**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

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

# "Caracterización numérica de espumas de Cobre reforzadas con esferas huecas de hierro, mediante el método de elementos finitos"

**CARLOS IGNACIO ÓRDENES ESCOBAR**

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

**PROFESOR GUÍA:** **DR. ING. LUIS PÉREZ P.**

**PROFESOR CORREFERENTE:** **DR. ISMELI ALFONSO LÓPEZ**

**SEPTIEMBRE 2018**

*Dedicado a mi familia, amigos y profesores, y a todos aquellos que me acompañaron durante esta gran etapa de mi vida.*

*Muchas gracias.*

# Resumen

Con la realización del presente Trabajo de Título, utilizando el software ANSYS Workbench, se desarrollan modelos tridimensionales para tres tipos de probetas de matriz de Cobre: la primera correspondiente a una espuma sintáctica reforzada con esferas huecas de hierro, la segunda con la misma geometría que la anterior, pero con ausencia de esferas, y por último, una probeta de espuma con presencia de poros interconectados. Estos tres modelos son estudiados mediante una simulación de ensayo de compresión para obtener sus módulos de Young, y realizar un análisis sobre la comparación del comportamiento elástico de los tres especímenes.

El objetivo principal de la investigación es determinar la influencia en el módulo de Young de los refuerzos esféricos en una espuma con matriz de cobre, con el fin de avanzar en el estudio de nuevos materiales compuestos y aplicaciones para éstos, ya que el cobre es el principal producto de explotación en Chile, y un material cuyas propiedades mecánicas, químicas, eléctricas y de transferencia de calor son de gran interés en la ingeniería.

En el marco teórico se presentan una serie de antecedentes que permiten un mejor entendimiento de la influencia en el comportamiento mecánico de las espumas sintácticas, según los materiales utilizados y sus propiedades mecánicas, así como la distribución, tamaño y otros parámetros de las inclusiones esféricas.

El análisis de los resultados del trabajo permite concluir que al ser mayor el tamaño del espécimen, las soluciones que entrega la simulación convergen hasta llegar a ciertos valores para el módulo de Young. Por otro lado, también se determina que para el caso en estudio, el módulo de Young disminuye con el aumento de porosidad.

# Abstract

Through the realization of this thesis, using the ANSYS Workbench software, three-dimensional models are developed for three types of Copper matrix test tubes: the first corresponding to a syntactic foam reinforced with hollow iron spheres, the second with the same geometry as the previous one, but with absence of spheres, and finally a foam test tube with the presence of interconnected pores. These three models are studied by a compression test simulation to obtain their Young's modules, and perform an analysis on the comparison of the elastic behavior of the three specimens.

The main objective of the research is to determine the influence on the Young's modulus of the spherical reinforcements in a foam with copper matrix, in order to advance in the study of new composite materials and applications for these, since copper is the main product of exploitation in Chile, and a material whose mechanical, chemical, electrical and heat transfer properties are very interesting in engineering.

In the theoretical framework a series of antecedents that allow a better understanding of the influence on the mechanical behavior of syntactic foams, according to the materials used and their mechanical properties, as well as the distribution, size and other parameters of the spherical inclusions.

The analysis of the results of the work makes it possible to conclude that as the specimen size increases, the solutions delivered by the simulation converge until reaching certain values for the Young's modulus. On the other hand, it is also determined that for the case under study, the Young's modulus decreases with increasing porosity.

# Índice General

1 Introducción ..... 1
2 Objetivos ..... 2
2.1 Objetivos Generales ..... 2
2.2 Objetivos Específicos ..... 2
3 Antecedentes Generales ..... 3
3.1 Materiales celulares ..... 3
3.2 Espumas metálicas ..... 4
3.3 Espumas de celda abierta y cerrada ..... 6
3.4 Espumas Sintácticas ..... 8
3.4.1 Esferas huecas ..... 8
3.4.2 Microestructura ..... 12
3.4.3 Propiedades Mecánicas ..... 14
3.4.4 Aplicaciones ..... 20
3.4.5 Métodos de fabricación de MMSFs ..... 22
3.5 Espumas de Cobre ..... 28
3.6 Homogeneización ..... 29
3.6.1 Homogeneización de espumas sintácticas ..... 30
3.7 Método de elementos finitos ..... 33
3.7.1 Discretización ..... 33
3.7.2 Mallado ..... 34
4 Estudios Relacionados ..... 38
4.1 Comportamiento en compresión de espumas metálicas sintácticas con matriz de aluminio reforzadas con esferas huecas de hierro ..... 38
4.2 Comportamiento elástico de espumas sintácticas ..... 41
4.3 Módulo elástico efectivo de espumas sintácticas ..... 43
4.4 Efectos de la porosidad en el comportamiento elástico y modos de falla en espumas sintácticas epoxy con microesferas de vidrio. ..... 44

5 Metodología ..... 46
5.1 Análisis de espumas sintácticas mediante el método MEF ..... 46
5.2 Simulación ..... 51
5.3 Geometría ..... 53
5.4 Propiedades ..... 58
5.5 Mallado ..... 59
5.6 Condiciones de contorno ..... 61
5.7 Cálculo del módulo de Young ..... 65
5.8 Resultados ..... 66
6 Conclusiones ..... 82
7 Trabajos futuros ..... 86
8 Referencias ..... 87
9 Anexos ..... 94
9.1 Espumas reforzadas ..... 94
9.2 Espumas de celda abierta ..... 109
9.3 Tablas de resultados ..... 124

# Tablas

Tabla 1. Calidad de malla según el factor de asimetría. 36
Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el estudio. 38
Tabla 3. Dimensiones de las esferas huecas de hierro. 39
Tabla 4. Propiedades y dimensiones de las esferas utilizadas en el estudio. 41
Tabla 5. Dimensiones de las probetas. 53
Tabla 6. Porosidades de las probetas reforzadas y las probetas sin refuerzo. 54
Tabla 7. Porosidades de las probetas de celdas abiertas. 54
Tabla 8. Módulo de Young de las espumas reforzadas según porosidad y tamaño de probeta. 66
Tabla 9. Módulo de Young de las espumas sin refuerzo según porosidad y tamaño de probeta. 67
Tabla 10. Módulo de Young de las espumas de celda abierta según porosidad y tamaño de probeta. 68
Tabla 11. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (a). 94
Tabla 12. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (b). 95
Tabla 13. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (c). 96
Tabla 14. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (d). 97
Tabla 15. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (e). 98
Tabla 16. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (f). 99
Tabla 17. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (g). 100
Tabla 18. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (h). 101
Tabla 19. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (i). 102
Tabla 20. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (j). 103
Tabla 21. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (k). 104
Tabla 22. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (l). 105
Tabla 23. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (m). 106
Tabla 24. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (n). 107
Tabla 25. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (o). 108

Tabla 26. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (a). ..... 109
Tabla 27. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (b)..... 110
Tabla 28. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (c). ..... 111
Tabla 29. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (d)..... 112
Tabla 30. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (e). ..... 113
Tabla 31. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (f). ..... 114
Tabla 32. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (g)..... 115
Tabla 33. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (h)..... 116
Tabla 34. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (i)..... 117
Tabla 35. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (j)..... 118
Tabla 36. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (k)..... 119
Tabla 37. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (l)..... 120
Tabla 38. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (m)..... 121
Tabla 39. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (n)..... 122
Tabla 40. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (o)..... 123
Tabla 41. Datos obtenidos para las probetas reforzadas. ..... 124
Tabla 42. Datos obtenidos para las probetas sin refuerzo. ..... 125
Tabla 43. Datos obtenidos para las probetas de celda abierta. ..... 126

# Figuras

Figura 1. Tipos de estructuras celulares: a) Panal b) Celda abierta c) Celda cerrada ..... 3
Figura 2. Materiales celulares según morfología y topología. ..... 4
Figura 3. Algunas propiedades físicas de las espumas según el material de la matriz. ..... 5
Figura 4. Clasificación de las espumas según su estructura. ..... 6
Figura 5. Espuma de aluminio de celda abierta. ..... 7
Figura 6. Espuma de aluminio de celda cerrada. ..... 7
Figura 7. a) Microesferas de vidrio b) Porosidad presente en la pared de la esfera, además de partículas adheridas a ésta. ..... 9
Figura 8. a) Cenoesferas de ceniza volante. b) Algunas partículas pueden tener una estructura irregular. ..... 9
Figura 9. Esquema de fabricación de esferas huecas metálicas por soplado. ..... 10
Figura 10. Fases presentes en la estructura de una MMSF ..... 12
Figura 11. Composición química de la interface entre la matriz Al99.5 y una esfera de hierro. ..... 13
Figura 12. Diagrama de compresión y comportamiento micro estructural de una MMSF de matriz AlMgSi1 con esferas cerámicas. ..... 15
Figura 13. Curvas esfuerzo vs deformación (experimentales y simuladas) para una MMSF de matriz de aluminio y esferas de hierro huecas. ..... 16
Figura 14. Módulo de Young relativo según la porosidad para una MMSF con matriz Epoxi y esferas a) K15 b) K46 ..... 17
Figura 15. Módulo de elasticidad relativo de una MMSF de matriz de Epoxi según el espesor de pared, para distintas porosidades. ..... 18
Figura 16. Módulo de elasticidad de una MMSFs con interface imperfecta. ..... 19
Figura 17. El avión caza F-18 utiliza espumas sintácticas para encapsular sus radares. .. 20
Figura 18. Panel tipo sándwich con núcleo de espuma sintáctica tras un impacto de 180 J. ..... 20

Figura 19. Sumergible para exploración subacuática, con dispositivos de flotabilidad y estructura de espuma sintáctica. ..... 21
Figura 20. Métodos de síntesis de MMSFs por Solidificación. ..... 22
Figura 21. Esquema de un equipo de infiltración por presión. ..... 23
Figura 22. Esquema de un sistema de fundición por agitación. ..... 25
Figura 23. Equipo de metalurgia de polvos para espumas reforzadas. ..... 26
Figura 24. Espuma de cobre de celda abierta con una distribución de 10 poros por pulgada cuadrada. ..... 28
Figura 25. Escalas de homogeneización de materiales compuestos. ..... 29
Figura 26. Modelo homogeneizado de celda unitaria para espumas sintácticas. ..... 30
Figura 27. Curvas obtenidas mediante el método de Lee & Westmann a) Módulo de compresibilidad óptimo b) Cotas para el Módulo de rigidez cortante. ..... 32
Figura 28. Proceso de discretización de un sistema continuo. ..... 34
Figura 29. Suavizado del cambio de sección de una pieza. ..... 34
Figura 30. Relación de aspecto de un elemento finito. ..... 35
Figura 31. Tipos de celda de una malla. ..... 35
Figura 32. Vectores para el cálculo de la calidad ortogonal de la malla. ..... 37
Figura 33. Esquema del equipo de infiltración del estudio. ..... 39
Figura 34. Probetas estudiadas a una compresión del 50% a) Real b) Simulación MEF. 40
Figura 35. Curva Esfuerzo vs Deformación obtenidas en el ensayo, para distintos tipos de aleaciones de aluminio. ..... 40
Figura 36. Comparación entre los resultados numéricos y analíticos para el Módulo de Young. ..... 42
Figura 37. Comparación entre los valores teóricos y experimentales del Módulo de Young. ..... 45
Figura 38. Modelo 2D de celda unitaria cúbica a) Condiciones de borde y dimensiones b) Mallado. ..... 47
Figura 39. Modelo 2D de celda unitaria esférica a) Condiciones de borde y dimensiones b) Mallado. ..... 47

Figura 40. Modelo 3D de celda unitaria cúbica con 5% de porosidad. ..... 48
Figura 41. Modelo de probeta cilíndrica con arreglo aleatorio de esferas, utilizada en el presente trabajo. ..... 48
Figura 42. Comparación entre los modelos analíticos, numéricos y experimentales para una matriz Epoxy con esferas cerámicas. ..... 49
Figura 43. Modelos MEF de espuma sintáctica con interface mixta a) arreglo tridimensional b) celda unitaria c) celda unitaria con divisiones. ..... 50
Figura 44. Ventana de análisis estructural del software ANSYS Workbench. ..... 51
Figura 45. Procedimiento de simulación mediante MEF en ANSYS Workbench (Ventana principal de simulación). ..... 52
Figura 46. Probetas reforzadas de porosidades a) 13% b) 21% c) 31% d) 38% e) 44% .. 55
Figura 47. Probetas sin presencia de esferas de porosidades a) 13% b) 21% c) 31% d) 38% e) 44% ..... 56
Figura 48. Probetas de celdas abiertas de porosidades a) 13% b) 21% c) 31% d) 38% e) 44% ..... 57
Figura 49. Propiedades mecánicas ingresadas en el software para el Cobre. ..... 58
Figura 50. Propiedades mecánicas ingresadas en el software para el Hierro..... 59
Figura 51. Configuración del mallado para las probetas..... 59
Figura 52. Mallado de esferas a) Selección del método de triángulos b) Configuración c) Selección de esferas. ..... 60
Figura 53. Comparación entre el mallado utilizado en el modelo MEF para a) la matriz y b) las esferas huecas. ..... 61
Figura 54. Condición de desplazamiento en una probeta de 13% de porosidad. ..... 62
Figura 55. Restricciones para la cara inferior. ..... 62
Figura 56. Condición de desplazamiento remoto en una probeta de 13% de porosidad... 63
Figura 57. Restricciones para la cara superior. ..... 64
Figura 58. Selección de la condición de borde para la fuerza de reacción ..... 64
Figura 59. Módulo de Young para probetas reforzadas. ..... 69
Figura 60. Módulo de Young para probetas sin refuerzo..... 69

Figura 61. Comparación del Módulo de Young entre probetas reforzadas, sin refuerzo y de celda abierta de 8 [mm] de altura. ..... 70
Figura 62. Módulo de Young para probetas de celda abierta. ..... 70
Figura 63. Comparación del Módulo de Young entre probetas reforzadas, sin refuerzo y de celda abierta de 9 [mm] de altura. ..... 71
Figura 64. Comparación del Módulo de Young entre probetas reforzadas, sin refuerzo y de celda abierta de 10 [mm] de altura. ..... 71
Figura 65. Distribución de esfuerzos y ubicación de los esfuerzos máximos en una probeta reforzada de 31% de porosidad (Probeta seccionada). ..... 73
Figura 66. Acercamiento a una zona sometida a esfuerzos máximos en una probeta reforzada de 31% de porosidad. ..... 74
Figura 67. Comparación de la distribución de esfuerzos en una probeta a) Reforzada (esferas ocultas) y b) Sin refuerzo, para una porosidad del 31%. ..... 75
Figura 68. Distribución de esfuerzos en una probeta de celda abierta de 31% de porosidad (Probeta seccionada). ..... 76
Figura 69. Acercamiento a una zona sometida a esfuerzos máximos en una probeta de celda abierta de 31% de porosidad. ..... 77
Figura 70. Distribución de la deformación total en una probeta reforzada de 31% de porosidad. ..... 78
Figura 71. Distribución de la deformación total en una probeta sin refuerzos de 31% de porosidad. ..... 79
Figura 72. Distribución de la deformación total en una probeta de celda abierta de 31% de porosidad. ..... 79
Figura 73. Distribución de la deformacion en probetas reforzadas de porosidades de a) 13% b) 21% c) 31% y d) 38%. ..... 80
Figura 74. Distribución de la deformacion en probetas de celda abierta de porosidades de a) 13% b) 21% c) 31% y d) 38%. ..... 81
Figura 75. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (a). ..... 94
Figura 76. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (b). ..... 95

Figura 77. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (c). ..... 96
Figura 78. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (d). ..... 97
Figura 79. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (e). ..... 98
Figura 80. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (f). ..... 99
Figura 81. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (g). ..... 100
Figura 82. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (h). ..... 101
Figura 83. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (i). ..... 102
Figura 84. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (j). ..... 103
Figura 85. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (k). ..... 104
Figura 86. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (l). ..... 105
Figura 87. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (m). ..... 106
Figura 88. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (n). ..... 107
Figura 89. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (o). ..... 108
Figura 90. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (a). ..... 109
Figura 91. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (b). ..... 110
Figura 92. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (c). ..... 111
Figura 93. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (d). ..... 112
Figura 94. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (e). ..... 113
Figura 95. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (f). ..... 114
Figura 96. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (g). ..... 115
Figura 97. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (h). ..... 116
Figura 98. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (i). ..... 117
Figura 99. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (j). ..... 118
Figura 100. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (k). ..... 119
Figura 101. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (l). ..... 120
Figura 102. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (m). ..... 121
Figura 103. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (n). ..... 122
Figura 104. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (o). ..... 123

# Glosario

- $A$: Área transversal de la probeta.
- $E$: Módulo de Young.
- $F$: Fuerza de reacción en compresión.
- $G^*$: Módulo de rigidez cortante de la matriz.
- $G^o$: Módulo de rigidez cortante de la matriz.
- GPa: Giga Pascal.
- $K^*$: Módulo de compresibilidad de la matriz.
- $K^o$: Módulo de compresibilidad de la matriz.
- $L$: Largo total de la probeta.
- MEF: Método de elementos finitos.
- MMSF: Espuma sintáctica de matriz metálica.
- MPa: Mega Pascal.
- Porosidad: Porcentaje del volumen total de una espuma que es ocupado por los poros.
- $v$: Coeficiente de Poisson.
- $V_o$: Módulo de Poisson de la matriz.
- $V_{vacío}$: Fracción volumétrica de los poros en la matriz.
- $\Delta L$: Variación del largo de la probeta en compresión.
- $\varepsilon$: Deformación.
- $\sigma$: Esfuerzo.
- $\rho$: Densidad relativa.

# 1 Introducción

Las espumas metálicas son materiales sólidos que presentan vacíos o poros en su interior, lo que les otorga un bajo peso específico, alta rigidez específica, aumenta su ductilidad y por su geometría de paredes celulares delgadas tienen una gran capacidad de absorción de energía de impacto. Dentro de las clases de espumas metálicas se encuentran las espumas sintácticas de matriz metálica (MMSFs), cuyos vacíos están compuestos por esferas huecas de distintos materiales.

La existencia de una segunda fase dentro de la matriz y una morfología de poro cerrado y esférico, permite mejorar las propiedades mecánicas, como una mayor resistencia compresiva e hidroestática y mayor módulo de Young, en comparación a las espumas con poros interconectados de una sola fase y morfología aleatoria. Su baja densidad y buenas propiedades físicas y mecánicas permiten su aplicación en sistemas de absorción de impactos en automóviles, aislación térmica, flotabilidad subacuática, entre otros.

Las técnicas más utilizadas para la fabricación de MMSFs son la Infiltración por presión, la Fundición por agitación y la Pulvimetalurgia, en las cuales se realiza la mezcla adecuada entre el material de la matriz y esferas para lograr la porosidad deseada. Éstos métodos generan distribuciones aleatorias de esferas dentro de la matriz, por lo cual es necesario realizar modelos que consideren esta aleatoriedad para obtener resultados realistas.

Las propiedades físicas, químicas, mecánicas y biológicas del Cobre lo convierten en un material atractivo para ser aplicado en espumas metálicas, y con éste trabajo se busca realizar un acercamiento para su uso en espumas sintácticas y así encontrar nuevas aplicaciones para el cobre, del cual Chile es el principal extractor y exportador a nivel mundial. Para esto resulta importante caracterizar el comportamiento mecánico a través de métodos de bajo costo y adaptables para las complicadas geometrías aleatorias de las espumas sintácticas, como el Método de Elementos Finitos (MEF).

# 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 distribución y características de las esferas huecas de hierro en una matriz de cobre. Con esto se busca plantear una alternativa para determinar una microestructura que optimice el comportamiento de este material en términos del 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.
- Analizar los resultados obtenidos para diferentes distribuciones y características de las esferas.
- Presentar las conclusiones del trabajo desarrollado.

# 3 Antecedentes Generales

## 3.1 Materiales celulares

Un material sólido celular es una estructura compuesta por dos fases, una fase sólida continua, llamada matriz, y una fase gaseosa, que puede ser continua o discontinua.

En la naturaleza se encuentran ejemplos de estos materiales, como el corcho, la madera o los huesos. El objetivo principal de diseñar y fabricar materiales celulares es imitar estas estructuras para obtener buenas propiedades mecánicas con una reducción de la densidad relativa.

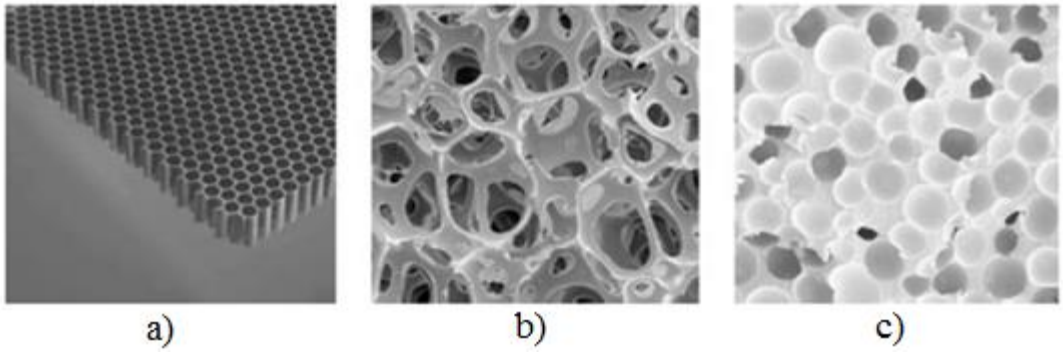



Figura 1. Tipos de estructuras celulares: a) Panal b) Celda abierta c) Celda cerrada [1]

Éstos materiales se pueden clasificar en celda cerrada y celda abierta. En el primer caso, el gas se mantiene dentro de las celdas, es decir, la fase gaseosa es discontinua. En el segundo caso, existe interconexión entre los poros, por lo cual la fase gaseosa se considera continua [2]. Sin embargo, en la práctica generalmente se obtienen estructuras intermedias. También se desarrollan estructuras con forma de panal. La Figura 1 muestra las estructuras anteriormente señaladas, mientras que la Figura 2 presenta una clasificación según morfología y topología, donde surge el concepto de espuma.

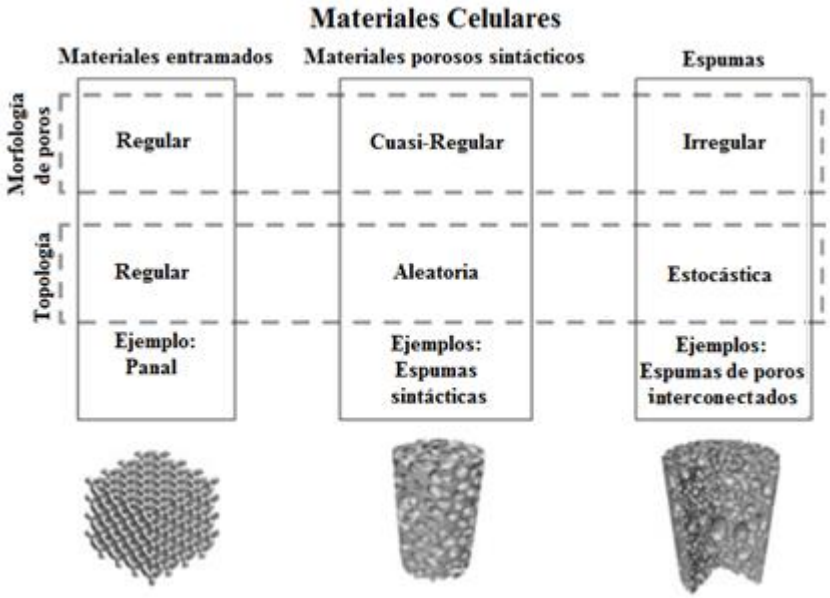



Figura 2. Materiales celulares según morfología y topología [1].

## 3.2 Espumas metálicas

Corresponden a una clase de material celular de estructura porosa aleatoria y una matriz metálica. Se caracterizan por su alta relación resistencia-peso, gran superficie específica, alta capacidad de absorción de energía y buena conductividad térmica, por lo cual son utilizadas en sistemas de absorción de impacto, filtros, intercambiadores de calor y aislantes térmicos. Estas propiedades dependen de su estructura, determinada por la porosidad, el tamaño y distribución de los poros, y espesor de las paredes celulares [3]. La Figura 3 compara una serie de propiedades según el material utilizado como matriz.

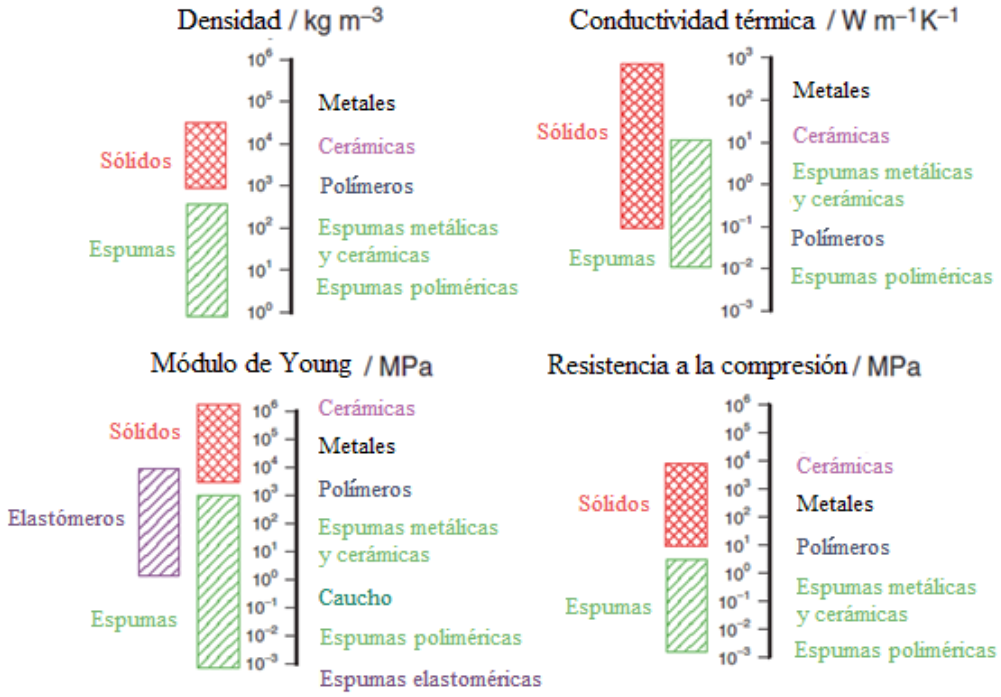



Figura 3. Algunas propiedades físicas de las espumas según el material de la matriz [1].

La porosidad, también llamada fracción volumétrica, puede ser calculada utilizando la Ecuación 3.1, donde $\rho_{espuma}$ es la densidad del material poroso y $\rho_{sólido}$ la densidad del material macizo [1]. Si la porosidad es menor a 0.7, el material corresponde a un sólido poroso o espuma, de lo contrario se considera un sólido celular.

$$p = 1 - \frac{\rho_{espuma}}{\rho_{sólido}}. \tag{3.1}$$

Las espumas metálicas, tal como muestra la Figura 4, pueden ser clasificadas en tres tipos; Espumas de Celda Abierta, Celda Cerrada y Compuestas. Éstas últimas se dividen a su vez en Espumas Reforzadas y Sintácticas [4].

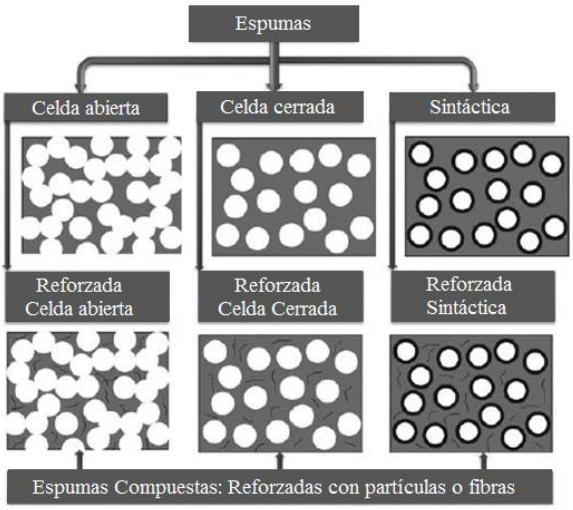



Figura 4. Clasificación de las espumas según su estructura [4].

## 3.3 Espumas de celda abierta y cerrada

Las **espumas de celda abierta** se caracterizan por tener una estructura de poros interconectados que permiten el flujo de gas o fluido a través de ellos. La interconexión de poros les confiere una alta permeabilidad, permitiendo su uso en intercambiadores de calor y filtros [5] y prótesis óseas [6]. Además, son las que poseen mayores porosidades, las cuales pueden ser controladas al variar la longitud y espesor de los ligamentos que se forman en las paredes de las celdas, como muestra la Figura 5. La existencia de estos ligamentos genera una baja rigidez estructural, ya que estos se deforman y fallan bajo cargas de compresión con mayor facilidad que las espumas de celda cerrada y las compuestas, debido a que éstos ligamentos tienen una sección transversal reducida y además son susceptibles a sufrir pandeo, por lo cual su uso estructural está limitado a núcleos de estructuras tipo sándwich.

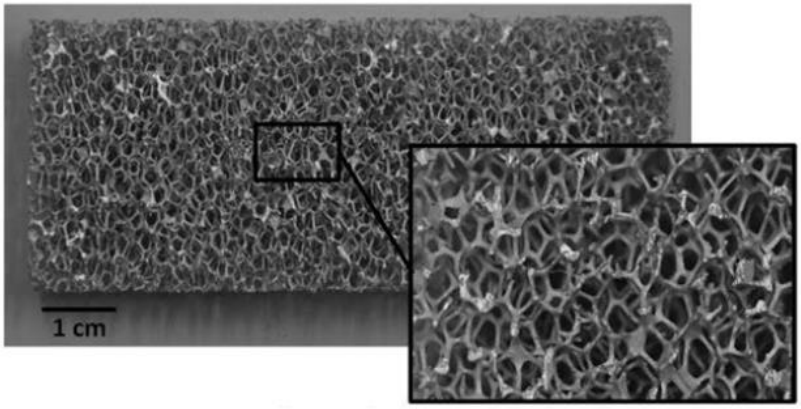



Figura 5. Espuma de aluminio de celda abierta [4].

Por otro lado, las **espumas de celda cerrada** (Figura 6) contienen poros que no están interconectados entre sí, lo cual se traduce en paredes celulares de mayor espesor, por lo tanto su densidad es mayor y sus propiedades mecánicas son superiores en comparación a las espumas de celda abierta.

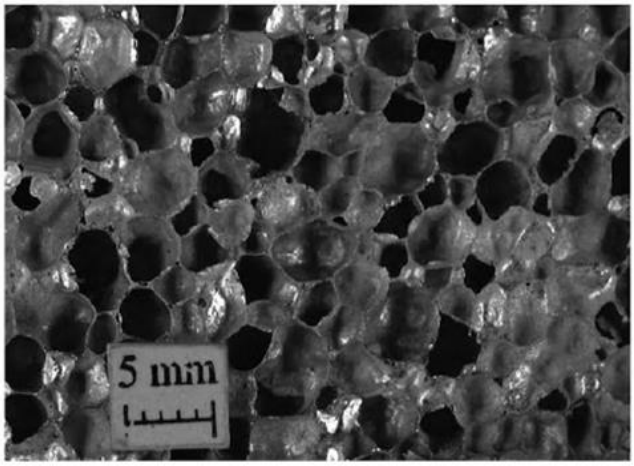



Figura 6. Espuma de aluminio de celda cerrada [4].

## 3.4 Espumas Sintácticas

Las espumas sintácticas corresponden a un tipo de espuma donde la porosidad se obtiene por la presencia de esferas huecas dispersas en la matriz. Las esferas Cerámicas [7], Metálicas [8] y de Carburo de Silicio [9] son las más utilizadas para estos materiales. En este trabajo se hace énfasis en las espumas sintácticas de matriz metálica (MMSFs), siendo el aluminio [10], magnesio [11], zinc [12], hierro [13] y titanio [14] los materiales más empleados. También existen estudios sobre la aplicación de MMSFs de matriz polimerica con memoria de forma [15], las cuales luego de sufrir deformación plástica pueden regresar casi completamente a su forma original al ser sometidas a cambios de temperatura.

### 3.4.1 Esferas huecas

Existen dos tipos de partículas huecas: Microesferas y Cenoesferas de ceniza volante. Las microesferas son partículas fabricadas comercialmente en un amplio rango de diámetros, espesores y distribución de tamaño, y son sometidas minuciosos controles de calidad para garantizar sus dimensiones y resistencia. También pueden ser sometidas a un baño con algún metal compatible con la matriz (por ejemplo níquel o cobre para el caso de una matriz de aluminio) con el fin de evitar reacciones que debiliten la unión entre ambas fases [4] [16]. También se encuentran las Macroesferas, las cuales se diferencian de las microesferas por su mayor tamaño, con diámetros mayores a 0.5 mm.

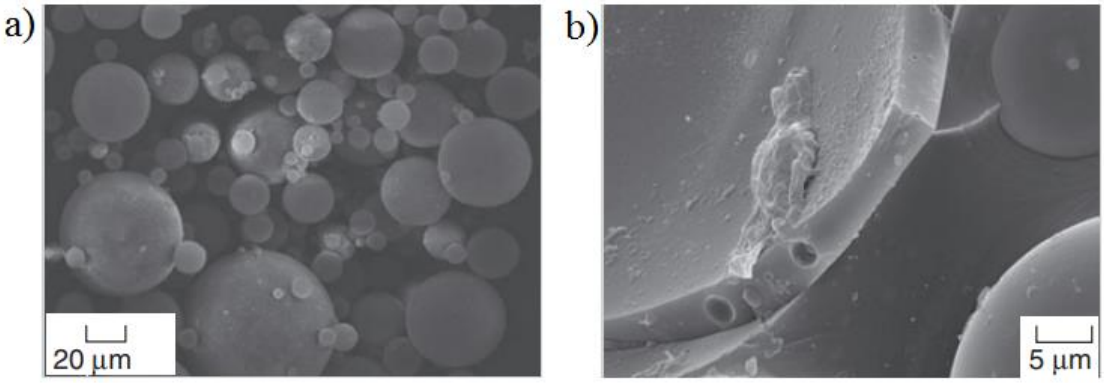



Figura 7. a) Microesferas de vidrio b) Porosidad presente en la pared de la esfera, además de partículas adheridas a ésta [16].

Las Cenoesferas de ceniza volante corresponden a esferas presentes en la ceniza resultante de la combustión del carbón. En éstas se encuentran distintos compuestos, tales como $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$ y $K_2O$, además de elementos tóxicos como As, Cd, Pb y Zn, dependiendo del origen del carbón y del proceso de combustión [16]. Algunos de estos elementos pueden reaccionar con la matriz y formar un gran número de fases en la microestructura de la espuma, lo que puede afectar sus propiedades mecánicas [4].

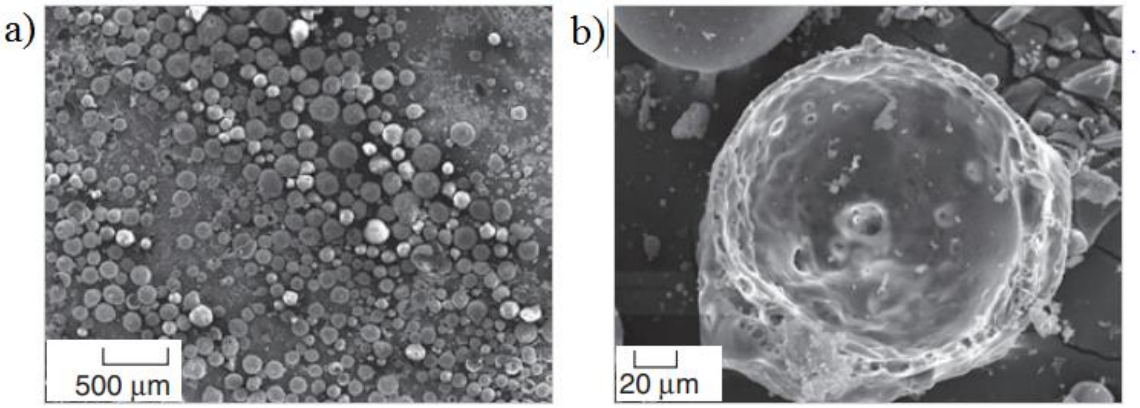



Figura 8. a) Cenoesferas de ceniza volante. b) Algunas partículas pueden tener una estructura irregular [16].

En el presente trabajo de título se estudia la aplicación de esferas huecas de hierro, producidas por Globomet [8], las cuales corresponden a una clase de macroesfera que es fabricada mediante el método de soplado coaxial [17]. Éste método, mostrado en la Figura 9, consiste en una cámara con polvos metálicos de un tamaño de partícula entre 1 a 10 µm, disueltos en un fluido (solvente o no solvente) a alta temperatura. La mezcla es expulsada por la abertura de la cámara y es soplada con gas, formando una esfera con un diámetro (Entre 1 y 6 mm) y espesor de pared (Entre 20 y 200 µm) definidos por la tensión superficial y fuerzas hidrostáticas. Al caer la esfera, ésta se solidifica a medida que el fluido se evapora.

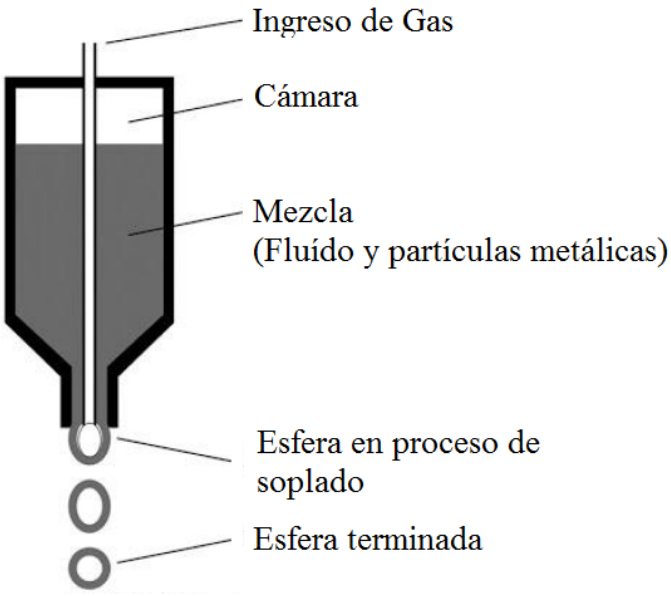



Figura 9. Esquema de fabricación de esferas huecas metálicas por soplado [17].

La desventaja principal de este proceso es la existencia de porosidad en la pared de las esferas, la cual afecta negativamente sus propiedades mecánicas, debiendo ser modificadas según la Ecuación 3.2, propuesta por Ramakrishnan & Arunachalam [18],

$$E = E_o \frac{(1-p)^2}{3-3v_o}, \tag{3.2}$$

donde $E$ es el módulo de Young modificado, $E_O$ corresponde al módulo de Young del hierro, $v_O$ es su módulo de Poisson y $p$ es la porosidad.

Por otro lado, el esfuerzo de fluencia, también debe ser recalculado, mediante la Ecuación 3.3, propuesta por Liu et al [19],

$$\sigma = K(1-p)^n \sigma_o, \tag{3.3}$$

donde $\sigma$ es el esfuerzo de fluencia modificado, $\sigma_o$ es el esfuerzo de fluencia del hierro, $K$ es una constante del material y $n$ es un exponente que corresponde a $n = 1$ para materiales con alta ductilidad (Como el Cu, Sn y Fe puro) y $n = 1.5$ para aquellos con baja ductilidad (Ti).

Utilizando ambas expresiones en las esferas huecas de hierro, según el estudio de Szlancsik et al. [20], se observa una disminución del módulo de Young de 210 [GPa] a 95.9 [GPa], y un valor para el esfuerzo de fluencia de 109.4 [MPa], lo que significa que la porosidad de las esferas es un parámetro que influye significativamente en las propiedades mecánicas de las esferas y por consiguiente, en el comportamiento mecánico de las MMSFs.

### 3.4.2 Microestructura

La microestructura de las MMSFs consta de tres fases principales; la matriz, la esfera y su vacío interno. Tal como muestra la Figura 10, las esferas en la matriz están distribuidas de manera aleatoria y le confieren porosidad a la espuma.

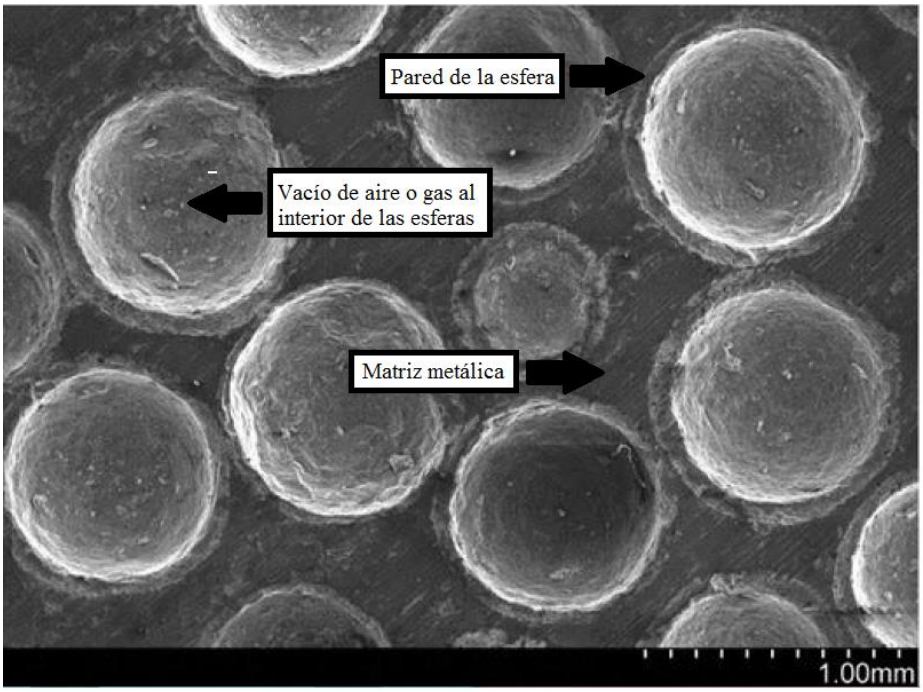



Figura 10. Fases presentes en la estructura de una MMSF [4]

En la periferia de las esferas existe una interface, donde ocurren reacciones durante el proceso de fabricación. Esta capa es la parte más crítica de la microestructura, ya que es responsable de la transferencia de carga entre la matriz y las esferas. Es por esto que es importante la correcta selección de los materiales de ambos componentes, para propiciar la formación de una interface resistente.

