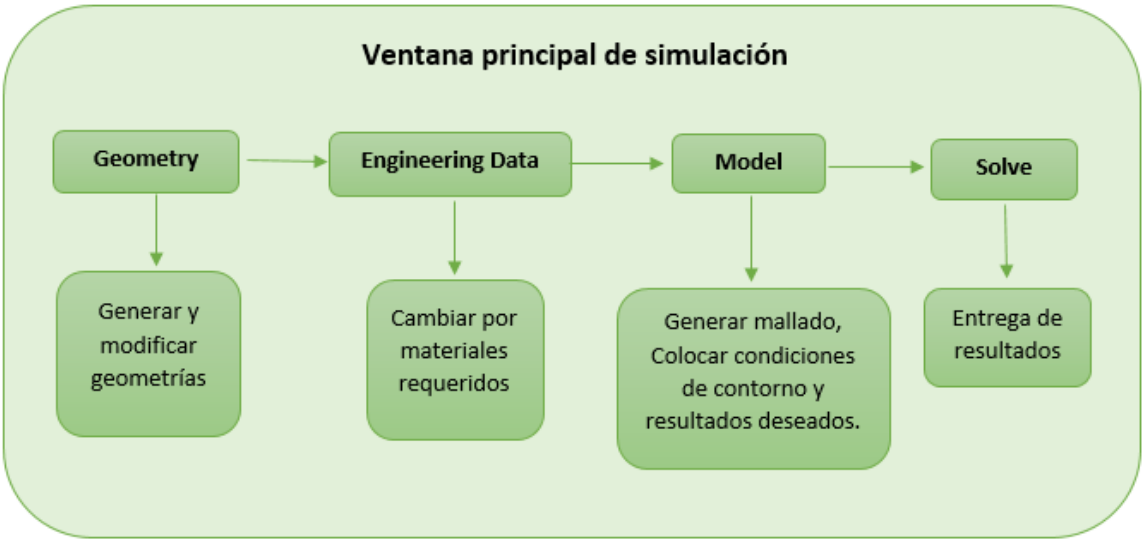


Figura 42. Diagrama del procedimiento de la simulación.

### 4.1.1 Geometrías

Para la modelación de las geometrías se consideran probetas cilíndricas con esferas huecas de hierro que corresponden a la representación de espumas sintácticas, algunas de ellas mostradas en la Figura 43. Además, con fines de comparación, se realizan probetas con poros las cuales representan espumas convencionales de cobre desarrolladas por el proceso de pulvimetalurgia mostradas en la Figura 44. Ambos tipos de geometría cumplen con las siguientes especificaciones mencionadas en la Tabla 3.

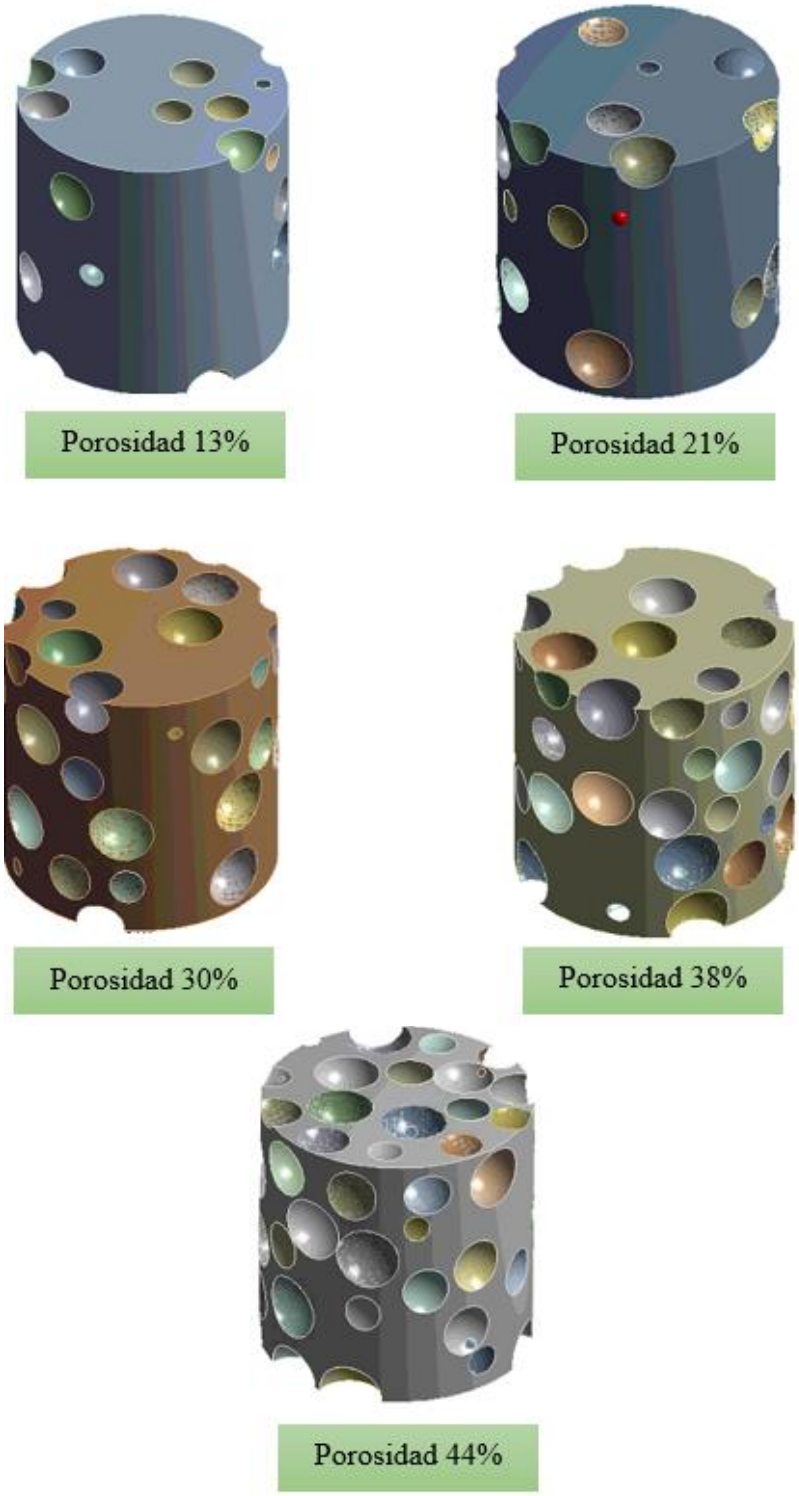


Figura 43. Geometrías de espumas sintácticas.

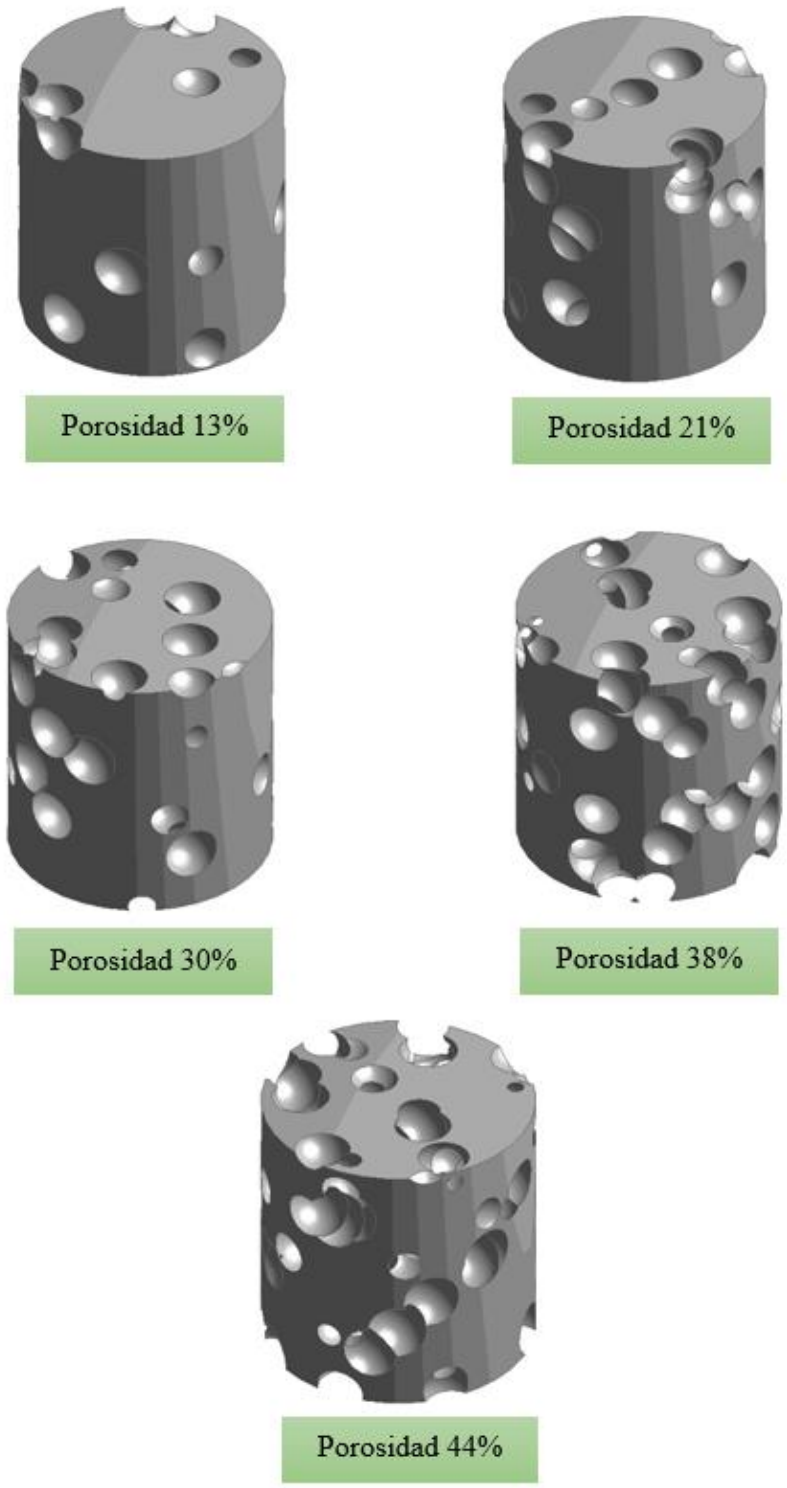


Figura 44. Geometrías de espumas convencionales.

Tabla 3. Características de las geometrías cilíndricas utilizadas.

| Porosidad [%] | Tamaño de geometría (Diámetro &Altura) [mm] |
|---|---|
| **13%** | 8 |
| | 9 |
| | 10 |
| **21%** | 8 |
| | 9 |
| | 10 |
| **33%** | 8 |
| | 9 |
| | 10 |
| **48%** | 8 |
| | 9 |
| | 10 |

Las probetas cumplen con la relación (2):

$$\frac{Altura(probeta)}{Diametro(probeta)} = 1 \qquad (2)$$

Las características de las esferas huecas puras de Fe se especifican en la Tabla 4, lo cual se basó en las mismas utilizadas en el apartado 3.7, esferas huecas de Fe Globomet (GM).

Tabla 4. Características para las microesferas.

| Microesferas puras de Fe | |
|---|---|
| **Diámetro nominal** | 1,92 ± 0,07 $[mm]$ |
| **Espesor de pared** | 23± 0,6 $[lm]$ |
| **Densidad** | 0,093 $[gcm^3]$ |

### 4.1.2 Propiedades del material

El material a utilizar para la simulación en la matriz de las espumas sintácticas es Cu, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 5, además en la Tabla 6 se especifican las del Fe puro material de las esferas.

Tabla 5. Propiedades del Cobre.

| Propiedades del Cobre | |
|---|---|
| **Modulo elástico** | 110000 $[N/mm2]$ |
| **Coeficiente de Poisson** | 0,37 |
| **Modulo Cortante** | 40000$[N/mm2]$ |
| **Densidad de masa** | 8900 $[Kg/m3]$ |
| **Límite de tracción** | 394,38 $[N/mm2]$ |
| **Límite elástico** | 258,64 $[N/mm2]$ |

Tabla 6.Propiedades del Hierro.

.

| Propiedades del Hierro | |
|---|---|
| **Modulo elástico** | 95400[$N/mm2$] |
| **Coeficiente de Poisson** | 0,293 |
| **Modulo Cortante** | 70000 [$N/mm2$] |
| **Densidad de masa** | 7874 [$Kg/m3$] |
| **Límite de tracción** | 180-210 [$N/mm2$] |
| **Limite elástico** | 120-150 [$N/mm2$] |

Para una correcta aplicación del MEF se deben tomar en cuenta los siguientes puntos para obtener resultados más confiables y certeros.