La Figura 11 corresponde a la composición química de la pared en una espuma de aluminio Al99.5 con esferas de hierro, donde se observa que en la interface los elementos Fe y Al se combinan para formar el compuesto $Al_3Fe$ debido a reacciones de difusión. Además, es importante controlar el tiempo de enfriamiento de la matriz durante el proceso de fabricación, ya que podría ocurrir una disolución completa de la esfera, perdiendo su estructura de espuma sintáctica [21].

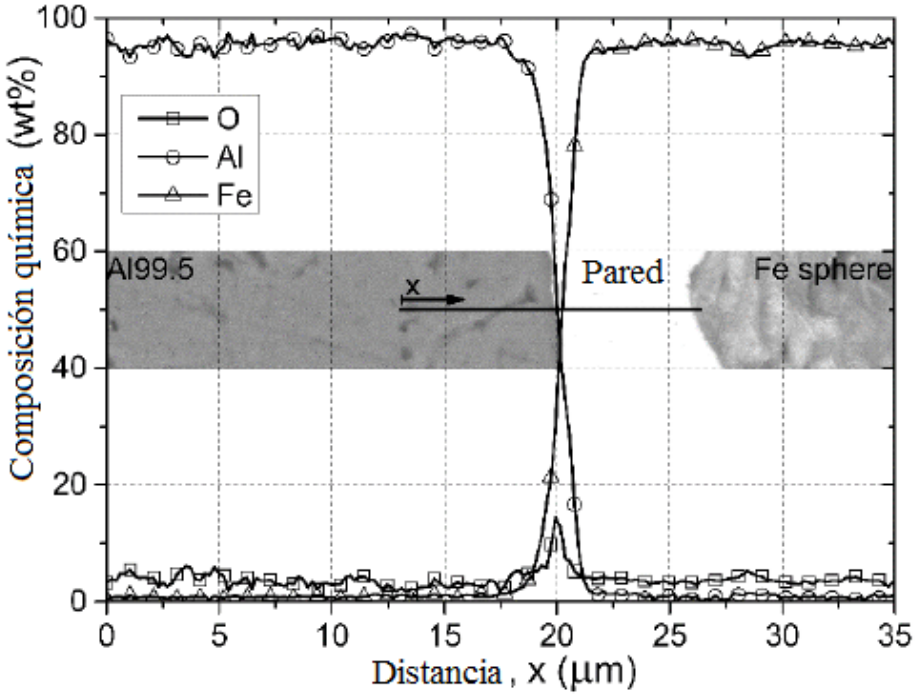



Figura 11. Composición química de la interface entre la matriz Al99.5 y una esfera de hierro [21].

En la interface también pueden existir defectos, como es el caso de la porosidad intersticial ($p_i$), que corresponde a espacios generados durante el proceso de fabricación, la cual puede ser calculada mediante la Ecuación 3.4, donde $\rho_t$ es la densidad teórica y $\rho_m$ la densidad medida [22],

$$p_i = \frac{\rho_t - \rho_m}{\rho_t}. \tag{3.4}$$

### 3.4.3 Propiedades Mecánicas

Al igual que otros tipos de espumas metálicas, las propiedades mecánicas de las espumas sintácticas dependen principalmente del material usado como matriz, la fracción volumétrica y el tamaño y distribución de las esferas huecas, el proceso de fabricación utilizada para su síntesis y el tratamiento térmico [4].

La baja densidad de las MMSFs permite fabricar estructuras de bajo peso, manteniendo una alta resistencia y rigidez. Dependiendo del material de la matriz, se pueden obtener densidades en un rango de 0,15 a 1 [g/cm3] y resistencias a la compresión entre 10 y 100 [MPa] [23]. En el caso de las espumas con esferas de diámetro uniforme, por las limitaciones en la geometría y ordenamiento aleatorio de las partículas, se puede lograr el empaquetamiento máximo a una porosidad del 63,7% para el caso de una probeta cilíndrica [24]. También se realizan estudios con MMSFs con esferas de distinto tamaño, donde las esferas más pequeñas se posicionan entre las de mayor tamaño, asegurando una alta porosidad, como es el caso del trabajo de Tao et al. [25], en el cual la porosidad se aumentó del 55.6% a 59% variando la proporción entre esferas finas y gruesas.

Las esferas huecas dentro de la matriz tienen un importante efecto en la resistencia a la compresión de las MMSFs, debido a que sus paredes localizan la deformación inelástica causante de fallas en el caso de las espumas de celda abierta, lo que les permite soportar entre 5 y 10 veces más presión hidrostática [26]. Por otro lado, al reducir el tamaño de las esferas se garantiza una mayor resistencia a la compresión, debido a que éstas contienen menos defectos en su microestructura en comparación a las de mayor tamaño [27]. Las propiedades mecánicas de estas espumas también pueden ser mejoradas aumentando la relación entre el espesor de pared y el diámetro de la esfera ($t/D$) [28].

En la Figura 12 se muestra una curva Esfuerzo vs Deformación en compresión para una MMSF de aluminio AlMgSi con esferas cerámicas, donde se observan tres partes principales. La primera es la región elástica, comprendida entre el punto A y B, donde el compuesto se comporta elásticamente y las esferas no sufren daños. La pendiente de la curva en esta zona corresponde al módulo de elasticidad del material. Entre los puntos B y C comienza la deformación plástica de la matriz, pero sin afectar la integridad de las esferas. Entre los puntos C y D se alcanza el esfuerzo de fluencia del espécimen y se observa la primera grieta en la matriz y en las esferas. La baja repentina en el esfuerzo entre los puntos D y E se debe a que la grieta se expande y el resto de las esferas se fractura y colapsa. A partir del punto E, comienza el proceso de densificación, donde el material se vuelve más compacto y denso, por lo que se requiere mayor fuerza para continuar la compresión. Desde que comienza la deformación plástica, se observa su gran capacidad de absorción de energía, una de las principales características de las MMSFs [29].

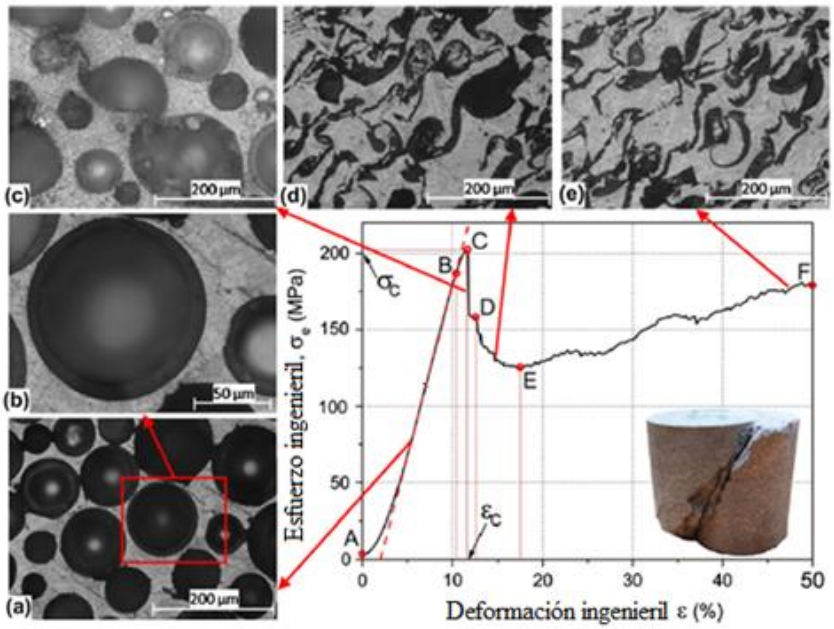



Figura 12. Diagrama de compresión y comportamiento micro estructural de una MMSF de matriz AlMgSi1 con esferas cerámicas [29].

A diferencia de la Figura 13, donde se muestra una fractura frágil debido a la utilización de esferas cerámicas, caracterizada por la irregularidad de la zona de deformación plástica en la curva esfuerzo vs deformación, en la Figura 12 se puede observar el comportamiento dúctil de una MMSF de matriz de aluminio y esferas huecas de hierro, con una fluencia y una región plástica más uniformes.

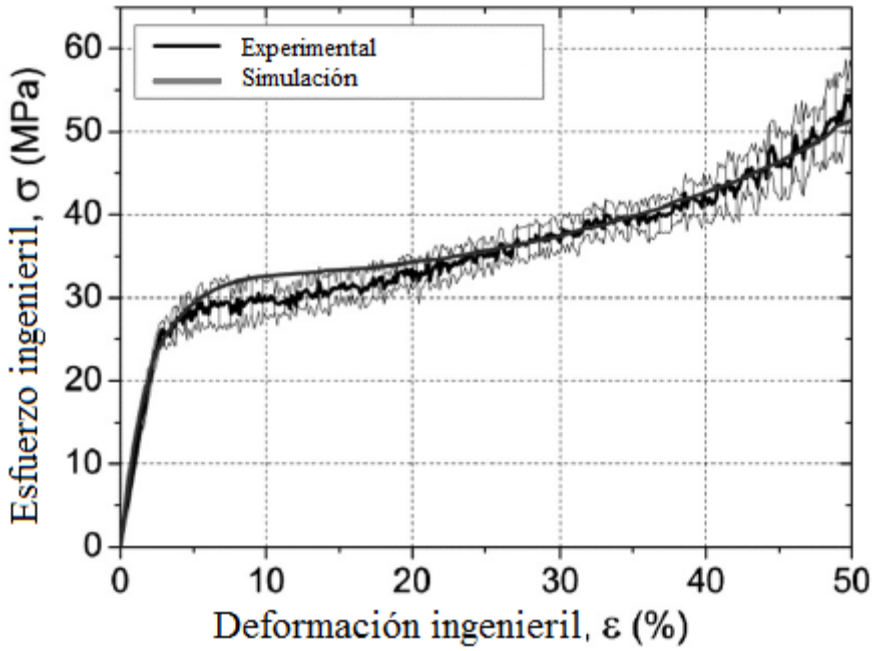



Figura 13. Curvas esfuerzo vs deformación (experimentales y simuladas) para una MMSF de matriz de aluminio y esferas de hierro huecas [20].

#### 3.4.3.1 Módulo de Young

El módulo elástico o módulo de Young es una de las propiedades más importantes para las aplicaciones de las MMSFs, y su caracterización numérica es el tema central de este trabajo.

Las MMSFs se caracterizan por su alta rigidez específica en comparación a las espumas metálicas de poros abiertos o con espaciadores de baja resistencia, especialmente en compresión, gracias a su estructura de celda cerrada y sus partículas de refuerzo [27].

La Figura 14 muestra el estudio de Porfiri & Gupta [30], con datos teóricos (línea sólida) y experimentales (puntos) sobre el efecto de la porosidad en el módulo de Young en una espuma sintáctica con matriz de resina Epoxi, utilizando dos tipos de micro-esferas de vidrio (K15 y K46). $E$ y $E_m$ corresponden al módulo elástico de la espuma y de la matriz, respectivamente. Se puede observar que en el caso de la esfera K15, el módulo de Young disminuye con el aumento de la porosidad, mientras que ocurre lo contrario con la esfera K46. Este comportamiento se debe principalmente a que la esfera K46 posee un módulo muy superior a la K15 y a la matriz, contribuyendo al aumento de la rigidez del compuesto. Si bien el material de la matriz en este caso es un polímero, el análisis numérico y las técnicas de homogeneización de las MMSFs son idealizaciones aplicables tanto a matrices poliméricas como metálicas.

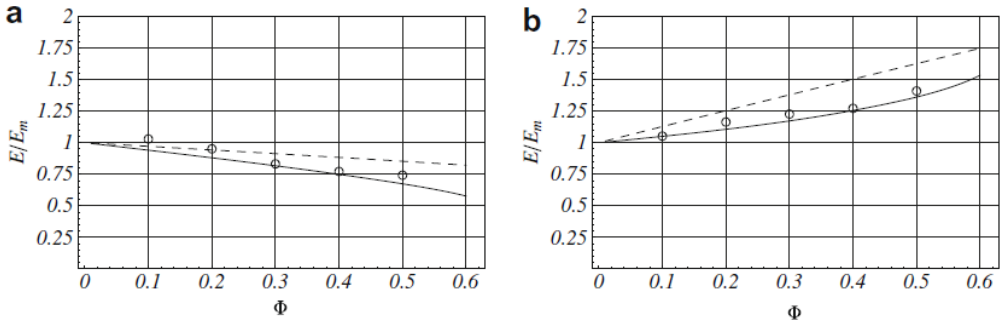



Figura 14. Módulo de Young relativo según la porosidad para una MMSF con matriz Epoxi y esferas a) K15 b) K46 [30]

El espesor de pared de las esferas huecas también tiene un efecto significativo en las propiedades mecánicas de las espumas sintácticas. Para el mismo estudio señalado anteriormente, se observan los resultados en la Figura 15 donde el valor $n = 0$ representa esferas completamente sólidas y $n = 1$, sólo vacíos, por lo tanto al aumentar el valor de $1 - n$, mayor es el espesor de pared. Se muestran los datos teóricos para distintas porosidades ($\Phi$) de la espuma y para todo el rango de espesor de pared. De esto se concluye que si se aumenta el espesor de pared de las esferas, manteniendo fijo el diámetro, también lo hace el módulo de Young. De forma más general, si aumenta el valor de la relación $t/d$, las propiedades elásticas de la espumas pueden ser mejoradas.

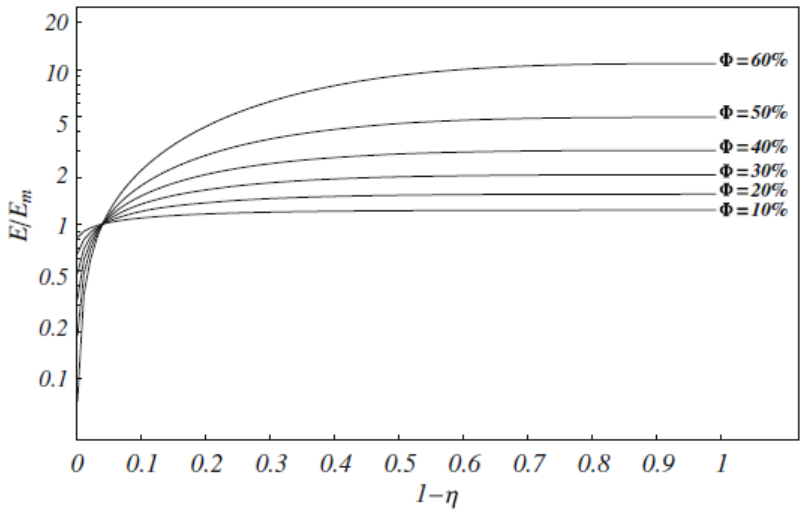



Figura 15. Módulo de elasticidad relativo de una MMSF de matriz de Epoxi según el espesor de pared, para distintas porosidades [30].

La calidad de la unión entre las esferas y la matriz también influye significativamente en las propiedades mecánicas, tal como muestra la Figura 16. En el trabajo de Marur [22], que utiliza datos teóricos y experimentales de una MMSF de matriz de epoxy con esferas de vidrio, muestra que la existencia de una interface con imperfecciones disminuye considerablemente el módulo de elasticidad al ser comparada con una unión perfecta.

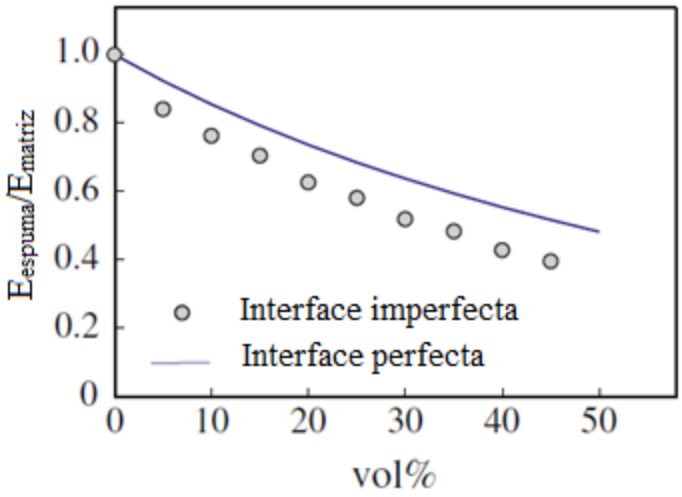



Figura 16. Módulo de elasticidad de una MMSFs con interface imperfecta [22].

### 3.4.4 Aplicaciones

Debido a las buenas propiedades de las espumas sintácticas, éstas se utilizan en la industria aeroespacial, como es el caso de las MMSFs con esferas de carbono [31], las cuales le otorgan a la espuma una alta resistencia a la compresión, bajo peso, baja conductividad térmica, alta resistencia a altas temperaturas y además son químicamente inertes.

Figura 17. El avión caza F-18 utiliza espumas sintácticas para encapsular sus radares [34].

En la industria automotriz se usan en paneles instrumentales y dispositivos de absorción de impacto, generalmente utilizando estructuras tipo sándwich con núcleo de espuma sintáctica [32].

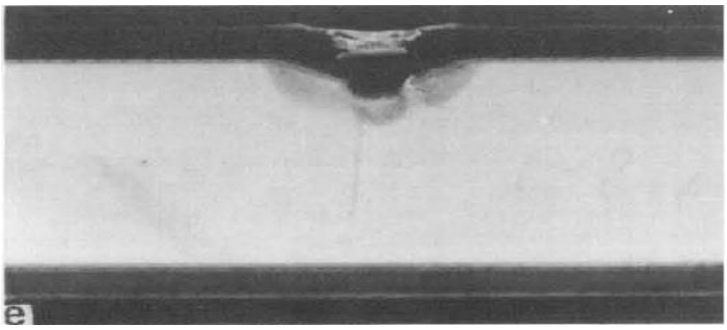


Figura 18. Panel tipo sándwich con núcleo de espuma sintáctica tras un impacto de 180 J [32].

En la industria naval, se encuentran en cascos y mamparas de submarinos, y en dispositivos de flotabilidad subacuática, debido a su gran capacidad para soportar la presión hidrostática, su baja densidad y a la presencia de aire o gas dentro de las partículas esféricas, sumado a la baja permeabilidad [33] [34].

Figura 19. Sumergible para exploración subacuática, con dispositivos de flotabilidad y estructura de espuma sintáctica [34].

### 3.4.5 Métodos de fabricación de MMSFs

Los métodos de fabricación de las MMSFs se clasifican en Solidificación y Pulvimetalurgia. En los procesos de solidificación (Figura 20), las partículas de refuerzo se combinan con un material matriz en estado líquido, para luego ser solidificada. En cambio, la metalurgia de polvos consiste en que las partículas de refuerzo y polvos metálicos son mezclados en estado sólido y consolidados a alta temperatura [4].

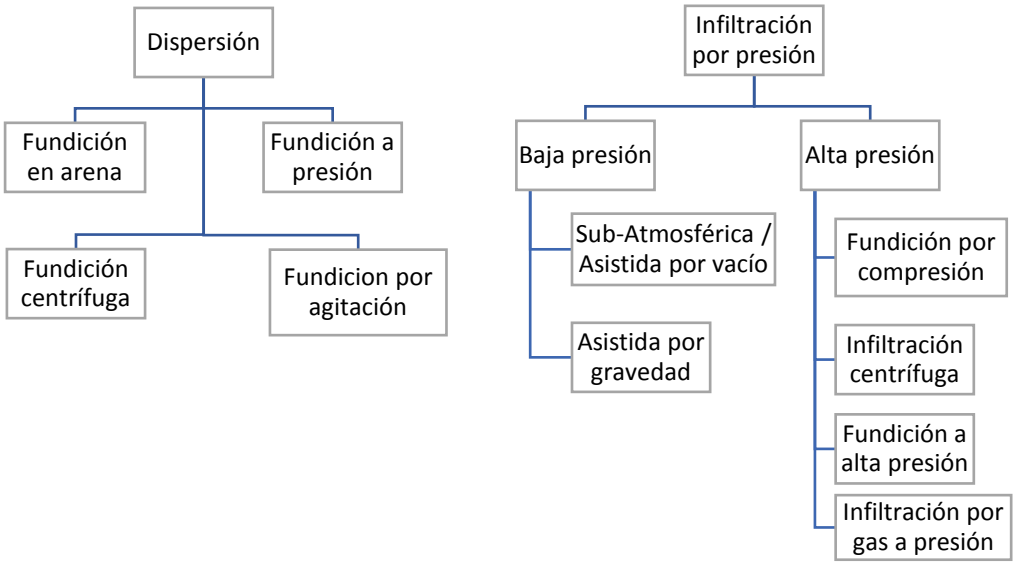



Figura 20. Métodos de síntesis de MMSFs por Solidificación [4].

Los procesos más utilizados para la fabricación de las MMSFs corresponden a la Infiltración por presión [35], Fundición por agitación [36] y Pulvimetalurgia [37]. Dependiendo del proceso utilizado, se pueden obtener distintas propiedades mecánicas debido a las diferencias en la densidad de la matriz, la fracción volumétrica y distribución de las esferas [38].

#### 3.4.5.1 Infiltración por presión

En este proceso, el metal de la matriz es posicionado sobre un arreglo de esferas, dentro de un molde sellado herméticamente, y se calienta hasta su punto de fusión, para luego forzar al metal líquido a infiltrarse entre las esferas utilizando alta presión por gas, vacío, movimiento centrífugo o compresión. Para la solidificación de la mezcla, ésta se expone a temperatura ambiente o enfriada directamente para lograr una solidificación direccional. El gradiente de temperatura de enfriamiento puede ser utilizado para alterar la microestructura de la espuma y mejorar sus propiedades mecánicas [35]. En la Figura 21 se observa un esquema de un equipo de infiltración por presión por gas.

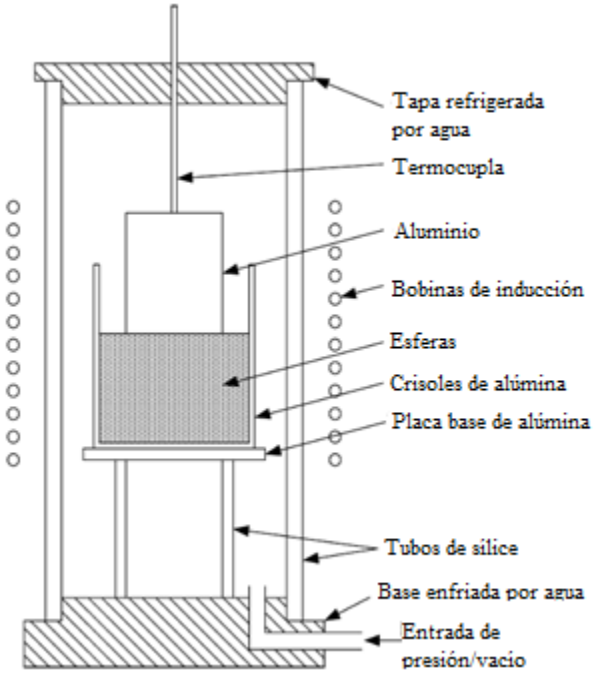



Figura 21. Esquema de un equipo de infiltración por presión [35].

Éste sistema es el más utilizado, pues permite un fácil control de la porosidad, una distribución uniforme de las partículas y una buena unión en la interface entre la matriz y las esferas. Con respecto a la porosidad, ésta se fija en valores cercanos al 63% [38].

Se debe tener un especial cuidado en no aplicar una presión demasiado alta, ya que esto puede generar fracturas en las esferas, fallas en la infiltración y la existencia de vacíos residuales. La presión requerida ($P$) puede ser calculada mediante la Ecuación 3.5, propuesta por García-Cordovilla et al. [39],

$$P = 6\,\lambda\,\gamma_{LV}\,cos\theta\,\frac{V_p}{\left(1 - V_p\right)D}, \tag{3.5}$$

donde $\gamma_{LV}$ corresponde a la tensión superficial del metal líquido, $\theta$ es el ángulo de contacto entre el metal líquido y la esfera, $D$ es el diámetro de la esfera y $V_p$ es la porosidad objetivo de la MMSF.

Rohatgi et al. [40] infiltraron cenoesferas de ceniza volante con una aleación de aluminio-silicón A356, con porosidades entre 57 y 63%. Se concluyó que la porosidad aumentaba con la disminución del tamaño de esfera, a una determinada temperatura y presión.

#### 3.4.5.2 Fundición por agitación

Consiste en dispersar esferas precalentadas en el metal fundido utilizado como matriz mediante un agitador mecánico o la utilización de vibración por ultrasonido. Luego, la mezcla es sometida a una presión entre 1 y 3 [MPa] y enfriada lentamente hasta solidificarse [36].

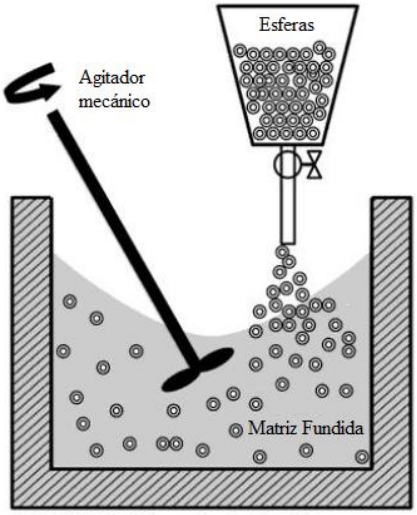



Figura 22. Esquema de un sistema de fundición por agitación [4].

Éste método permite un fácil ajuste de la porosidad y su costo de producción es bajo. Su desventaja es la distribución no uniforme de las esferas, ya que estas tienden a agruparse y también a desplazarse a la superficie del metal líquido, debido a la diferencia de densidades entre los constituyentes [38].

Daoud et al. [41] produjeron MMSFs con aleación de magnesio ZC63 y cenoesferas de ceniza volante, con porosidades entre 10 y 25%. Las esferas fueron dispersas a una tasa de 30 g/min en el metal líquido a 650°C, agitado a 700 rpm mediante un agitador mecánico. Los análisis microestructurales revelaron que las cenoesferas influencian la estructura y química de la aleación, además de sufrir compresión debido a la solidificación de la interface, disminuyendo el tamaño de las celdas y en algunos casos, siendo infiltradas por el metal líquido hacia su interior.

#### 3.4.5.3 Pulvimetalurgia

El proceso de pulvimetalurgia comienza mezclando las esferas con polvos metálicos del material a utilizar como matriz en la proporción adecuada según la porosidad y asegurando la menor cantidad de vacíos no deseados. Luego, se extrae el aire presente al interior de la mezcla, se realiza un tratamiento térmico a una temperatura inferior al punto de fusión de la matriz y por último se realiza una compactación por compresión, con lo que se logra la sinterización de las partículas, creando enlaces fuertes entre ellas [37].

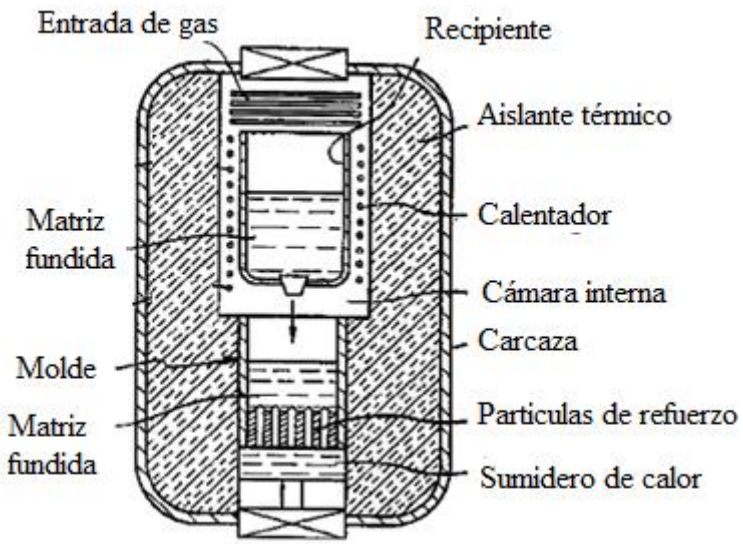



Figura 23. Equipo de metalurgia de polvos para espumas reforzadas [37].

Este proceso permite un amplio rango de porosidades con una distribución homogénea, un gran control sobre la química del metal de la matriz y las esferas, del tamaño de grano, además de un bajo consumo energético durante la fabricación. Sin embargo, se debe tener especial cuidado en la selección correcta del tamaño de partículas de polvo metálico y de las esferas, además de un preciso control de la temperatura y de la presión de compactación [38].

La presión de compactación ($P$) puede ser calculada mediante la relación por regla de mezclas [42], presente en la Ecuación 3.6, la cual está en función de los esfuerzos de fluencia de la matriz ($\sigma_m$) y de las esferas huecas ($\sigma_{hs}$), la resistencia de la pared de las esferas ($\sigma_s$), las fracciones volumétricas de la matriz ($V_m$), las esferas ($V_{hs}$) y la porosidad propia de la pared de las esferas ($V_{hsp}$), mientras que $C$ y $n$ son constantes empíricas.

$$P = \sigma_m V_m + \sigma_{hs} V_{hs} = \sigma_m V_m + C\sigma_s (1 - V_{hsp})^n V_{hsp}. \tag{3.6}$$

Zhao et al. [43] produjeron y estudiaron MMSFs de matriz de Fe, reforzadas con esferas huecas mediante metalurgia de polvos. La mezcla estaba formada por partículas de Fe con un tamaño entre 100 y 200 µm para la matriz, y esferas de diámetro entre 75 y 125 µm, compactada a una presión de 150 [MPa] y tratada a una temperatura de 850°C durante 4 horas, logrando porosidades entre 25 y 55%.

## 3.5 Espumas de Cobre

Debido a sus buenas propiedades físicas, químicas y biológicas, las espumas de cobre son utilizadas en áreas como el almacenamiento de energía, gracias a su buena conductividad eléctrica, a través de la fabricación de baterías y electrodos [44]. Con respecto a las espumas de cobre de celda abierta (Figura 24), debido a su buena conductividad térmica, alta permeabilidad y gran área superficial, son ampliamente usadas en intercambiadores de calor y aislantes térmicos [45], y sus propiedades antibacterianas permiten su utilización como filtros purificadores [46].

Figura 24. Espuma de cobre de celda abierta con una distribución de 10 poros por pulgada cuadrada [68].

Los métodos de fabricación más utilizados para las espumas de cobre son la pulvimetalurgia y la fundición, ya que permiten un buen control sobre la forma, tamaño y distribución de los poros, lo que mejora las propiedades mecánicas de estos materiales en comparación a otros métodos [47].

En el presente trabajo, se estudia la incorporación de esferas de hierro huecas en una matriz de cobre, lo que genera una estructura de celda cerrada, con poros reforzados y de tamaño uniforme, permitiendo un acercamiento a nuevas aplicaciones para este tipo de MMSFs.

## 3.6 Homogeneización

Debido a que las espumas sintácticas son aglomeraciones heterogéneas de elementos, para analizar sus propiedades mecánicas efectivas es necesario recurrir a un procedimiento de homogeneización. Para superar la dificultad que representa analizar un material heterogéneo, debe ser modelado como un medio donde cada una de las fases que lo conforman se asume como homogénea e isotrópica, a una escala tal que se puedan estimar sus propiedades con una buena aproximación.

Las escalas a las que pueden estudiarse los materiales se clasifican en Micro, Macro y una intermedia llamada Meso escala. En la Micro escala se pueden observar al detalle los elementos o fases que conforman el material y se describe el comportamiento mecánico mediante modelos continuos, tomando en cuenta la interacción entre las fases. En la Macro escala se observa la estructura completa o más general del espécimen. Por último, la Meso escala representa un espacio donde se observan sub-dominios formados por variaciones locales en las cargas y en la distribución de los elementos constituyentes.

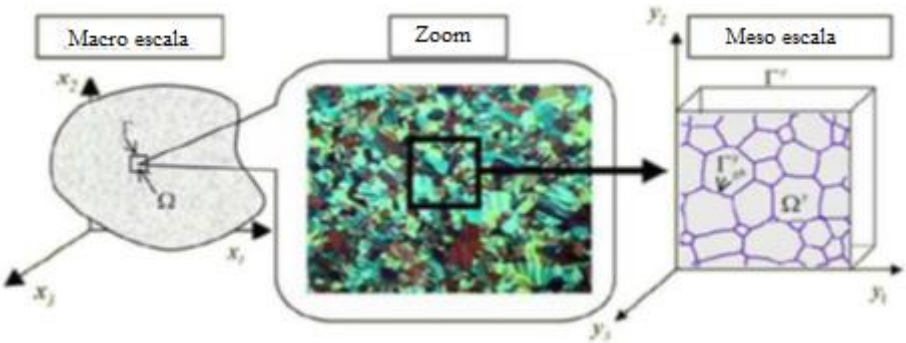



Figura 25. Escalas de homogeneización de materiales compuestos [64].

La Homogeneización busca representar al material a una escala intermedia de tamaño δ que permita una buena estimación de las propiedades mecánicas efectivas del compuesto. Si esta escala existe, se dice que el material puede ser homogeneizado (homogeneidad macroscópica). Es aquí donde surge el Elemento de Volumen

Representativo (RVE), el cual posee un volumen $V$ y tamaño $\delta$. Este elemento es sometido a condiciones de borde correspondientes a desplazamientos o cargas de tracción o compresión, generando esfuerzos y deformaciones que permiten determinar las propiedades mecánicas del material [48].

### 3.6.1 Homogeneización de espumas sintácticas

El modelado mediante métodos numéricos de las espumas sintácticas requiere el uso de técnicas de homogeneización más sofisticadas que las utilizadas para otros tipos de materiales compuestos, incluso aquellos que contengan partículas como fibras o espaciadores sólidos distintos a las esferas huecas. Para esto se debe utilizar un método similar al problema de Eshelby [49], ampliamente utilizado para la estimación de las propiedades mecánicas de materiales porosos o compuestos, pero modificado con una inclusión esférica [50] tal como se muestra en la Figura 26.

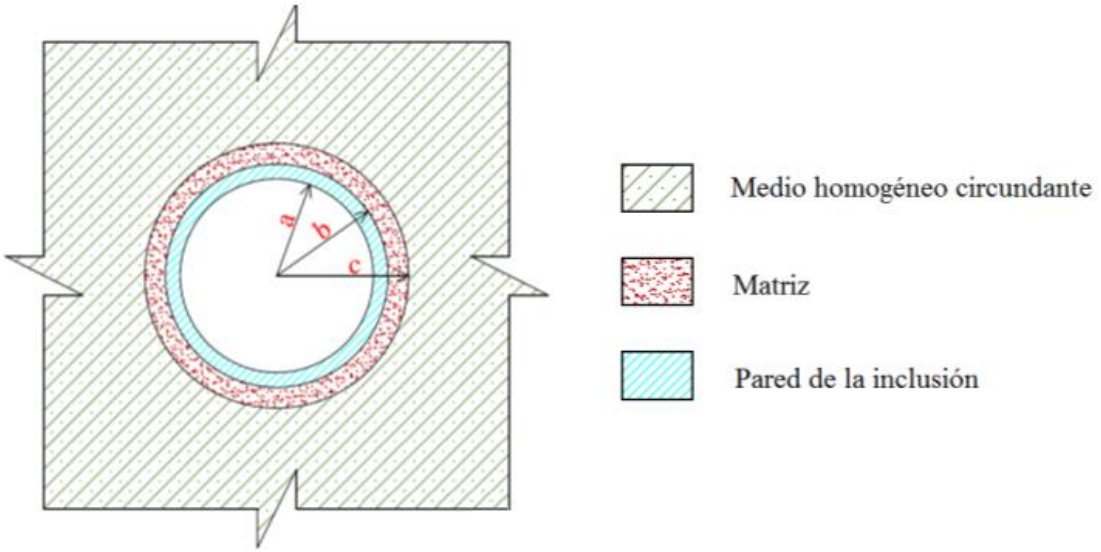



Figura 26. Modelo homogeneizado de celda unitaria para espumas sintácticas [50].

Estos modelos micro mecánicos tienen la desventaja de que sobre estiman el módulo elástico, ya que asumen que la adhesión entre las fases es perfecta y las partículas están uniformemente distribuidas en la matriz. Además, no consideran la existencia de porosidad intersticial ($p_i$) generada en el proceso de fabricación.

Algunos de los métodos más utilizados para la estimación del módulo elástico de las MMSFs corresponden a los trabajos de Nielsen & Landel [51], Huang & Gibson [52], Lee & Westmann [53], y Herve & Pellegrini [54]. Estos se basan en modelos de 3 o 4 fases, correspondientes a la inclusión esférica, la matriz, los vacíos dentro de la inclusión y una cuarta fase correspondiente al medio homogéneo circundante [51]. A continuación se explican brevemente algunos de estos métodos.

- **Nielsen & Landel** [51]

Consiste en homogeneizar la inclusión por separado, utilizar una fórmula simplificada para el módulo de rigidez cortante y finalmente aplicar cualquier método estándar para la homogeneización de materiales compuestos.

- **Huang & Gibson** [52]

Utiliza soluciones elásticas para el problema de un cubo de tamaño finito con una esfera hueca en su centro geométrico. Los valores del Módulo de compresibilidad ($K^*$) y el Módulo de rigidez cortante ($G^*$) de la espuma se calculan a través de la Ecuacion 3.7 y Ecuacion 3.8, respectivamente,

$$\frac{K^*}{K^o} = \frac{1}{1 + \frac{3(1 - V_o)}{2(1 - 2V_o)} V_{vacío}}, \tag{3.7}$$

$$\frac{G^*}{G^o} = \frac{1}{1 + \frac{15(1 - V_o)}{(7 - 5V_o)} V_{vacío}}, \tag{3.8}$$

donde $K^o$ corresponde al Módulo de compresibilidad de la matriz, $G_o$ al módulo de rigidez cortante de la matriz, $V_o$ al Módulo de Poisson de la matriz y $V_{vacío}$ es la fracción volumétrica de las inclusiones en la matriz.

- **Lee & Westmann** [53]

Este método permite obtener un único resultado para la relación entre el módulo de compresibilidad de la espuma (K*) y de la matriz (Ko) y límites superior e inferior para la relación entre el módulo de rigidez cortante de la espuma (G*) y la matriz ($G_o$), en función de la porosidad y la densidad de la matriz ($\omega_o$), de la inclusión ($\omega_1$) y de la espuma ($\omega$).

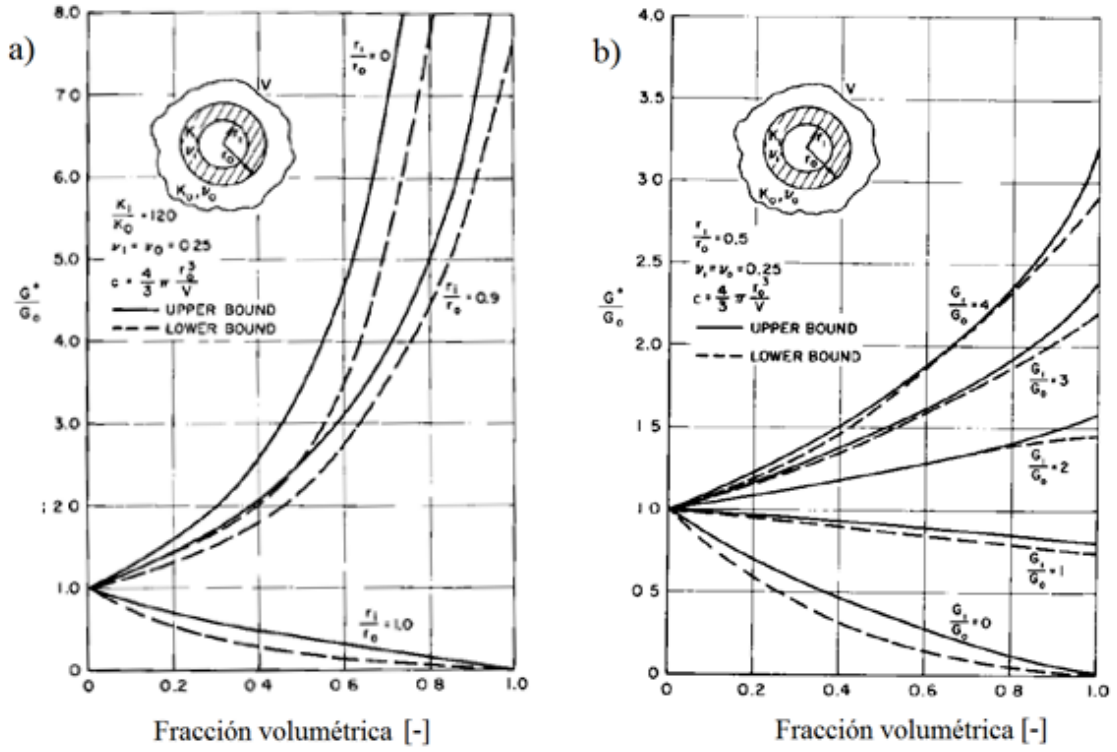



Figura 27. Curvas obtenidas mediante el método de Lee & Westmann a) Módulo de compresibilidad óptimo b) Cotas para el Módulo de rigidez cortante [53].

## 3.7 Método de elementos finitos

Los fenómenos físicos, químicos y biológicos pueden ser modelados con exactitud mediante ecuaciones, pero al ser problemas continuos, el gran número de variables hace que obtener resultados requiera tiempos y requisitos computacionales muy elevados. Para esto, es necesario convertir el medio continuo de la estructura estudiada en una cantidad finita de elementos adyacentes entre sí, lo cual puede ser logrado mediante el método de elementos finitos (MEF).

Existen diversas herramientas computacionales que utilizan el MEF, como Solidworks [55], Abaqus [56] y el programa que es utilizado en el presente trabajo, ANSYS Workbench [57].

### 3.7.1 Discretización

El método de los elementos finitos se basa en la hipótesis de Discretización, la cual consiste en la conversión del medio continuo en un número finito de formas geométricas sencillas y normalizadas, llamadas elementos finitos, los cuales se unen entre sí por medio de puntos, llamados nodos. La precisión del modelo está determinada por la cantidad de elementos y ciertos parámetros geométricos descritos en el Capítulo 3.7.2. Las incógnitas del problema se determinan por el desplazamiento de los nodos, los cuales son considerados independientes y determinan la deformación de la estructura.

El desplazamiento de un punto cualquiera se obtiene por la interpolación de los desplazamientos nodales, de manera tal que la deformación de los contornos de unión entre los nodos sean compatibles para todos los elementos. Estas deformaciones definen el estado de tensiones en cada elemento, generando un sistema de fuerzas que se equilibran entre sí, permitiendo determinar los esfuerzos y fuerzas internas y externas que son aplicadas al modelo [58].

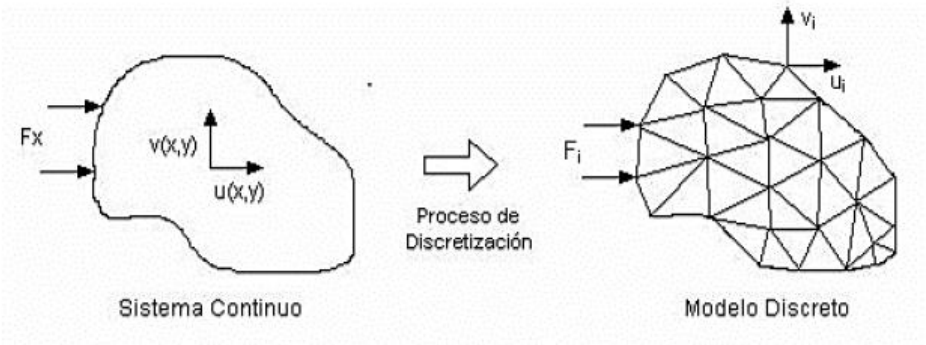



Figura 28. Proceso de discretización de un sistema continuo [2].

### 3.7.2 Mallado

Para garantizar buenos resultados en una simulación mediante el MEF, la malla debe cumplir una serie de parámetros para garantizar resultados correctos y con tiempos de simulación adecuados [59].

- **Suavidad:** En las zonas donde ocurren cambios importantes en la forma de la geometría, como cambios de sección o curvaturas, se requieren elementos más finos que permitan una mejor continuidad de la malla, evitando grandes cambios en la forma de los elementos. Sin embargo, se debe considerar que una reducción del tamaño de los elementos conlleva un aumento en su cantidad y por consiguiente un mayor tiempo de procesamiento.

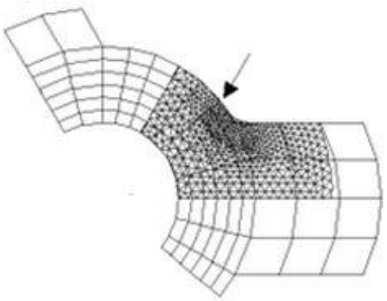


Figura 29. Suavizado del cambio de sección de una pieza.

- **Relación de aspecto:** Es un parámetro de forma de los elementos. Se define como el cociente entre el lado más largo y más corto de la cara de un elemento, el cual se requiere que sea cercano a la unidad.

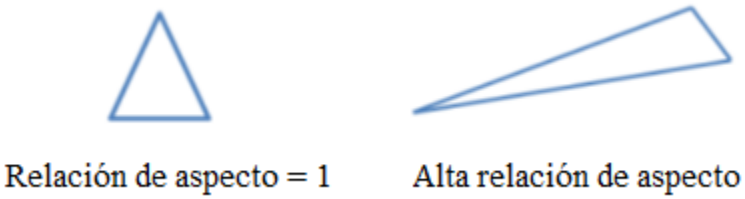



Figura 30. Relación de aspecto de un elemento finito.

- **Calidad de elementos:** Es un factor de forma que se encuentra en un rango de 0 a 1, y resulta de la comparación entre la forma deseada por el usuario y la forma final de los elementos en la malla. Un valor de 0 significa una mala representación (el elemento tiene volumen cero o negativo) mientras que el valor 1 corresponde a que el elemento tiene una forma ideal.

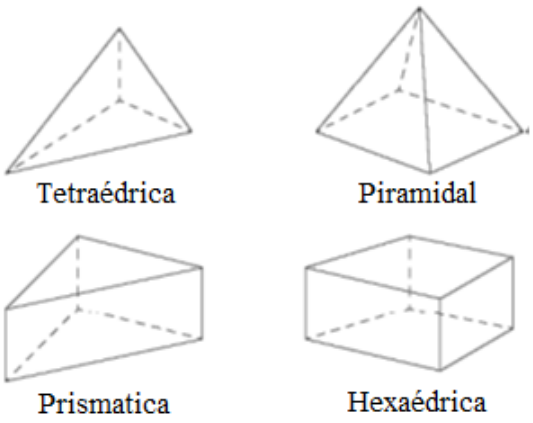



Figura 31. Tipos de celda de una malla.

- **Asimetría:** Este parámetro determina qué tan cercana a la forma ideal se encuentra una celda, representado por un rango entre 0 y 1, donde el valor 0 corresponde a una celda equilateral (ideal), mientras que un valor de 1 considera la celda como degenerada, es decir, su forma generará problemas en la simulación. La importancia de que la asimetría sea cercana al 1 radica en que las ecuaciones de se resuelven en el programa asumen que las celdas son relativamente equilaterales y equiangulares.

Tabla 1. Calidad de malla según el factor de asimetría.

| Asimetría | Calidad de Malla |
|---|---|
| **1** | Degenerada |
| **1>S>9** | Mediocre |
| **0.9>S>0.75** | Pobre |
| **0.75>S>0.5** | Regular |
| **0.5>S>0.25** | Buena |
| **0.25>S>0** | Excelente |
| **0** | Perfecta |

- **Calidad ortogonal:** Toma valores entre 0 y 1, donde el valor 1 es una calidad ideal. Utiliza tres vectores, un vector normal a una cara del elemento ($\overrightarrow{A_i}$), un vector que va desde el centroide de la celda al centroide de esa cara ($\overrightarrow{f_i}$) y un vector desde el centroide de la celda al centroide de la celda adyacente a esa cara ($\overrightarrow{c_i}$). El valor de la calidad ortogonal se determina mediante la Ecuacion 3.5, donde el subíndice i corresponde a cada cara del elemento.

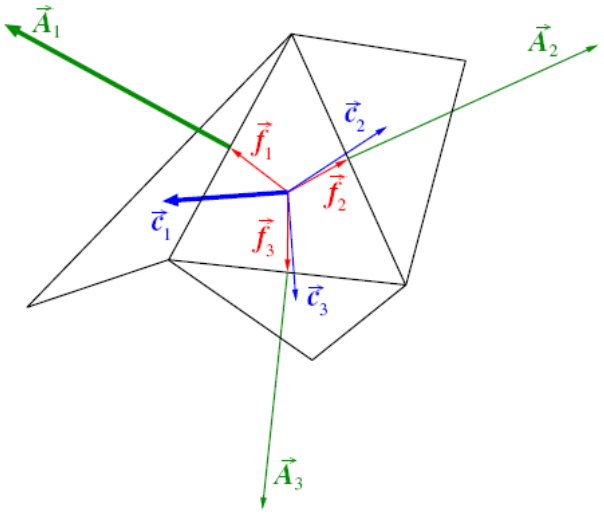



Figura 32. Vectores para el cálculo de la calidad ortogonal de la malla.

$$Calidad\ ortogonal = \text{mín}\left\{\frac{\overrightarrow{A_i}\cdot\overrightarrow{f_i}}{|\overrightarrow{A_i}|\cdot|\overrightarrow{f_i}|};\frac{\overrightarrow{A_i}\cdot\overrightarrow{c_i}}{|\overrightarrow{A_i}|\cdot|\overrightarrow{c_i}|}\right\} \tag{3.9}$$

# 4 Estudios Relacionados

El estudio del comportamiento elástico de las espumas sintácticas se encuentra presente en diversas publicaciones científicas, mediante la utilización de ensayos de compresión, métodos matemáticos y análisis mediante MEF. A continuación se presentan brevemente algunos de estos estudios con sus respectivas conclusiones, los cuales utilizan especímenes de matrices metálicas y poliméricas con esferas huecas de distintos materiales, para amplios rangos de porosidades. Otro estudio importante se encuentra descrito anteriormente en el Capítulo 3.4.3.1.

## 4.1 Comportamiento en compresión de espumas metálicas sintácticas con matriz de aluminio reforzadas con esferas huecas de hierro

Este trabajo [20] estudia el comportamiento en compresión de cuatro tipos de MMSFs, realizando una comparación entre datos obtenidos en ensayos de compresión [21] y simulaciones mediante elementos finitos. Las espumas son fabricadas mediante la técnica de infiltración por presión, utilizando matrices de aleaciones de aluminio Al99.5, AlSi12, AlMgSi1 y AlCu5, y esferas huecas de hierro puro de la empresa Globomet (GM) [8]. Las propiedades mecánicas de las matrices se encuentran en la Tabla 2, mientras que las propiedades y dimensiones de las esferas se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el estudio.

| Material | Módulo de Young [GPa] | Densidad [g cm-3] |
|---|---|---|
| **Al 99.5** | 69,0 | 2,71 |
| **Fe** | 95,9 | 0,093 |

Tabla 3. Dimensiones de las esferas huecas de hierro.

| **Material** | **Fe** |
|---|---|
| **Diámetro nominal** | 1,92 ± 0,07 [mm] |
| **Espesor de pared** | 23 ± 0,6 [um] |

El proceso de fabricación se realiza en un molde cilíndrico especial (Figura 33) con su interior cubierto por una fina capa de grafito, en el cual se introducen un arreglo de esferas y mediante golpes continuos, se alcanza una porosidad cercana al 63%. Luego, el molde es envuelto en una red de acero inoxidable y precalentado en un horno a 300°C durante 30 minutos. Paralelamente, el material de la matriz se calienta 50°C sobre su temperatura de fusión. Las esferas se ubican en el equipo de la Figura 22, el material fundido se deposita sobre éstas y se inyecta gas inerte (Argón) a una presión de 400 [kPa], forzando al metal líquido a infiltrarse entre las esferas. Una vez que la mezcla es enfriada, se retira del molde y se realiza el maquinado hasta las dimensiones de una probeta cilíndrica de 14 [mm] de altura y 14 [mm] de diámetro.

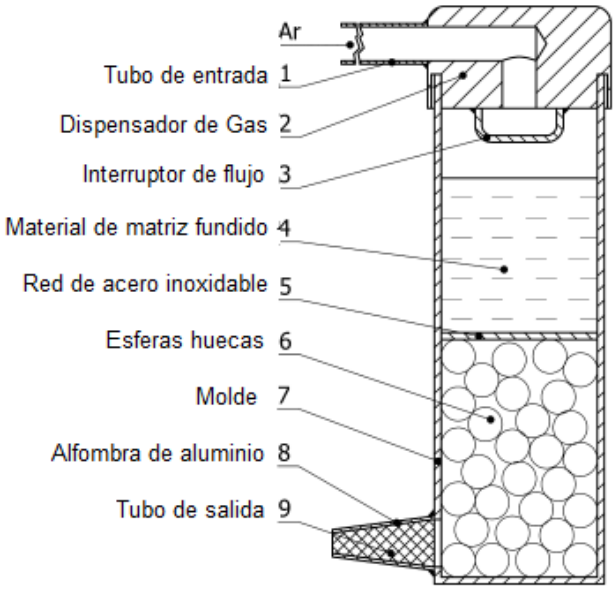



Figura 33. Esquema del equipo de infiltración del estudio [20].

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 34) y los resultados son graficados en las curvas de Esfuerzo vs Deformación de la Figura 35.

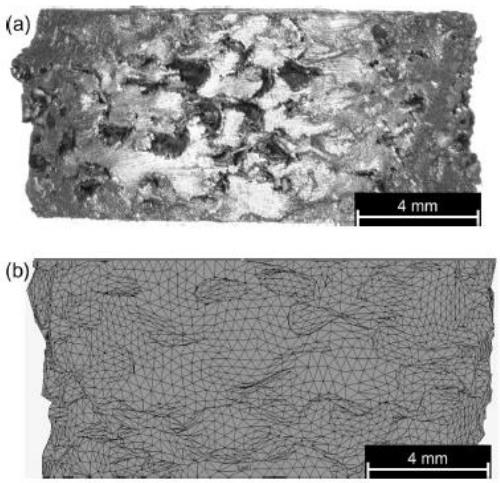



Figura 34. Probetas estudiadas a una compresión del 50% a) Real b) Simulación MEF [20].

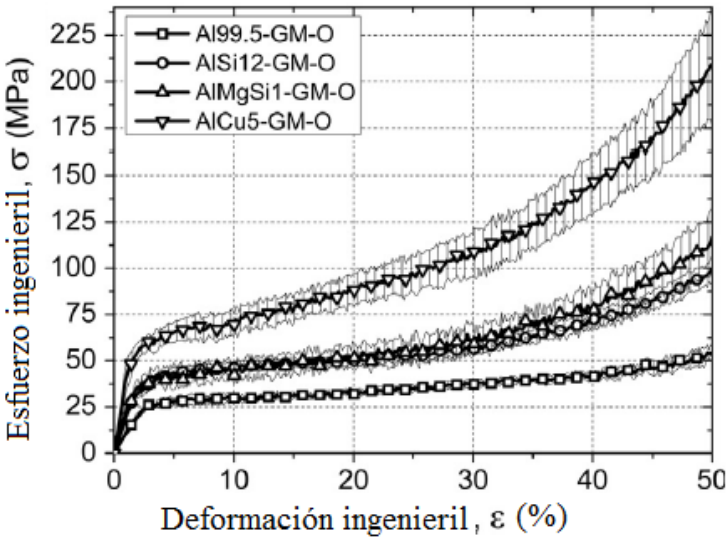



Figura 35. Curva Esfuerzo vs Deformación obtenidas en el ensayo, para distintos tipos de aleaciones de aluminio [20].

Las conclusiones del estudio con respecto al comportamiento mecánico de las MMSFs real y simulada son las siguientes:

1 Las curvas de Esfuerzo vs Deformación ingenieril registradas muestran una alta ductilidad y una región de meseta larga y de ascenso lento que asegura una gran capacidad de absorción de energía.

2 El modelo FEM a escala completa permite una excelente aproximación a los valores medidos para la MMSF de aluminio Al99 en compresión libre. Los valores medidos están comprendidos dentro del 5% en el caso de las propiedades características y dentro del 10% para toda la curva.

## 4.2 Comportamiento elástico de espumas sintácticas

Este estudio [51] compara resultados teóricos (analíticos y numéricos) y experimentales para espumas sintácticas de matriz polimérica (Epoxy) reforzadas con distintos tipos de esferas huecas de vidrio, para porosidades entre 15 y 60%. Se analiza el módulo de Young en función de la porosidad y del espesor de la inclusión, utilizando modelos de celda unitaria para disminuir los tiempos de procesamiento computacional, bajo el supuesto de un espaciamiento periódico entre las inclusiones. La matriz Epoxy tiene $E = 2.8\,GPa$ y un $v = 0.41$, mientras que se utilizan distintos tipos de esferas, cuyas propiedades se señalan en la Tabla 4. En la Figura 36 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4. Propiedades y dimensiones de las esferas utilizadas en el estudio.

| Tipo | Módulo de Young [GPa] | Coef. de Poisson | Densidad [g cm-3] | Diámetro medio [µm] | Espesor [µm] | t/d |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **K1** | 70.11 | 0.23 | 0.125 | 70.00 | 0.58 | 0.0083 |
| **K15** | | | 0.15 | 70.00 | 0.70 | 0.01 |
| **S22** | | | 0.22 | 40.00 | 0.59 | 0.0148 |
| **K37** | | | 0.37 | 50.00 | 1.28 | 0.0256 |

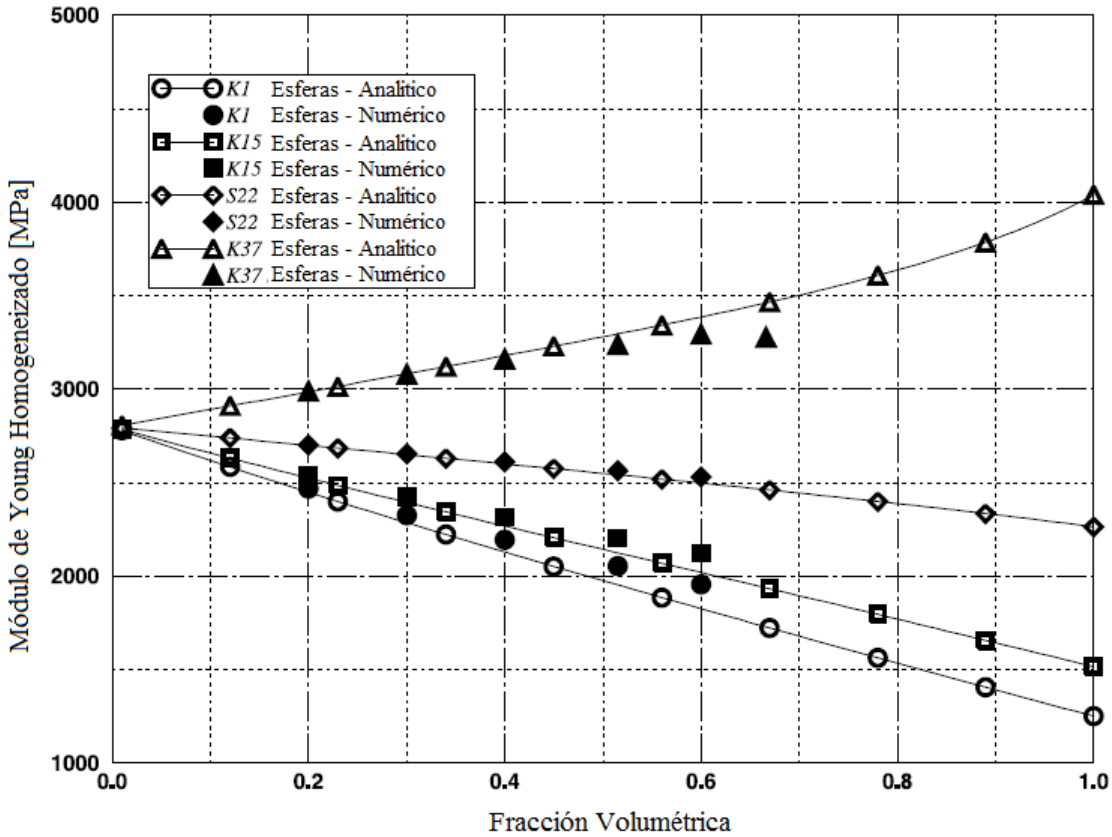



Figura 36. Comparación entre los resultados numéricos y analíticos para el Módulo de Young.

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

1. Se observa que el módulo de Young de las esferas está fuertemente relacionado con la relación entre el espesor de pared y el diámetro de la inclusión esférica. Debido a la gran diferencia entre el valor del módulo de Young de las fases en la espuma, mientras mayor es el valor de la relación $t/d$, mayor es el módulo de Young del compuesto, llegando incluso a existir una relación de proporcionalidad directa con la porosidad.
2. Los modelos de celda unitaria pueden ser utilizados sin obtener errores substanciales en el módulo de elasticidad del material.

3. El supuesto de una unión perfecta entre la esfera y la matriz es válido hasta el punto de ruptura del material, y más aún en la zona elástica. Para valores extremos de porosidad, el módulo de Young teórico es mayor que el experimental debido a la acción de la interface y al reducido espesor de pared.
4. La distribución del espesor de pared tiene una influencia mínima en las propiedades elásticas de la espuma.
5. La presencia de demasiados vacíos intersticiales influye negativamente en el módulo elástico.

## 4.3 Módulo elástico efectivo de espumas sintácticas

Este estudio [26] realiza cálculos analíticos y numéricos para estimar el modulo elástico de espumas sintácticas, comparando los resultados con datos teóricos y experimentales, mediante el uso de modelos de celda unitaria en 2 y 3 dimensiones, y modelos en 3 dimensiones con distribución de esferas, los cuales se describen en el Capítulo 5.1, además de un modelo analítico similar a los que se señalan en el Capítulo 3.6.1. Con respecto a los materiales utilizados, la matriz corresponde a un polímero (Epoxy) con $E = 3.08\ GPa$ y $v = 0.4$, mientras que las microesferas cerámicas tienen 60 µm de diámetro y 400 nm de espesor de pared ($t/d = 0{,}0067$), $E = 74\ GPa$ y $v = 0.19$.

Las conclusiones del trabajo son las siguientes:

1. El valor del módulo de Young y del coeficiente de Poisson disminuyen con el aumento de la porosidad de la espuma.
2. Todos los métodos teóricos sobreestiman los resultados experimentales del módulo de Young y subestiman el coeficiente de Poisson. Las diferencias pueden ser explicadas por:

a. La existencia de porosidad intersticial en los especímenes reales, y que no es considerada en los modelos teóricos.
b. La unión entre las esferas y la matriz no es perfecta, como suponen los modelos teóricos.
c. No se considera la existencia de una interface entre las esferas y la matriz, la cual puede tener un módulo de Young distinto a los componentes de la espuma.

3. Existen diferencias entre los métodos analíticos y numéricos (MEF), ya que en los modelos numéricos se imponen condiciones de borde que mantienen paralelos los límites de las celdas unitarias, lo que puede resultar en falta de isotropía y un aumento de la rigidez. Esto explica el mayor módulo de Young y menor coeficiente de Poisson de los modelos de celda unitaria con respecto a las probetas cilíndricas con distribución de esferas.

## 4.4 Efectos de la porosidad en el comportamiento elástico y modos de falla en espumas sintácticas epoxy con microesferas de vidrio.

Este estudio [60] analiza el comportamiento elástico y plástico de matrices de epoxy y esferas de vidrio para porosidades entre 10 y 40%, a través de un análisis MEF con una distribución aleatoria de esferas en un arreglo cúbico (Figura 37). La matriz Epoxy tiene $E = 2.2\ GPa$ y un $v = 0.36$, mientras que las esferas poseen un $E = 60\ GPa$, $v = 0.21$, diámetro entre 10 y 65 µm, y espesor de pared de 2 µm ($t/d = 0.03 - 0.2$).

Las conclusiones del trabajo son las siguientes:

1 Debido al elevado valor de la relación entre el espesor de pared y el diámetro de las esferas ($t/d$), además del elevado módulo de Young de éstas, se obtiene un aumento del Módulo de Young del compuesto a medida que aumenta la porosidad.

2 El Módulo de Young teórico es mayor al experimental, debido a que en el modelo no se consideran los vacíos intersticiales ni la interface entre las esferas y la matriz.

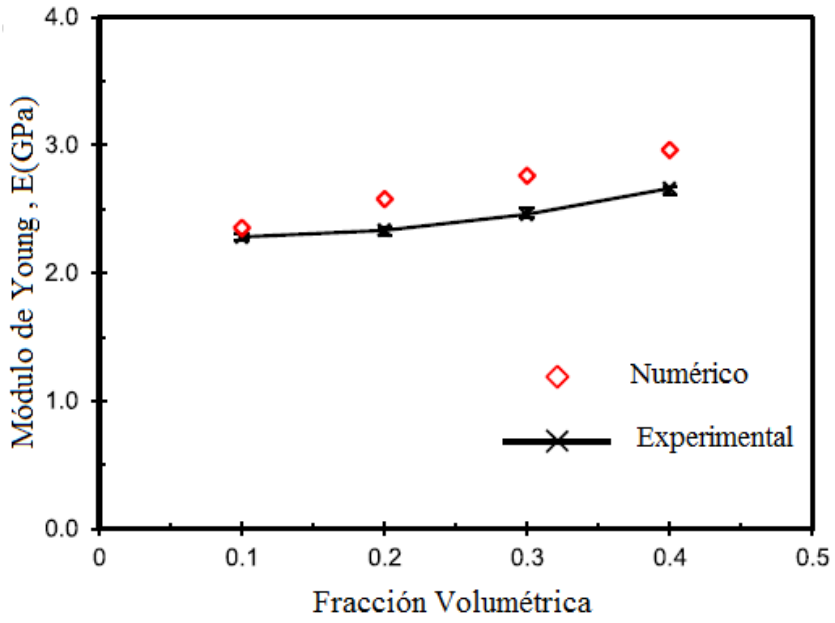



Figura 37. Comparación entre los valores teóricos y experimentales del Módulo de Young.

# 5 Metodología

En el presente capítulo se explica la metodología para la realización de un estudio mediante el método de elementos finitos, utilizando el software ANSYS Workbench, para la estimación del módulo de Young de espumas sintácticas de matriz de cobre reforzadas con esferas huecas de hierro. Para esto se modelan una serie de probetas cilíndricas con un arreglo aleatorio de esferas huecas para distintas porosidades (entre 13% y 44%) y dimensiones de probeta, se seleccionan las propiedades mecánicas de sus materiales, se establecen las condiciones de contorno para el ensayo de compresión y los resultados son utilizados para el cálculo del módulo de Young del compuesto.

Adicionalmente se realiza el mismo procedimiento para probetas con la misma geometría, pero sin la presencia de esferas huecas (sin refuerzo), además de espumas de cobre de celda abierta con las mismas dimensiones y porosidades, con el fin de realizar una comparación de su comportamiento mecánico.

## 5.1 Análisis de espumas sintácticas mediante el método MEF

Las celdas unitarias para las espumas sintácticas pueden ser modeladas en 2 y 3 dimensiones. La Figura 38 representa una celda unitaria cúbica en 2 dimensiones, la cual es sometida a restricciones en el desplazamiento en dos de sus lados ($x_1 = 0$ y $x_2 = 0$), mientras se somete a un desplazamiento compresivo en uno de los lados restantes, dejando el otro libre. El módulo de Young es calculado con las fuerzas de reacción y la deformación promedio. En la Figura 39 se observa un modelo de celda unitaria esférica, donde el proceso es similar, excepto que en lugar de aplicar un desplazamiento, se utiliza una presión hidrostática en el lado curvo exterior del modelo [26].

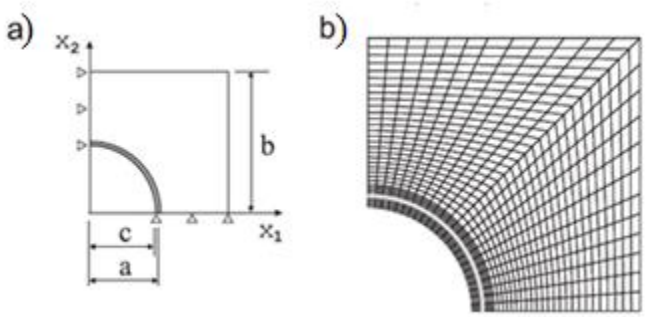



Figura 39. Modelo 2D de celda unitaria cúbica a) Condiciones de borde y dimensiones b) Mallado [26].

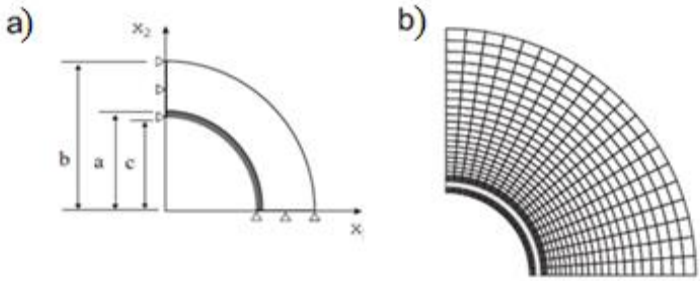



Figura 38. Modelo 2D de celda unitaria esférica a) Condiciones de borde y dimensiones b) Mallado [26].

En la Figura 40 se muestra otro método de celda unitaria, que corresponde a un modelo 3D cúbico, donde debido a la simetría de las esferas bajo el supuesto de un arreglo periódico de partículas, es necesaria la representación de sólo un octavo de la inclusión esférica, realizando restricciones de movimiento en las caras que cortan la esfera. El control de la porosidad se realiza variando el radio de la inclusión y manteniendo fijas las dimensiones de la matriz cúbica [26].

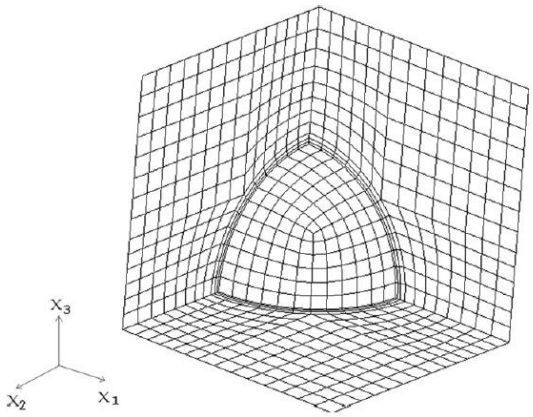



Figura 40. Modelo 3D de celda unitaria cúbica con 5% de porosidad [26].

El modelo 3D de la Figura 41 corresponde a un arreglo aleatorio de esferas en una matriz cilíndrica, donde la porosidad es controlada seleccionando el tamaño y cantidad de esferas. La importancia de este tipo de ordenamiento de partículas radica en que se busca simular las estructuras reales, ya que de lo contrario, propiedades como el Módulo de Young son sobreestimadas [61].

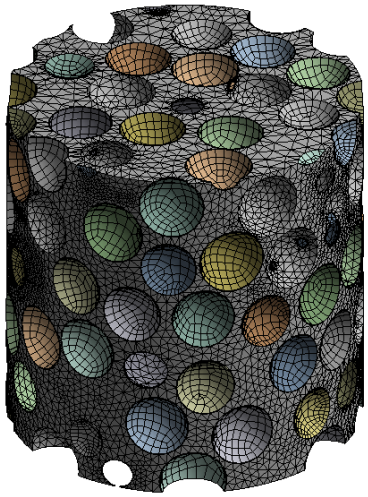


Figura 41. Modelo de probeta cilíndrica con arreglo aleatorio de esferas, utilizada en el presente trabajo.

En la Figura 42 se observa una comparación entre estos modelos, para el caso de estudio de Marur [26], descrito en el Capítulo 4.3, para una matriz de Epoxy con microesferas cerámicas.

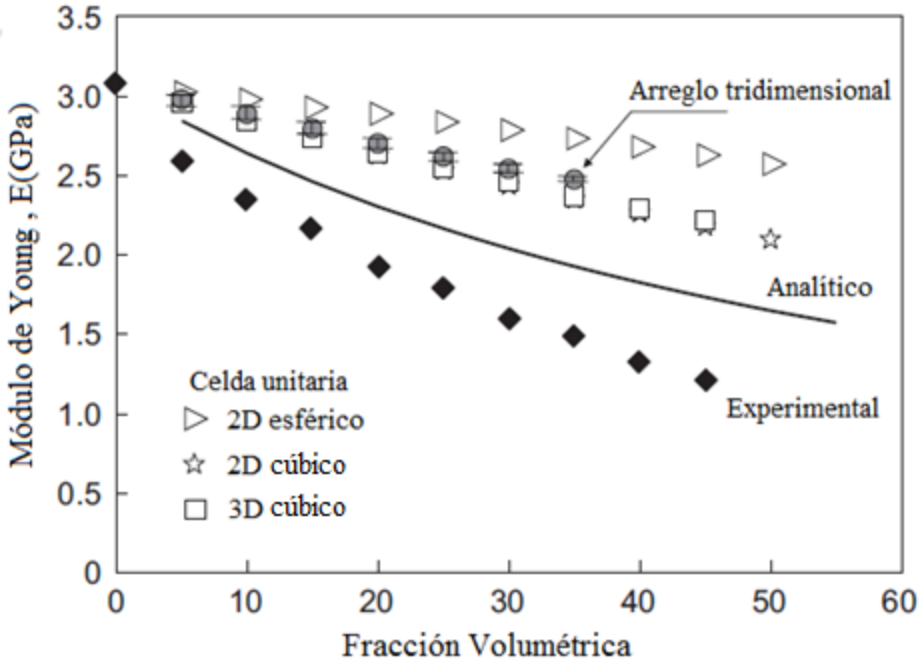



Figura 42. Comparación entre los modelos analíticos, numéricos y experimentales para una matriz Epoxy con esferas cerámicas [26].

La adhesión entre las microesferas y la matriz también es un factor que afecta las propiedades mecánicas de las espumas sintácticas. Si la interface es fuerte, el modelo puede considerarla como una unión de rigidez infinita (*bonded contact)* y la carga aplicada al espécimen podría ser transferida completamente a las esferas. Por el contrario, si ésta interface es débil, se puede utilizar como criterio la unión parcialmente rígida (*partially debonded interface*), o un modelo mixto (Figura 43), con el fin de evitar la sobreestimación de propiedades como el módulo de Young [62].

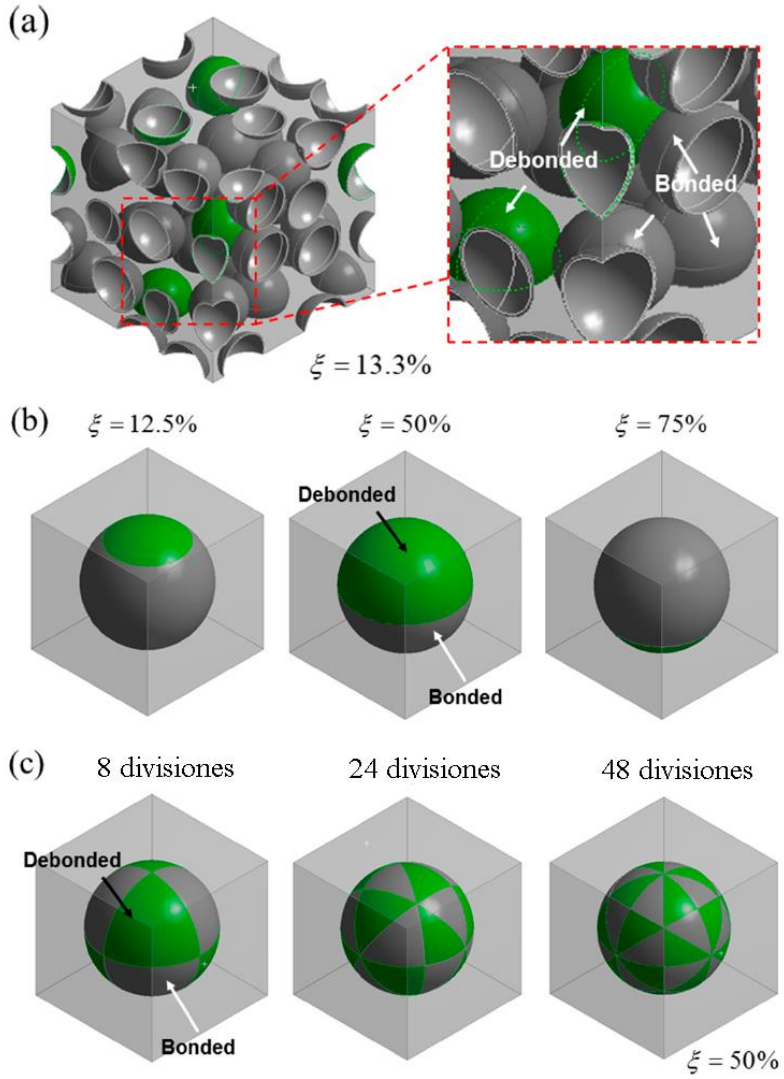



Figura 43. Modelos MEF de espuma sintáctica con interface mixta a) arreglo tridimensional b) celda unitaria c) celda unitaria con divisiones [62].

## 5.2 Simulación

Para la realización de las simulaciones en el software ANSYS Workbench, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Ingresar a la ventana *Static Structural*, la cual permite realizar análisis estructurales (Figura 44).
2. Cargar una geometría en la ventana *Geometry*, la cual permite además realizar modificaciones en el tamaño de probetas, adición o sustracción de esferas y resolución de errores de la geometría importada.
3. Ingresar las propiedades mecánicas de los materiales en la ventana *Engineering data*.
4. Ejecutar la ventana *Model*, en la cual se configura y genera el mallado, se ingresan las condiciones de contorno, como restricciones y desplazamientos, y por último se selecciona el tipo de análisis (Fuerza de reacción, deformación, esfuerzos, entre otros). Una vez listos todos los parámetros, se inicia la simulación para la obtención de los resultados requeridos.

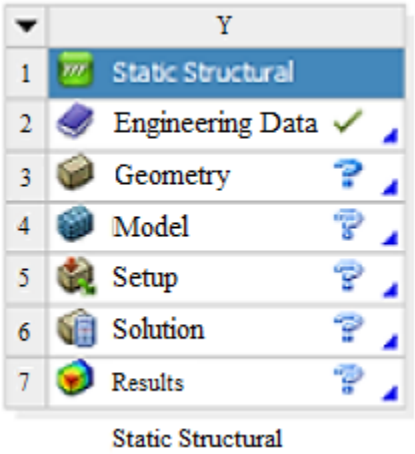



Figura 44. Ventana de análisis estructural del software ANSYS Workbench.

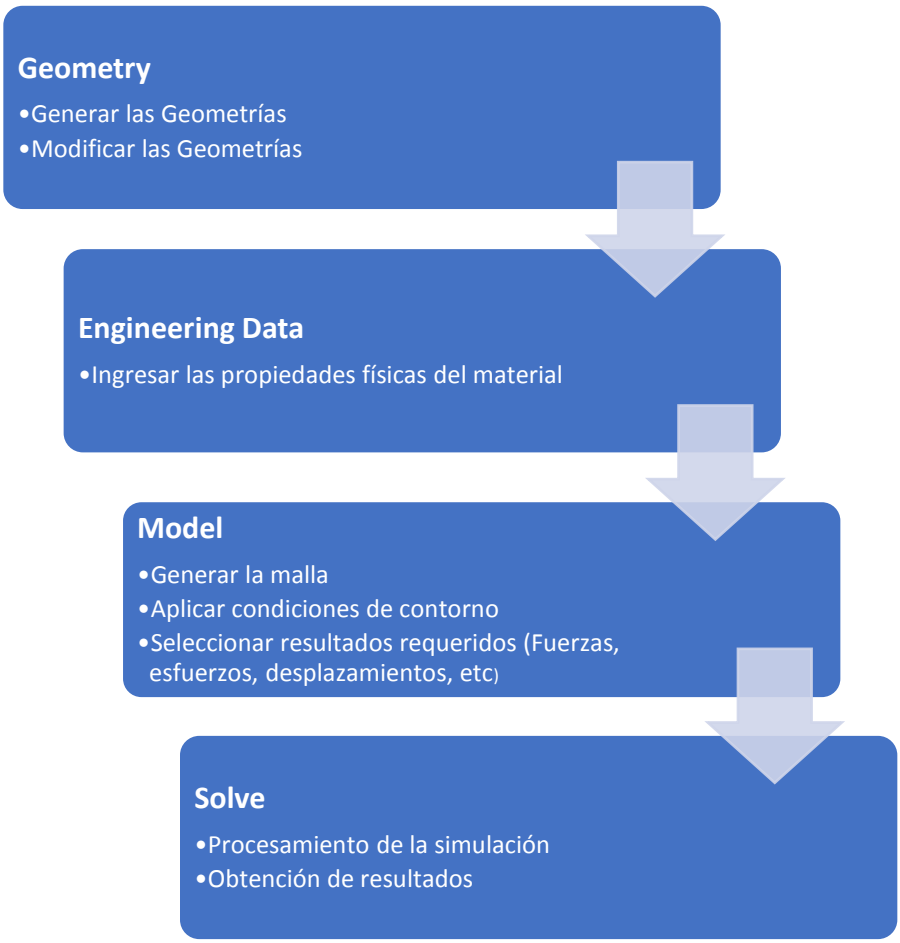



Figura 45. Procedimiento de simulación mediante MEF en ANSYS Workbench (Ventana principal de simulación).

## 5.3 Geometrías

Las geometrías cilíndricas utilizadas cumplen las siguientes relaciones dimensionales:

$$\frac{Altura_{probeta}}{Diámetro_{probeta}} = 1 \tag{5.1}$$

$$\frac{Diámetro_{probeta}}{Diámetro_{esfera}} = N \tag{5.2}$$

Para obtener buenos resultados, el elemento representativo de volumen (probeta) debe ser al menos 2.5 a 3.5 veces el tamaño máximo de los elementos contenidos en el modelo (esferas) [63]. Esta condición (N) se cumple para todas las probetas, tal como muestra la Tabla 5. Las dimensiones y propiedades mecánicas de las esferas huecas de hierro se encuentran en la Tabla 2 del Capítulo 4.