### 4.1.3 Mallado

La especificación de la malla utilizada para las probetas de Cu se presenta en la Figura 45. Para este análisis se busca un mallado muy fino, lo cual indica que el área de las celdas del mallado será pequeña y se logrará obtener un resultado más preciso. Además, se pide al programa realizar un cambio de caras y celdas con mayor suavidad. Procesar los datos tomara algo de tiempo por la demanda computacional que genera trabajar con este tipo de mallas.

| Details of "Mesh" | |
|---|---|
| **Defaults** | |
| Physics Preference | Mechanical |
| Relevance | 0 |
| **Sizing** | |
| Use Advanced Size Function | Off |
| Relevance Center | Fine |
| Element Size | Default |
| Initial Size Seed | Active Assembly |
| Smoothing | High |
| Transition | Fast |
| Span Angle Center | Fine |
| Minimum Edge Length | 0,124040 mm |

Figura 45. Especificaciones de mallado.

En el anexo 9.1, se presentan algunas medidas de los parámetros calculados en los elementos de mallas, tales como: calidad de elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal, con sus histogramas correspondiente entregados por el programa. Cabe mencionar que lo expuesto en el anexo anterior va sujeto a algunas geometrías de diferente porosidad, ya que, los resultados generales son similares para todas las mallas de las diferentes probetas simuladas.

Verificando los parámetros de mallado obtenidos se aprecia que se encuentran dentro de los rangos correspondientes, por lo que se concluye que el mallado aplicado a las geometrías es aceptable.

La Figura 46 muestra el mallado para una geometría de porosidad 44% de una espuma reforzada con esferas huecas y otra para una geometría de espuma con poros.

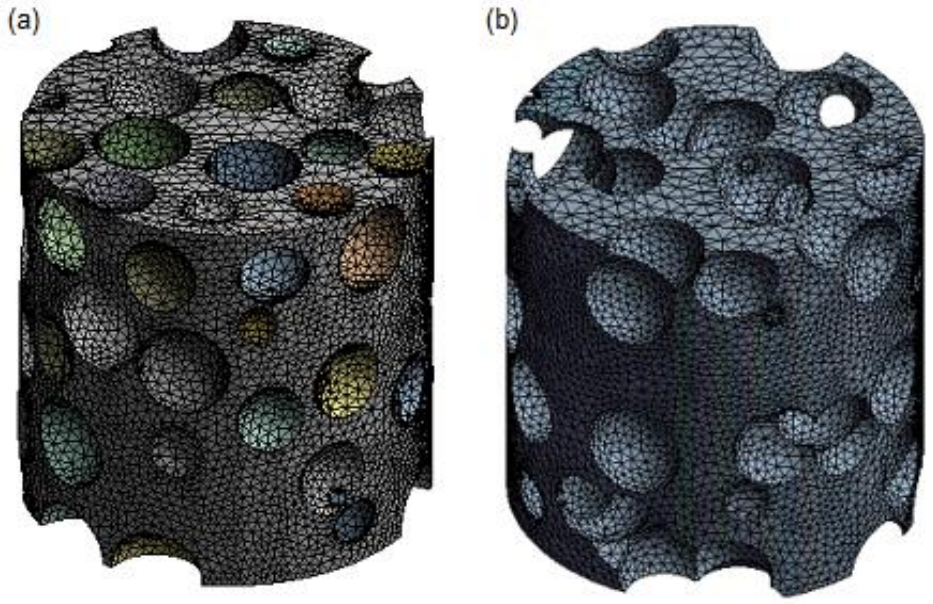


Figura 46. Mallado para espumas con a) esferas y b) poros.

Las espumas de mayor incorporación de esferas y por la demanda que significa trabajar con estos tipos de mallados, producirá que se demoren en procesar los datos por la demanda computacional que esto conlleva.

#### 4.1.3.1 Mallado de esferas

Para el mallado de las esferas de Fe, se utiliza un mallado distinto que en la matriz. Se inserta el método de triángulos, que permite que la pared de la esfera este formada por elementos de su mismo espesor. En la parte *Project* se selecciona *mesh* insertar método *all triangles method* (ver Figura 47). En donde se seleccionan solo las esferas de la probeta como se muestra en la Figura 48.

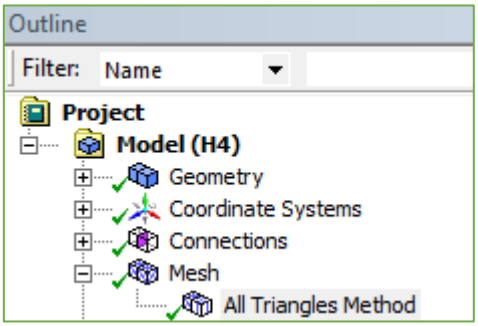


Figura 47. Especificaciones método de triángulos.

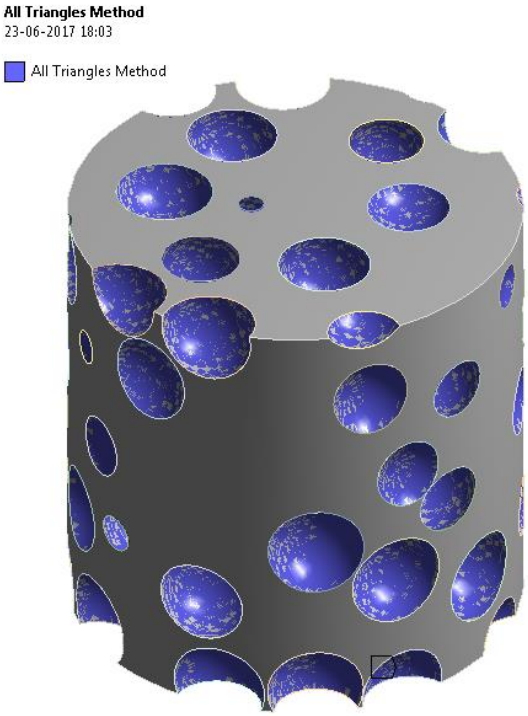


Figura 48. Características de mallado para esferas huecas de hierro.

### 4.1.4 Condiciones de contorno

Para poder representar de forma real las condiciones de un trabajo experimental, se deben aplicar las condiciones de contorno, fuerzas, desplazamientos y parámetros aplicados a una geometría.

La primera condición que se coloca es prohibir el desplazamiento en una de las caras de la probeta. Como primera instancia en la cara inferior se coloca un desplazamiento igual a 0 $mm$ en el eje Z, esto genera que la cara inferior quede inmovilizada como se puede apreciar en la Figura 49.

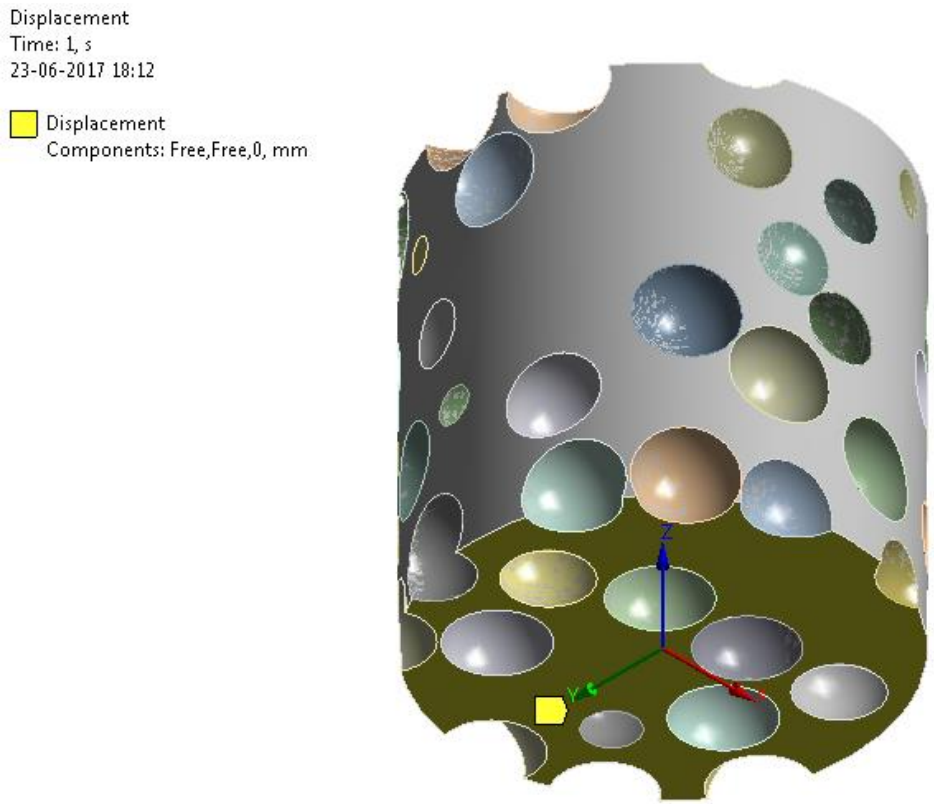


Figura 49.Condición de desplazamiento de la cara inferior de la probeta.

| Definition | |
|---|---|
| Type | Displacement |
| Define By | Components |
| Coordinate System | Global Coordinate System |
| X Component | Free |
| Y Component | Free |
| Z Component | 0, mm (ramped) |
| Suppressed | No |

Figura 50. Restricciones para cara inferior.

La segunda condición para obtener un buen resultado es el remote displance, que consiste en el acoplamiento de los nodos en la cara superior, esto lograra obtener una deformación igual en todos los puntos de la cara, en este caso se coloca una deformación del 1% de acuerdo con el largo de la probeta, (es lo máximo que podrá deformarse la probeta). En la Figura 51 se puede apreciar dicha condición.

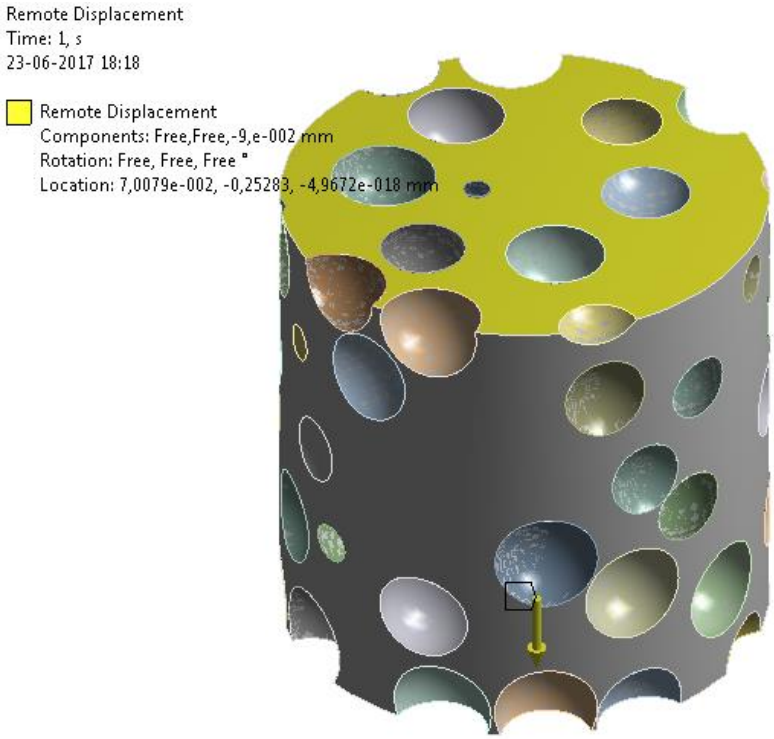


Figura 51. Condición de desplazamiento remoto en la cara superior.

Se debe seleccionar la cara superior y colocar *remote displance* y en el eje z colocar la deformación del 1%, luego en *bahavior* se coloca *coupled*. El detalle de dicha condición se muestra en la Figura 52.

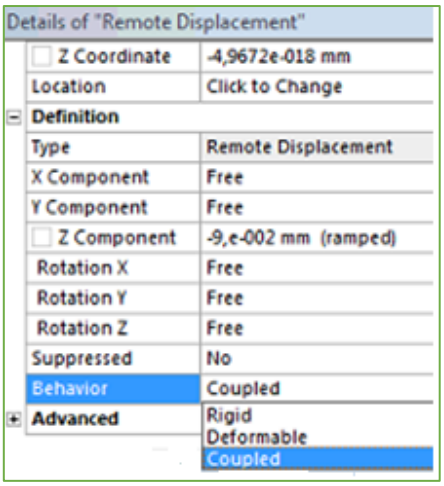


Figura 52. Detalle de la condición de desplazamiento remoto.

Por último, se le aplica las soluciones que para este caso la fundamental es la fuerza de reacción. El software puede calcular la fuerza de reacción en la cara inferior de la probeta cilíndrica debido al desplazamiento gradual aplicado. Para ello, se aplica "*Force reaction*" que se encuentra en la sección "*probe*" ingresando los detalles que se muestran en la Figura 53.

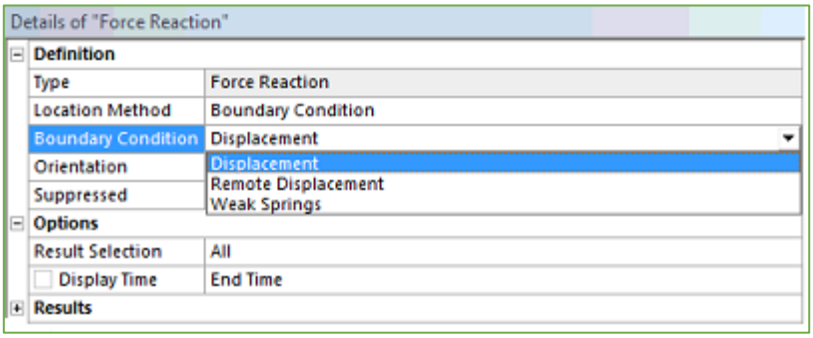


Figura 53. Detalle de la fuerza de reacción.