Tabla 5. Dimensiones de las probetas.

| Probeta | Altura [mm] | Diámetro [mm] | N [-] |
|---|---|---|---|
| **1** | 8 | 8 | 4,17 |
| **2** | 9 | 9 | 4,69 |
| **3** | 10 | 10 | 5,21 |

Tanto las probetas reforzadas y como las probetas de celda abierta son modeladas en porosidades de 13, 21, 31, 28 y 44% (Tabla 5 y Tabla 6), y se muestran en la Figura 46, Figura 47 y Figura 48.

Tabla 6. Porosidades de las probetas reforzadas y las probetas sin refuerzo.

| Altura [mm] | Porosidad [%] | Porosidad Estándar [%] |
|---|---|---|
| **8** | 12,84 | 13 |
| **9** | 13,67 | |
| **10** | 13,06 | |
| **8** | 20,96 | 21 |
| **9** | 20,36 | |
| **10** | 21,28 | |
| **8** | 30,55 | 31 |
| **9** | 30,81 | |
| **10** | 30,72 | |
| **8** | 38,27 | 38 |
| **9** | 37,02 | |
| **10** | 38,27 | |
| **8** | 43,50 | 44 |
| **9** | 44,00 | |
| **10** | 43,50 | |

Tabla 7. Porosidades de las probetas de celdas abiertas.

| Altura [mm] | Porosidad [%] | Porosidad Estándar [%] |
|---|---|---|
| **8** | 13,32 | 13 |
| **9** | 13,29 | |
| **10** | 13,36 | |
| **8** | 20,46 | 21 |
| **9** | 20,85 | |
| **10** | 20,68 | |
| **8** | 30,85 | 31 |
| **9** | 30,76 | |
| **10** | 30,18 | |
| **8** | 37,56 | 38 |
| **9** | 37,79 | |
| **10** | 37,96 | |
| **8** | 43,63 | 44 |
| **9** | 43,63 | |
| **10** | 43,35 | |

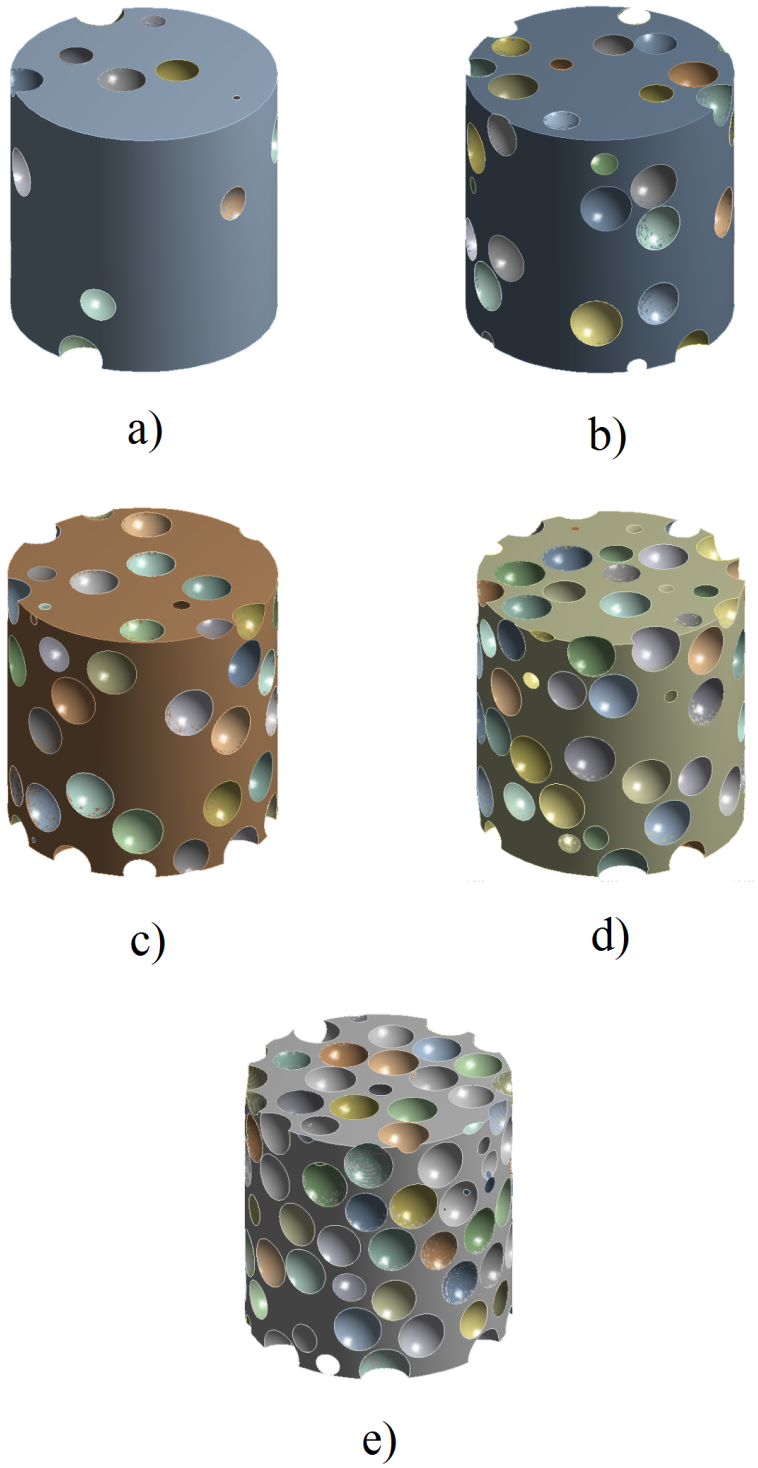



Figura 46. Probetas reforzadas de porosidades a) 13% b) 21% c) 31% d) 38% e) 44%

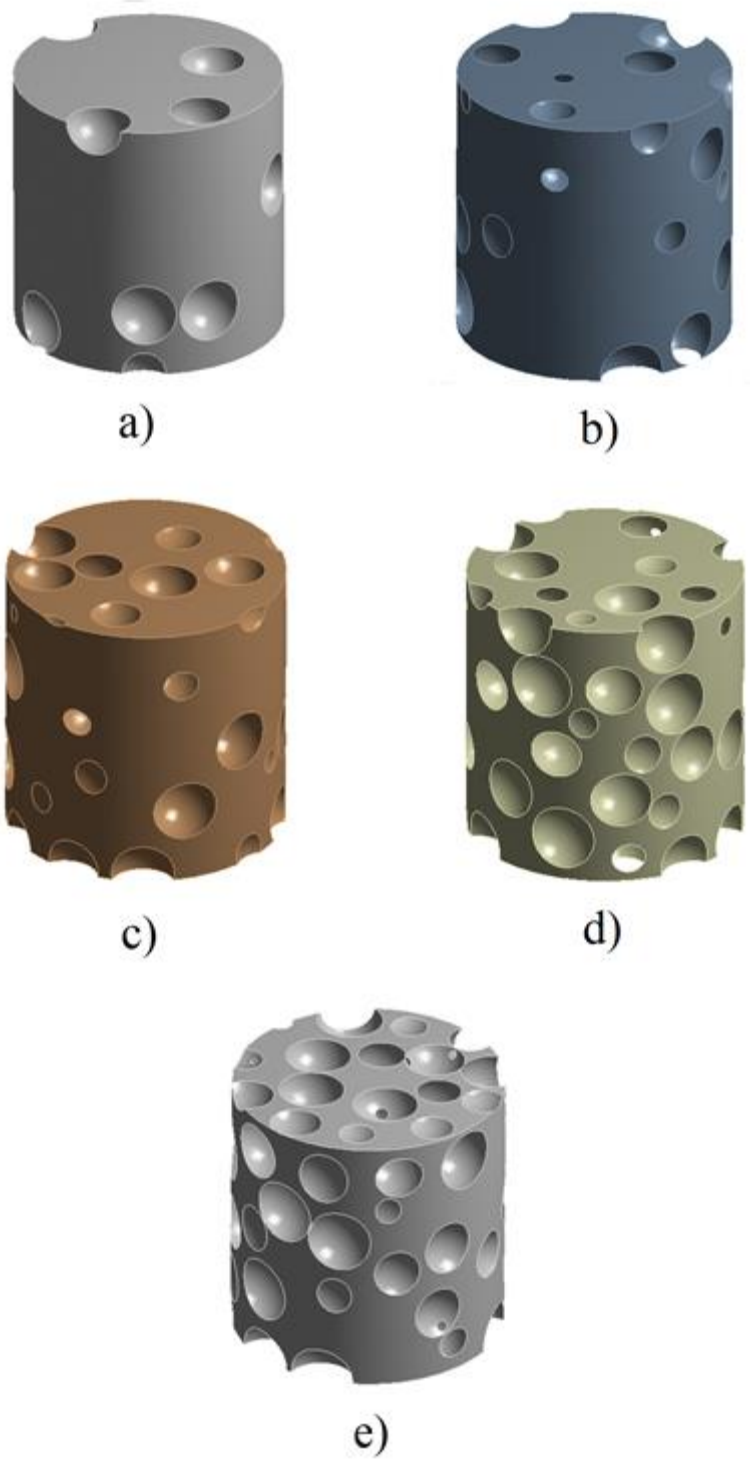



Figura 47. Probetas sin presencia de esferas de porosidades
a) 13% b) 21% c) 31% d) 38% e) 44%

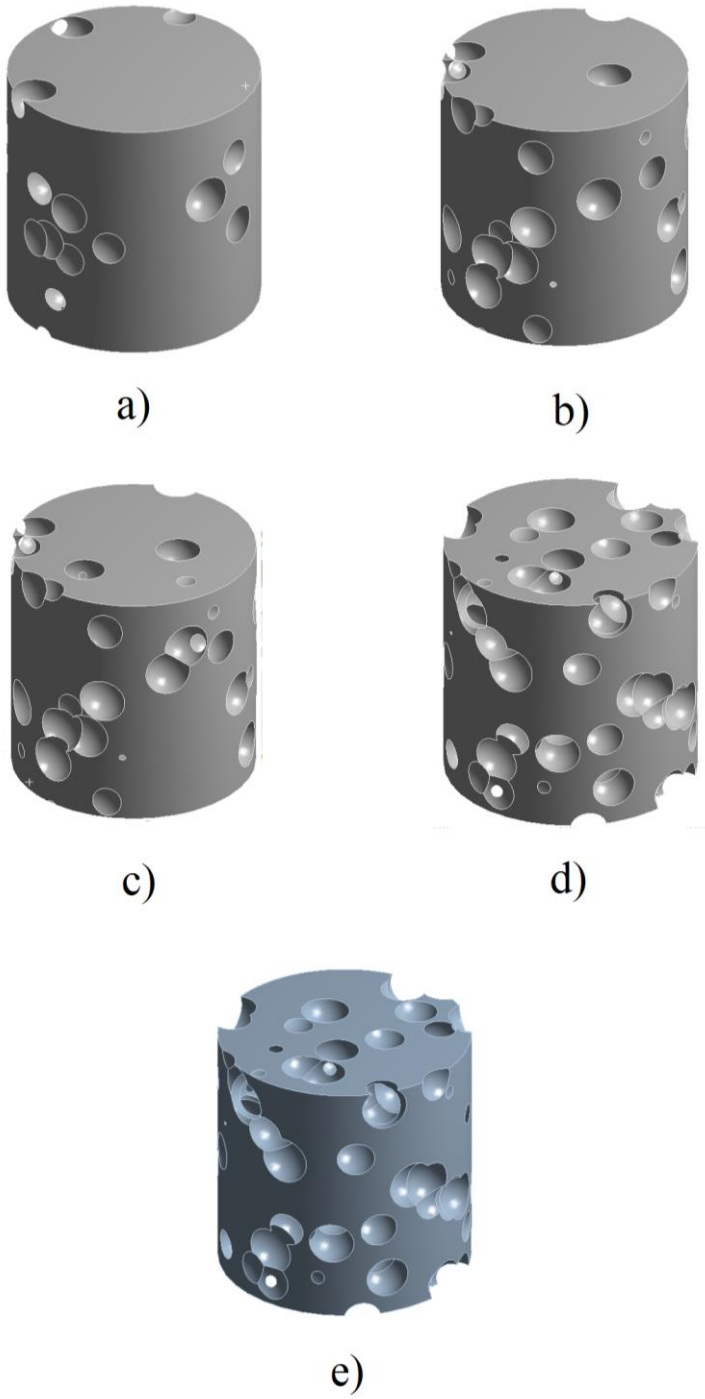



Figura 48. Probetas de celdas abiertas de porosidades a) 13% b) 21% c) 31% d) 38% e) 44%

## 5.4 Propiedades

Para la matriz de la espuma se utilizan las propiedades mecánicas del Cobre de la biblioteca de materiales de ANSYS (Figuras 49 y 50), mientras que las propiedades de las esferas huecas de hierro se extraen del estudio del Capítulo 4.1. Debido a que se desea estudiar únicamente el comportamiento elástico del compuesto, sólo son necesarias las propiedades de elasticidad isotrópica, como el Módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Se selecciona un comportamiento isotrópico con el fin de homogeneizar el material, ya que se asume que las propiedades mecánicas son iguales en todos los puntos y direcciones [48].

| 1 | Property | Value | Unit |
|---|---|---|---|
| 2 | Material Field Variables | Table | |
| 3 | Density | 8300 | kg m^-3 |
| 4 | Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion | | |
| 6 | Isotropic Elasticity | | |
| 7 | Derive from | Young's Modulus and P... | |
| 8 | Young's Modulus | 1,1E+11 | Pa |
| 9 | Poisson's Ratio | 0,34 | |
| 10 | Bulk Modulus | 1,1458E+11 | Pa |
| 11 | Shear Modulus | 4,1045E+10 | Pa |
| 12 | Tensile Yield Strength | 2,8E+08 | Pa |
| 13 | Compressive Yield Strength | 2,8E+08 | Pa |
| 14 | Tensile Ultimate Strength | 4,3E+08 | Pa |
| 15 | Compressive Ultimate Strength | 0 | Pa |

Figura 49. Propiedades mecánicas ingresadas en el software para el Cobre.

| 1 | Property | Value | Unit |
|---|---|---|---|
| 2 | Material Field Variables | Table | |
| 3 | Density | 7860 | kg m^-3 |
| 4 | Isotropic Elasticity | | |
| 5 | Derive from | Young's Modulus and P... | |
| 6 | Young's Modulus | 9,59E+10 | Pa |
| 7 | Poisson's Ratio | 0,3 | |
| 8 | Bulk Modulus | 7,9917E+10 | Pa |
| 9 | Shear Modulus | 3,6885E+10 | Pa |
| 10 | Multilinear Isotropic Hardening | Tabular | |

Figura 50. Propiedades mecánicas ingresadas en el software para el Hierro

## 5.5 Mallado

El mallado de las probetas debe garantizar buenos resultados, para lo cual se utiliza una malla cuyos parámetros característicos (Calidad de elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal), mostrados en los histogramas y tablas de los Anexos, están dentro de los valores aceptables mostrados en el Capítulo 3.7.2, y que además no generan problemas durante la simulación debido a limitaciones en la capacidad de procesamiento del equipo. En la Figura 51 se muestra la configuración de malla seleccionada en ANSYS y que es utilizada para todas matrices.

| 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 51. Configuración del mallado para las probetas.

La matriz se construye con elementos tetraédricos, mientras que para las esferas, se utiliza un método de triángulos, el cual permite que la pared de la esfera esté formada por elementos triangulares de su mismo espesor, tal como se muestra en la Figura 33. El espesor utilizado es de 0,023 [mm] y debe estar dirigido hacia adentro (*inner thickness)*, ya que la esfera es un elemento de coraza (*shell)*, de diámetro 1,92 [mm]. Esto evita que las esferas y la matriz se intersecten entre sí.

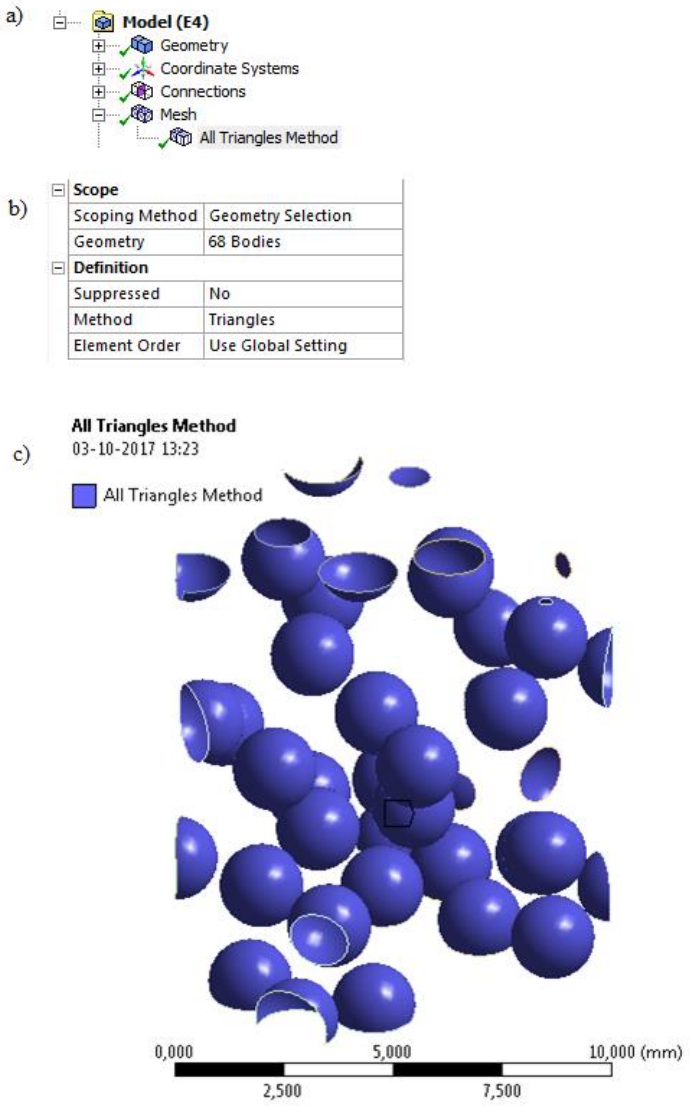



Figura 52. Mallado de esferas a) Selección del método de triángulos b) Configuración c) Selección de esferas.

La elección del método de triángulos para las esferas huecas se debe principalmente a que la matriz está formada por elementos tetraédricos, los cuales poseen caras triangulares, al igual que las esferas, lo que favorece la coincidencia de nodos entre ambas fases del modelo (Figura 53).

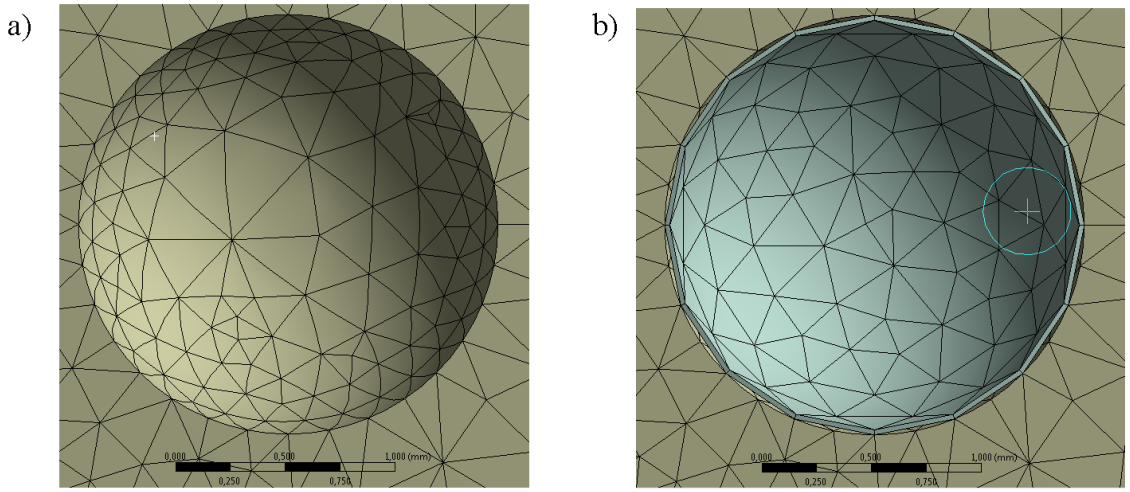



Figura 53. Comparación entre el mallado utilizado en el modelo MEF para a) la matriz y b) las esferas huecas.

## 5.6 Condiciones de contorno

La simulación mediante el MEF que se realiza a las probetas consiste en un ensayo de compresión uniaxial, para lo cual se deben seleccionar las condiciones de contorno adecuadas en las caras planas de la probeta para representar las condiciones de un ensayo real, y así obtener fuerzas de reacción que puedan ser utilizadas para el cálculo del módulo elástico del material.

La cara inferior se debe mantener fija, mediante el uso de la condición de desplazamiento *(displacement)*, en el cual se permite el movimiento en los ejes X e Y, mientras que en el eje Z no se permite el desplazamiento de la probeta, dejando esa coordenada igual a cero, tal como muestra la Figura 54 y la Figura 55.

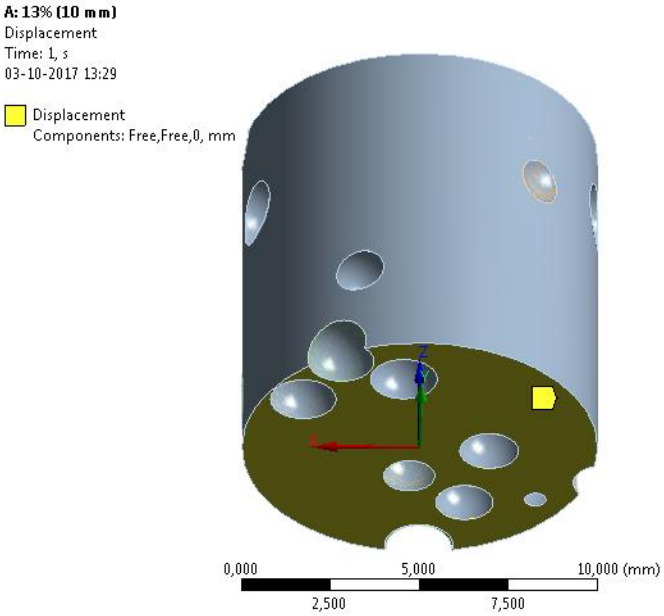



Figura 54. Condición de desplazamiento en una probeta de 13% de porosidad.

| 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 55. Restricciones para la cara inferior.

La condición seleccionada en la cara superior (Figura 56) es de desplazamiento remoto (*remote displacement*), la cual simula un desplazamiento producto de una fuerza externa. El movimiento en los ejes X e Y es restringido, mientras que en el eje Z se aplica un desplazamiento hacia abajo igual al 1% de la altura de la probeta (Figura 57), generando una compresión del modelo. Además, el comportamiento de esta cara debe ser acoplado (*coupled*), lo que obliga a que todos sus elementos se sometan al mismo desplazamiento.

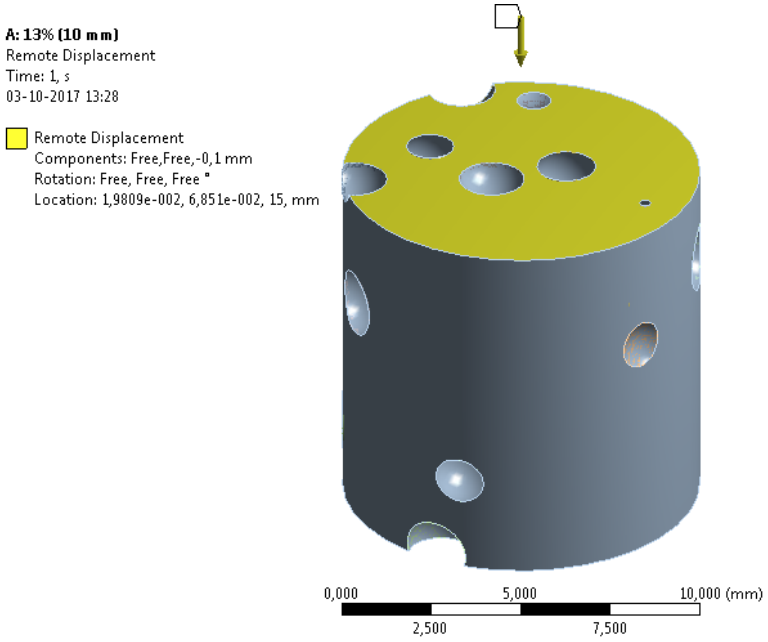



Figura 56. Condición de desplazamiento remoto en una probeta de 13% de porosidad.

| Definition | |
|---|---|
| Type | Remote Displacement |
| X Component | Free |
| Y Component | Free |
| Z Component | -0,1 mm (ramped) |
| Rotation X | Free |
| Rotation Y | Free |
| Rotation Z | Free |
| Suppressed | No |
| Behavior | Coupled |

Figura 57. Restricciones para la cara superior.

En la ventana de soluciones, el resultado más importante en este estudio es la fuerza de reacción (*Force reaction*), la cual requiere estar asociada a una condición de borde, por lo que se selecciona el desplazamiento remoto, tal como muestra la Figura 58.

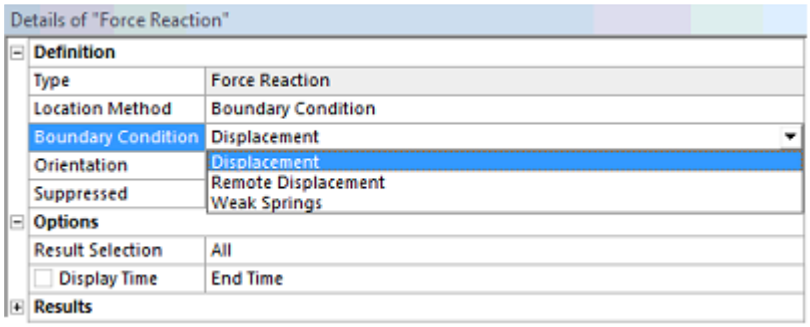



Figura 58. Selección de la condición de borde para la fuerza de reacción

## 5.7 Cálculo del módulo de Young

Con los resultados de la fuerza de reacción y el desplazamiento al que son sometidas las probetas, se puede aplicar un método para el cálculo del módulo de Young mediante una serie de expresiones [3]. La Ecuación 5.3 permite calcular el esfuerzo ($\sigma$) a partir de la fuerza de reacción ($F$) producto de la deformación y el área transversal de la probeta ($A$), correspondiente a la superficie inicial de la cara circular de la probeta sin poros, ya que al aumentar la porosidad tiende a disminuir el área superficial de la probeta, lo que dificulta la comparación de los resultados entre ellas,

$$\sigma = \frac{F}{A}. \tag{5.3}$$

La deformación ($\varepsilon$) es calculada con la Ecuación 5.4, a partir de la relación entre la variación de la altura de la probeta ($\Delta L$) al realizar su compresión y su altura inicial ($L$). Para todas las probetas se utiliza una deformación equivalente al 1% de la altura,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}. \tag{5.4}$$

La Ecuación 5.5 corresponde a la ley de Hooke para el comportamiento elástico de los materiales bajo compresión uniaxial, obteniendo el módulo de Young al relacionar el esfuerzo ($\sigma$) y la deformación ($\varepsilon$),

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \tag{5.5}$$

## 5.8 Resultados

Los resultados de las simulaciones corresponden a la fuerza de reacción que ejerce la probeta al ser deformada en un 1%. Debido a que en las propiedades mecánicas de los materiales sólo se ingresan las constantes de elasticidad, el comportamiento simulado se encuentra únicamente en la zona elástica.

En las Tablas 8, 9 y 10 se muestran los resultados del módulo de Young calculados de las probetas según tipo, tamaño y porcentaje de porosidad, mientras que en los Anexos se encuentran los datos adicionales como el área (A), fuerza de reacción (F), desplazamiento (d), deformación ($e$) y esfuerzo ($\sigma$).

Tabla 8. Módulo de Young de las espumas reforzadas según porosidad y tamaño de probeta.

| Porosidad Estándar [%] | Altura [mm] | Módulo de Young [GPa] |
|---|---|---|
| **0** | 8 | 110.0 |
| **13** | 8 | 86.90 |
| | 9 | 85.19 |
| | 10 | 86.65 |
| **21** | 8 | 72.23 |
| | 9 | 73.51 |
| | 10 | 72.23 |
| **31** | 8 | 57.55 |
| | 9 | 57.55 |
| | 10 | 57.06 |
| **38** | 8 | 46.65 |
| | 9 | 48.58 |
| | 10 | 47.93 |
| **44** | 8 | 40.32 |
| | 9 | 39.68 |
| | 10 | 37.45 |

Tabla 9. Módulo de Young de las espumas sin refuerzo según porosidad y tamaño de probeta.

| **Porosidad Estándar [%]** | **Altura [mm]** | **Módulo de Young [GPa]** |
|---|---|---|
| **0** | 8 | 110.0 |
| **13** | 8 | 86.45 |
| | 9 | 84.72 |
| | 10 | 86.65 |
| **21** | 8 | 71.54 |
| | 9 | 72.81 |
| | 10 | 72.23 |
| **31** | 8 | 56.59 |
| | 9 | 56.57 |
| | 10 | 56.06 |
| **38** | 8 | 45.52 |
| | 9 | 47.45 |
| | 10 | 47.93 |
| **44** | 8 | 39.37 |
| | 9 | 37.85 |
| | 10 | 37.45 |

Tabla 10. Módulo de Young de las espumas de celda abierta según porosidad y tamaño de probeta.

| **Porosidad Estándar [%]** | **Altura [mm]** | **Módulo de Young [GPa]** |
|---|---|---|
| **0** | 8 | 110.0 |
| **13** | 8 | 85.06 |
| | 9 | 84.68 |
| | 10 | 84.29 |
| **21** | 8 | 68.94 |
| | 9 | 69.23 |
| | 10 | 68.91 |
| **31** | 8 | 53.08 |
| | 9 | 54.25 |
| | 10 | 55.11 |
| **38** | 8 | 38.60 |
| | 9 | 38.32 |
| | 10 | 39.10 |
| **44** | 8 | 32.04 |
| | 9 | 31.16 |
| | 10 | 32.69 |

Las Figuras 59, 60 y 61 muestran los gráficos de los resultados del Módulo de Young para las espumas reforzadas y de celda abierta, respectivamente, para cada tamaño de probeta. La comparación entre las probetas reforzadas y de celda abierta se muestra en las Figuras 62, 63 y 64, para las probetas de 8, 9 y 10 [mm] de altura, respectivamente.

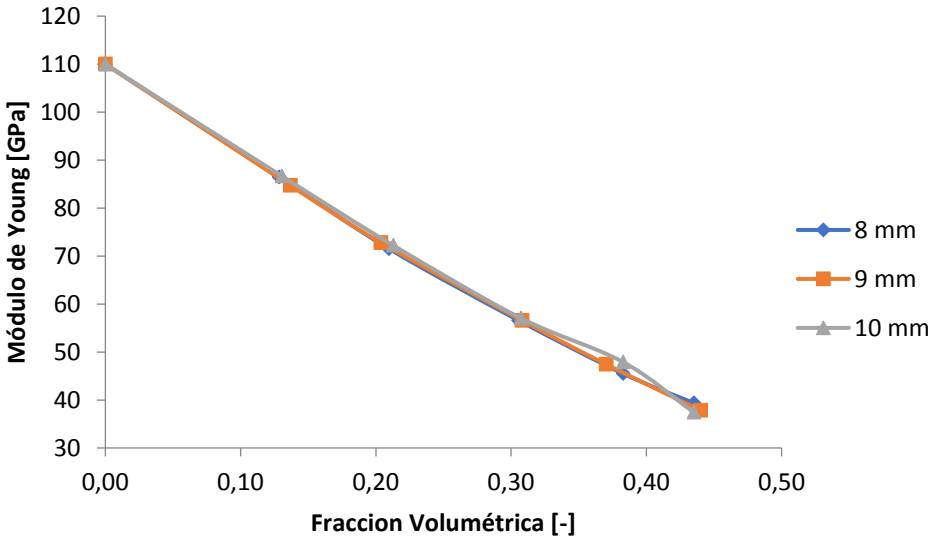



Figura 59. Módulo de Young para probetas reforzadas.

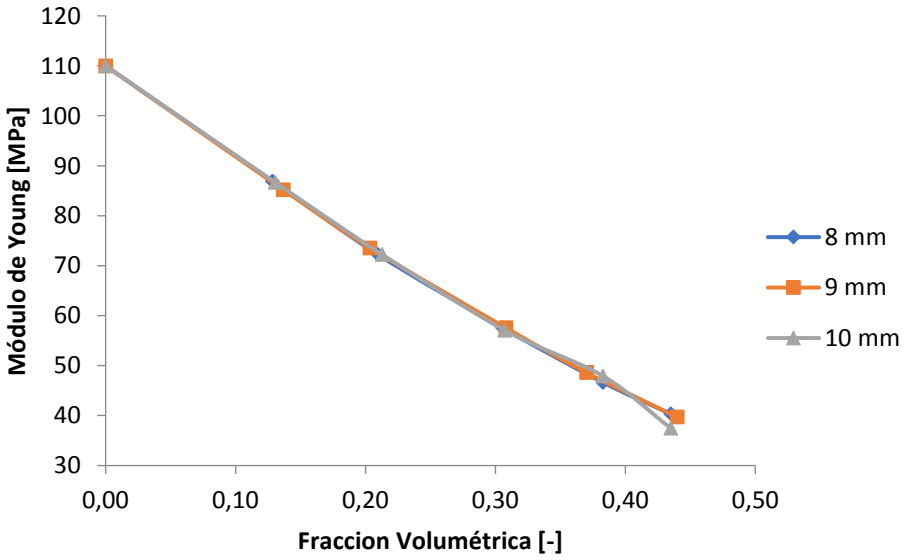



Figura 60. Módulo de Young para probetas sin refuerzo.

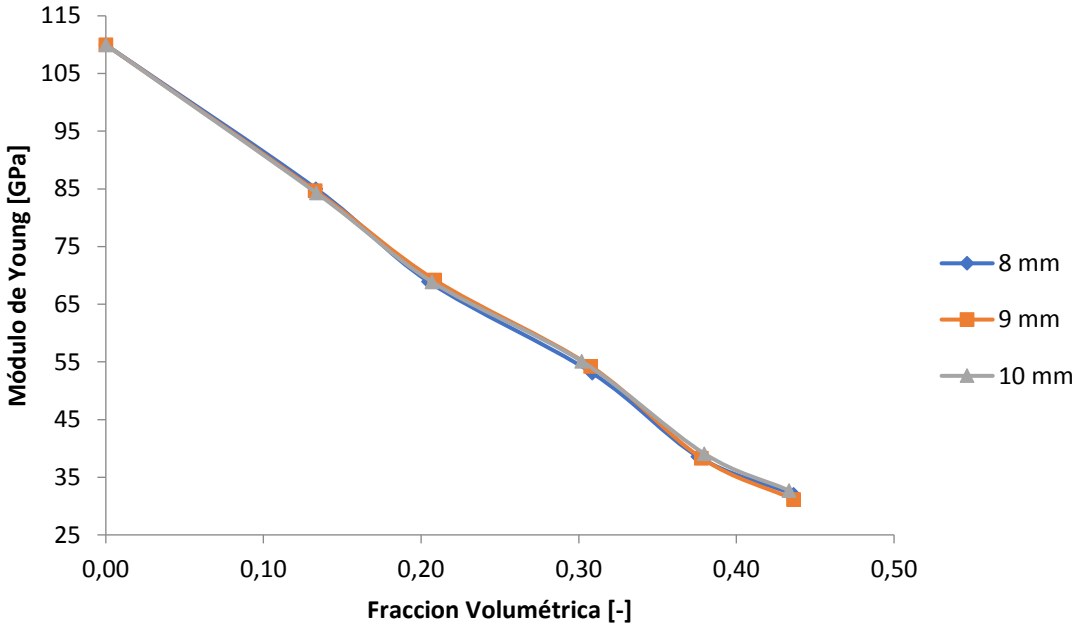



Figura 62. Módulo de Young para probetas de celda abierta.

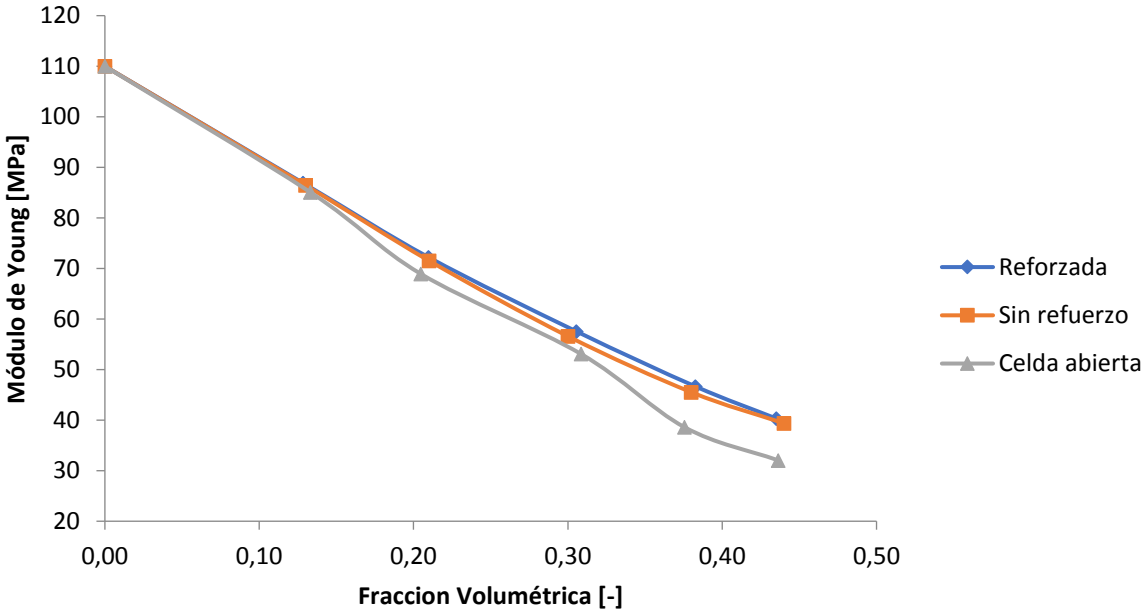



Figura 61. Comparación del Módulo de Young entre probetas reforzadas, sin refuerzo y de celda abierta de 8 [mm] de altura.

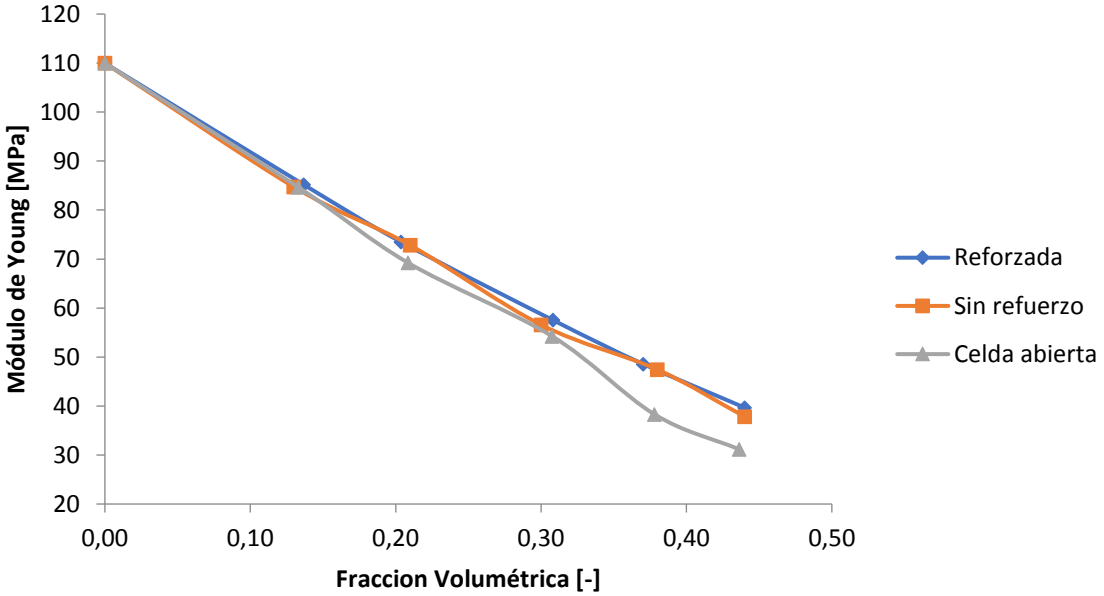



Figura 63. Comparación del Módulo de Young entre probetas reforzadas, sin refuerzo y de celda abierta de 9 [mm] de altura.