## 4.2 Cálculo de propiedades mecánicas para las espumas sintácticas de matriz de Cu reforzadas con esferas hueca de Fe.

Terminada la simulación de todas las probetas, el programa entrega la fuerza de reacción resultante en función del acortamiento de la muestra, estos datos permiten determinar el esfuerzo en función a la deformación, y con ellos obtener el módulo de Young. La relación (4) determina el esfuerzo ($\sigma$).

$$\sigma = \frac{Fuerza[F]}{Área[A]} \tag{4}$$

En donde (F) es la carga instantánea aplicada y (A) es el área de la cara perpendicular de la probeta a la fuerza (F) antes de que ocurra la deformación.

$$\varepsilon = \frac{Variación\ del\ largo[\Delta l]}{Largo\ inicial\ [l]} \tag{5}$$

La deformación **ε** viene dada por la relación (5), en donde la variación del largo (ΔL) se calcula como la longitud inicial en dirección de la fuerza menos la longitud instantánea.

La ley de Hooke determina el comportamiento de muestra bajo cargas uniaxiales en la zona elástica, como se expresa en la relación (6).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{6}$$

Con esta expresión se logra deducir que el esfuerzo ($\sigma$) y la deformación ($\varepsilon$) son directamente proporcionales, (E) representa el módulo de Young, el cual también se interpreta como la rigidez de un material o la resistencia a ser deformado elásticamente.

En las simulaciones la fuerza (F) viene dada por la fuerza de reacción en dirección al eje z, el área (A) se calcula obteniendo de la cara del cilindro inmóvil sin considerar poros ni esferas. La variación del largo para este trabajo se utilizó de 1% en la altura de la probeta y los largos inicial, corresponden al largo original de la probeta en este caso de 8, 9 y 10 $mm$.

## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Simulación

Al simular las probetas, éstas entregan la fuerza de reacción, un ejemplo se muestra en la Figura 54 en donde se aprecia la simulación en dos probetas de 8 $mm$ con una porosidad de 44%, para una espuma convencional y para una espuma reforzada con esferas.

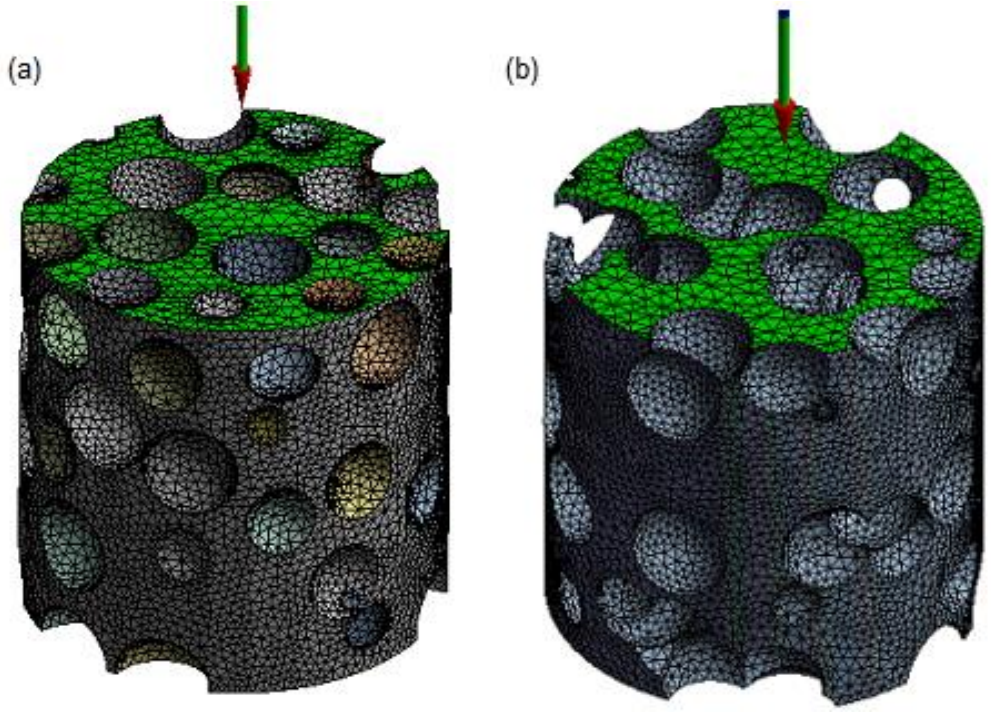


Figura 54. Fuerza de reacción para probetas con 44% de porosidad y 8 $mm$ de tamaño. a) Probeta con esferas y b) probeta con poros.

### 4.3.2 Cálculos

Con los resultados de la simulación se calculan el esfuerzo y módulo de Young para todas las pruebas utilizando las fórmulas mencionadas en el apartado anterior.

En la Tabla 7, se presentan los resultados y cálculos para distintas probetas de espumas reforzadas según su porosidad y diámetro, mientras que en la Tabla 8 se muestran las probetas de espumas con poros.

Tabla 7.Resumen de resultados para espumas sintácticas de Cu con esferas huecas de Fe.

| Porosidad | Altura $[mm]$ | Área $[mm^2]$ | Fuerza $[N]$ | Esfuerzo $[Mpa]$ | Módulo de Young $[Gpa]$ |
|---|---|---|---|---|---|
| **13%** | 8 | 50,27 | 43810 | 871,5 | 87,15 |
| | 9 | 63,62 | 54145 | 851,1 | 85,11 |
| | 10 | 78,54 | 68048 | 866,4 | 86,64 |
| **21%** | 8 | 50,27 | 35854 | 714,1 | 71,41 |
| | 9 | 63,62 | 46144 | 725,3 | 72,53 |
| | 10 | 78,54 | 56500 | 719,4 | 71,94 |
| **33%** | 8 | 50,27 | 27185 | 541,1 | 54,11 |
| | 9 | 63,62 | 35291 | 554,7 | 55,47 |
| | 10 | 78,54 | 44902 | 571,7 | 57,17 |
| **38%** | 8 | 50,27 | 22422 | 450,6 | 45,06 |
| | 9 | 63,62 | 30860 | 484,2 | 48,42 |
| | 10 | 78,54 | 37587 | 478,6 | 47,86 |
| **44%** | 8 | 50,27 | 19118 | 384,2 | 38,42 |
| | 9 | 63,62 | 24830 | 390,3 | 39,03 |
| | 10 | 78,54 | 29501 | 375,6 | 37,56 |

Tabla 8. Resumen de resultados para geometrías con poros.

| Porosidad | Altura $[mm]$ | Área $[mm^2]$ | Fuerza $[N]$ | Esfuerzo $[Mpa]$ | Módulo de Young $[Gpa]$ |
|---|---|---|---|---|---|
| **13%** | 8 | 50,27 | 42759,662 | 850,6 | 85,06 |
| | 9 | 63,62 | 53873,416 | 846,8 | 84,68 |
| | 10 | 78,54 | 66201,366 | 842,9 | 84,29 |
| **21%** | 8 | 50,27 | 34656,138 | 689,4 | 68,94 |
| | 9 | 63,62 | 44088,66 | 693,0 | 69,3 |
| | 10 | 78,54 | 54121,914 | 689,1 | 68,91 |
| **33%** | 8 | 50,27 | 26683,316 | 530,8 | 53,08 |
| | 9 | 63,62 | 34513,85 | 542,5 | 54,25 |
| | 10 | 78,54 | 43283,394 | 551,1 | 55,11 |
| **38%** | 8 | 50,27 | 19404,22 | 386 | 38,60 |
| | 9 | 63,62 | 24379,184 | 383,2 | 38,32 |
| | 10 | 78,54 | 30277,17 | 385,5 | 38,55 |
| **44%** | 8 | 50,27 | 16106,508 | 320,4 | 32,04 |
| | 9 | 63,62 | 20008,49 | 314,5 | 31,45 |
| | 10 | 78,54 | 24665,487 | 314,05 | 31,4 |

Para facilitar el análisis de resultados, las Figuras 55, 56 y 57 muestran los gráficos módulo de Young v/s Porosidad de todas las simulaciones realizadas, comparando para cada tamaño de geometría las espumas sintácticas con esferas huecas y espumas con poros.

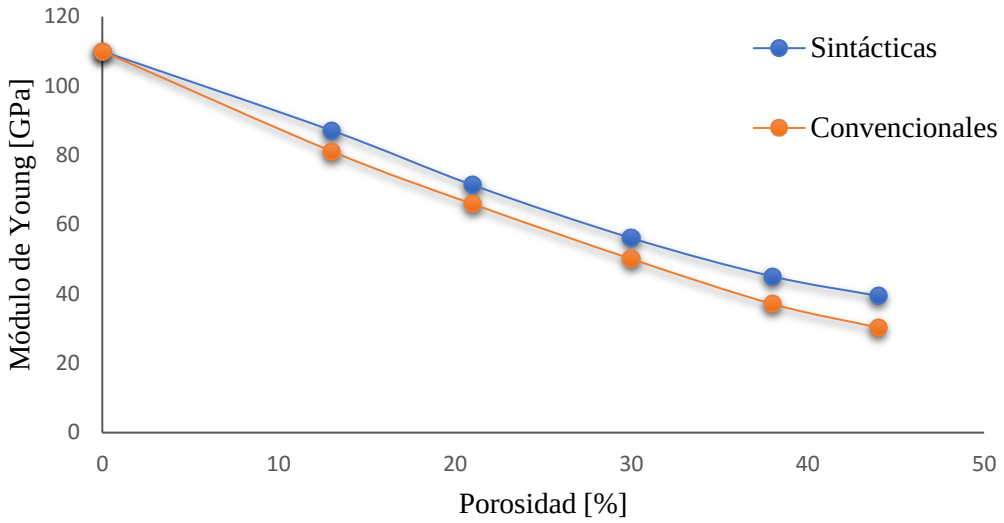


Figura 55. Gráfico para el estudio del comportamiento del Módulo de Young versus la porosidad para probetas de 8 $mm$, con esferas y con poros.

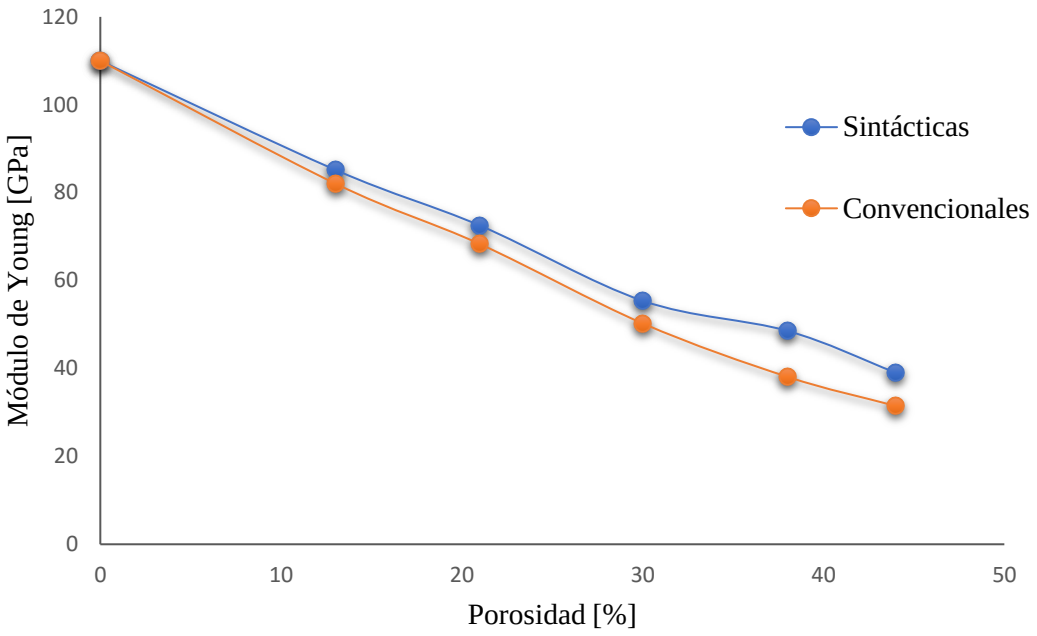


Figura 56. Gráfico para el estudio del comportamiento del Módulo de Young versus la porosidad para probetas de 9 *mm*, con esferas y con poros.

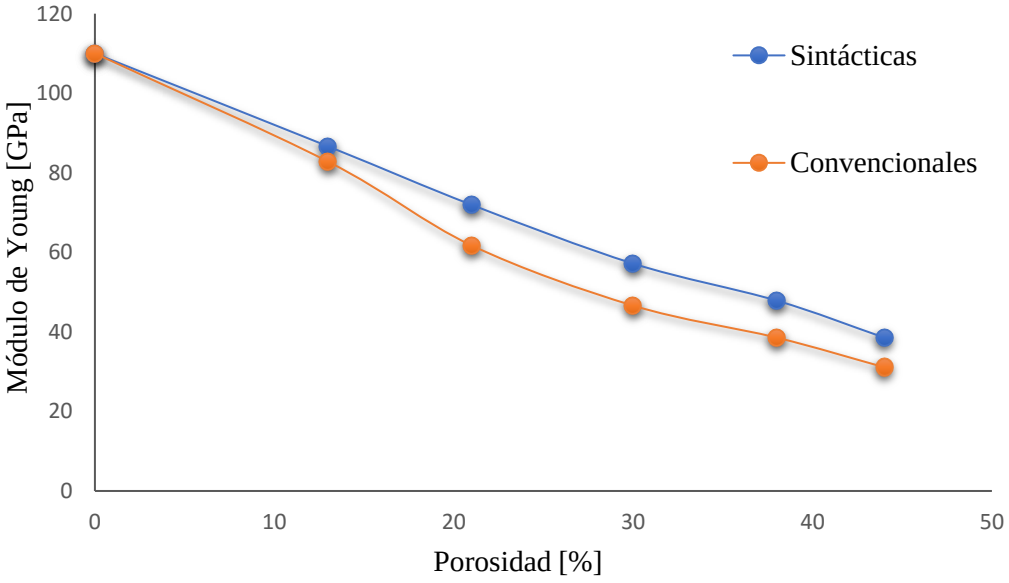


Figura 57. Gráfico para el estudio del comportamiento del Módulo de Young versus la porosidad para probetas de 10 *mm*, con esferas y con poros.

Para poder apreciar con mayor claridad cómo afecta el tamaño de la geometría en la simulación se genera un gráfico (ver Figura 58), donde se muestran las relaciones entre porcentaje de porosidad y módulo de Young para las espumas con esferas huecas de tamaño 8, 9 y 10 $mm$ y en la Figura 59 para las espumas con poros.

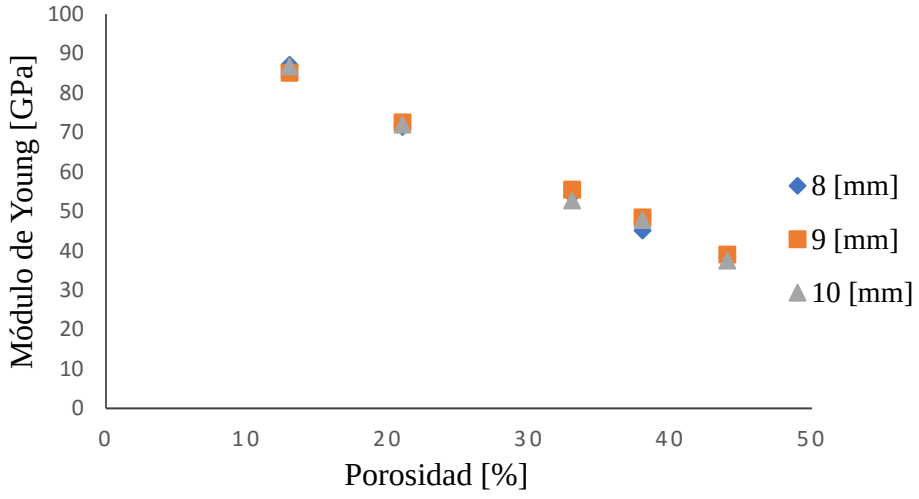


Figura 58. Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de los distintos tamaños de espuma con esfera hueca.

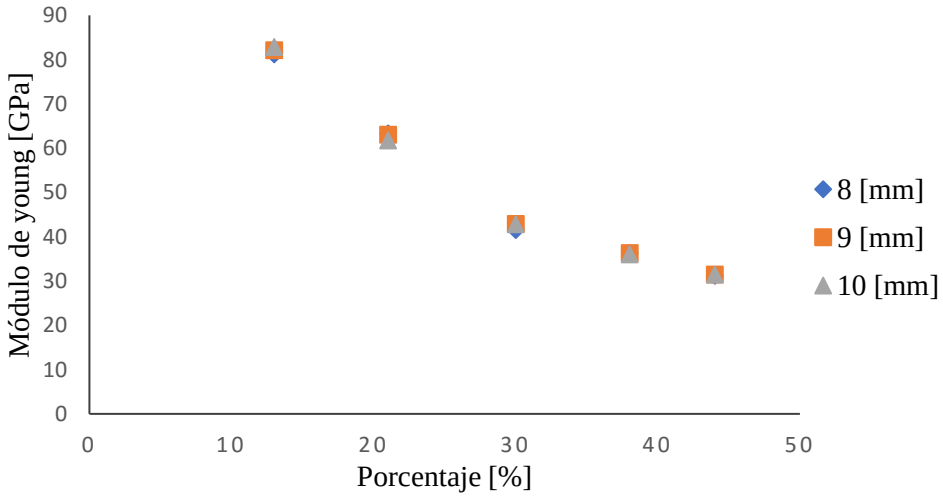


Figura 59. Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de los distintos tamaños de espuma con poros.

## 4.4 Análisis de Resultados

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se puede apreciar que a medida que aumenta la porosidad para cada tamaño de probeta disminuye su módulo de Young, ya que, la estructura pierde material, disminuyendo su resistencia a cargas externas, hasta el punto de crear zonas con paredes celulares delgadas que se deforman con mayor facilidad, es decir una porosidad mayor hace que la geometría tenga menores propiedades mecánicas.

De los gráficos 55, 56 y 57 que comparan las curvas que se producen de las espumas reforzadas y de las espumas convencionales, es posible apreciar que el módulo de Young de las espumas reforzadas aumenta un poco en comparación con las espumas convencionales, diferencia que se incrementa al aumentar la porosidad, corroborándose para los 3 tamaños de geometría diferentes. Esto se puede explicar por la existencia de esferas huecas de hierro que permiten una mejor distribución de esfuerzos debido al material de las esferas, que resiste las deformaciones. Para porosidades bajas, la distribución de esferas en las espumas reforzadas se asemeja a las convencionales, debido a la mayor distancia entre poros, pero al aumentar la porosidad en las espumas convencionales comienzan a formarse zonas de celda abierta por la interconexión de los poros causado por la disminución de distancia entre ellos y por consiguiente disminuye también de espesor de pared celular, lo que no ocurre en las espumas reforzadas.

El rango de mayor diferencia se encuentra en las probetas de mayor porosidad, esto se debe a que las probetas con poros de 44% de porosidad se caracterizan por tener un elevado número de poros, lo cual incrementa la posibilidad de que se generen concentraciones de esfuerzo, lo que indica que la estructura se debilita.

Se puede observar de las Figuras 58 y 59, que el tamaño de la geometría no influye demasiado en los resultados del módulo de Young. Las variaciones que existen se deben a la adición y/o sustracción de poros para ajustar las probetas a los valores estándar de porosidad.

# 5. Efecto de la interfase Cu-Fe en espumas sintácticas de Cu reforzadas con esferas Fe.

El comportamiento de las MMFS está influido por diversos parámetros como espesor de pared en las esferas, diámetro de esferas, volumen de fracción, etc.

Para obtener mejores resultados en el comportamiento mecánico de estas espumas sintácticas, se considera medir la interfase la cual separa las esferas de la matriz, actuando como principal factor de influencia sobre el módulo de Young de las espumas sintácticas.

En esta sección se busca determinar cómo influye la interfase Cu-Fe entre el material de la matriz y el material de las esferas huecas. La unión entre estos dos metales como se especifica en el apartado 3.7.2 no genera compuesto alguno, por lo tanto, su adherencia y penetración entre ambos materiales dependerá en gran parte de su proceso de fabricación. Para este caso, se supone el mismo mencionado en el capítulo 3.7 en donde el proceso de fabricación es por infiltración de metal líquido usando gas inerte en espumas sintácticas de matriz de aluminio [51].

Por lo tanto, se toma como cuantificador del tamaño de la interfase al espesor de esferas huecas utilizadas en las simulaciones. Se utilizan las mismas probetas ya simuladas en el capítulo anterior, pero esta vez se modifican para hacer variar el espesor de pared de esferas en 4 medidas diferentes

## 5.1 Desarrollo

La geometría utilizada cumple con las mismas características que se describen en el capítulo 6. Se realizaron pruebas para espesores de esfera de; 0,015, 0,02; 0,023 y 0,03. Para poder modificar el espesor en las probetas ya mencionadas, en la parte *geometry* se seleccionan todas las esferas y modificando espesor en *thickness* como se muestra en la Figura 60.

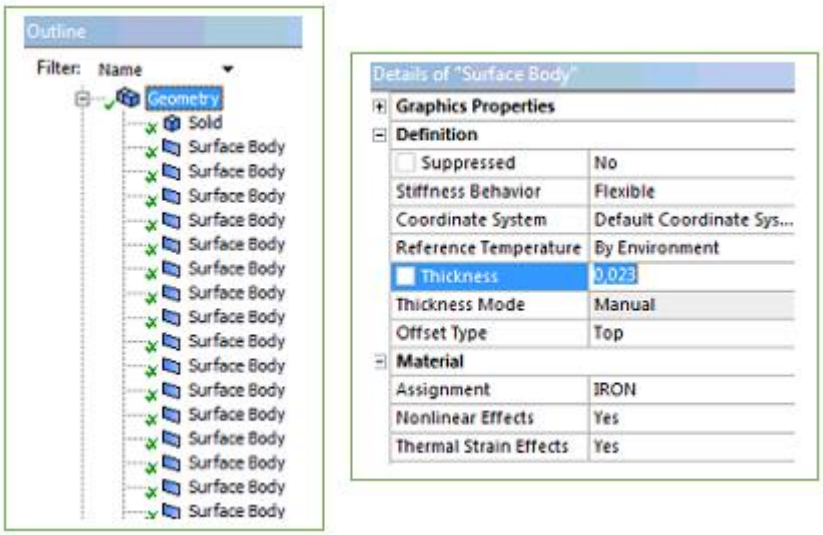


Figura 60. Detalle de la modificación en el espesor.

### 5.1.1 Mallado

Se utilizó la misma técnica de mallado que en el apartado 4.1.2 para las espumas de cobre reforzadas con esferas huecas de Fe.

## 5.2 Resultados

En el anexo 9.1 y 9.2 se muestra el resultado de la simulación en donde se presenta la fuerza de reacción variando los espesores de las esferas huecas de Fe. Con ello se calcula el módulo de Young para cada valor entregado. Para las 4 medidas de espesor se simula 3 veces cada geometría, con el fin de conseguir resultados más exactos donde se corrobora que la simulación se desarrolla de forma correcta obteniendo un promedio de valores para cada geometría.

Con los resultados obtenidos se generaron los siguientes gráficos (Figuras 61, 62 y 63), donde se aprecia la variación en el espesor para cada porosidad y tamaño de probeta.

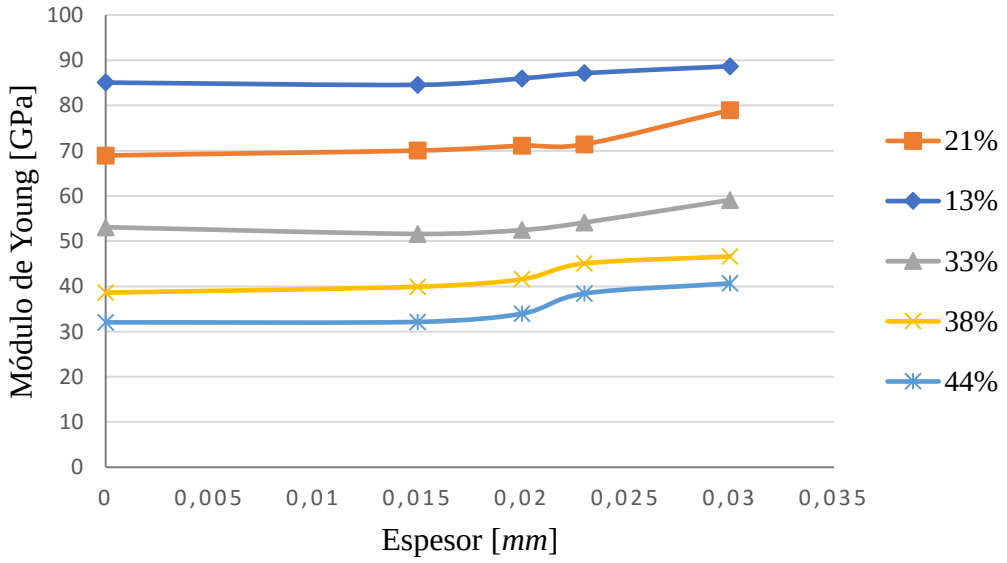


Figura 61. Comportamiento en la variación de espesores de esferas para probetas de diferente porosidad y tamaño de 8 *mm*.