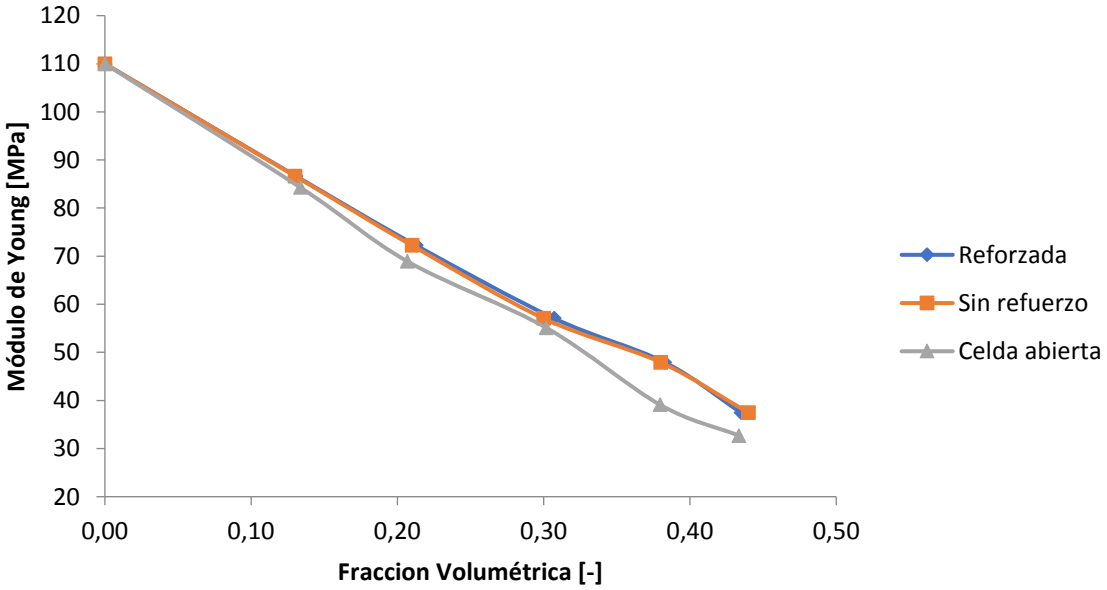



Figura 64. Comparación del Módulo de Young entre probetas reforzadas, sin refuerzo y de celda abierta de 10 [mm] de altura.

En la Figura 65 se muestra la distribución de esfuerzos de una probeta reforzada, para una porosidad del 31%, en la cual se ubican algunas de las zonas con mayor solicitación de esfuerzos. En las secciones transversales se observa una predominancia de zonas sometidas a esfuerzos entre 645 y 1285 [MPa], mientras que en la perisferia de las esferas, la matriz se somete a esfuerzos mayores, entre 1285 y 1924 [MPa]. Por otro lado, las esferas de hierro son sometidas a esfuerzos menores, en el rango entre 5,84 y 645 [MPa].

Al comparar los esfuerzos de las probetas reforzadas (con las esferas ocultas para una mejor visualización) y sin presencia de esferas en la Figura 67, se observa que el comportamiento mecánico es similar, pero los rangos de los valores de los esfuerzos son mayores en la espuma sin esferas, lo cual señala que las esferas huecas de hierro contribuyen a la disminución de los esfuerzos en estas espumas.

En la Figura 68 se muestra la distribución de esfuerzos en una probeta de celda abierta de 31% de porosidad, en la cual existe una predominancia de zonas bajo esfuerzos entre 1,36 y 1851 [MPa], llegando a los 3701 [MPa] en las paredes de los poros, un rango mayor al de las esferas reforzadas.

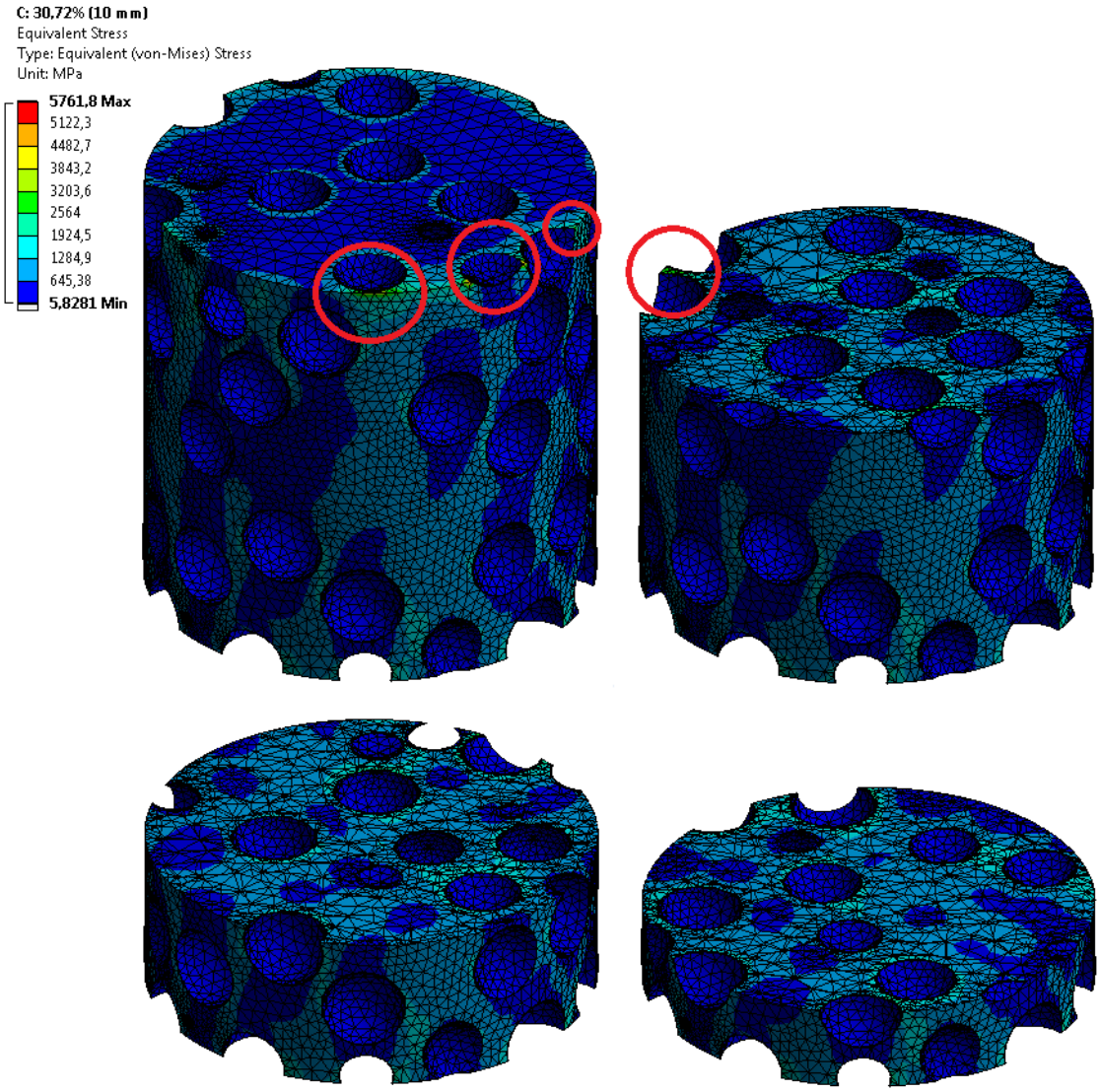



Figura 65. Distribución de esfuerzos y ubicación de los esfuerzos máximos en una probeta reforzada de 31% de porosidad (Probeta seccionada).

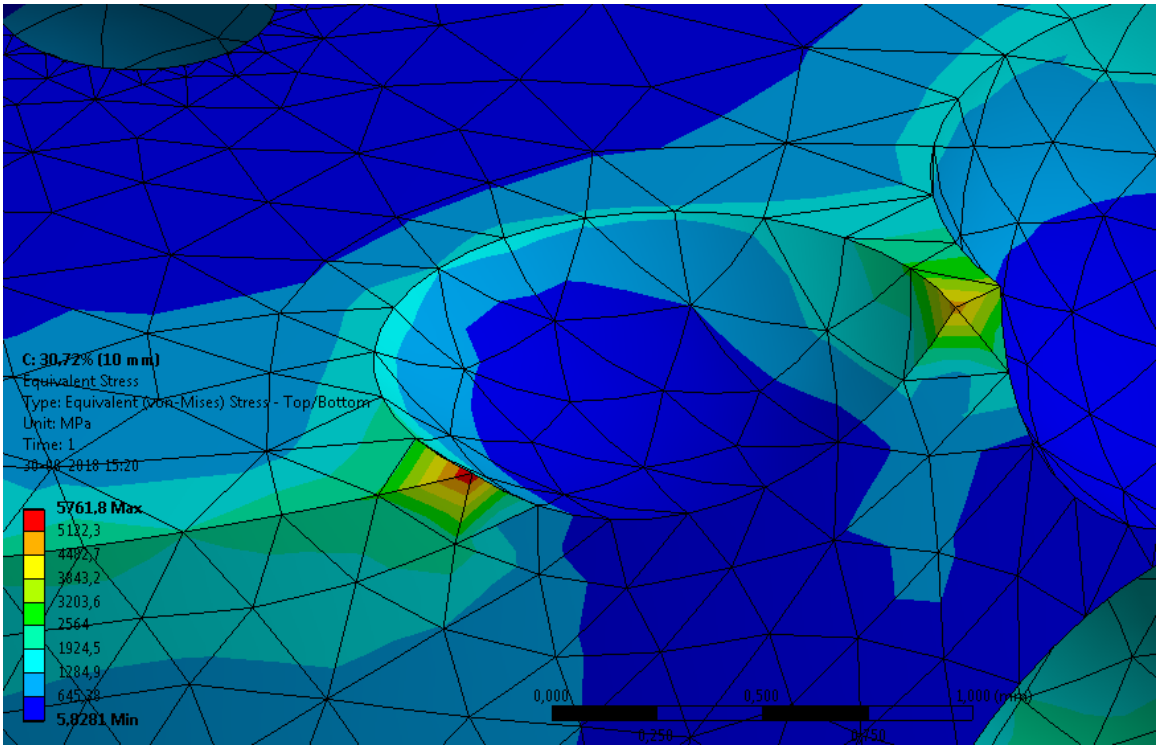
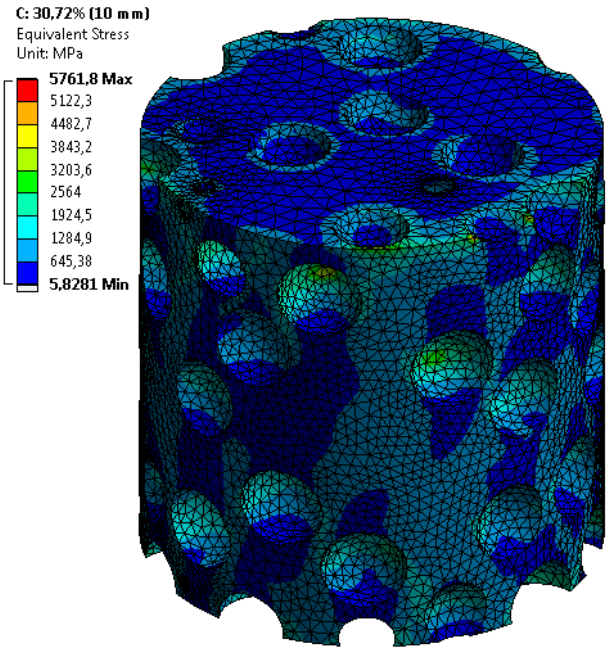
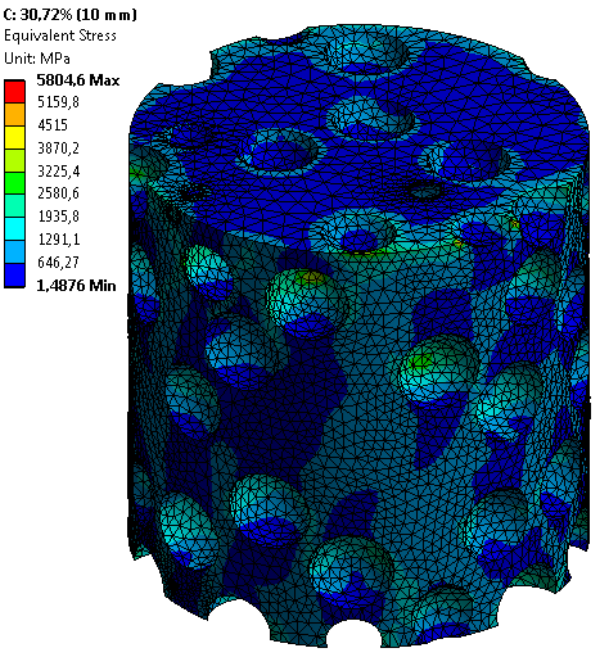



Figura 66. Acercamiento a una zona sometida a esfuerzos máximos en una probeta reforzada de 31% de porosidad.

En la Figura 66 se muestra el detalle de los esfuerzos máximos en una probeta reforzada, ubicados en la cara superior. La existencia de estos esfuerzos puede ser producto de la condición *coupled* utilizada para generar el desplazamiento de compresión, ya que ésta obliga a la cara a no sufrir deformación en el plano XY, lo cual puede traducirse en una sobre solicitación de las zonas susceptibles a la concentración de esfuerzos.




a)




b)

Figura 67. Comparación de la distribución de esfuerzos en una probeta a) Reforzada (esferas ocultas) y b) Sin refuerzo, para una porosidad del 31%.

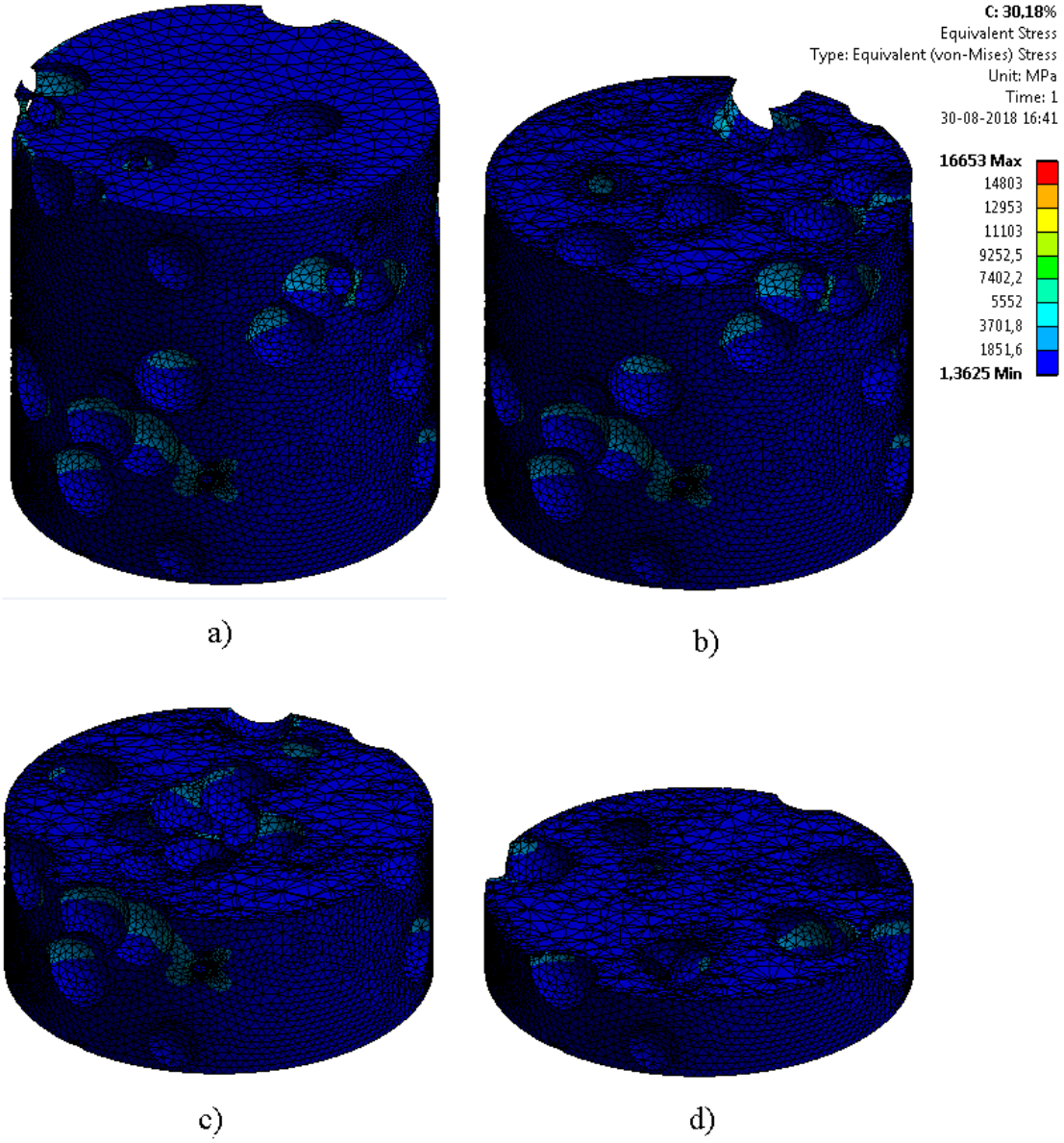



Figura 68. Distribución de esfuerzos en una probeta de celda abierta de 31% de porosidad (Probeta seccionada).

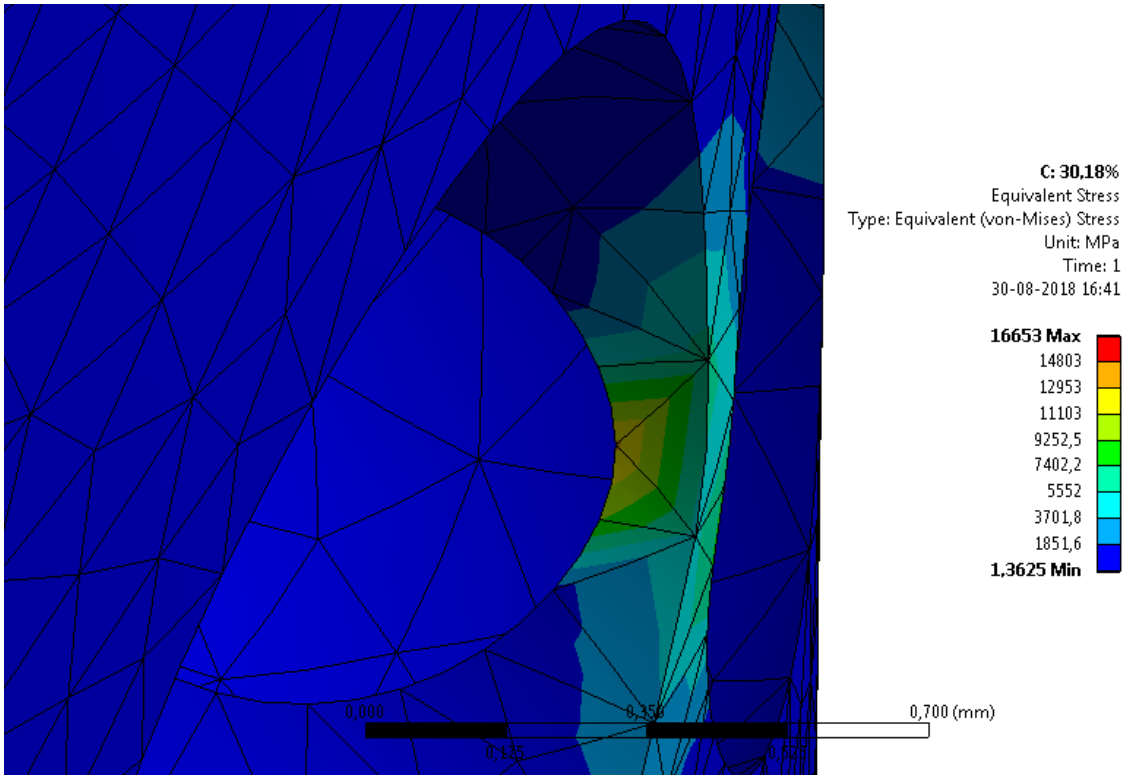



Figura 69. Acercamiento a una zona sometida a esfuerzos máximos en una probeta de celda abierta de 31% de porosidad.

La Figura 69 muestra un ligamento formado por la interconexión de poros en una probeta de celda abierta de 31% de porosidad. La existencia de estas zonas, las cuales se someten a esfuerzos de hasta 12953 [MPa], puede causar un colapso de la probeta con mayor facilidad, en comparación a las espumas reforzadas.

En las Figuras 70, 71 y 72 se muestra la deformación total de una probeta reforzada, una sin refuerzo, y una probeta de celda abierta, respectivamente, para una porosidad del 31%. En los tres tipos de espuma, producto del desplazamiento compresivo al cual se somete la cara superior, los nodos superiores de los especímenes sufren la mayor deformación. En las Figuras 73 y 74, se presentan probetas reforzadas y de celda abierta, respectivamente, para distintas porosidades, en las cuales se observa que la uniformidad de la distribución de las deformaciones obedecen a la ubicación de los poros y al aumento de la porosidad de las probetas.

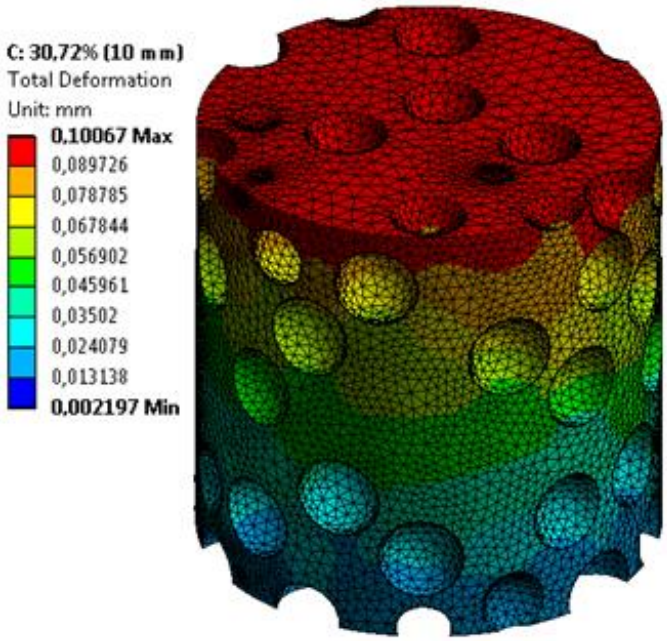



Figura 70. Distribución de la deformación total en una probeta reforzada de 31% de porosidad.

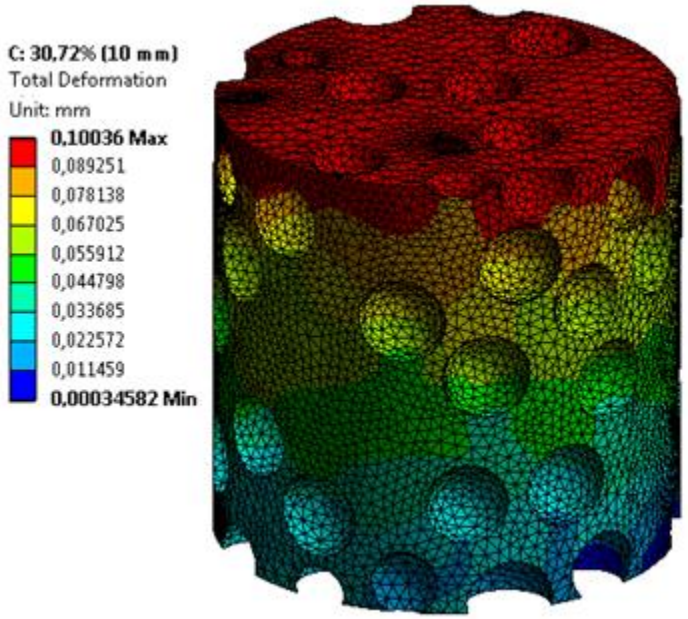



Figura 71. Distribución de la deformación total en una probeta sin refuerzos de 31% de porosidad.

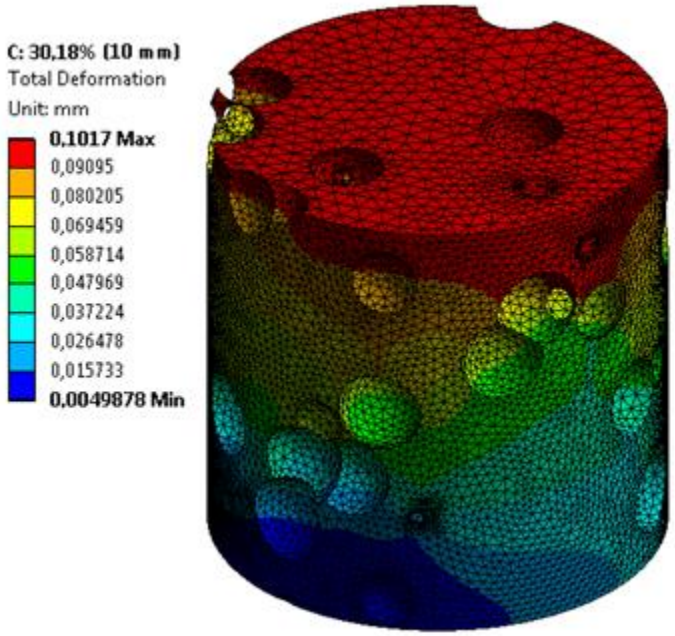



Figura 72. Distribución de la deformación total en una probeta de celda abierta de 31% de porosidad.

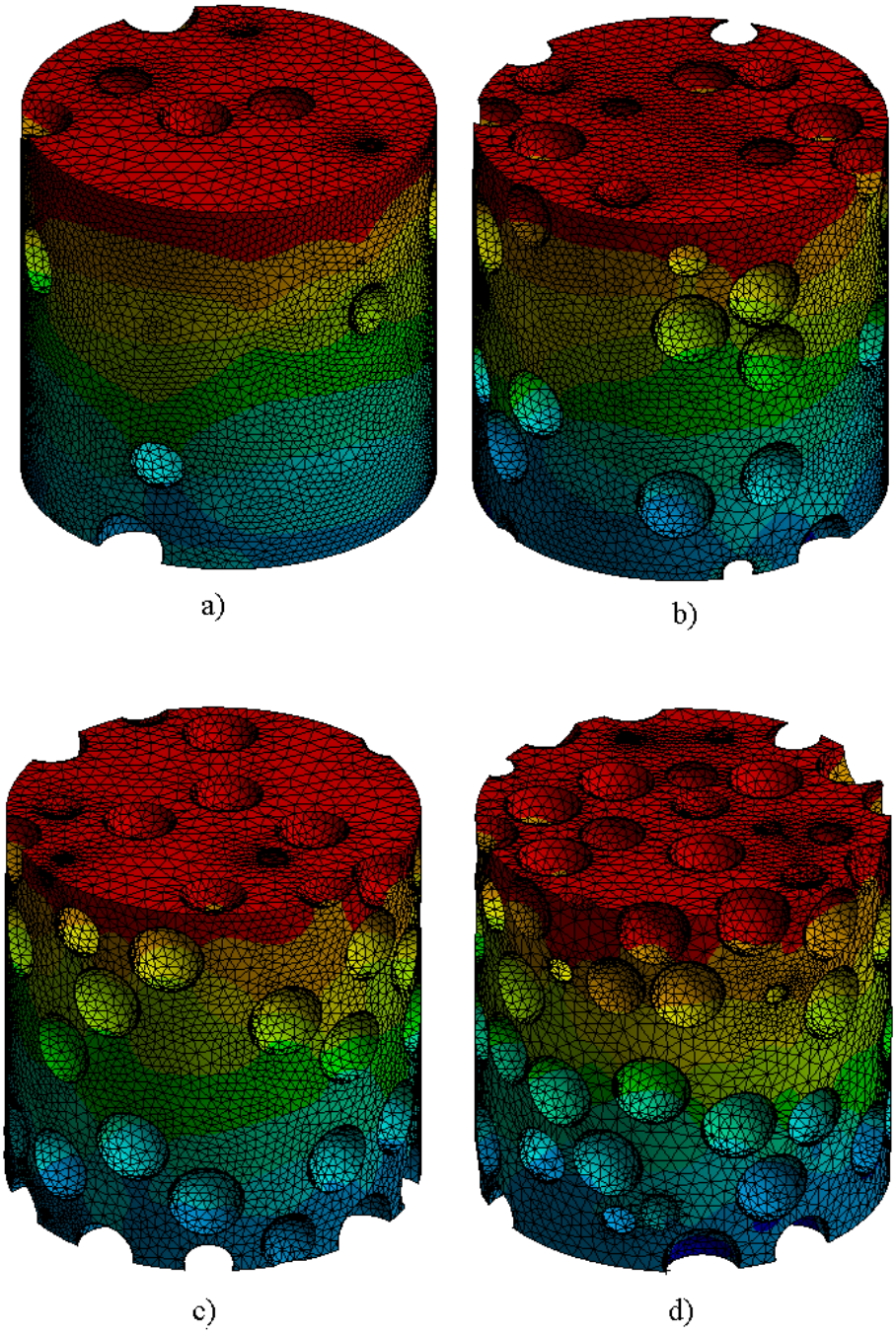



Figura 73. Distribución de la deformacion en probetas reforzadas de porosidades de a) 13% b) 21% c) 31% y d) 38%.

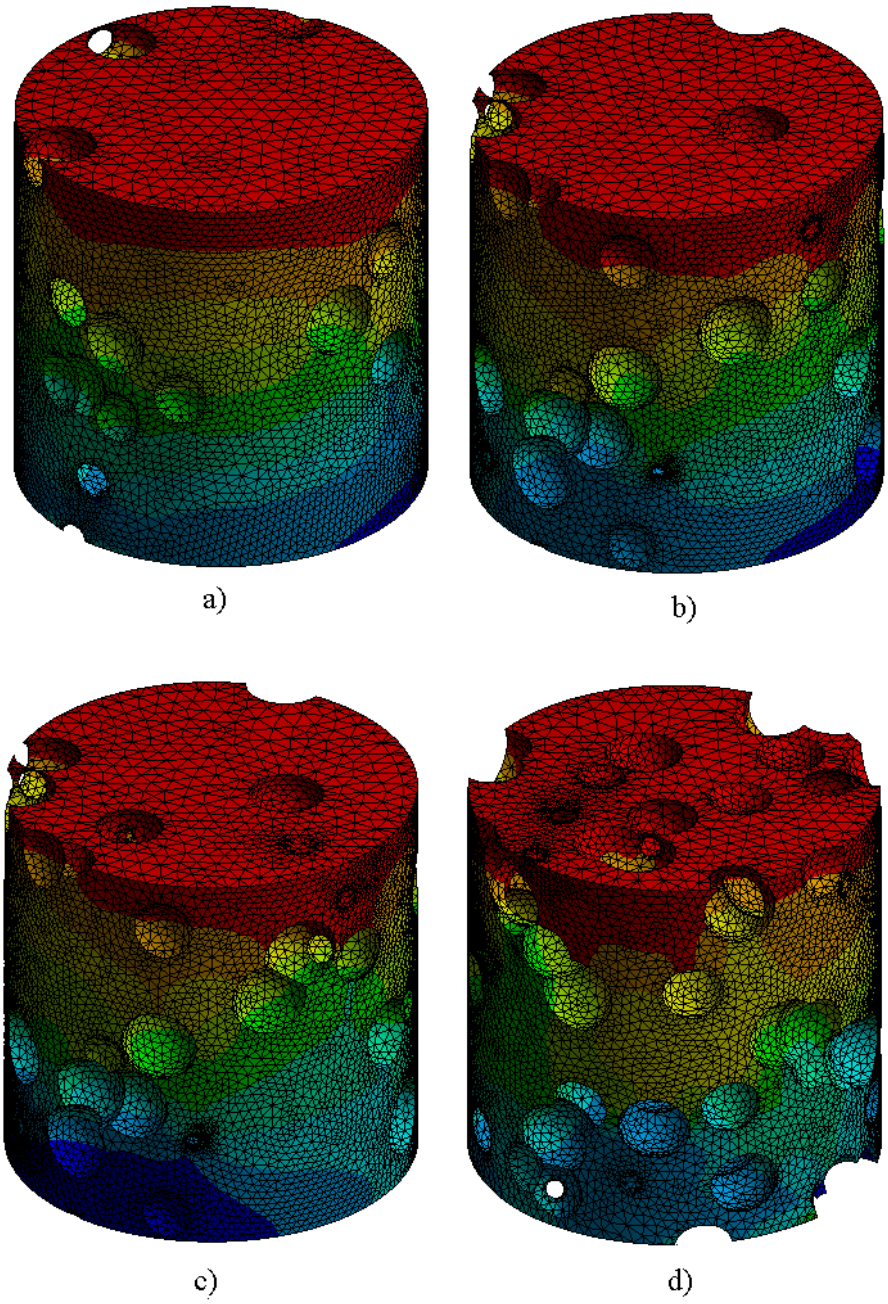



Figura 74. Distribución de la deformación en probetas de celda abierta de porosidades de a) 13% b) 21% c) 31% y d) 38%.

# 6 Conclusiones

Se logra el desarrollo de modelos tridimensionales para las espumas sintácticas de matriz de cobre con esferas de hierro, así como para probetas de cobre de celda abierta.

Mediante la utilización del software ANSYS Workbench y a través del método de elementos finitos, se determina numéricamente el módulo de Young de los especímenes. Las simulaciones son satisfactorias, ya que se obtienen todos los resultados requeridos, cumpliendo con los parámetros de mallado: calidad de elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal.

Los datos obtenidos se disponen en tablas y gráficos, de los cuales se desprenden las siguientes conclusiones:

- Se observa que al aumentar el tamaño de probeta, los valores tanto de las espumas reforzadas con esferas como las que no poseen refuerzo, igualan sus módulos de Young al alcanzar los 12 [mm] de altura y diámetro, por lo que se corrobora que mientras mayor es el tamaño del espécimen con respecto a sus inclusiones, los resultados convergen. Las pequeñas variaciones en los resultados pueden ser causadas por el cambio de la estructura y ligeros cambios en la porosidad, debido a la aparición de nuevas esferas o poros en la periferia de la matriz y la adición y sustracción de poros para ajustar las probetas a los valores estándar de porosidad, ya que se utilizaron las mismas distribuciones de esferas, aumentando únicamente el tamaño de probeta.

- Para todas los especímenes se observa que el módulo de Young disminuye al aumentar la porosidad. Este efecto se produce debido a que al aumentar la porosidad, la estructura sufre una disminución de su sección transversal hasta el punto de crear zonas

con paredes celulares delgadas que se deforman con mayor facilidad, disminuyendo su resistencia a las cargas externas.

- Las MMSFs reforzadas tienen un mayor módulo de Young que aquellas sin refuerzo, pero esta diferencia no es significativa. Esto se debe a:

  - Producto de la porosidad propia de las esferas huecas de hierro (24%), éstas tienen un bajo módulo de Young en comparación al material de la matriz (95.9 [GPa] para las esferas y 110 [GPa] para la matriz de cobre), lo cual no sería suficiente para superar de manera significativa la capacidad de resistir las cargas externas que posee el volumen de cobre que es reemplazado por la esfera hueca de hierro.

  - Ambas espumas tienen la misma geometría y estructura de celda cerrada, por lo que al considerar el punto anterior, el comportamiento mecánico es similar.

- Se observa que las MMSFs reforzadas y las espumas sin refuerzo (con la misma geometría) tienen un mayor módulo de Young que las espumas de celda abierta, diferencia que se incrementa al aumentar la porosidad. Esto se puede explicar por:

  - La existencia de las esferas huecas de hierro dentro de la matriz, cuyo módulo de Young, a pesar de ser menor que el del material de la matriz, permite una mejor distribución de esfuerzos debido a su forma esférica y además actúan como un refuerzo para las paredes celulares.

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

consiguiente, también disminuye el espesor de pared celular en mayor medida que en las espumas reforzadas.

Al analizar la distribución de esfuerzos, se observa que las probetas reforzadas tienen un comportamiento mecánico similar al de las probetas sin refuerzo, pero en éstas últimas el esfuerzo es mayor. En la probeta reforzada, a pesar de que se utiliza una unión perfecta entre la matriz y las esferas, éstas últimas son sometidas a menores esfuerzos, lo que significa que cumplen su función como refuerzo para las paredes de las celdas de la espuma. Por otra parte, la probeta de celda abierta sufre esfuerzos considerablemente mayores, lo que la hace susceptible a deformarse o fallar con mayor facilidad en comparación a las espumas reforzadas. En los tres casos, los esfuerzos máximos ocurren en la periferia de las esferas, en el caso de las espumas reforzadas, y en los ligamentos formados por la interconexión de poros, en el caso de las espumas de celda abierta.

Por otro lado, en todas las probetas se observa que la deformación es máxima en los nodos de la cara superior de la probeta, donde se aplica el desplazamiento de compresión, y disminuye gradualmente hasta un valor mínimo en la cara opuesta, mientras que la uniformidad de la distribución de la deformación disminuye al aumentar la porosidad, por la existencia de una mayor cantidad de poros, lo que altera la estructura de la espuma.

A pesar que la similitud de los resultados entre las probetas reforzadas y las que no poseen refuerzo, la importancia del uso de las esferas huecas en espumas metálicas radica en que éstas le otorgan poros esféricos de celda cerrada con paredes celulares más rígidas, lo cual le permite al material soportar de mejor manera las cargas de compresión uniaxiales e hidrostáticas en comparación a las espumas con otros tipos de partículas espaciadoras, por lo cual se recomienda su estudio, desarrollo y aplicación.

Para mejorar el comportamiento elástico de las espumas sintácticas de matriz de cobre con esferas huecas de hierro, se plantea lo siguiente:

- La relación entre el espesor de pared y el diámetro de las esferas ($t/D$) tiene un valor aproximado de 0.012. Según los estudios de Santa María *et al*. [28], las propiedades mecánicas pueden ser mejoradas aumentando esta relación, lo cual también se observa en los estudios descritos en el Capítulo 4, donde la aplicación de esferas con un módulo de Young significativamente mayor al de la matriz, además de una alta relación $t/D$, podría incluso generar que el módulo de Young sea mayor con el aumento de la porosidad de la espuma sintáctica.

- Disminuir la porosidad (24%) presente en la pared de las esferas huecas de hierro, ya que debido a ésta, su módulo de Young disminuye de 210 a 95.9 [GPa], lo cual afecta negativamente el comportamiento elástico de la espuma sintáctica.

Los dos puntos anteriores requieren que se utilice otro tipo de esfera, o bien, se revise su método de fabricación de tal manera que se conjuguen las características de diámetro, espesor y módulo de Young efectivo de la esfera según el comportamiento mecánico que se desea obtener para las espumas sintácticas de cobre.

# 7 Trabajos futuros

Para profundizar más en el estudio de las MMSFs con matriz de cobre, se plantea la realización de los siguientes trabajos futuros:

- Realizar simulaciones de ensayos de compresión mediante MEF de espumas sintácticas de cobre con presencia de otros tipos de esferas en su matriz, como las esferas de vidrio, cenoesferas de ceniza volante o esferas cerámicas con propiedades y tamaños comerciales.

- Estudiar el efecto de distintos valores de diámetro y/o espesor de pared de una esfera de determinado material, con el fin de estudiar el efecto de la relación $t/d$.

- Determinar la influencia de una interface no perfecta entre la matriz y las esferas en el comportamiento mecánico de las espumas sintácticas de cobre.

- Estudiar el comportamiento en la zona de deformación plástica de las espumas sintácticas de cobre.

# 8 Referencias


[1] Lehmhus D, Busse M, Herrmann AS, Kayvantash K. Structural materials and processes in transportation. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2013.

[2] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (1997) Cellular Solids - Structure and Properties, 2nd edn, Chapter 1, Cambridge University Press, Cambridge., 2 ed.

[3] L. Pérez, R. Mercado, I. Alfonso. Young's modulus estimation for CNT reinforced metallic foams obtained using different space holder particles. Composite Structures 168 (2017) 26–32.

[4] P. Rohatgi y N. Gupta, Metal Matrix Syntactic Foams: Processing, Microstructure, Properties and Applications, DEStech Publications, Incorporated, 2014.

[5] Zhao, C. Y. (2012). Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. International Journal of Heat and Mass Transfer 55(3-14): 3618-3932.

[6] Matassi, F., Botti, A., Sirleo, L., Carulli, C. & Innocenti, M. Porous metal for orthopedics implants. Clin. Cases Miner. Bone Metab. 10, 111–115 (2013).

[7] Envirospheres Ltd. <http://www.envirospheres.com/products.asp>.

[8] Hollomet GmbH. <http://www.hollomet.com/home.html>.

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

[10] Rohatgi, P.K.; Kim, J.K.; Gupta, N.; Alaraj, S.; Daoud, A. Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique. Compos. A Appl. Sci. Manuf. 2006, 37, 430–437.

[11] DeFouw JD, Rohatgi PK (2011) Low density magnesium matrix syntactic foams. In Supplemental Proceedings: Volume 2: Materials Fabrication, Properties, Characterization, and Modeling, The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, p 797.

[12] Daoud A. Synthesis and characterization of novel ZnAl22 syntactic foam composites via casting. Mater. Sci. Eng. A. 2008;488:281–295.

[13] Neville, B.P., Rabiei, A., 2008.Composite Metal Foams processed through Powder Metallurgy. Materials and Design 29, 388-396.

[14] Mondal DP, Majumdar DJ, Jha N, Badkul A, Das S, et al.(2012) Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route. Mater Des 34: 82-89.

[15] Xu T, Li G. A shape memory polymer based syntactic foam with negative Poisson's ratio. Materials Science and Engineering A 2011;528(22):6804-11.

[16] Rohatgi PK, Gupta N, Schultz BF, Luong DD. The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams. JOM. 2011;63:36-42.

[17] Torobin, L. B. (1987). Method of making hollow porous microespheres. US Patent 4.671.909.

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

[19] P. Liu, C. Fu, T. Li, C. Shi, Relationship between tensile strength and porosity for high porosity metals, Sci. China Ser. E 42 (1999) 100–107.

[20] Szlancsik A, Katona B, Bobor K, Majlinger K, Orbulov Imre N. Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres. Mater Des 2015;83:230–7.

[21] Szlancsik, A.; Katona, B.; Májlinger, K.; Orbulov, I. Compressive behavior and microstructural characteristics of iron hollow sphere filled aluminum matrix syntactic foams. Materials 2015, 8, 7926–7937.

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

[23] Gupta N, Kishore WE, Sankaran S (2001) Studies on compressive failure features in syntactic foam material. J Mater Sci 36(18):4485–4491.

[24] G. D. Scott y D. M. Kilgour, The density of random close packing of spheres, Toronto, Canada: Department of Physics, University of Toronto, 1969.

[25] Tao, X.F., L.P. Zhang and Y.Y. Zhao (2009). "Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres."Materials & Design 30(7): 2732–2736.

[26] Marur PR. Numerical estimation of effective elastic moduli of syntactic foams. Finite Elem Anal Des 2010;46:1001–7.

[27] Imre Norbert Orbulov. Compressive properties of aluminium matrix syntactic foams. Mater. Sci. Eng. A 2012;555:52-56.

[28] Joseph A. Santa Maria [et al]. Effect of hollow sphere size and size distribution on the quasi-static and high strain rate compressive properties of Al-A380–Al2O3 syntactic foams. J Mater Sci (2014) 49:1267–1278.

[29] Imre Norbert Orbulov, János Ginsztler. Compressive characteristics of metal matrix syntactic foams. Compos: Part A 2012;43:553–561.

[30] Maurizio Porfiri, Nikhil Gupta. Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties. Compos: Part B 2009;40:166-173.

[31] Thomas CR. Syntactic carbon foams. J Mater Sci 1973;12:219–33.

[32] Hiel, C., Dittman, D. and Ishai, O. Composite sandwich construction with syntactic foam core. Composites 1993, 24(5): 447.

[33] Kallas, D. H. and Chatten, C. K. ,. "Buoyancy Materials for Deep. Submergence", Ocean Engineering 1969, v. 1, p. 421-431.

[34] ] Gupta N, Zeltmann SE, Shunmugasamy VC, Pinisetty D. Applications of polymer matrix syntactic foams. JOM 2014;66(2):245–54.

[35] R.A. Palmer, K. Gao, T.M. Doan, L. Green, G. Cavallaro. Pressure infiltrated syntactic foams—Process development and mechanical properties. Mater. Sci. Eng. A 2007;464:85-92.

[36] Mondal DP, Das S, Ramakrishnan N, Uday Bhasker K. Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique. Compos Part A 2009;40:279–88.

[37] Banhart J 2001 Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Prog. Mater. Sci. 46, 559–632.

[38] Zhao YY, Tao XF. Behaviour of metal matrix syntactic foams in compression. In: Characterization of metal matrix composite materials. Pittsburgh, PA: Mater. Sci. Tech. 2009. p. 1785–94.

[39] García-Cordovilla, C., E. Louis and J. Narciso (1999). Presure infiltration of packed ceramic particulates by liquid metals. Acta Materialia 47(189: 4461-4479.

[40] Rohatgi, P. K., J. K. Kim, N. Gupta, S. Alaraj and A. Daoud (2006). Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37(3): 430-437.

[41] Daoud, A., M. T. Abou El-khair, M. Abdel-ziz and P. Rohatgi (2007). Fabrication, microestructure and compressive behavior of ZC63 Mg-microballon foam comosites. Composites Science and Technology 67(9):1842-1853.

[42] Mondal, D. P., J. Datta Majumder, N. Jha, A. Badjul, S. Das, A. Patel and G. Gupta (2012). Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route. Materials and Design 34(0): 82-89.

[43] Y.Y. Zhao, X.F. Tao, and X.B. Xue, Manufacture and Mechanical Properties of Metal Matrix Syntactic Foams. Materials Science and Technology 2008. 2607-2615.

[44] ] Karthik N, Edison TNJI, Sethuraman MG, Lee YR. Sonochemical fabrication of petal array-like copper/nickel oxide composite foam as a pseudocapacitive material for energy storage. Appl Surf Sci 2016;396:1245–50.

[45] Bonaccorsi L, Freni A, Proverbio E, Restuccia G, Russo F. Zeolite coated cooper foams for heat pumping applications. Microporous and Mesoporous Materials 2006; 91:7–14.

[46] P. S. Harikumar, Antibacterial Activity of Copper Nanoparticles and Copper Nanocomposites against Escherichia Coli Bacteria, International Journal of Sciences 02(2016):83-90.

[47] Fabrication of Copper Foam from Copper - Polymer composite By Powder Metallurgy Technique for using as Electrode.

[48] S. Kurukuri, S. Eckardt. A review of homogenization techniques for heterogeneous materials. Advanced Mechanics of Materials and Structures, Graduate School in Structural Engineering, Germany (2004).

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

[50] 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.

[51] L. Bardella, F. Genna, On the elastic behavior of syntactic foams, Int. J. Solids Struct. 2001;38:7235-7260.

[52] Huang, J.S.; Gibson, L.J. Elastic moduli of a composite of hollow spheres in a matrix. J. Mech. Phys. Solids 1993, 41, 55–75.

[53] K. J. Lee y R. A. Westmann, Elastic Properties of Hollow-Sphere-Reinforced Composites, Los Angeles, California: University of California, 1969.

[54] Hervé, E., Pellegrini, O., 1995. The elastic constants of a material containing spherical coated holes. Archives of Mechanics 47 (2), 223-246..

[55] SOLIDWORKS, I. Solidworks Corporation. Concord, MA, 2002.

[56] HIBBETT, KARLSSON y SORENSEN. ABAQUS/standard: User's Manual..

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

[58] Zienkiewicz, O. C. y TAYLOR, R. L. El Método de los Elementos Finito. 4a.ed. España, McGraw-Hill y CIMNE, 2007.

[59] v15, A.W., Meshing Training Manual. 2014.

[60] Huang RX, Li PF. Elastic behaviour and failure mechanism in epoxy syntactic foams: The effect of glass microballoon volume fractions. Compos Part B-Eng. 2015;78:401-8.

[61] L. Pérez, S. Lascano, C. Aguilar, D. Estay, U. Messner, I.A. Figueroa, I. Alfonso. DEM–FEA estimation of pores arrangement effect on the compressive Young's modulus for Mg foams. Mater. Sci. 2015;110:281-286.

[62] Cho, Y.J.; Kang, Y.; Lee, Y.C.; Park, Y.; Lee, W. Influence of Partially Debonded Interface on Elasticity of Syntactic Foam: A Numerical Study. Materials 2017, 10, 911.

[63] S.K. Sebsadji, K. Chouicha, Determining periodic representative volumes of concrete mixtures based on the fractal analysis, Int. J. Solids Struct. 49 (2012) 2941–2950.

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

[65] Pradeep K. Rohatgi, Nikhil Gupta, Benjamin F. Schultz, and Dung D. Luong. The Synthesis, Compressive Properties, and Applications of Metal Matrix Syntactic Foams. JOM (2011) 63: 36.

[66] Banhart J, Ashby MF, Fleck NA. Metal foams and porous metal structures. Bremen: Verlag MIT Publishing; 1997.

[67] L. Pérez, S. Lascano, C. Aguilar, D. Domancic, I. Alfonso. Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy. Mater. Des. 2015;83:276-283.

[68] 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.

[69] H. Frfhlich, R. Sack, Theory of the rheological properties of dispersions, Proceedings of the Royal Society, A 185 (1946) 415–430.

[70] Marur, P.R., 2005. Effective elastic moduli of syntactic foams. Materials Letters 59 (14-15), 1954–1957.

# 9 Anexos

## 9.1 Espumas reforzadas

a) Espuma de 8 [mm] de altura y 13% de porosidad.

Tabla 11. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (a).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 9.3341e-002 | 1.0006 | 9.1643e-007 | 0.19383 |
| **Valor máximo** | 1 | 13.484 | 0.97603 | 1 |
| **Promedio** | 0.76486 | 2.0426 | 0.34132 | 0.81297 |
| **Des. estándar** | 0.13875 | 0.65917 | 0.20338 | 0.11331 |

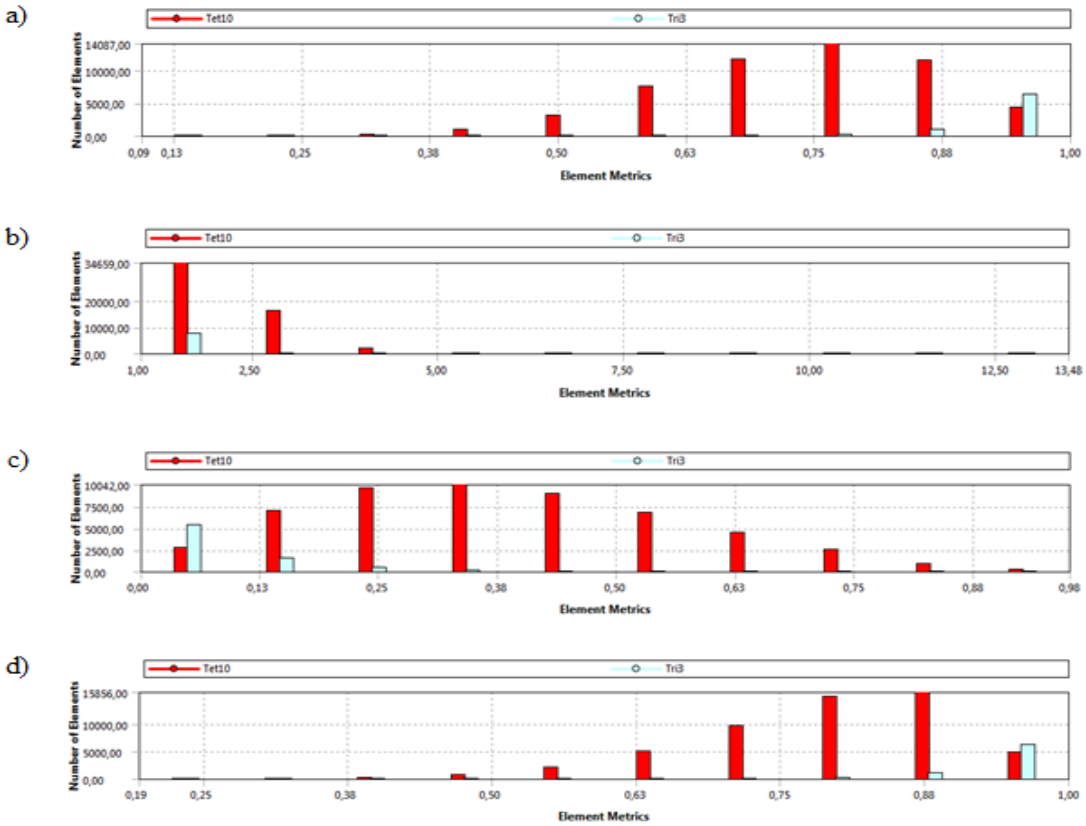



Figura 75. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (a).

b) Espuma de 8 [mm] de altura y 21% de porosidad.

Tabla 12. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (b).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 5.4959e-002 | 1.002 | 6.4418e-006 | 0.13997 |
| **Valor máximo** | 1 | 18.115 | 0.99533 | 1 |
| **Promedio** | 0.76486 | 2.04 | 0.33797 | 0.8134 |
| **Des. estándar** | 0.14413 | 0.71108 | 0.20859 | 0.11782 |

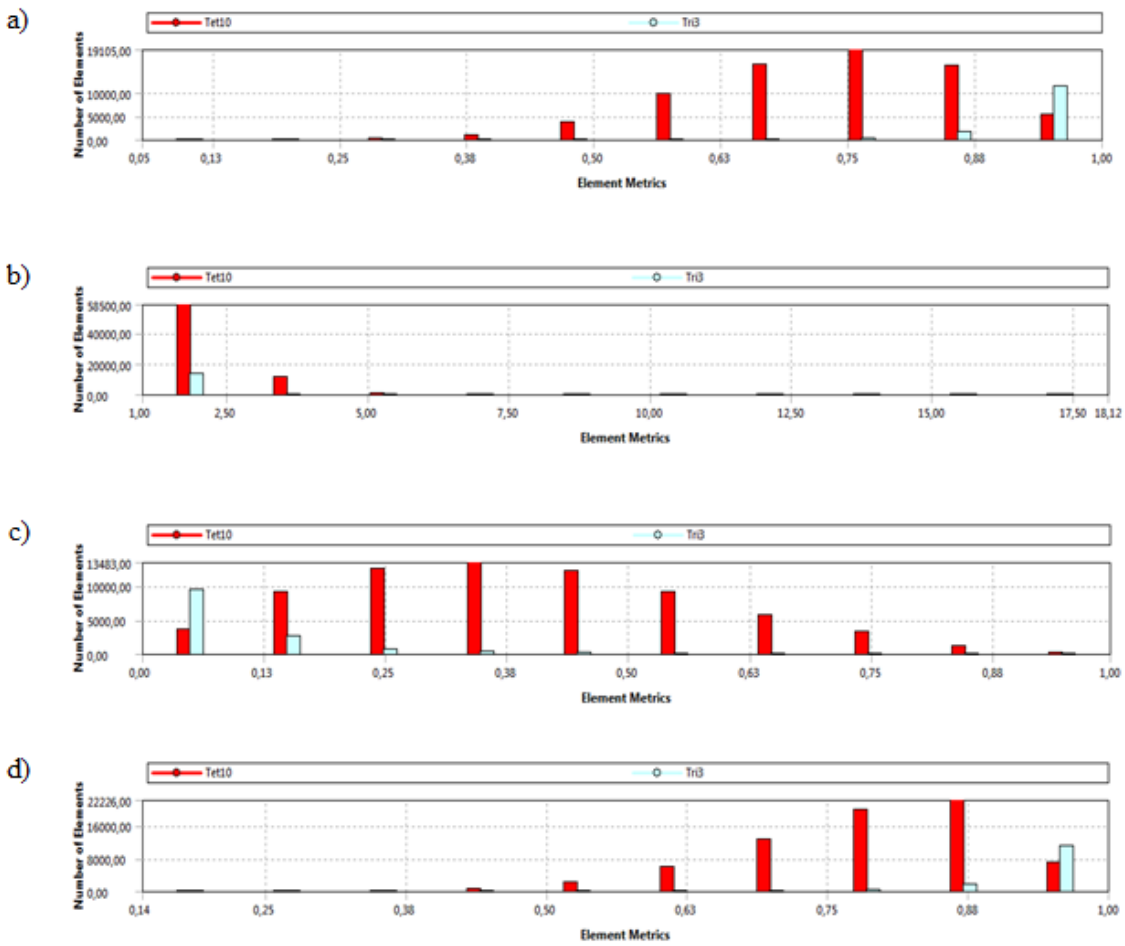



Figura 76. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (b).

c) Espuma de 8 [mm] de altura, reforzada y 31% de porosidad.

Tabla 13. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (c).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 3.1314e-002 | 1.0026 | 1.1955e-005 | 9.01022e-002 |
| **Valor máximo** | 0.99999 | 46.636 | 0.9992 | 0.99999 |
| **Promedio** | 0.77152 | 2.0033 | 0.32059 | 0.82094 |
| **Des. estándar** | 0.14869 | 0.79785 | 0.21004 | 0.12083 |

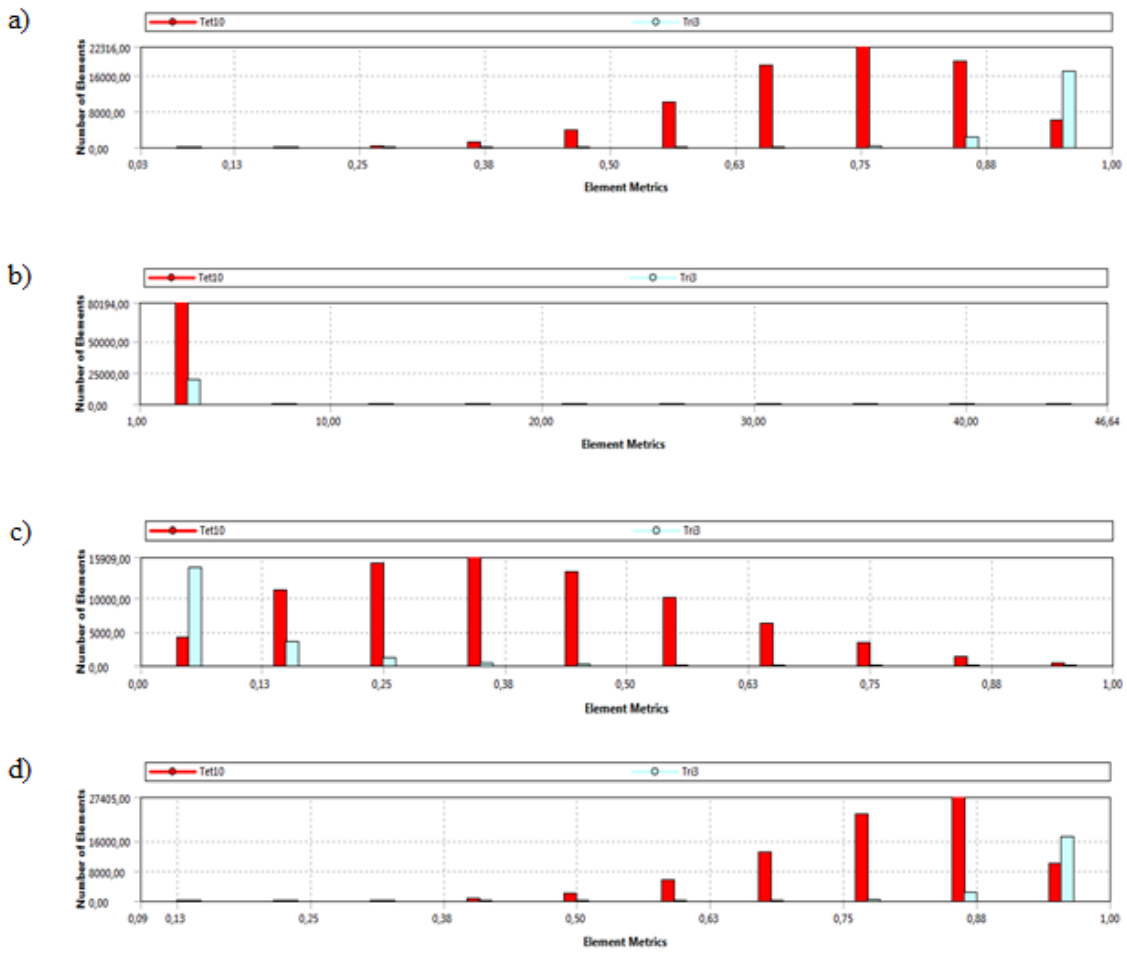



Figura 77. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (c).

d) Espuma de 8 [mm] de altura, reforzada y 38% de porosidad.

Tabla 14. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (d).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.6032e-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 |
| **Des. estándar** | 0.15249 | 0.97455 | 0.21119 | 0.12439 |

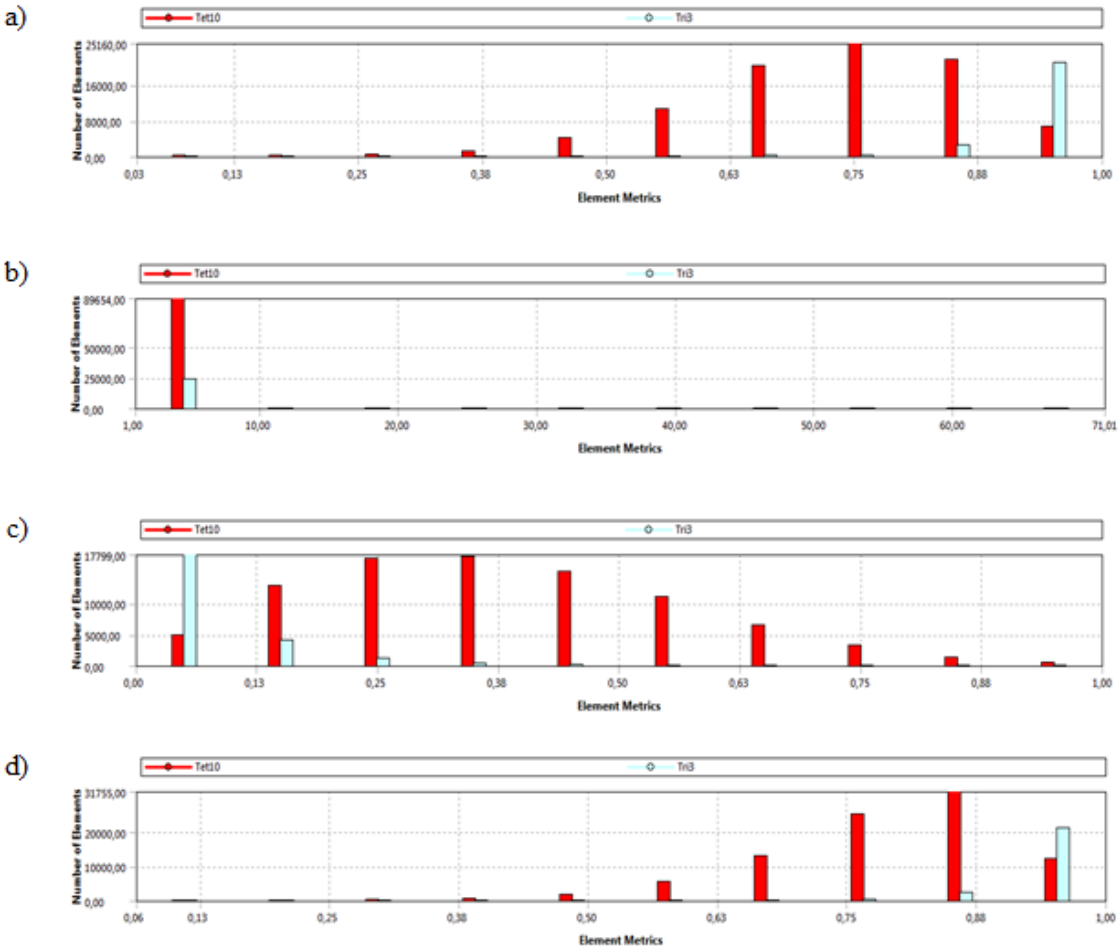



Figura 78. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (d).

e) Espuma de 8 [mm] de altura, reforzada y 44% de porosidad.

Tabla 15. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (e).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 1.9518e-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 |
| **Des. estándar** | 0.16733 | 1.9819 | 0.21979 | 0.14167 |

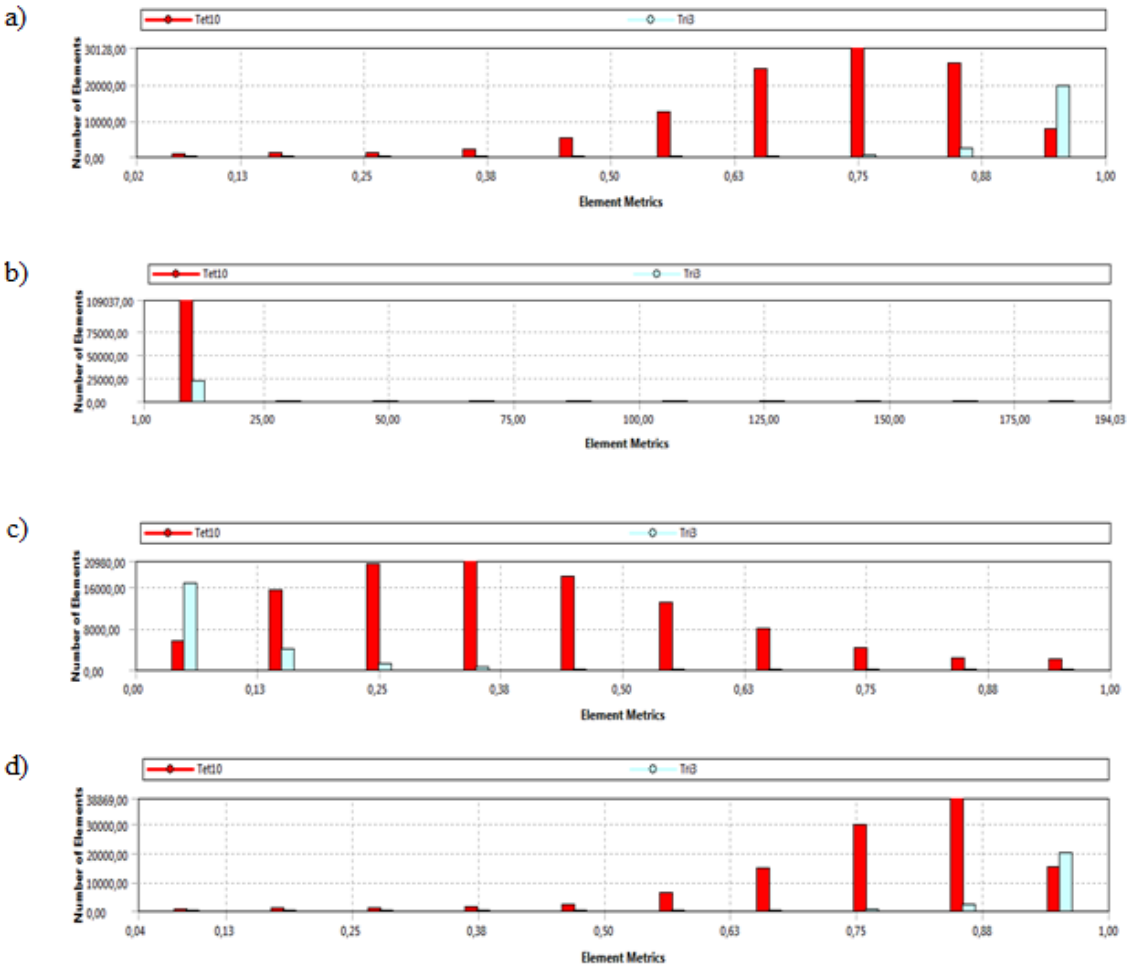



Figura 79. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (e).

f) Espuma de 9 [mm] de altura, reforzada y 13% de porosidad.

Tabla 16. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (f).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 3.9709e-002 | 1.0007 | 9.8961e-007 | 6.4608e-002 |
| **Valor máximo** | 1 | 35.937 | 0.99964 | 1 |
| **Promedio** | 0.76095 | 2.0622 | 0.34415 | 0.81004 |
| **Des. estándar** | 0.14248 | 0.73169 | 0.20564 | 0.11674 |

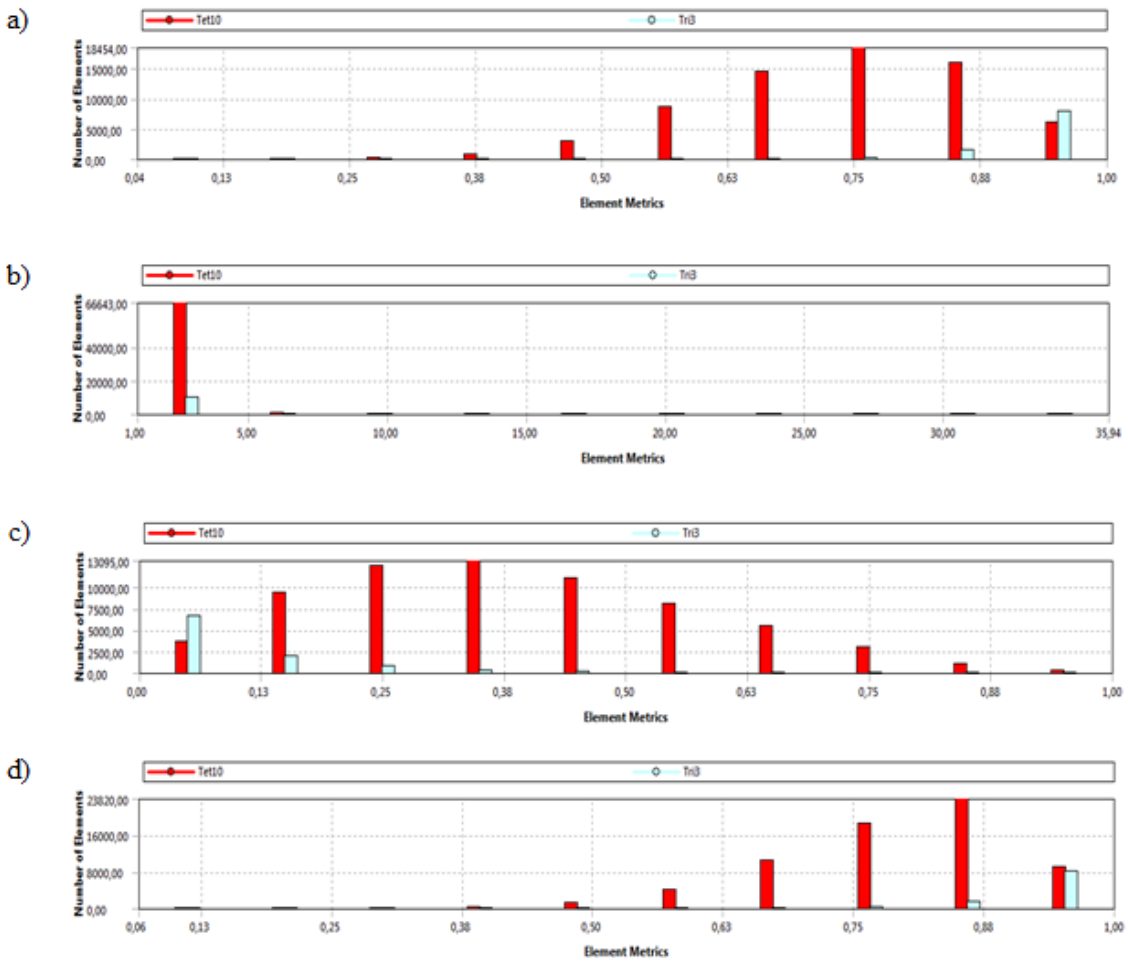



Figura 80. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (f).

g) Espuma de 9 [mm] de altura, reforzada y 21% de porosidad.

Tabla 17. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (g).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 1.1955e-002 | 1.002 | 8.1286e-006 | 4.2797e-002 |
| **Valor máximo** | 0.99999 | 115.35 | 0.99998 | 0.99999 |
| **Promedio** | 0.76617 | 2.0374 | 0.33257 | 0.81572 |
| **Des. estándar** | 0.14445 | 0.95734 | 0.20633 | 0.11791 |

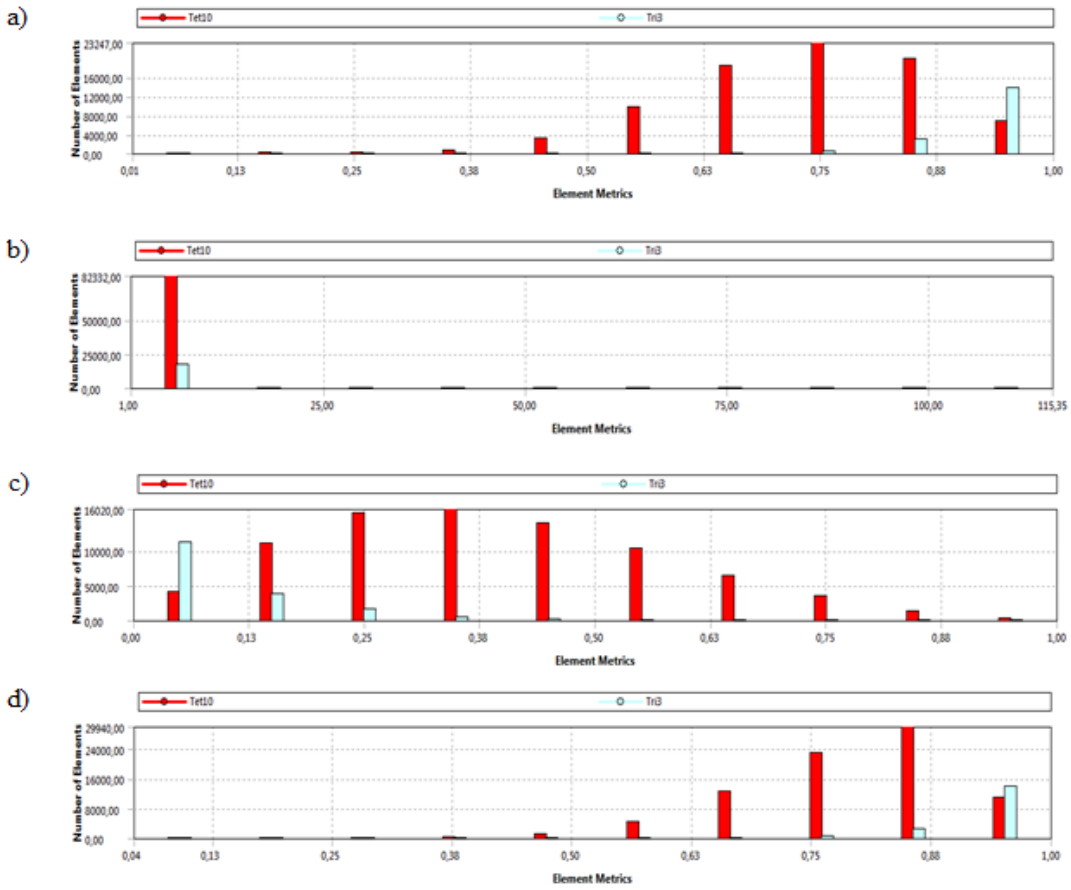



Figura 81. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (g).

h) Espuma de 9 [mm] de altura, reforzada y 31% de porosidad.

Tabla 18. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (h).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.6343e-002 | 1.0008 | 1.197e-006 | 6.1348e-002 |
| **Valor máximo** | 1 | 32.661 | 0.99903 | 1 |
| **Promedio** | 0.76924 | 1.9989 | 0.31988 | 0.82094 |
| **Des. estándar** | 0.14978 | 0.76564 | 0.20834 | 0.12063 |

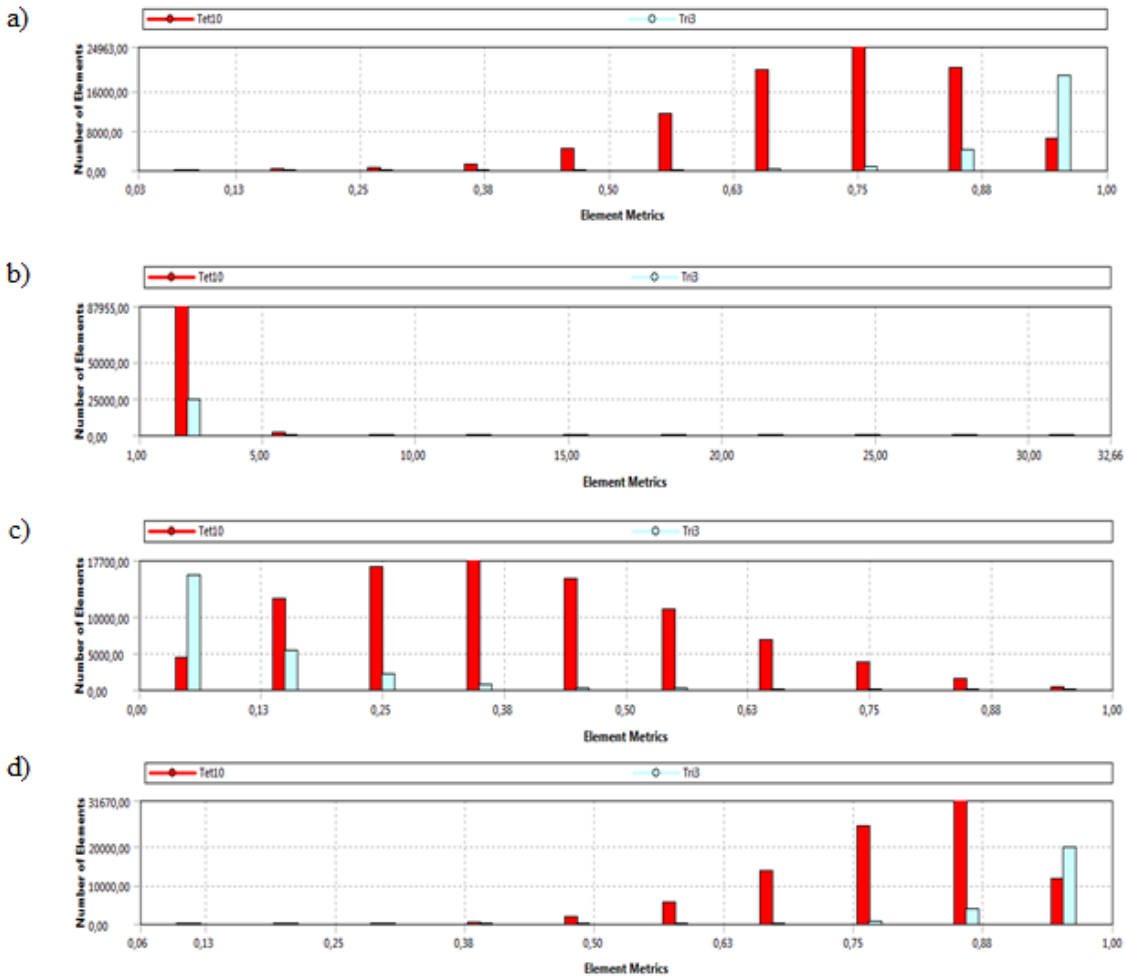



Figura 82. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (h).

i) Espuma de 9 [mm] de altura, reforzada y 38% de porosidad.

Tabla 19. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (i).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.956e-002 | 1.0017 | 4.9282e-006 | 4.2342e-002 |
| **Valor máximo** | 1 | 224 | 0.99999 | 1 |
| **Promedio** | 0.77662 | 1.963 | 0.30402 | 0.82812 |
| **Des. estándar** | 0.15164 | 1.0483 | 0.20634 | 0.1211 |

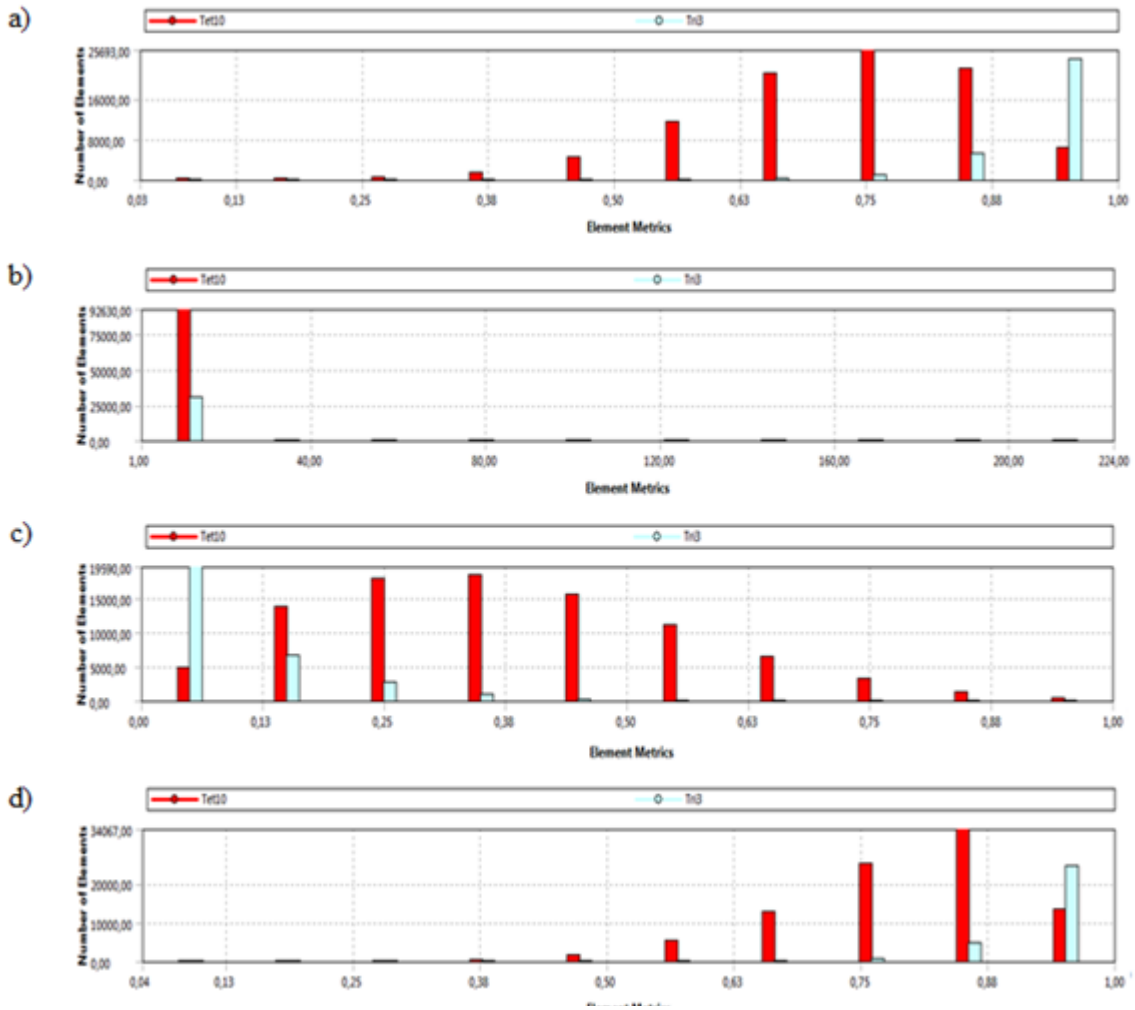



Figura 83. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (i).

j) Espuma de 9 [mm] de altura, reforzada y 44% de porosidad.