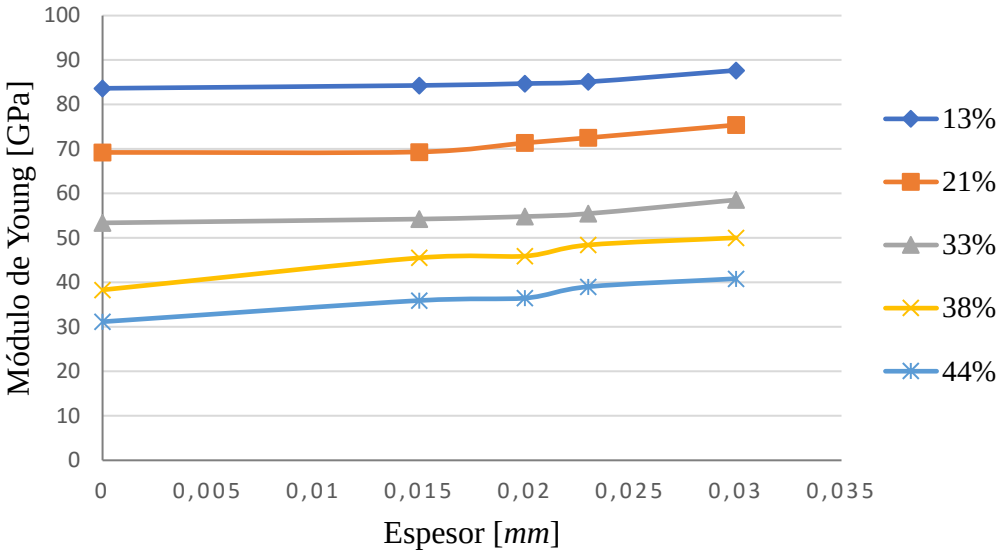


Figura 62. Comportamiento en la variación de espesores de esferas para probetas de diferente porosidad y tamaño 9 *mm*.

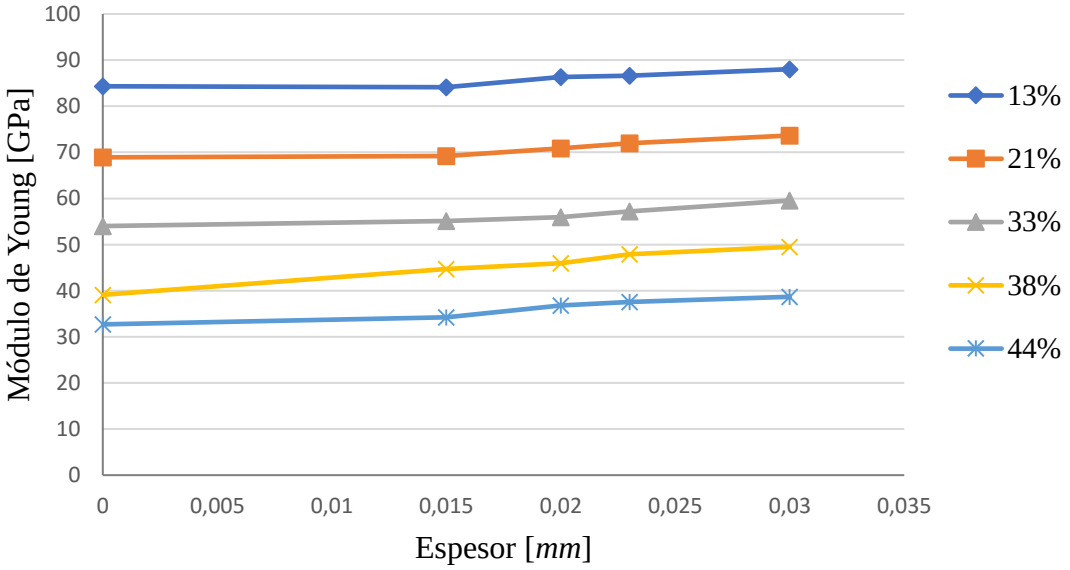


Figura 63. Comportamiento en la variación de espesores de esferas para probetas de diferente porosidad y tamaño 10 *mm*.

Del gráfico de la Figura 61 (módulo de Young en función del espesor) se puede apreciar que, al aumentar el espesor en las micro esferas huecas de Fe, se produce un leve aumento en el módulo de Young de las geometrías, esto se corrobora para las probetas de tamaño 9 y 10 $mm$ de las Figuras 62 y 63.

Mediante este estudio es posible demostrar en forma numérica por medio del análisis de elementos finitos el efecto que tiene hacer variar el espesor de las esferas de refuerzo en una espuma sintáctica de cobre. Se comprueba que existe un aumento en el módulo de Young de las probetas de espuma sintáctica de cobre a medida que aumenta el espesor de las esferas de Fe.

El aumento de espesor de esferas disminuye los defectos que se forman en las paredes de los poros de la espuma sintáctica reduciendo las propiedades en comparación con los valores medidos por las espumas de convencionales. Se logra disminuir de manera importante la densidad de un material, manteniendo o incluso pudiendo mejorar las propiedades mecánicas de las espumas sintácticas de cobre.

# 6. Conclusiones

Al realizar este trabajo se logra desarrollar un modelo 3D representativo de las espumas sintácticas con esferas huecas y probetas generadas con poros.

Se logra determinar numéricamente las propiedades mecánicas de las espumas sintácticas de matriz de cobre con esferas huecas de hierro, utilizando el método de elementos finitos mediante el software ANSYS, que resulta ser una gran herramienta para el análisis de estas espumas sintácticas.

Se comprueba, a través de las modelaciones que la simulación es eficaz, ya que la calidad de malla es aceptable según los parámetros de calidad de elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal.

Se llega a la conclusión que el tamaño de la geometría 8, 9 y 10 $mm$ no afecta significativamente en las simulaciones, pues de los gráficos porosidad v/s módulo de Young se obtuvieron resultados similares para cada tamaño.

Comparando las curvas que se generaron de las probetas de espumas sintácticas y las probetas de espumas convencionales, se deduce que la incorporación de las esferas afecta en las propiedades mecánicas de la probeta. Esto se puede explicar por la existencia de esferas huecas de hierro que permiten una mejor distribución de esfuerzos debido al material de las esferas, que resiste las deformaciones.

Para porosidades bajas, la distribución de esferas en las espumas reforzadas se asemeja a las convencionales, debido a la mayor distancia entre poros, pero al aumentar la porosidad en las espumas convencionales comienzan a formarse zonas de celda abierta por la interconexión de los poros causado por la disminución de distancia entre

ellos y por consiguiente disminuye también de espesor de pared celular, lo que no ocurre en las espumas reforzadas.

Usando el espesor de pared de las esferas para analizar la interfase se deduce que la variación de espesor influye levemente en los resultados de las simulaciones. De tal manera que a mayor espesor de esferas mayores son la interfase y el módulo elástico.

En todas las probetas se corrobora que el aumento de la porosidad en cada probeta disminuye el módulo de Young y el esfuerzo de fluencia. Las relaciones son lineales para todas las geometrías.

# 7. Trabajos Futuros

A partir de las inquietudes encontradas en el desarrollo de este trabajo se sugiere seguir con las siguientes líneas de análisis:

- Es importante analizar y desarrollar las espumas sintácticas de cobre según el método de fabricación adecuado ya que este tiene influencia en el tamaño de interfase de las espumas sintácticas de cobre con esferas huecas de hierro.
- Analizar las espumas sintácticas de cobre modificando módulo de elasticidad aparte del espesor de pared de las esferas huecas.

# 8. Referencias

[1] Banhart, J. 2001. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science. 46(6):559-632

[2] Gutiérrez-Vázquez, J.A. y Oñoro, J. 2008. Espumas de aluminio: fabricación, propiedades y aplicaciones. Revista de Metalurgia. 44(5):457-476.

[3] W.S. Sanders, L.J. Gibson /Mechanics of hollow sphere foam, Materials Science, and Engineering A347 (2003) 70-85.

[4] A.M. Parvanian, M. Panjepour. Mechanical behavior improvement of open-pore copper foams synthesized through space holder technique / Materials and Design 49 (2013) 834–841.

[5] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley. Metal Foams: A Design Guide, Butterworth–Heinemann, Oxford, UK, 2000.

[6] Andrews E, Sandersw, Gilson L. Comprenssive and tensile behavior of aluminium foams, Materials Science and Engineering A 270; 113-124. 1999.

[7] Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S. y Kitahar, A. 2000. ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications. Advanced Engineering Materials. 2(4):179-183.

[8] BANHART J. Manufacturing Routes for Metallic Foams, JOM 52(12):22-27. 2000

[9] Fernández, P., Cruz, L. J., & Coleto, J. (2009). Procesos de fabricación de metales celulares. Parte II: Vía sólida, deposición de metales, otros procesos. Revista de Metalurgia, 45(2), 124-142.

[10] ERG MATERIALS AND AEROSPACE CORP., URL http://www.ergaerospace.com. 2011 (Julio).

[11] AUTO DESKTOP University [en línea]. http://auworkshop.autodesk.com/library/cfdaec/troubleshooting-meshing-issues-aec-applications [consulta: 28 noviembre 2015].

[12] Benke, S., Weichert, D., 2003. Meso-mechanical modeling of damage in metal foams. Key Engineering Materials 251–252, 345–350.

[13] http://farm2.static.flickr.com/7773/543897653_15817da5fc_m.jpg

[14] http://arquitecturaesopal.files.wordpress.com/2007/03/birdwing-1.jpg

[15] D.D Luong V.C Shunmugasamy, N. Gupta, D.Lehmhus, J. Weise, J. Baumeister,Quasi-static and high strain rates comprenssive response of iron and Invar matrix syntactic foams, Mater. Des. 66(2015) 515-531.

[16] A, Daoud, M.T. Abou El- Khair, M. Abdel-Aziz, P. Rohatgi, Fabrication, microstructure and comprenssive behavior of Mg-microballoon foam composites, Compos sci and technol. 67(2007) 1842-1853.

[17] A. Daoud, Synthesis and characterization of novel ZnAl22 syntactic foam composites via casting, Mater. Sci. Eng., A 488(2008) 281-295.

[18] D.P. Mondal, J.Datta Majunder, N Jha, A. Badkull, S. Das, A. patel, G. Gupta, Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route, Mater. Des. 34(2012) 82-89.

[19] Hollomet GmbH. <http://www.hollomet.com/home.html> (accessed 18.12.14).

[20] Deep Springs Technology. <http://www.teamdst.com/HollowShells.htm >(accessed 18.12.14).

[21] G.A. Rocha Rivero, B.F. Schultz, J.B. Ferguson, N. Gupta, P.K. Rohatgi, Compressive properties of Al–A206/SiC and Mg–AZ91/SiC syntactic foams, J. Mater. Res. 28 (2013) 2426–2435.

[22] M, Taherishargh, I.V. Belova, G.E. Murch, T. Fiedler, Low- density expanded perlite-aluminium syntactic foam, Mater. Sci. Eng, A604(2014) 127-134.

[23] http://cel.sagepub.com/content/16/4/223.refs.htm.

[24] Rohatgi P.K., Gupta, N., Schultz, B.F et al. JOM (2011) 63: 36. https://doi.org/10.1007/s11837-011-0026-1.

[25] G. Castro, S.R. Nutt, Synthesis of syntactic steel foam using gravity-fed infiltration, Mater. Sci. Eng., A 553 (2012) 89–95.

[26] G. Castro, S.R. Nutt, Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration, Mater. Sci. Eng., A 535 (2012) 274–280.

[27] M. Hrairi, M. Ahmed, and Y. Nimir, *Advanced Powder Technology*, 20 (6) (2009), pp.548–553.

[28] N. Sobczak, J. Sobczak, J. Morgiel, and L. Stobierski, *Materials Chemistry and Physics*, 81 (2-3) (2003), pp. 296–300.

[29] M, Taherishargh, I.V. Belova, G.E. Murch, T. Fiedler, On the particle size effect inexpanded perlite aluminium syntactic foam, Mater. Des. 66(2015) 294-303.

[30] D.D Luong, O.M. Strbik III, V.H. Hammond, N Gupta,K. cho, Development of high performance lightweight aluminium alloy/ SiC hollow sphere syntactic foams and comprenssive characterization at guasi-stactic and high strain rates, J.Alloys Comp. 550(2013) 412-422.

[31] J. Weise, N. Salk, U. Jehring, J. Baumeister, D. Lehmhus, M.A. Bayoumi, Influence of powder size on production parameters and properties of syntactic invar foams produced by means of metal powder injection moulding, Adv. Eng. Mater. 15 (2013) 118–122.

[32] N. Gupta, P.K. Rohatgi, Metal Matrix Syntactic Foams, DES tech Publications, Inc., Lancaster, Pennsylvania, USA, 2014.

[33] P P.K Rohatgi, D. Weiss, and N. Gupta, JOM, 58(11) (2006), pp.71-76.

[34] Q.Zhang, P.D.Lee, R. Singh, G. Wu, and T.C. Lindley, Acta Materialia, 57(10)(2009), pp.3003-3011.

[35] S. Sankaran et al. Syntactic Foams for Multifunctional Application, K.K. Kar (ed.), Composite Materials, DOI 10.1007/978-3-662-49514-8_9.

[36] http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/21428-Espuma-sintactica-con-gran-potencial.html.

[37] VADWALA, Pathik. Thermal energy storage in copper foams filled with paraffin wax. Tesis (Master of Applied Science). Toronto. University of Toronto, Department of Mechanical & Industrial Engineering, 2011.

[38] REZAEY, Reza. High temperature gas to liquid metal foam and wire mesh heat exchangers. Tesis (Master of Applied Science). Toronto. University of Toronto, Department of Mechanical & Industrial Engineering, 2012.

[39] Goodall R, Marmottant A, Salvo L, Mortensen A. Spherical pore replicated microcellular aluminium: processing and influence on properties. Mater Sci Eng A 2007;465:124–35.

[40] D. Domancic. Análsis de esfuerzos de probetas porosas de Aluminio Mediante el Método de Elementos Finitos. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2014.

[41] Gibson, L., Ashby, M., 1997. Cellular Solids: Structure and Properties, Second ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

[42] Eshelby, J.D., “The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems”, Proc. Roy. Soc. London., A241, 376-396, (1957).

[43] L. Bardella, A. Sfreddo, C. Ventura, M. Porfiri, N. Gupta, A critical evaluation of micromechanical models for syntactic foams, Mech. Mater. 50 (2012) 53-69.

[44] Korendo, M., Finite Element Homogenization of porous titanium based on an extended Rosette Gage Theory. 2014: p. 78.

[45] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor (2007). El Método de los Elementos Finito. España: McGraw-Hill y CIMNE.

[46] CERROLAZA, Miguel. El método de elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas. 1ª. ed. Venezuela, Universidad central de Venezuela, 2007.

[47] http://civil.uprm.edu/revistadesastres/Vol3num1/JacaGodoy%20C%2023_9_03.pdf#search='SIMULACION%20DE%20SOLDADURA

[48] CAD CAM Engineering WorldWide [en línea]. http://www.cadcamengineering.net/subdivide-facetbody-siemens-nx/ [consulta: 28 noviembre 2015].

[49] ANSYS, Inc (2012). Ansys Meshing User's Guide Rel. 14.5. Ansys, Inc.

[50] AUTO DESKTOP University [en línea]. http://auworkshop.autodesk.com/library/cfdaec/troubleshooting-meshing-issues-aec-applications [consulta: 28 noviembre 2015].

[51] A.Szlancsik et al./ Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres. Material & Desing 83 (2015) 230-237.

[52] N. Ramakrishnan, V.S. Arunachalam, Effective elastic moduli of porous ceramic materials, J. Am. Ceram. Soc 76(1993) 2745-2752.

[53] P.R. Marur, Influence of imperfect interface on the elastic moduli of syntactic foams, Comput. Mater. Sci. 46 (2009) 327–332.

[54] P.R Marur, Effective elastic moduli of syntactic foams, Mater. Lett. 59 (2005) 1954-1957.

[55] P.R Marur, Numerical estimation of effective elastic moduli of syntactic foams , Finite Elements Anal. Des. 46 (2010) 1001-1007.

[56] M. Porfiri, N. Gupta, Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites, Compos. Part B 40 (2009) 166-173.

[57] I Alfonso et al. FEA evaluation of the Al4C3 formation effect on the Young´s modulus of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites, Composite Structures 127 (2015) 420-425.

[58] Fredriksson et al. On the mechanism of liquid copper penetration into iron grain boundaries, Journal of Metallurgy 2001; 30: 41–50.

[59] T. Ishida. The interaction of molten copper with solid iron, Journal of materials science 21 (1986) 1171-1179.

# 9. Anexos

## 9.1 Mallado

a) Espuma con poros de 8 mm de altura con 13% de porosidad.

Tabla 9. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma a).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 2,252e-002 | 1,1901 | 1,8494e-003 | 6,8225e-002 |
| Valor máximo | 0,99989 | 45,161 | 0,99947 | 0,99066 |
| Promedio | 0,73451 | 2,1768 | 0,38506 | 0,78948 |
| Desviación estándar | 0,1294 | 0,68766 | 0,18921 | 0,1078 |

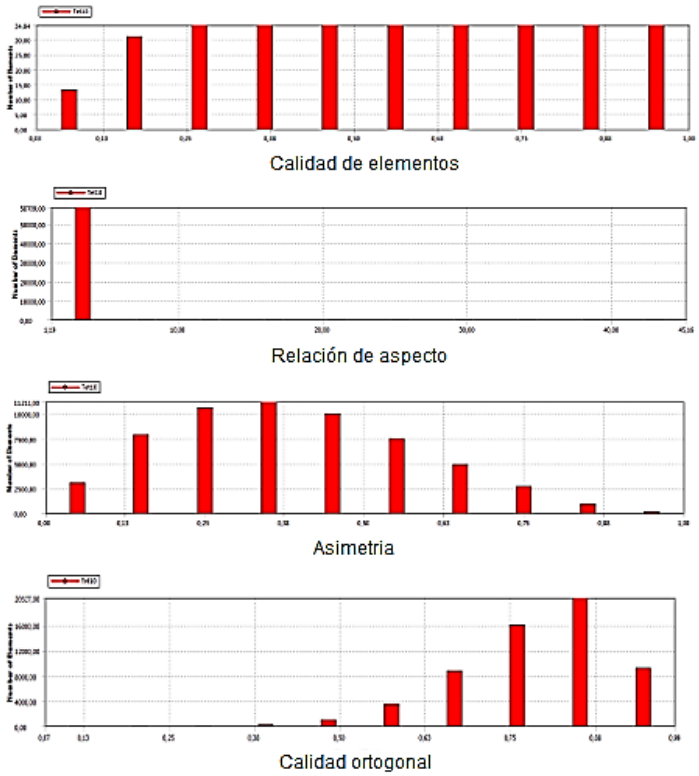


Figura 64. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma a).

b) Espuma con poros de 8 mm de altura con 21% de porosidad.

Tabla 10. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma b).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 4,3236e-002 | 1,1813 | 7,9029e-004 | 0,11255 |
| Valor máximo | 0,99965 | 23,705 | 0,99673 | 0,98781 |
| Promedio | 0,73082 | 2,1921 | 0,3866 | 0,78739 |
| Desviación estándar | 0,13189 | 0,71834 | 0,1908 | 0,1107 |

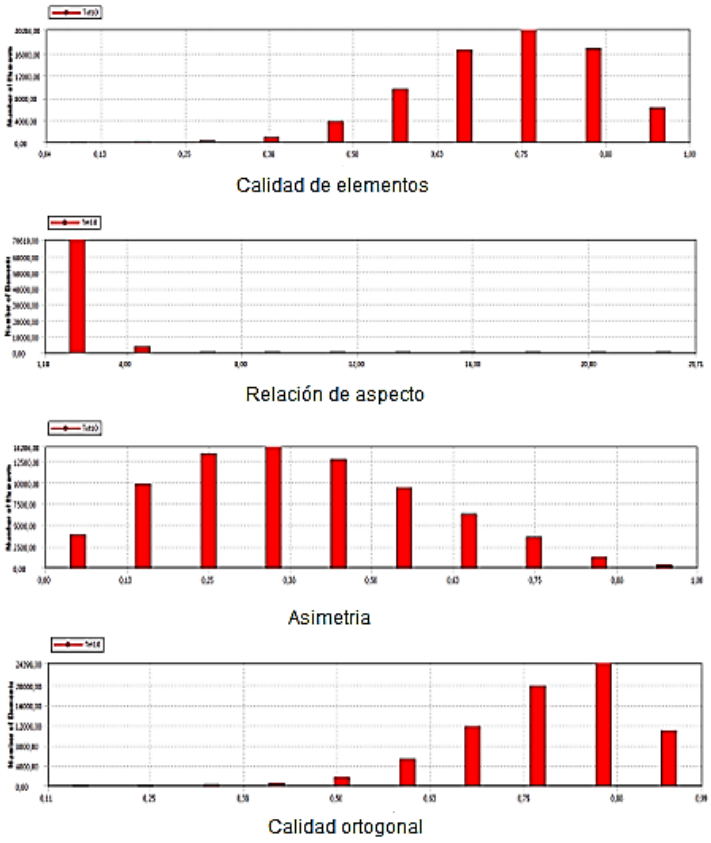


Figura 65. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma b).

c) Espuma con poros de 8 mm de altura con 30% de porosidad

Tabla 11. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma c).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 3,238e-002 | 1,1814 | 8,1088 e-004 | 5,3655e-002 |
| Valor máximo | 0,99965 | 81,197 | 0,9999 | 0,9929 |
| Promedio | 0,72066 | 2,2515 | 0,39421 | 0,78183 |
| Desviación estándar | 0,13665 | 1,2111 | 0,19331 | 0,11636 |

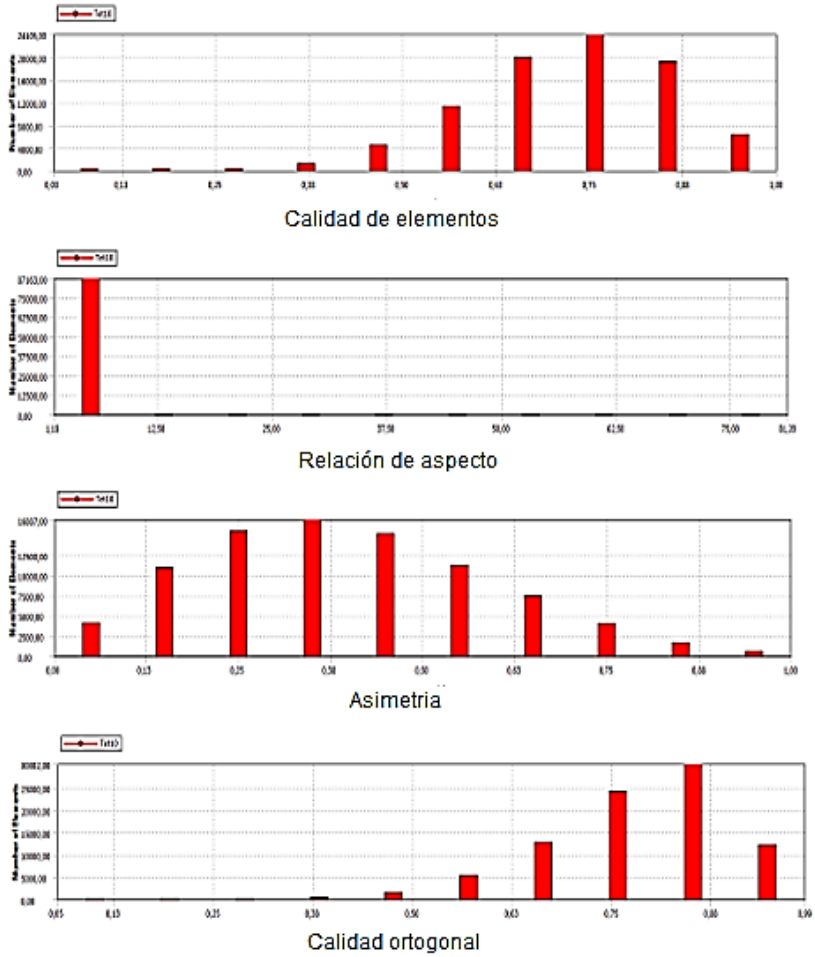


Figura 66. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma c).

d) Espuma con poros de 8 mm de altura con 38% de porosidad

Tabla 12. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma d).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 3,2322e-002 | 1,1771 | 1,6261e-003 | 5,6975e-002 |
| Valor máximo | 0,99983 | 96,505 | 0,9994 | 0,98892 |
| Promedio | 0,72229 | 2,2267 | 0,38751 | 0,78522 |
| Desviación estándar | 0,13589 | 1,1072 | 0,19139 | 0,1151 |

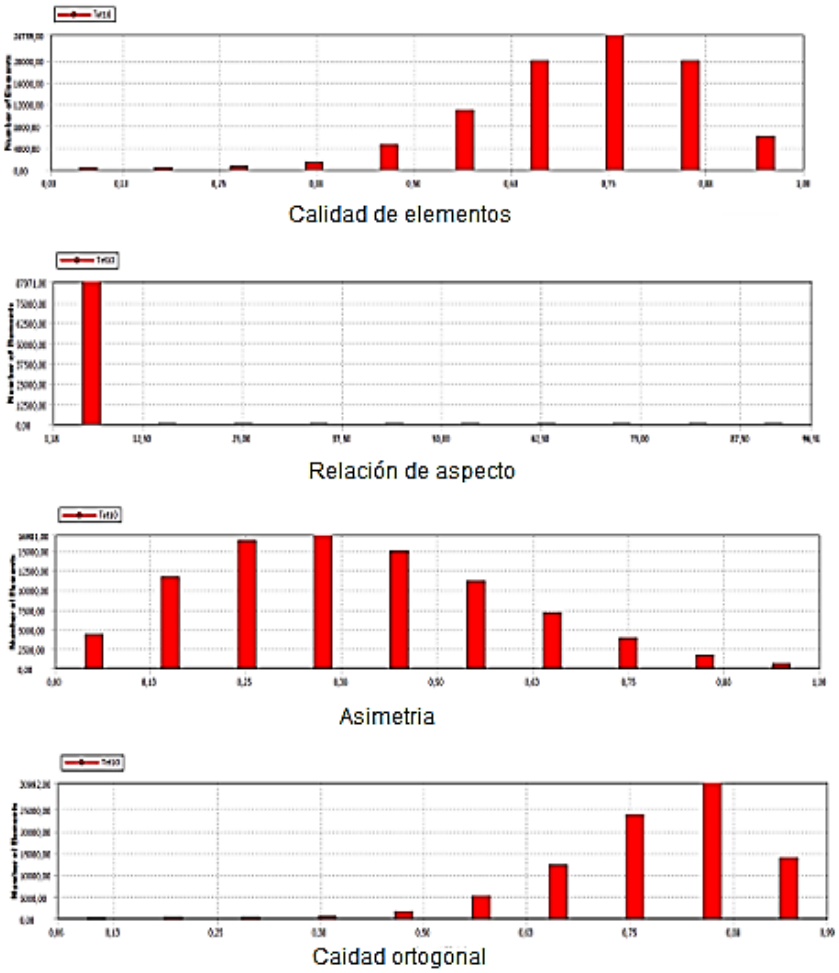


Figura 67. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma d).

e) Espuma con poros de 8 mm de altura con 44% de porosidad.