Tabla 20. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (j).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 1.7161e-002 | 1 | 1.0283e-009 | 2.4722e-002 |
| **Valor máximo** | 1 | 283.84 | 1 | 1 |
| **Promedio** | 0.73707 | 2.3203 | 0.34507 | 0.79599 |
| **Des. estándar** | 0.18191 | 2.6535 | 0.22784 | 0.15537 |

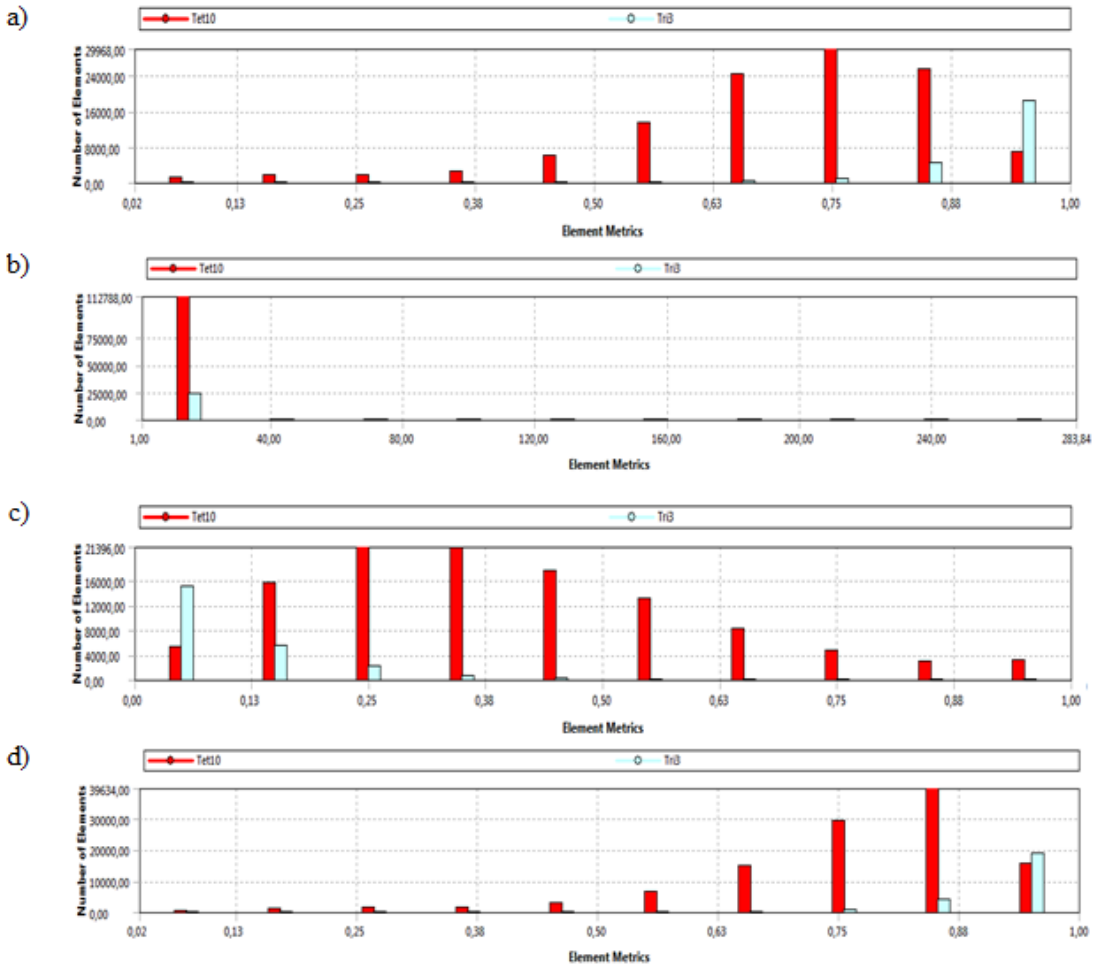



Figura 84. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (j).

k) Espuma de 10 [mm] de altura, reforzada y 13% de porosidad.

Tabla 21. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (k).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 4.9704e-002 | 21.0007 | 8.2584e-006 | 5.3288e-002 |
| **Valor máximo** | 0.99999 | 92.3 | 0.99926 | 1 |
| **Promedio** | 0.75813 | 2.0803 | 0.34575 | 0.80837 |
| **Des. estándar** | 0.14854 | 0.88342 | 0.21069 | 0.1225 |

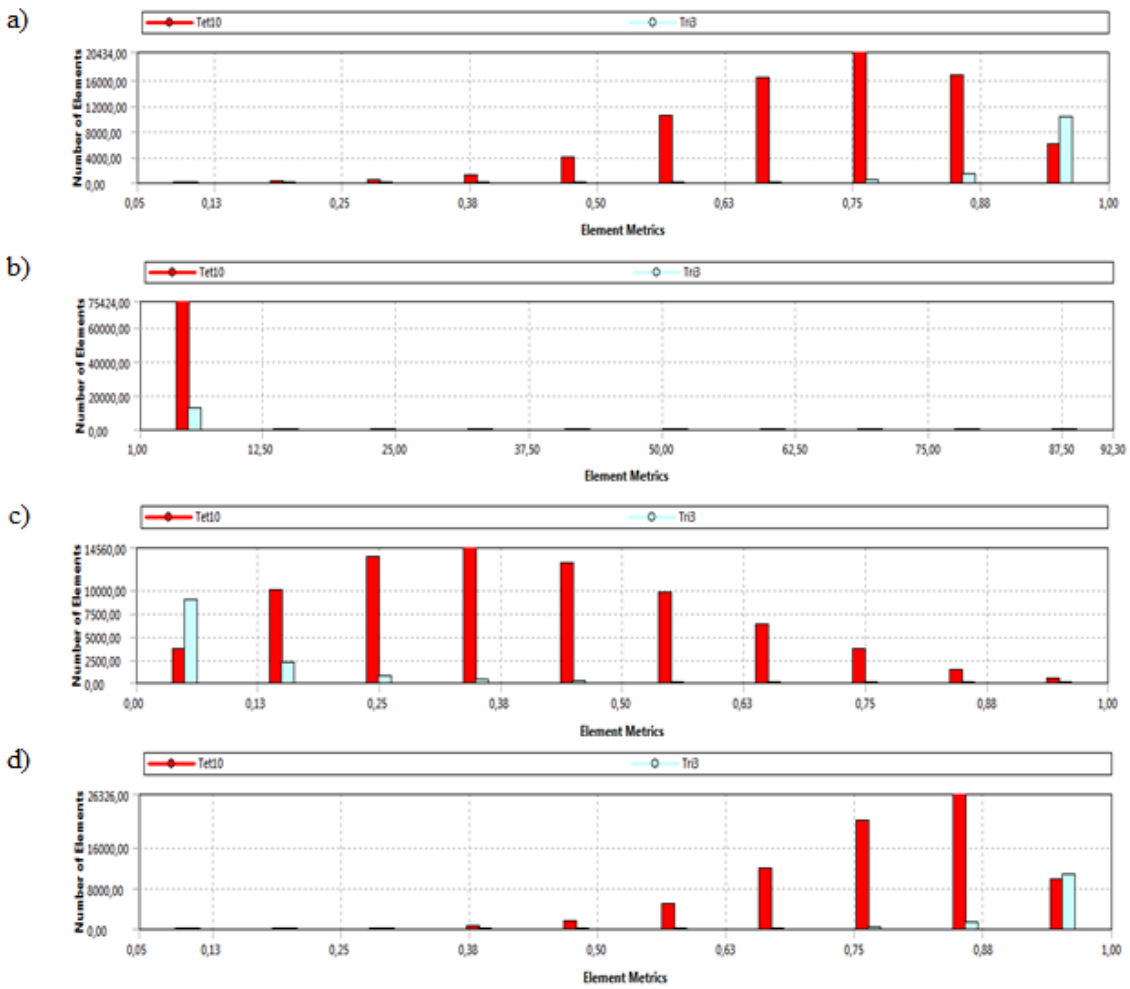



Figura 85. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (k).

l) Espuma de 10 [mm] de altura, reforzada y 21% de porosidad.

Tabla 22. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (l).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.9858e-002 | 1 | 8.2694e-011 | 0.10967 |
| **Valor máximo** | 1 | 21.358 | 0.99395 | 1 |
| **Promedio** | 0.76819 | 2.0053 | 0.32651 | 0.81949 |
| **Des. estándar** | 0.1468 | 0.69795 | 0.20862 | 0.11819 |

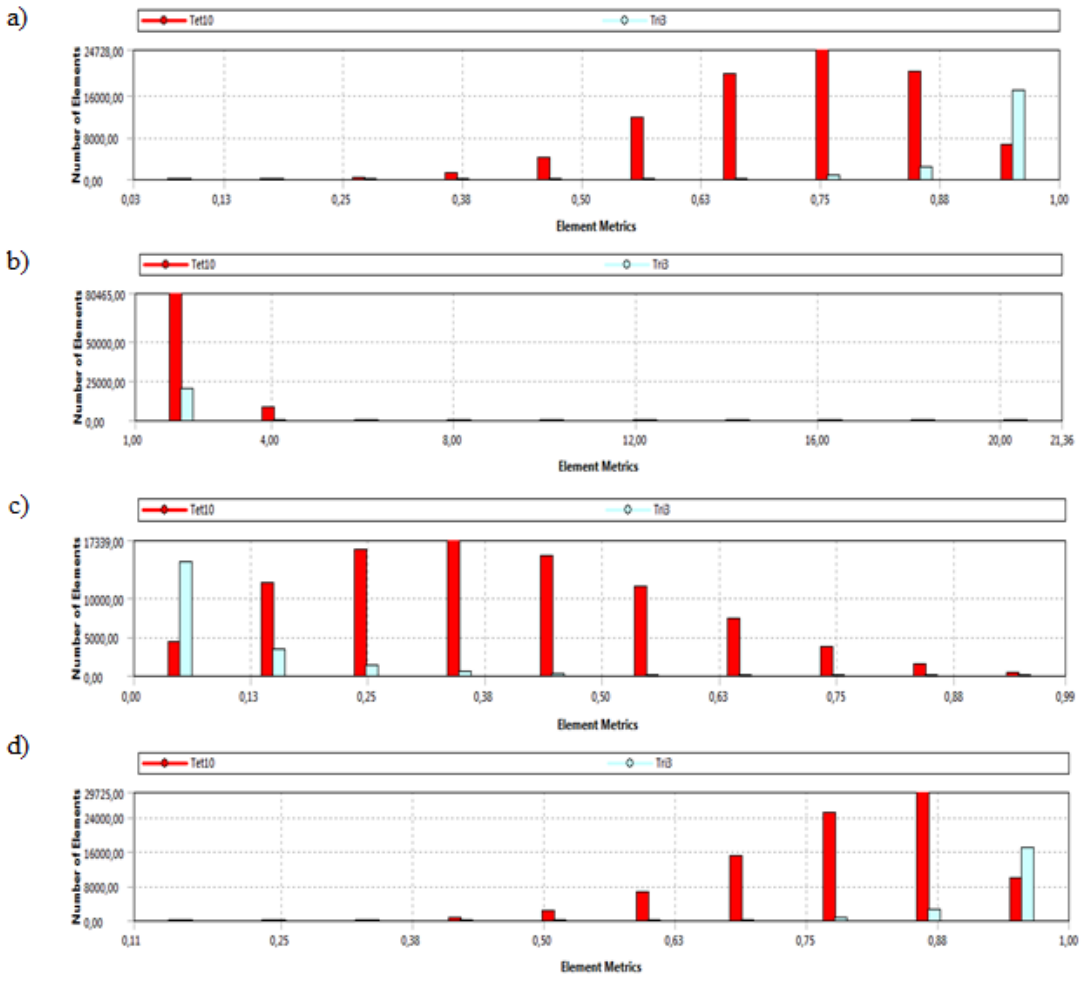



Figura 86. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (l).

m) Espuma de 10 [mm] de altura, reforzada y 31% de porosidad.

Tabla 23. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (m).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.9858e-002 | 1 | 8.2694e-011 | 0.10967 |
| **Valor máximo** | 1 | 21.358 | 0.99395 | 1 |
| **Promedio** | 0.76819 | 2.0053 | 0.32651 | 0.81949 |
| **Des. estándar** | 0.1468 | 0.69795 | 0.20862 | 0.11819 |

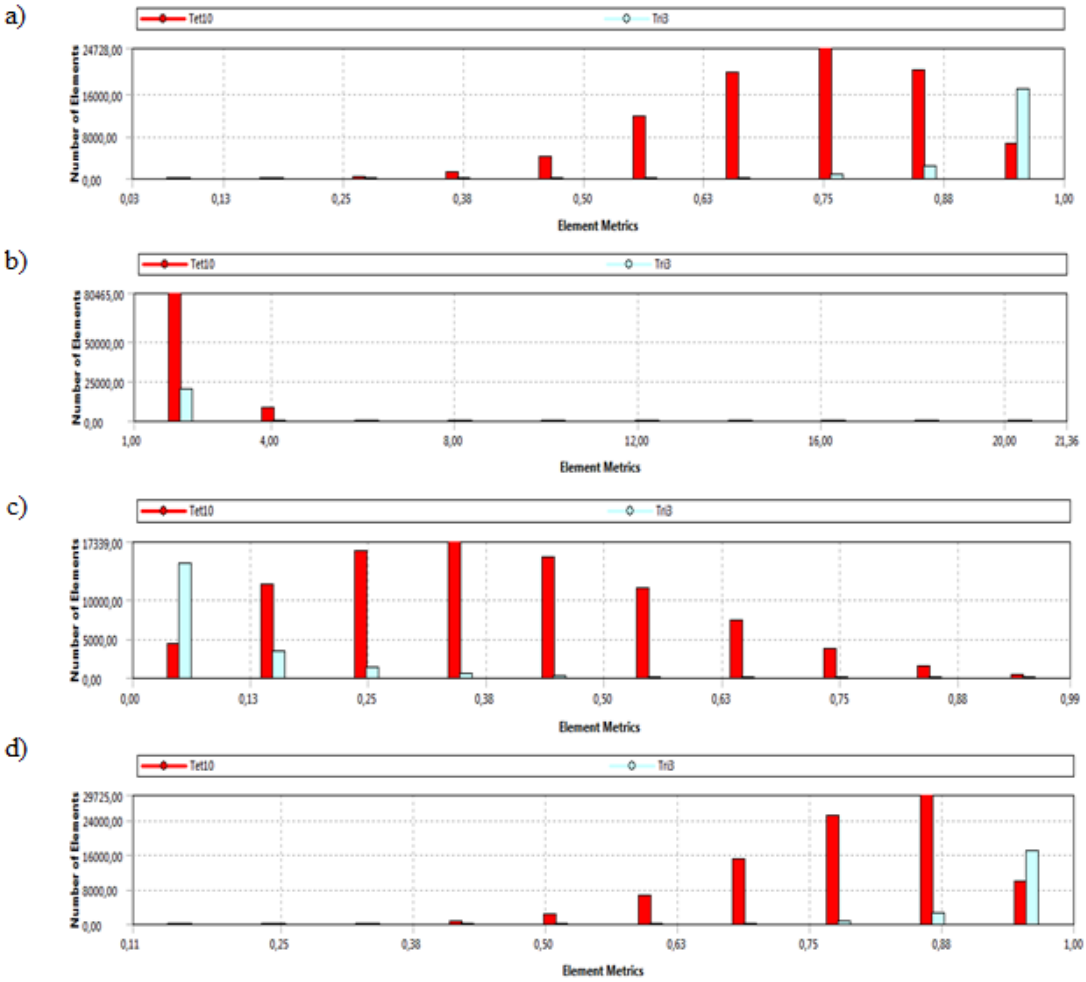



Figura 87. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (m).

n) Espuma de 10 [mm] de altura, reforzada y 38% de porosidad.

Tabla 24. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (n).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.159e-002 | 1 | 3.3307e-013 | 4.6754e-002 |
| **Valor máximo** | 1 | 84.715 | 0.99968 | 1 |
| **Promedio** | 0.7709 | 1.9676 | 0.30136 | 0.82691 |
| **Des. estándar** | 0.16415 | 0.9242 | 0.21404 | 0.12832 |

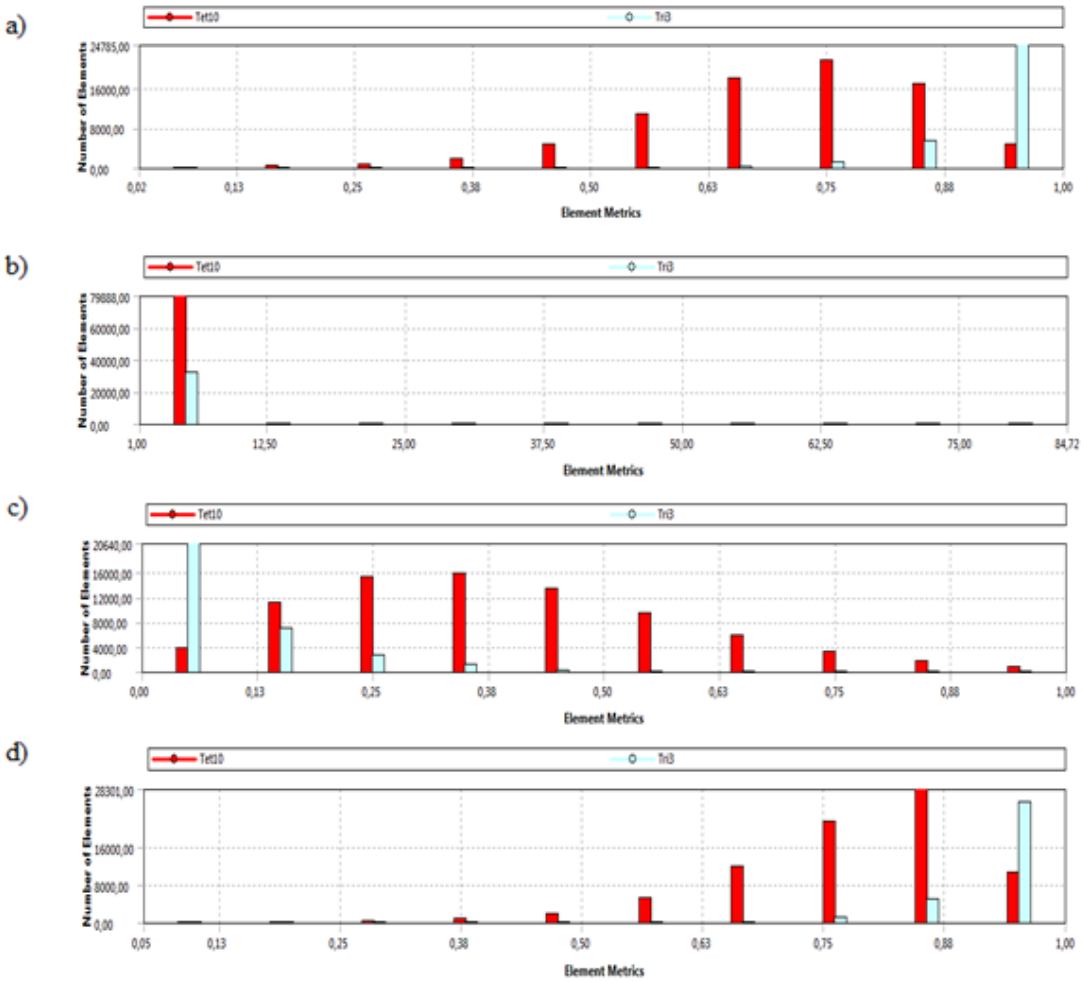



Figura 88. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (n).

o) Espuma de 10 [mm] de altura, reforzada y 44% de porosidad.

Tabla 25. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (o).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 1.4322e-002 | 1 | 0 | 3.0107e-002 |
| **Valor máximo** | 1 | 184.38 | 0.99997 | 1 |
| **Promedio** | 0.73825 | 2.2665 | 0.34224 | 0.80097 |
| **Des. estándar** | 0.17679 | 2.1447 | 0.22388 | 0.15282 |

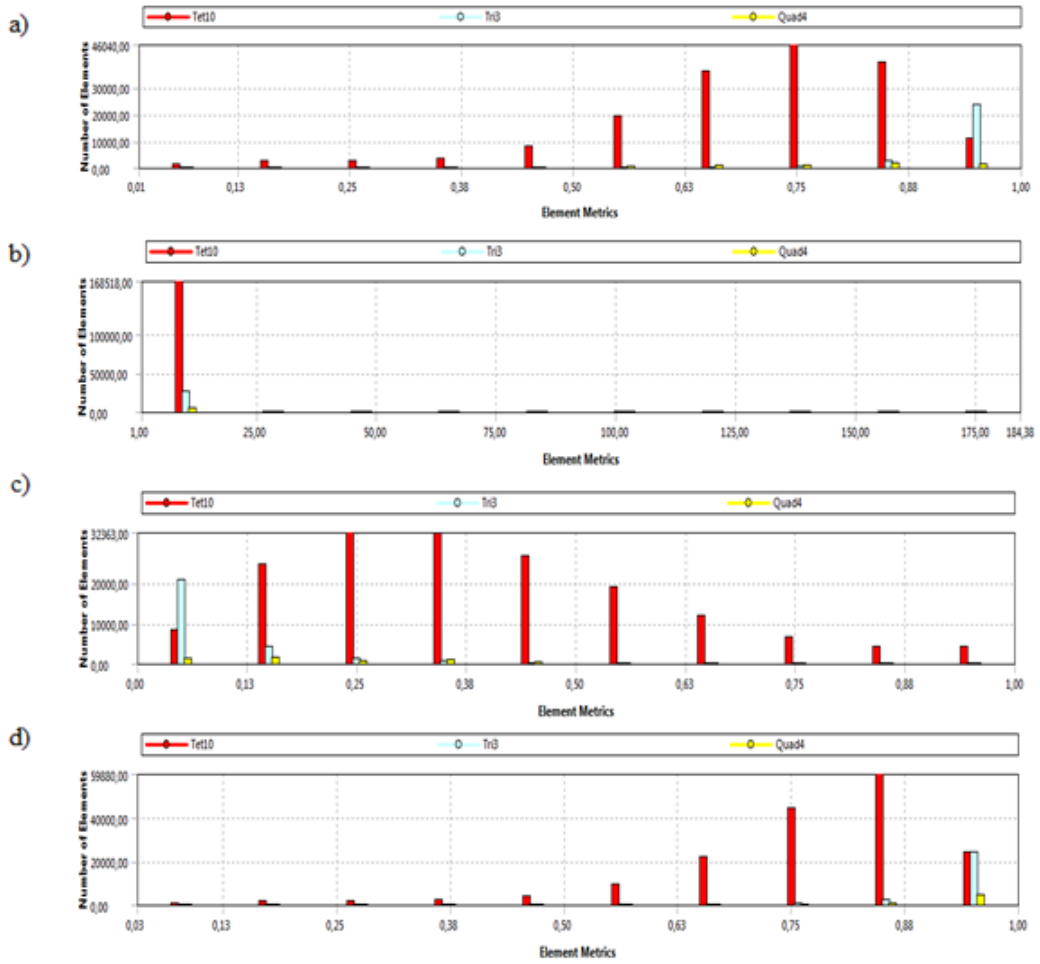



Figura 89. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (o).

## 9.2 Espumas de celda abierta

a) Espuma de 8 [mm] de altura y 13% de porosidad.

Tabla 26. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (a).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.5252e-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 |
| **Des. estándar** | 0.1294 | 0.68766 | 0.18921 | 0.1078 |

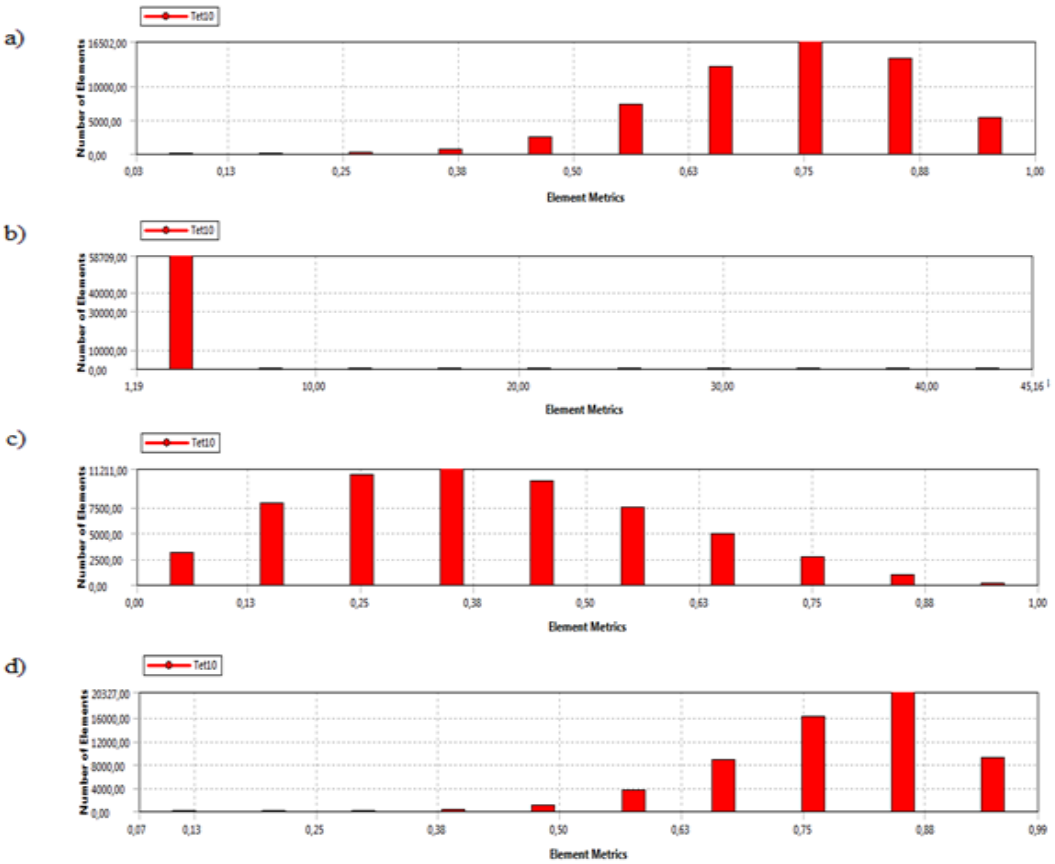



Figura 90. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (a).

b) Espuma de 8 [mm] de altura y 21% de porosidad.

Tabla 27. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (b).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 4.3236e-002 | 1.1819 | 7.9029e-004 | 0.11255 |
| **Valor máximo** | 0.99965 | 23.705 | 0.99673 | 0.98781 |
| **Promedio** | 0.73082 | 2.1921 | 0.3866 | 0.78739 |
| **Des. estándar** | 0.13189 | 0.71834 | 0.1908 | 0.1107 |

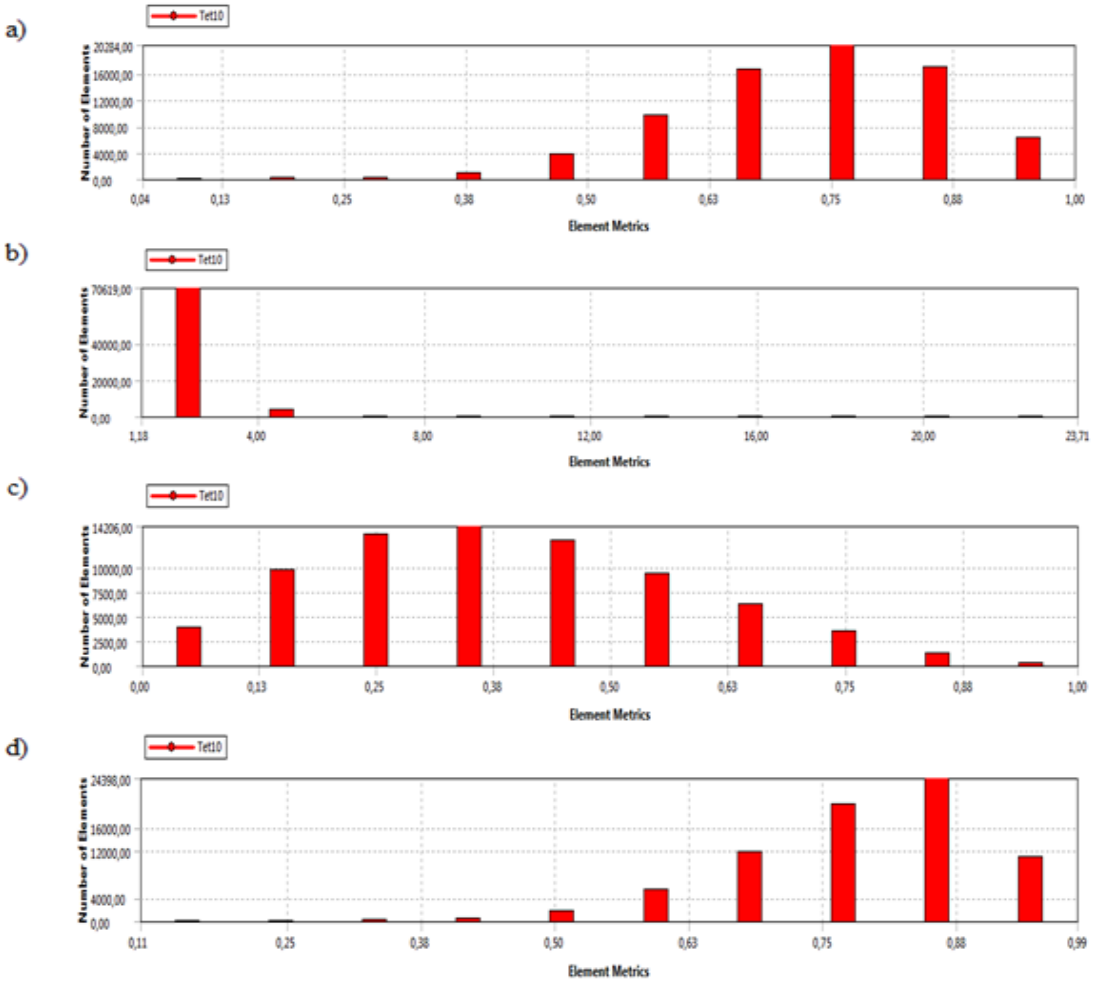



Figura 91. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (b).

c) Espuma de 8 [mm] de altura y 31% de porosidad.

Tabla 28. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (c).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 3.2383e-002 | 1.1814 | 8.1088e-004 | 5.3655e-002 |
| **Valor máximo** | 0.99965 | 81.197 | 0.9999 | 0.9929 |
| **Promedio** | 0.72066 | 2.2515 | 0.39421 | 0.78183 |
| **Des. estándar** | 0.13665 | 1.2111 | 0.19331 | 0.11636 |

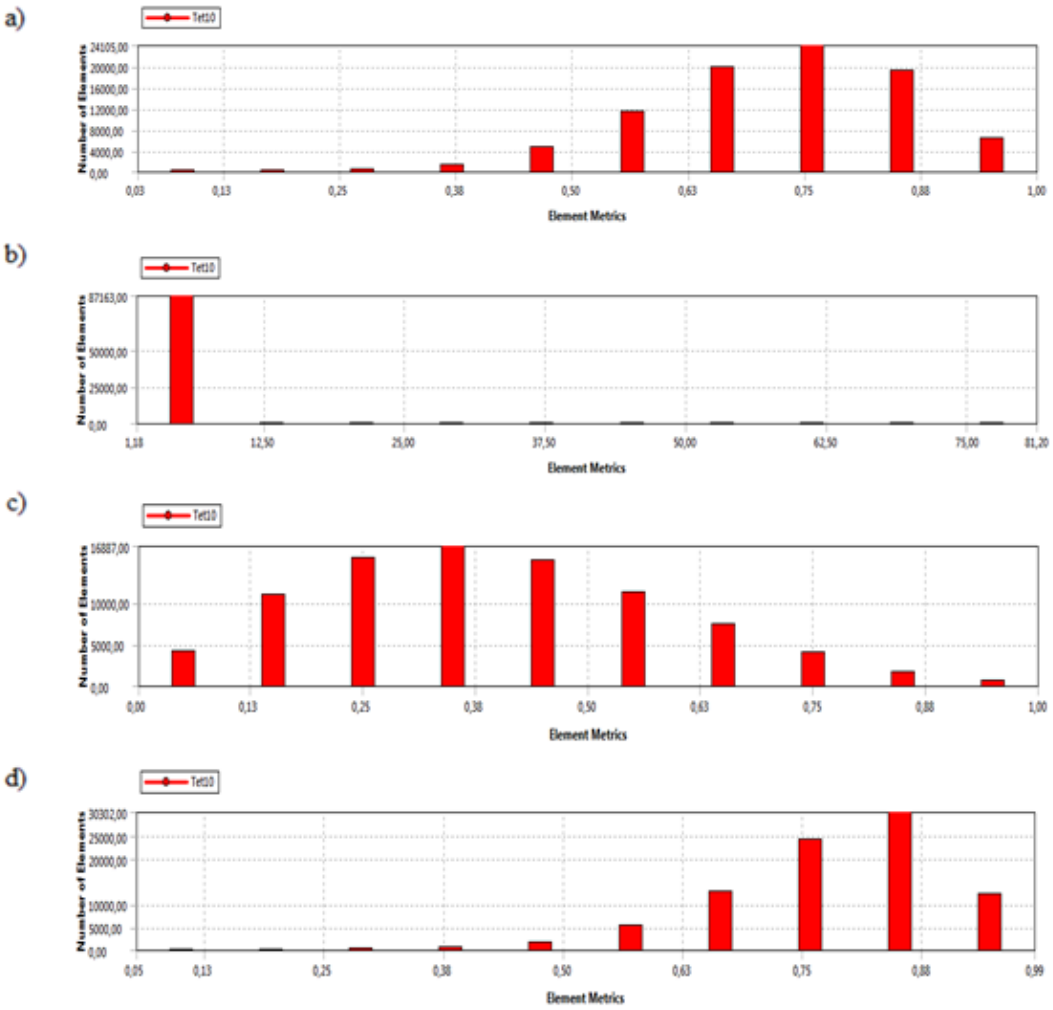



Figura 92. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (c).

d) Espuma de 8 [mm] de altura y 38% de porosidad.

Tabla 29. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (d).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 3.2322e-002 | 1.1771 | 1.6264e-003 | 5.6975e-002 |
| **Valor máximo** | 0.99983 | 96.505 | 0.9999 | 0.98892 |
| **Promedio** | 0.72229 | 2.2267 | 0.38751 | 0.78522 |
| **Des. estándar** | 0.13589 | 1.1072 | 0.19139 | 0.1151 |

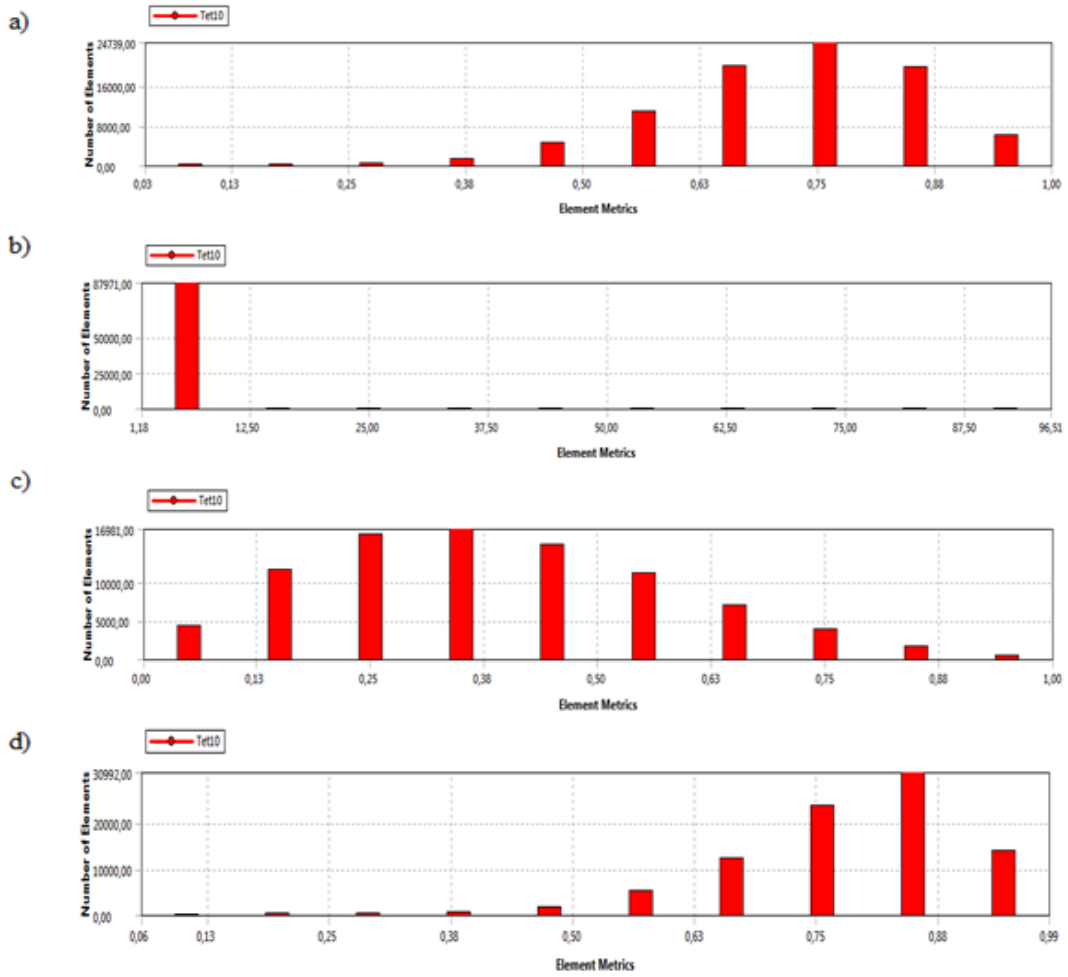



Figura 93. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (d).

e) Espuma de 8 [mm] de altura y 44% de porosidad.

Tabla 30. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (e).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 3.9606e-002 | 1.1627 | 6.8329e-005 | 6.1785e-002 |
| **Valor máximo** | 0.99961 | 90.57 | 0.99933 | 0.98889 |
| **Promedio** | 0.72003 | 2.2323 | 0.38513 | 0.7845 |
| **Des. estándar** | 0.139 | 1.10452 | 0.19356 | 0.11787 |

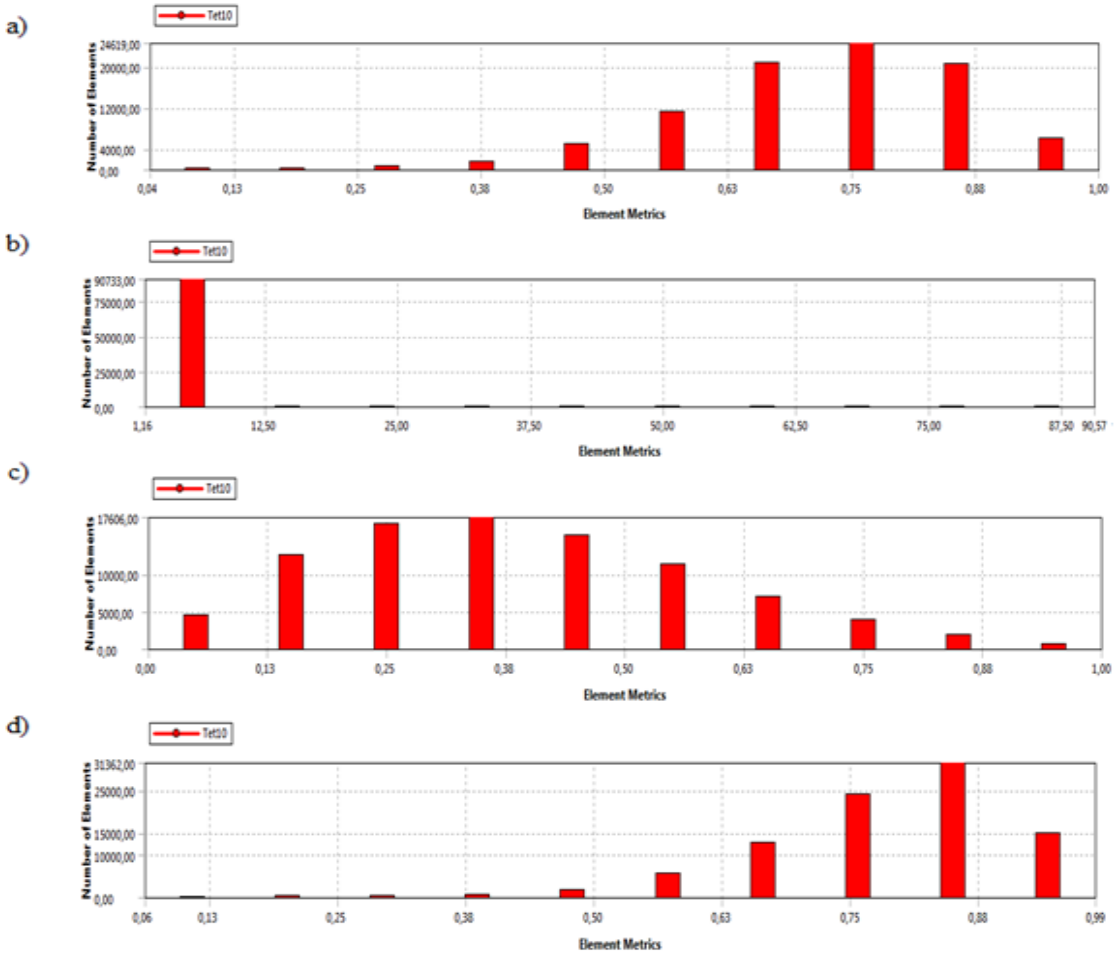



Figura 94. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (e).

f) Espuma de 9 [mm] de altura y 13% de porosidad.