Tabla 13. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma e).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 3,9606e-002 | 1,1627 | 6,8329e-005 | 6,1785-002 |
| Valor máximo | 0,99961 | 90,57 | 0,99933 | 0,98889 |
| Promedio | 0,72003 | 2,2323 | 0,38513 | 0,7845 |
| Desviación estándar | 0,139 | 1,0452 | 0,19356 | 0,11787 |

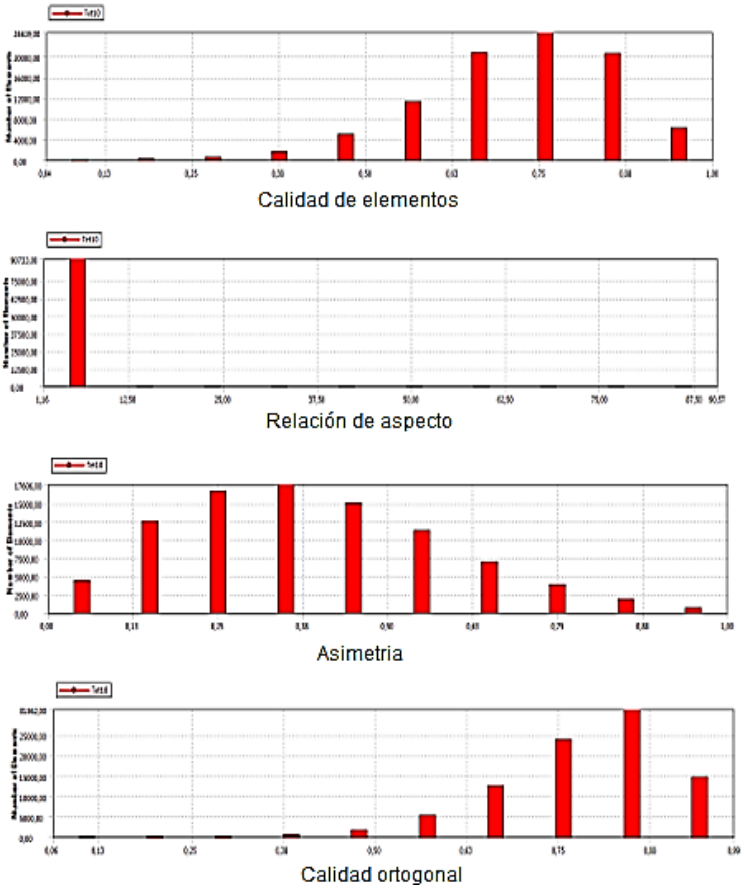


Figura 68. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma e).

f) Espuma sintáctica con esferas huecas, tamaño de 8 mm de altura con 13% de porosidad.

Tabla 14. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma f).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 4,9704 e-002 | 1,0022 | 8,2584e-006 | 5,3288e-002 |
| Valor máximo | 0,99999 | 92,3 | 0,99926 | 1 |
| Promedio | 0,75813 | 2,0803 | 0,34575 | 0,80837 |
| Desviación estándar | 0,14854 | 0,883442 | 0,21069 | 0,1225 |

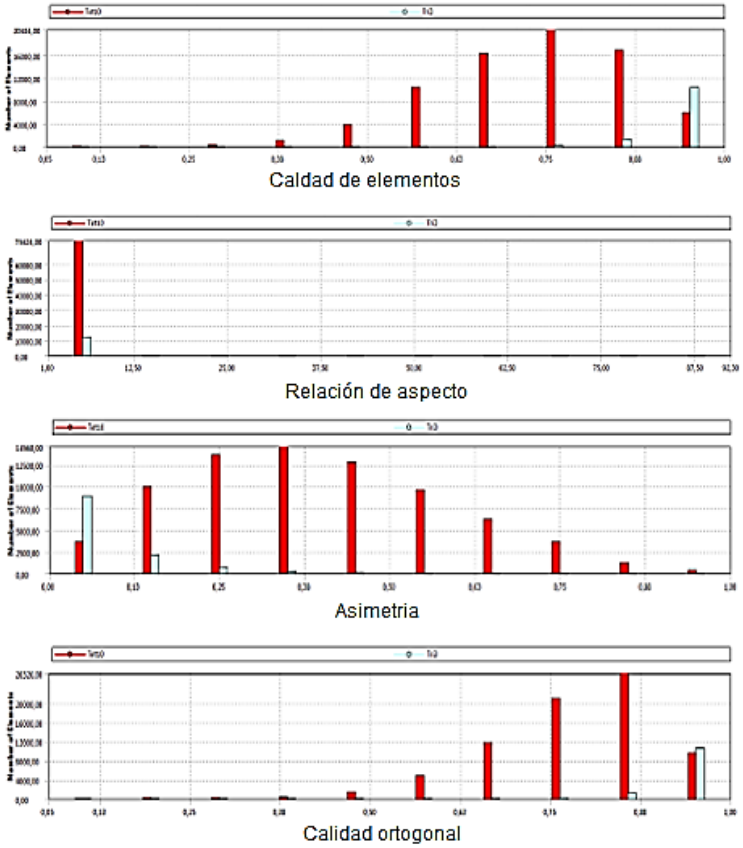


Figura 69. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma f).

g) Espuma sintáctica con esferas huecas, tamaño de 8 mm de altura con 21% de porosidad.

Tabla 15. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma g).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 5,4959 e-002 | 1,002 | 6,4418e-006 | 0,13997 |
| Valor máximo | 1 | 18,115 | 0,99533 | 1 |
| Promedio | 0,76456 | 2,04 | 0,33797 | 0,8134 |
| Desviación estándar | 0,14413 | 0,71108 | 0,20859 | 0,11782 |

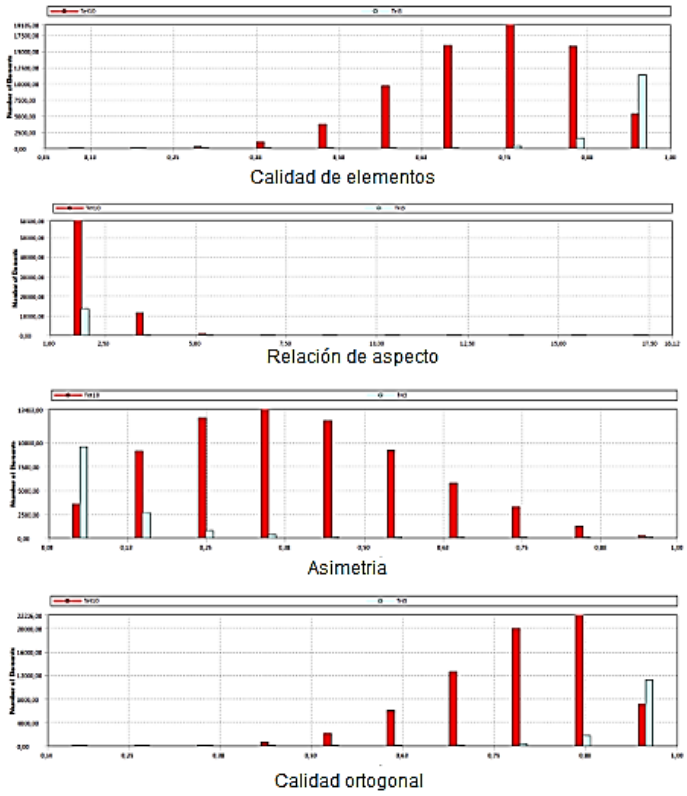


Figura 70. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma g).

h) Espuma sintáctica con esferas huecas, tamaño de 8 mm de altura con 30% de porosidad.

Tabla 16. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma h).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 3,1314 e-002 | 1,0026 | 1,1955e-005 | 9,0122e-002 |
| Valor máximo | 0,99999 | 46,636 | 0,9992 | 0,99999 |
| Promedio | 0,77152 | 2,0033 | 0,32059 | 0,82094 |
| Desviación estándar | 0,14869 | 0,79785 | 0,21004 | 0,12083 |

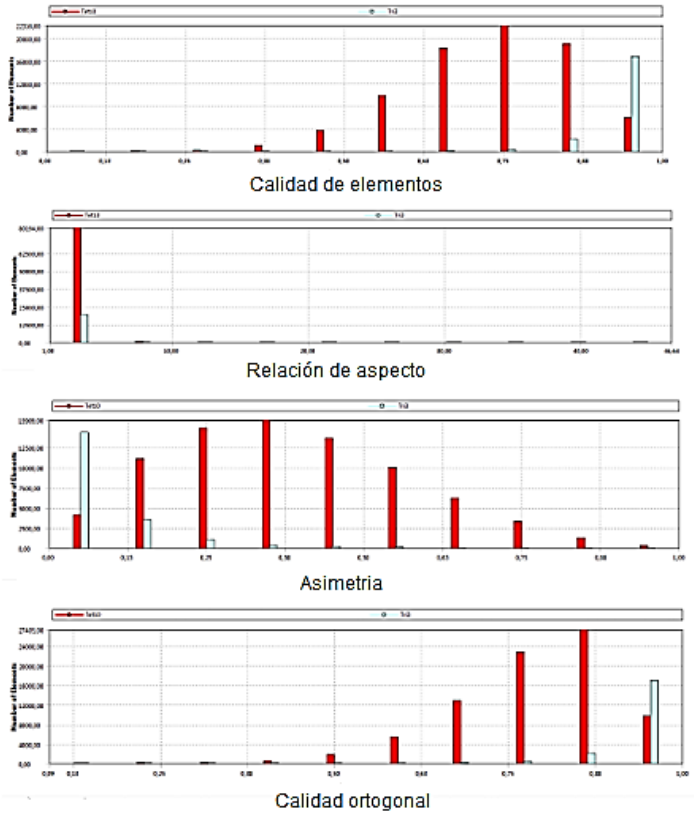


Figura 71. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma h).

i ) Espuma sintáctica con esferas huecas, tamaño de 8 mm de altura con 38% de porosidad.

Tabla 17. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma i).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 2,6032 e-002 | 1,0027 | 1,4224e-005 | 6,2926e-002 |
| Valor máximo | 0,99999 | 71,008 | 0,9995 | 0,99999 |
| Promedio | 0,77414 | 1,9998 | 0,31217 | 0,82387 |
| Desviación estándar | 0,15249 | 0,97455 | 0,21119 | 0,12439 |

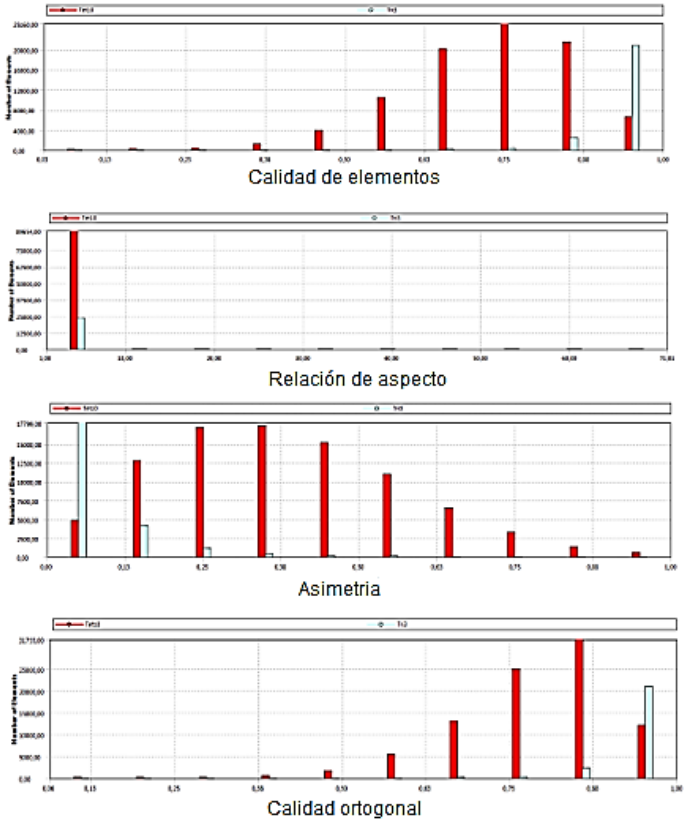


Figura 72. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma i).

j) Espuma sintáctica con esferas huecas, tamaño de 8 mm de altura con 44% de porosidad.

Tabla 18. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma j).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| Valor mínimo | 1,9518 e-002 | 1,0014 | 3,3742e-006 | 3,7078e-002 |
| Valor máximo | 1 | 194,03 | 0,99997 | 1 |
| Promedio | 0,75443 | 2,1771 | 0,33337 | 0,80805 |
| Desviación estándar | 0,16733 | 1,9819 | 0,21979 | 0,14167 |

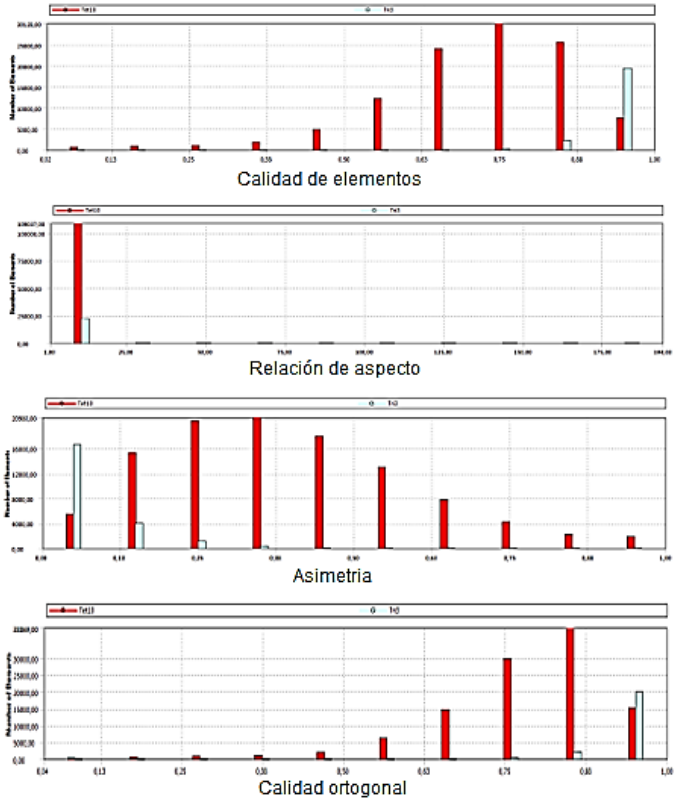


Figura 73. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma j).

## 9.2 Resultados de las simulaciones

Tabla 19. Resultados de las fuerzas de reacción de probetas de 8 $mm$.

| Porosidad | Espesor de esfera [$mm$] | Fuerza [$N$] | Promedio |
|---|---|---|---|
| 13% | 0,015 | 42301 | 42507 |
| | | 42634 | |
| | | 42587 | |
| | 0,02 | 43034 | 43226 |
| | | 43124 | |
| | | 43521 | |
| | 0,023 | 43752 | 43810 |
| | | 43909 | |
| | | 43771 | |
| | 0,03 | 44896 | 44569 |
| | | 43998 | |
| | | 44812 | |
| 21% | 0,015 | 34689 | 35209 |
| | | 35004 | |
| | | 35934 | |
| | 0,02 | 35653 | 35744 |
| | | 35980 | |
| | | 35599 | |
| | 0,023 | 35899 | 35854 |
| | | 35761 | |
| | | 35902 | |
| | 0,03 | 40151 | 39701 |
| | | 39063 | |
| | | 39889 | |
| 33% | 0,015 | 25997 | 25937 |
| | | 25912 | |
| | | 25901 | |
| | 0,02 | 26302 | 26371 |
| | | 26400 | |
| | | 26411 | |
| | 0,023 | 27176 | 27185 |
| | | 27201 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 27178 | |
| | 0,03 | 29658 | 29710 |
| | | 30001 | |
| | | 29472 | |
| 38% | 0,015 | 20021 | 20063 |
| | | 19978 | |
| | | 20192 | |
| | 0,02 | 20896 | 20896 |
| | | 20891 | |
| | | 20901 | |
| | 0,023 | 22680 | 22422 |
| | | 21989 | |
| | | 22598 | |
| | 0,03 | 23489 | 23434 |
| | | 23402 | |
| | | 23412 | |
| 44% | 0,015 | 15063 | 15132 |
| | | 15201 | |
| | | 15133 | |
| | 0,02 | 17001 | 17069 |
| | | 16998 | |
| | | 17208 | |
| | 0,023 | 19210 | 19118 |
| | | 19110 | |
| | | 19034 | |
| | 0,03 | 20488 | 20444 |
| | | 20371 | |
| | | 20472 | |

Tabla 20. Resultados de la fuerza de reacción en probetas de 9 $mm$.

| Porosidad | Espesor de esfera [$mm$] | Fuerza [$N$] | Promedio |
|---|---|---|---|
| | 0,015 | 53452 | 53217,6667 |
| | | 53001 | |
| | | 53200 | |
| | | 53823 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **13%** | 0,02 | 53912 | 53901,3333 |
| | | 53969 | |
| | 0,023 | 54244 | 54145 |
| | | 54002 | |
| | | 54189 | |
| | 0,03 | 55829 | 55779,6667 |
| | | 55998 | |
| | | 55512 | |
| **21%** | 0,015 | 43992 | 44111 |
| | | 44329 | |
| | | 44012 | |
| | 0,02 | 45392 | 45404,6667 |
| | | 45621 | |
| | | 45201 | |
| | 0,023 | 46129 | 46144 |
| | | 46012 | |
| | | 46291 | |
| | 0,03 | 48012 | 47972 |
| | | 47972 | |
| | | 47932 | |
| **33%** | 0,015 | 33910 | 33965 |
| | | 34002 | |
| | | 33983 | |
| | 0,02 | 34912 | 34873,3333 |
| | | 34896 | |
| | | 34812 | |
| | 0,023 | 35145 | 35290,6667 |
| | | 35326 | |
| | | 35401 | |
| | 0,03 | 37021 | 37256 |
| | | 36912 | |
| | | 37835 | |
| **38%** | 0,015 | 29012 | 28963,3333 |
| | | 28999 | |
| | | 28879 | |
| | 0,02 | 29210 | 29210,6667 |
| | | 29312 | |
| | | 29110 | |
| | 0,023 | 30890 | 30860 |
| | | 30978 | |
| | | 30712 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 0,03 | 31923 | 31829,6667 |
| | | 31756 | |
| | | 31810 | |
| 44% | 0,015 | 22879 | 22841,6667 |
| | | 22834 | |
| | | 22812 | |
| | 0,02 | 23219 | 23203,6667 |
| | | 23178 | |
| | | 23214 | |
| | 0,023 | 24836 | 24829,6667 |
| | | 24832 | |
| | | 24821 | |
| | 0,03 | 26012 | 25981,3333 |
| | | 26009 | |
| | | 25923 | |

Tabla 21. Resultado de la fuerza de reacción de probeta 10 $mm$.

| Porosidad | Espesor de esfera [$mm$] | Fuerza [$N$] | Promedio |
|---|---|---|---|
| 13% | 0,015 | 65912 | 66066 |
| | | 66129 | |
| | | 66157 | |
| | 0,02 | 67790 | 67818 |
| | | 67771 | |
| | | 67893 | |
| | 0,023 | 68044 | 68048 |
| | | 68102 | |
| | | 67998 | |
| | 0,03 | 69321 | 69142,6667 |
| | | 69101 | |
| | | 69006 | |
| 21% | 0,015 | 54319 | 54351,6667 |
| | | 54238 | |
| | | 54498 | |
| | 0,02 | 55210 | 55647,6667 |
| | | 55821 | |
| | | 55912 | |
| | 0,023 | 56420 | |
| | | 56593 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 56489 | 56500,6667 |
| | 0,03 | 57784 | 57845,3333 |
| | | 57984 | |
| | | 57768 | |
| **33%** | 0,015 | 33910 | 42475 |
| | | 34002 | |
| | | 33983 | |
| | 0,02 | 43923 | 43917,6667 |
| | | 44001 | |
| | | 43829 | |
| | 0,023 | 44912 | 44902,3333 |
| | | 44872 | |
| | | 44923 | |
| | 0,03 | 47120 | 46760 |
| | | 46929 | |
| | | 46231 | |
| **38%** | 0,015 | 35198 | 35082,6667 |
| | | 35127 | |
| | | 34923 | |
| | 0,02 | 36095 | 36077 |
| | | 36007 | |
| | | 36129 | |
| | 0,023 | 37520 | 37587 |
| | | 37543 | |
| | | 37698 | |
| | 0,03 | 38910 | 38888,3333 |
| | | 38801 | |
| | | 38954 | |
| 44% | 0,015 | 26756 | 26891,3333 |
| | | 26999 | |
| | | 26919 | |
| | 0,02 | 28965 | 28897,3333 |
| | | 28815 | |
| | | 28912 | |
| | 0,023 | 29415 | 29501 |
| | | 29576 | |
| | | 29512 | |
| | 0,03 | 30127 | 30368 |
| | | 30654 | |
| | | 30323 | |

## 9.3 Resultado de cálculos

Tabla 22. Resumen de cálculos probeta de 8 $mm$.

| Porosidad | Espesor de esfera [$mm$] | Fuerza [$N$] | Módulo de Young [$Mpa$] |
|---|---|---|---|
| 13% | 0,015 | 42507 | 84,56 |
| | 0,02 | 43226 | 85,99 |
| | 0,023 | 43810 | 87,15 |
| | 0,03 | 44569 | 88,66 |
| 21% | 0,015 | 35209 | 70,04 |
| | 0,02 | 35744 | 71,11 |
| | 0,023 | 35854 | 71,41 |
| | 0,03 | 39701 | 78,98 |
| 33% | 0,015 | 25937 | 51,59 |
| | 0,02 | 26371 | 52,46 |
| | 0,023 | 27185 | 54,11 |
| | 0,03 | 29710 | 59,10 |
| 38% | 0,015 | 20063 | 39,91 |
| | 0,02 | 20896 | 41,57 |
| | 0,023 | 22422 | 45,06 |
| | 0,03 | 23434 | 46,62 |
| 44% | 0,015 | 15132 | 30,11 |
| | 0,02 | 17069 | 33,95 |
| | 0,023 | 19118 | 38,42 |
| | 0,03 | 20444 | 40,67 |

Tabla 23. Resumen de cálculos probeta 9 $mm$.

| Porosidad | Espesor de esfera [$mm$] | Fuerza [$N$] | Módulo de Young [$Mpa$] |
|---|---|---|---|
| 13% | 0,015 | 53217 | 83,65 |
| | 0,02 | 53901 | 84,72 |
| | 0,023 | 54145 | 85,11 |
| | 0,03 | 55780 | 87,68 |
| 21% | 0,015 | 44111 | 69,34 |
| | 0,02 | 45405 | 71,37 |
| | 0,023 | 46144 | 72,53 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 0,03 | 47972 | 75,4 |
| **33%** | 0,015 | 33965 | 53,39 |
| | 0,02 | 34873 | 54,82 |
| | 0,023 | 35291 | 55,47 |
| | 0,03 | 37256 | 58,56 |
| **38%** | 0,015 | 28963 | 45,53 |
| | 0,02 | 29210 | 45,91 |
| | 0,023 | 30860 | 48,42 |
| | 0,03 | 31830 | 50,03 |
| **44%** | 0,015 | 22842 | 35,93 |
| | 0,02 | 23204 | 36,47 |
| | 0,023 | 24830 | 39,03 |
| | 0,03 | 25981 | 40,84 |

Tabla 24. Resumen de cálculos probeta 10 $mm$.

| Porosidad | Espesor de esfera $[mm]$ | Fuerza $[N]$ | Módulo de Young $[Mpa]$ |
|---|---|---|---|
| **13%** | 0,015 | 66066 | 84,12 |
| | 0,02 | 67818 | 86,35 |
| | 0,023 | 68048 | 86,64 |
| | 0,03 | 69143 | 88,03 |
| **21%** | 0,015 | 54352 | 69,21 |
| | 0,02 | 55648 | 70,85 |
| | 0,023 | 56500 | 71,94 |
| | 0,03 | 57845 | 73,65 |
| **33%** | 0,015 | 42475 | 54,01 |
| | 0,02 | 43918 | 55,92 |
| | 0,023 | 44902 | 57,17 |
| | 0,03 | 46760 | 59,54 |
| **38%** | 0,015 | 35083 | 44,67 |
| | 0,02 | 36077 | 45,93 |
| | 0,023 | 37587 | 47,86 |
| | 0,03 | 38888 | 49,51 |
| **44%** | 0,015 | 26891 | 34,24 |
| | 0,02 | 28897 | 36,79 |
| | 0,023 | 29501 | 37,56 |
| | 0,03 | 30368 | 38,67 |