Tabla 31. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (f).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 1.0739e-002 | 1.1914 | 2.9515e-003 | 2.0078e-002 |
| **Valor máximo** | 0.99998 | 115.26 | 0.99991 | 0.99204 |
| **Promedio** | 0.7335 | 2.1854 | 0.3831 | 0.78882 |
| **Des. estándar** | 0.13208 | 0.96209 | 0.19118 | 0.1098 |

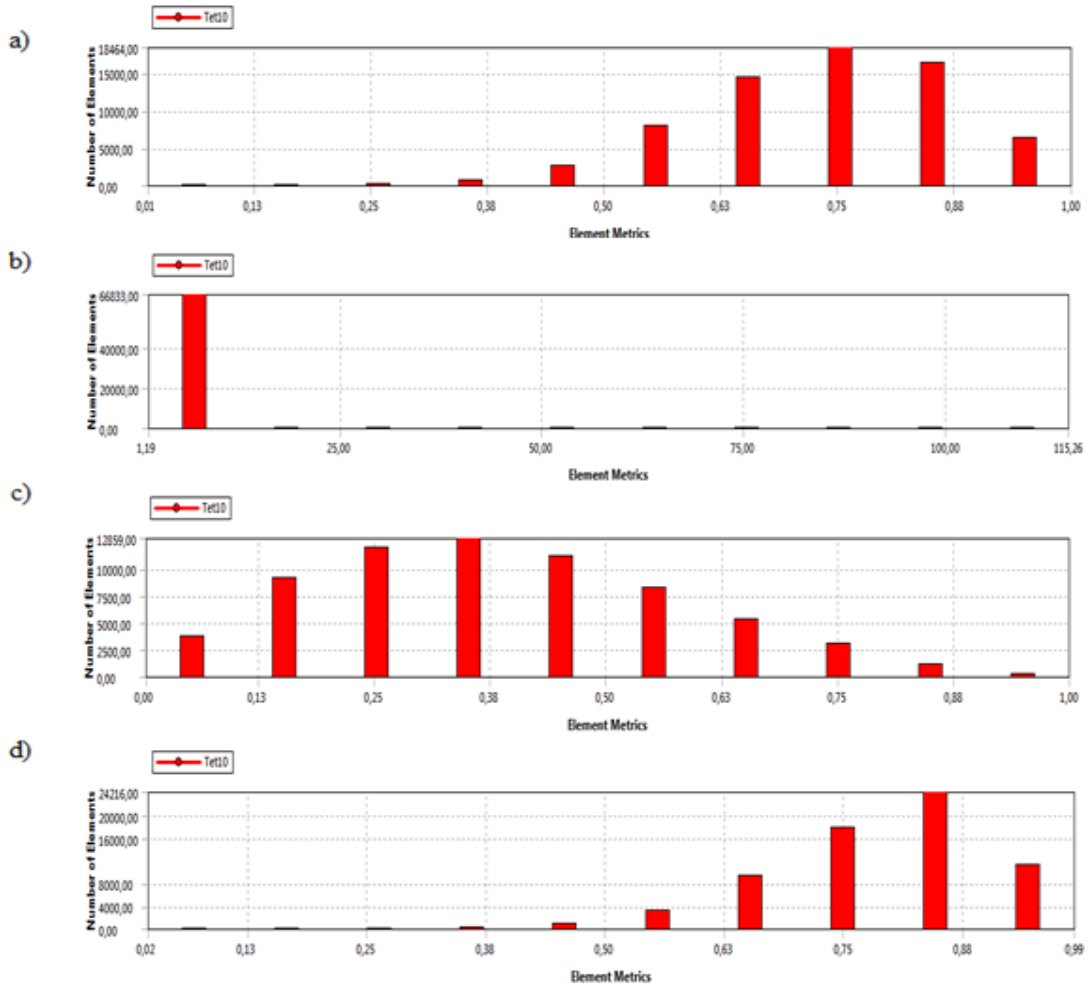



Figura 95. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (f).

g) Espuma de 9 [mm] de altura y 21% de porosidad.

Tabla 32. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (g).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 1.4513e-002 | 1.1742 | 6.3919e-004 | 0 |
| **Valor máximo** | 0.99979 | 13494 | 1 | 0.98218 |
| **Promedio** | 0.72038 | 2.4294 | 0.39726 | 0.60123 |
| **Des. estándar** | 0.13571 | 47.001 | 0.19307 | 0.19091 |

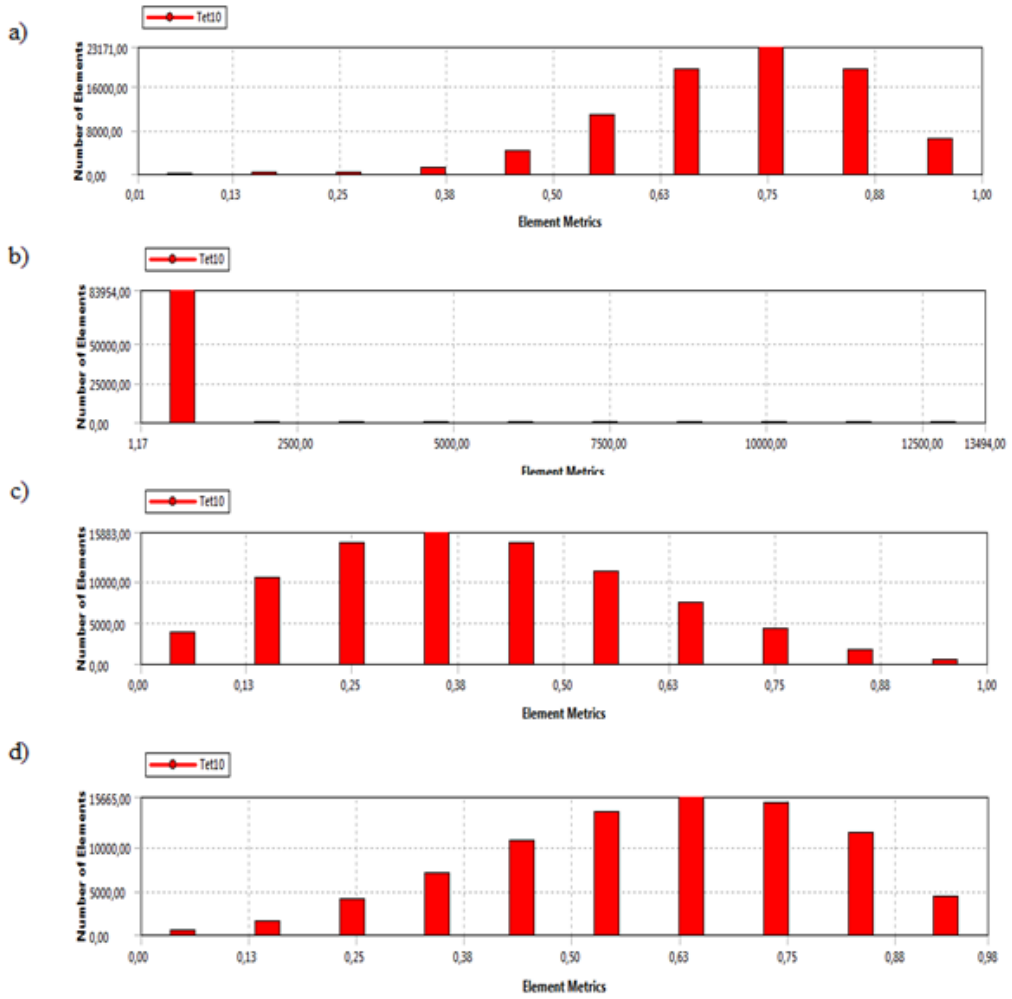



Figura 96. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (g).

h) Espuma de 9 [mm] de altura y 31% de porosidad.

Tabla 33. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (h).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 5.0864-003 | 1.1686 | 3.0769 | 5.1413e-012 |
| **Valor máximo** | 0.99944 | 3667.9 | 1 | 0.983 |
| **Promedio** | 0.71616 | 2.3509 | 0.39594 | 0.60216 |
| **Des. estándar** | 0.1402 | 13.274 | 0.19487 | 0.19286 |

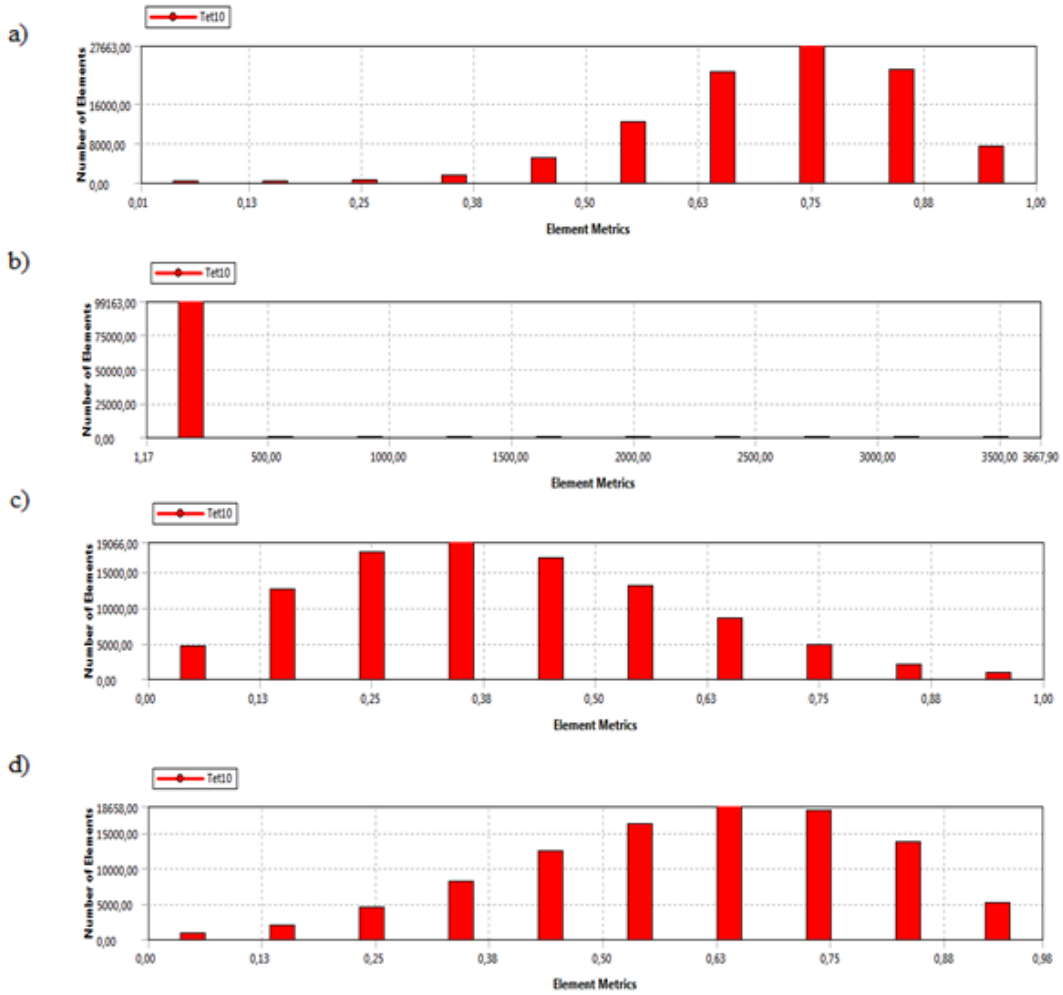



Figura 97. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (h).

i) Espuma de 9 [mm] de altura y 38% de porosidad.

Tabla 34. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (i).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.8009e-002 | 1.1745 | 1.417e-003 | 8.6932e-004 |
| **Valor máximo** | 0.9997 | 51.455 | 0.99913 | 0.98471 |
| **Promedio** | 0.71542 | 2.2454 | 0.39198 | 0.60649 |
| **Des. estándar** | 0.14008 | 0.93372 | 0.19391 | 0.1918 |

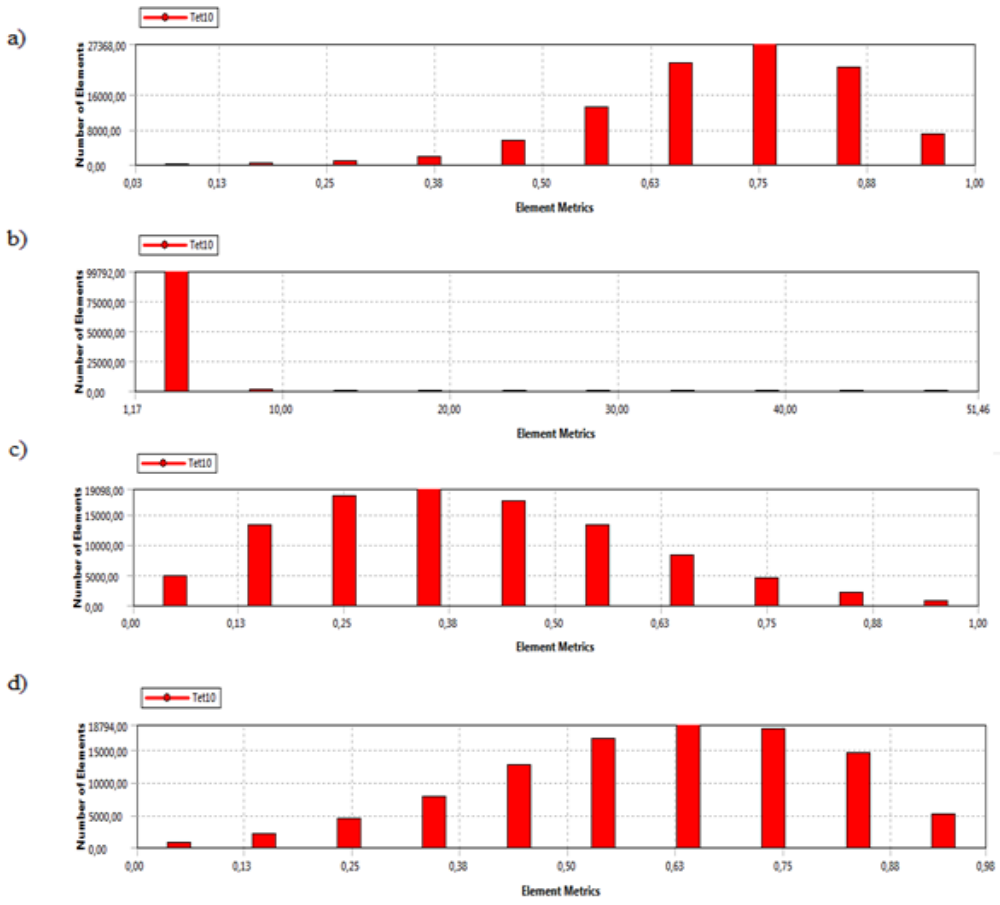



Figura 98. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (i).

j) Espuma de 9 [mm] de altura y 44% de porosidad.

Tabla 35. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (j).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.6273e-002 | 1.1692 | 4.3203e-004 | 1.3862e-006 |
| **Valor máximo** | 0.99876 | 77.993 | 1 | 0.98309 |
| **Promedio** | 0.67731 | 2.4155 | 0.41226 | 0.58626 |
| **Des. estándar** | 0.16592 | 1.4097 | 0.20968 | 0.20777 |

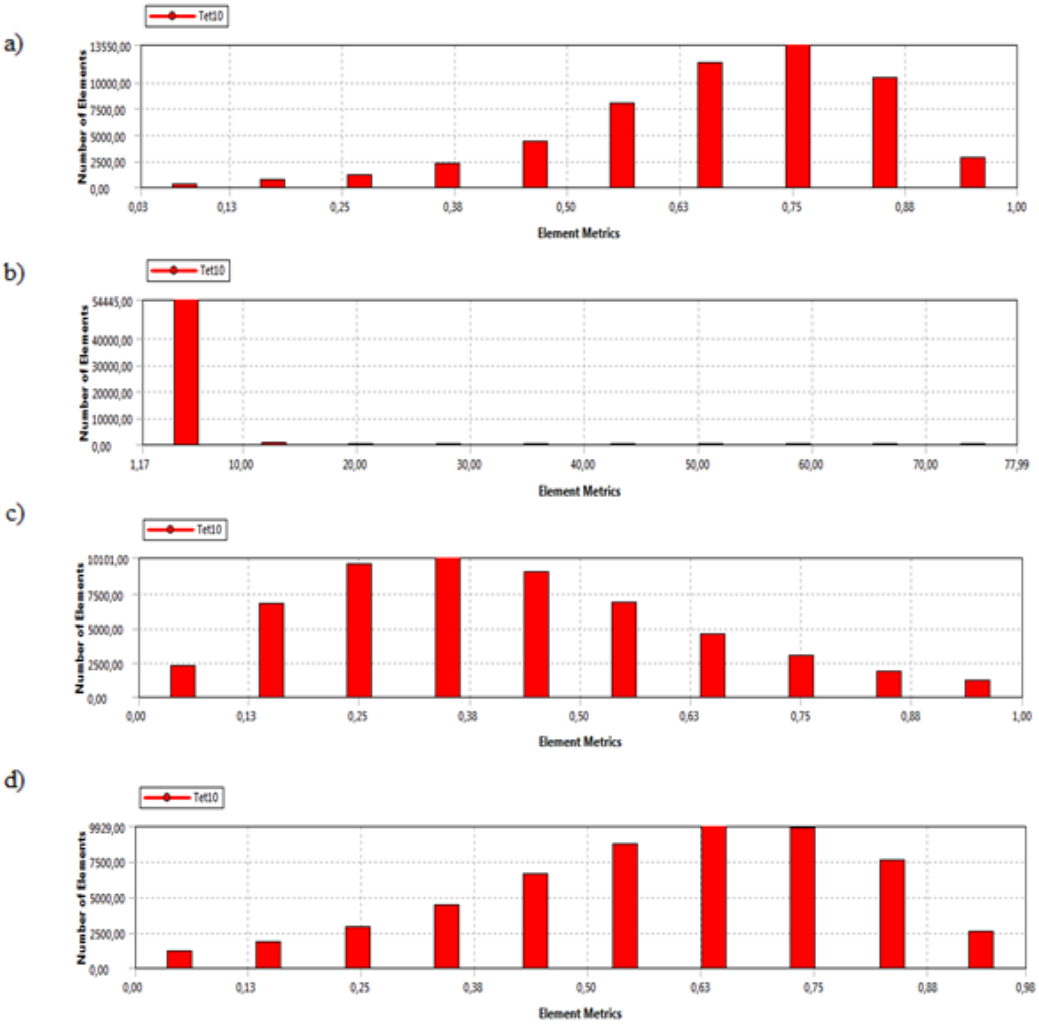



Figura 99. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (j).

k) Espuma de 10 [mm] de altura y 13% de porosidad.

Tabla 36. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (k).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 1.6173e-002 | 1.1772 | 1.2889e-003 | 1.0338e-003 |
| **Valor máximo** | 0.99963 | 73.891 | 0.99897 | 0.98697 |
| **Promedio** | 0.72747 | 2.2035 | 0.38978 | 0.6087 |
| **Des. estándar** | 0.13301 | 0.83128 | 0.19085 | 0.18869 |

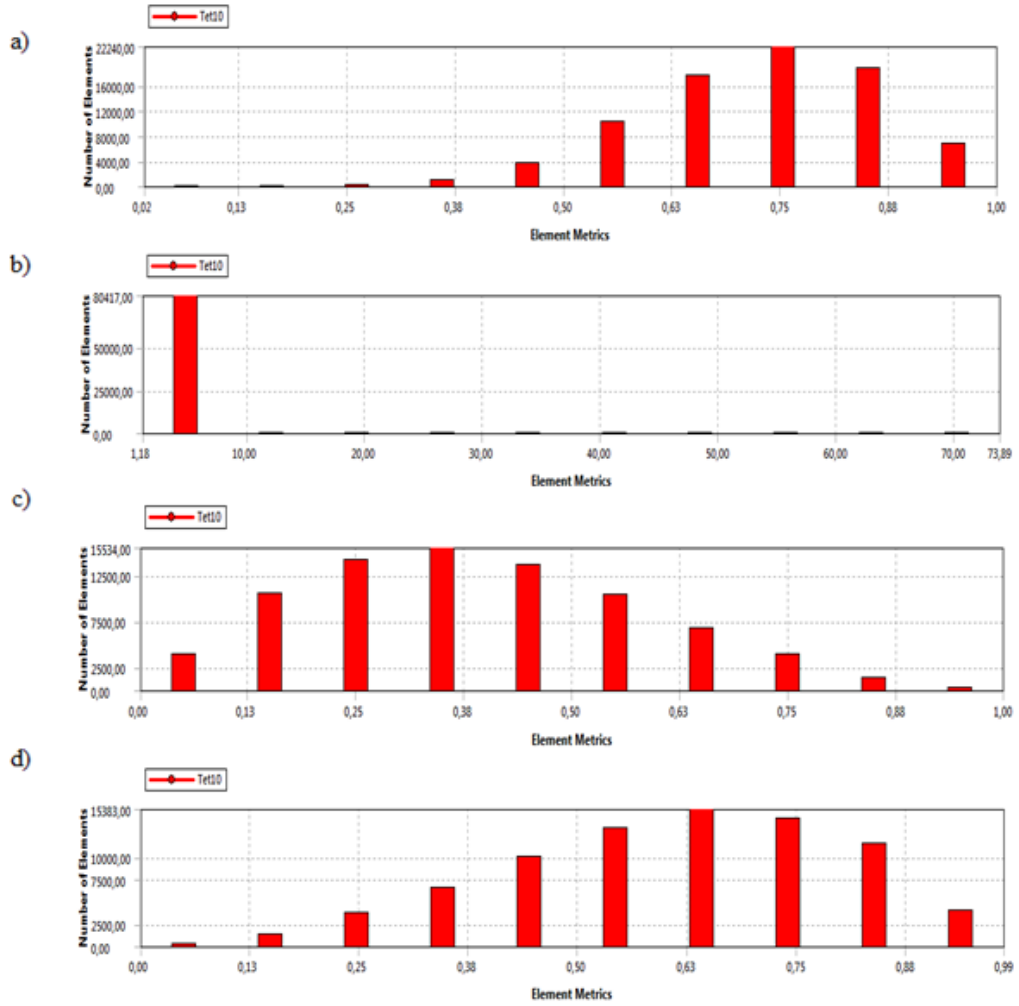



Figura 100. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (k).

l) Espuma de 10 [mm] de altura y 21% de porosidad.

Tabla 37. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (l).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 4.6593e-002 | 1.1742 | 1.8151e-003 | 4.1469e-003 |
| **Valor máximo** | 0.99971 | 62.783 | 0.99959 | 0.98533 |
| **Promedio** | 0.7173 | 2.2549 | 0.39894 | 0.59958 |
| **Des. estándar** | 0.13877 | 1.0129 | 0.19571 | 0.19364 |

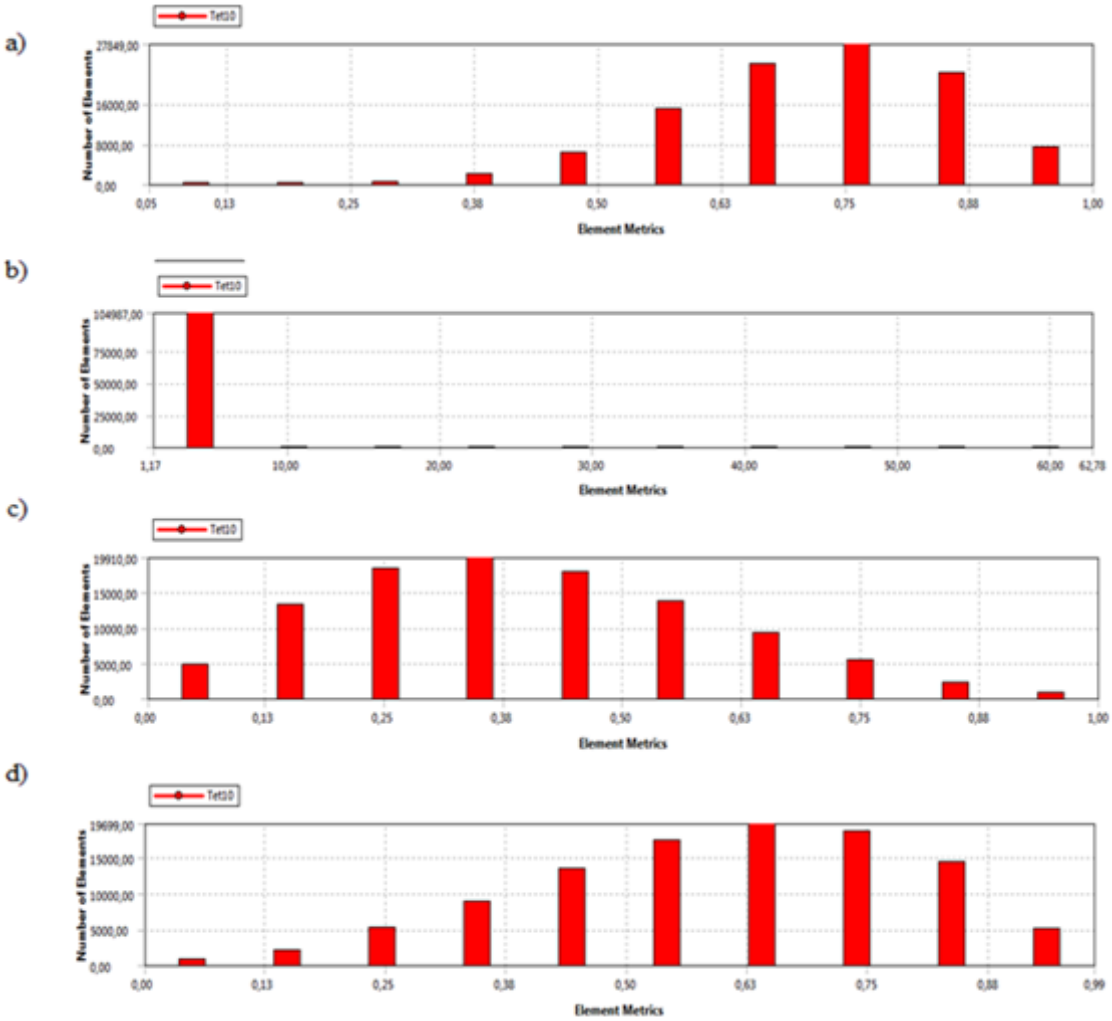



Figura 101. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (l).

m) Espuma de 10 [mm] de altura y 31% de porosidad.

Tabla 38. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (m).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.1164e-002 | 1.188 | 1.9004e-003 | 1.1258e-005 |
| **Valor máximo** | 0.99987 | 193.33 | 0.99999 | 0.98458 |
| **Promedio** | 0.71299 | 2.2883 | 0.3995 | 0.59913 |
| **Des. estándar** | 0.14048 | 1.6059 | 0.19502 | 0.19306 |

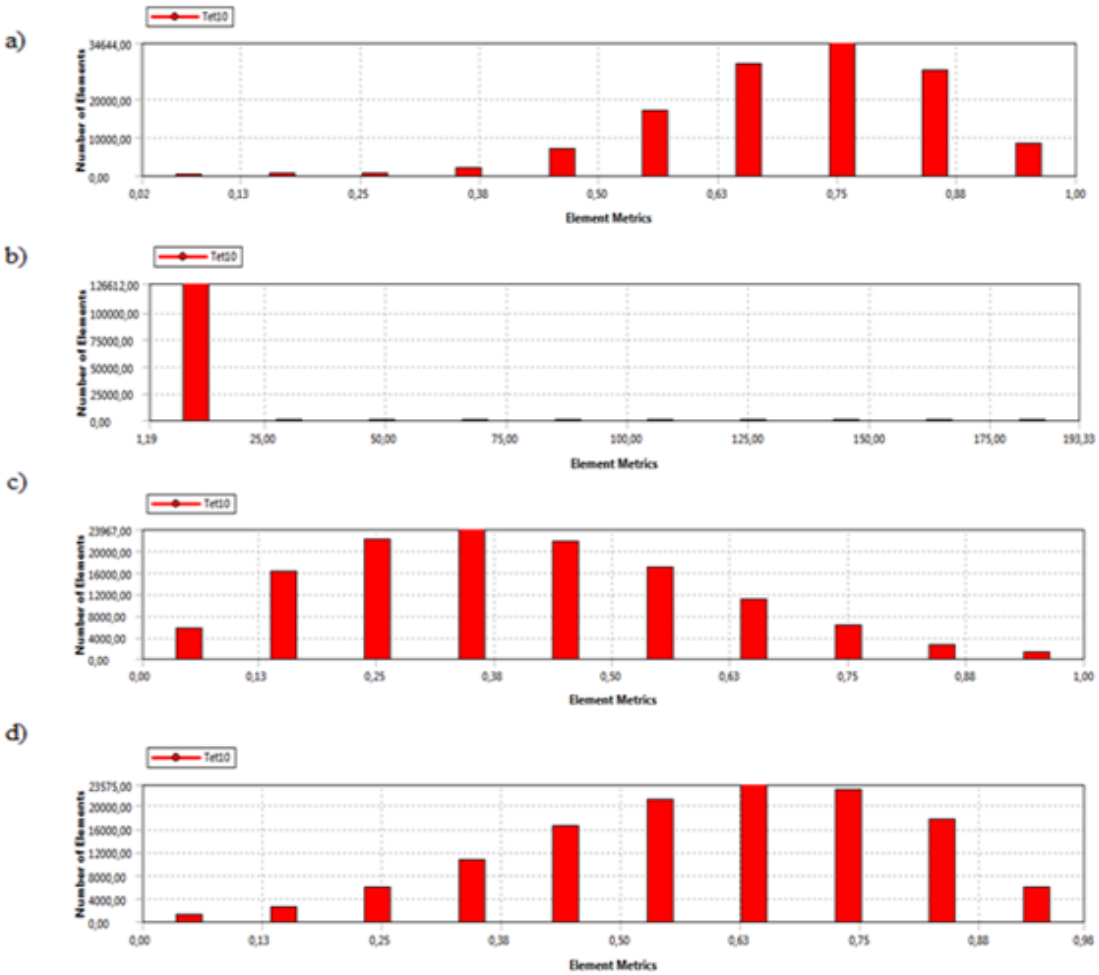



Figura 102. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (m).

n) Espuma de 10 [mm] de altura y 38% de porosidad.

Tabla 39. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (n).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 4.6593e-002 | 1.1742 | 1.8151e-003 | 4.1469e-003 |
| **Valor máximo** | 0.99971 | 62.783 | 0.99959 | 0.98533 |
| **Promedio** | 0.7173 | 2.2549 | 0.39894 | 0.59958 |
| **Des. estándar** | 0.13877 | 1.0129 | 0.19571 | 0.19364 |

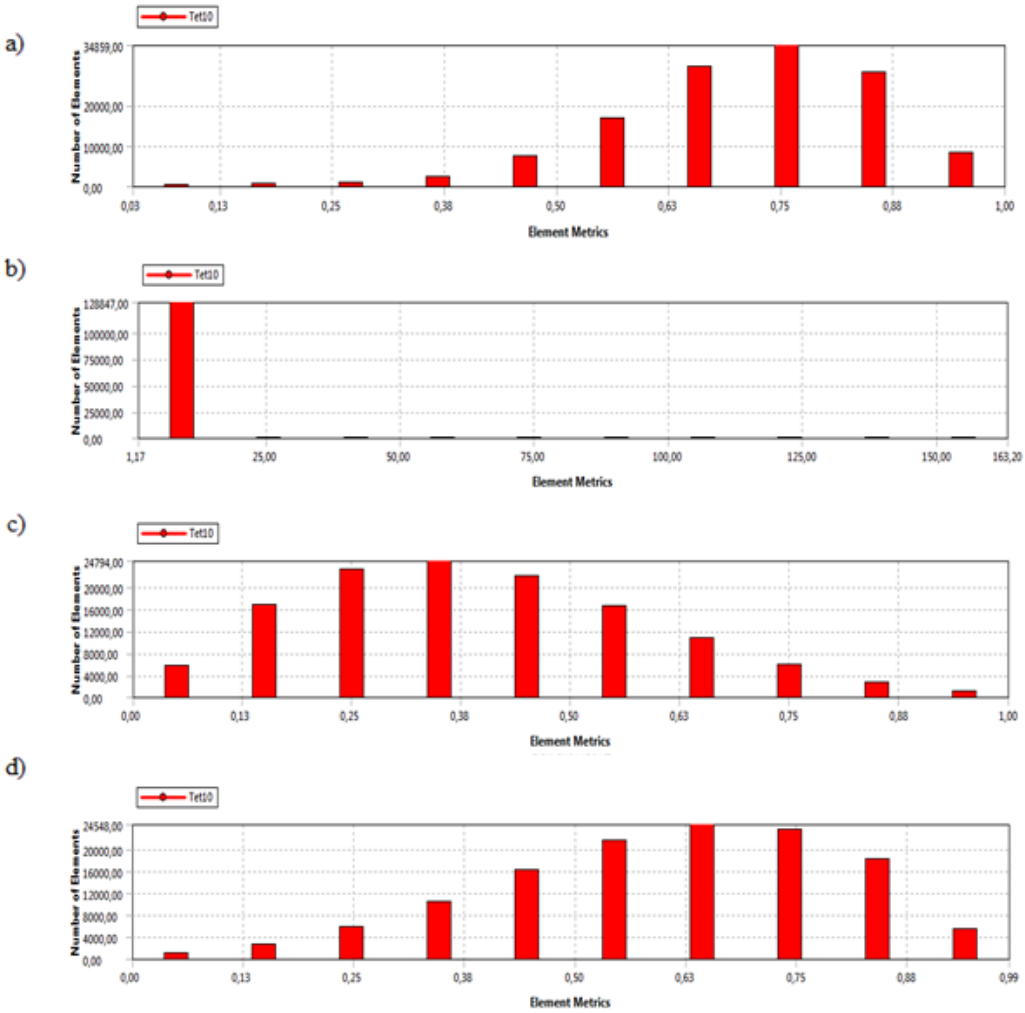



Figura 103. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (n).

o) Espuma de 10 [mm] de altura y 44% de porosidad.

Tabla 40. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos (o).

| | **Calidad de elementos** | **Relación de aspecto** | **Asimetría** | **Calidad ortogonal** |
|---|---|---|---|---|
| **Valor mínimo** | 2.8398e-002 | 1.1792 | 3.1333e-003 | 5.3375e-006 |
| **Valor máximo** | 0.99954 | 243.39 | 0.41135 | 0.9825 |
| **Promedio** | 0.67 | 2.4533 | 0.41135 | 0.5872 |
| **Des. estándar** | 0.13877 | 2.2142 | 0.20993 | 0.20804 |

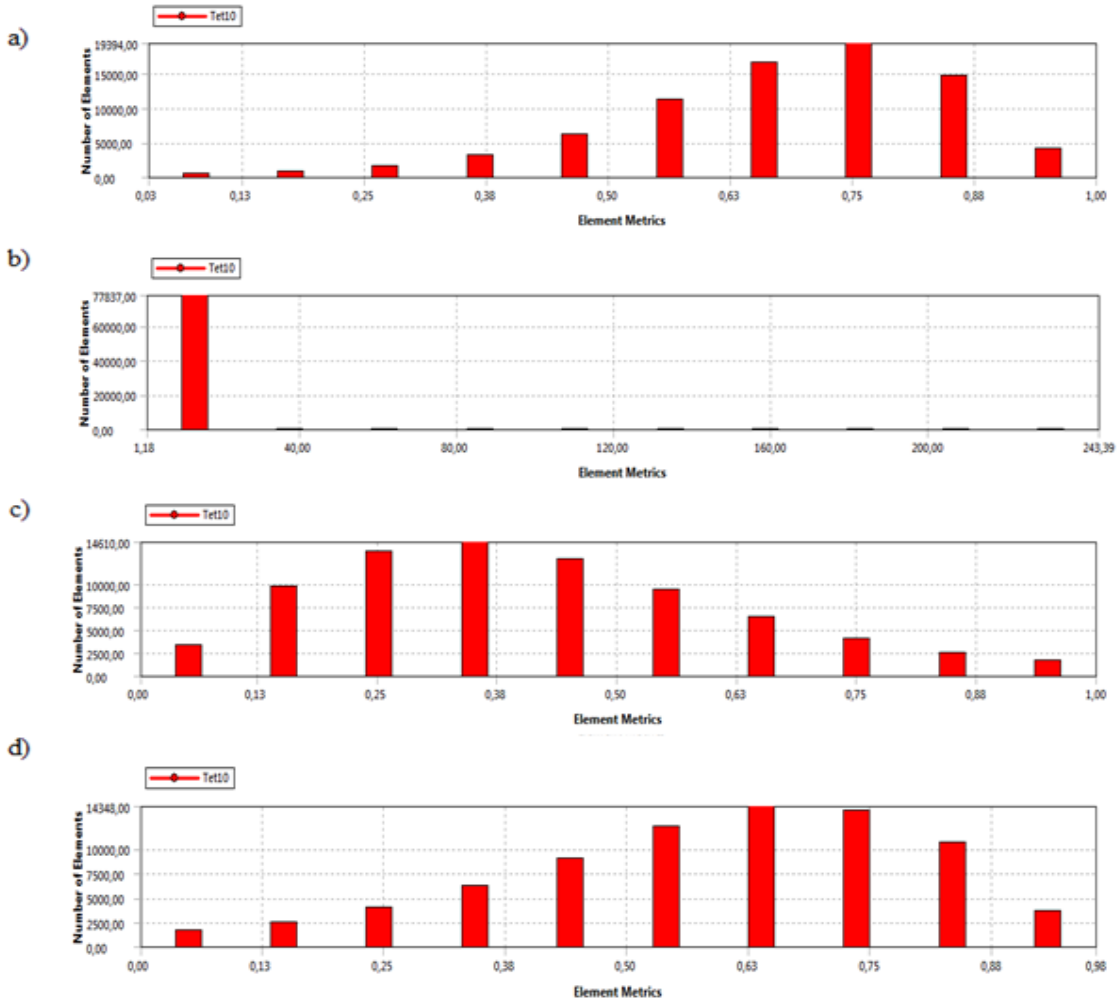



Figura 104. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos (o).

## 9.3 Tablas de resultados

Tabla 41. Datos obtenidos para las probetas reforzadas.

| Fracción Volumétrica [-] | | Área [mm2] | Fuerza [N] | Altura [mm] | Desplazamiento [mm] | Deformación [-] | Esfuerzo [Mpa] | Módulo Elástico [Gpa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,00** | | 50,27 | 55.292 | 8 | 0,08 | 0,01 | 1.100 | 110,0 |
| 0,128 | | 50,27 | 43.687 | 8 | 0,08 | 0,01 | 869,0 | 86,90 |
| 0,137 | **0,13** | 63,62 | 54.199 | 9 | 0,09 | 0,01 | 851,9 | 85,19 |
| 0,131 | | 78,54 | 68.052 | 10 | 0,10 | 0,01 | 866,5 | 86,65 |
| 0,210 | | 50,27 | 36.312 | 8 | 0,08 | 0,01 | 722,3 | 72,23 |
| 0,204 | **0,21** | 63,62 | 46.768 | 9 | 0,09 | 0,01 | 735,1 | 73,51 |
| 0,213 | | 78,54 | 56.728 | 10 | 0,10 | 0,01 | 722,3 | 72,23 |
| 0,306 | | 50,27 | 28.930 | 8 | 0,08 | 0,01 | 575,5 | 57,55 |
| 0,308 | **0,31** | 63,62 | 36.613 | 9 | 0,09 | 0,01 | 575,5 | 57,55 |
| 0,307 | | 78,54 | 44.817 | 10 | 0,10 | 0,01 | 570,6 | 57,06 |
| 0,383 | | 50,27 | 23.452 | 8 | 0,08 | 0,01 | 466,5 | 46,65 |
| 0,370 | **0,38** | 63,62 | 30.904 | 9 | 0,09 | 0,01 | 485,8 | 48,58 |
| 0,383 | | 78,54 | 37.642 | 10 | 0,10 | 0,01 | 479,3 | 47,93 |
| 0,435 | | 50,27 | 20.268 | 8 | 0,08 | 0,01 | 403,2 | 40,32 |
| 0,440 | **0,44** | 63,62 | 25.243 | 9 | 0,09 | 0,01 | 396,8 | 39,68 |
| 0,435 | | 78,54 | 29.414 | 10 | 0,10 | 0,01 | 374,5 | 37,45 |

Tabla 42. Datos obtenidos para las probetas sin refuerzo.

| Fracción Volumétrica [-] | | Área [mm2] | Fuerza [N] | Altura [mm] | Desplazamiento [mm] | Deformación [-] | Esfuerzo [Mpa] | Módulo Elástico [Gpa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,00** | | 50,27 | 55.292 | 8 | 0,08 | 0,01 | 1.100 | 110,0 |
| 0,128 | **0,13** | 50,27 | 43.456 | 8 | 0,08 | 0,01 | 864,5 | 86,45 |
| 0,137 | | 63,62 | 53.896 | 9 | 0,09 | 0,01 | 847,2 | 84,72 |
| 0,131 | | 78,54 | 68.052 | 10 | 0,10 | 0,01 | 866,5 | 86,65 |
| 0,210 | **0,21** | 50,27 | 35.961 | 8 | 0,08 | 0,01 | 715,4 | 71,54 |
| 0,204 | | 63,62 | 46.323 | 9 | 0,09 | 0,01 | 728,1 | 72,81 |
| 0,213 | | 78,54 | 56.728 | 10 | 0,10 | 0,01 | 722,3 | 72,23 |
| 0,306 | **0,31** | 50,27 | 28.449 | 8 | 0,08 | 0,01 | 565,9 | 56,59 |
| 0,308 | | 63,62 | 35.992 | 9 | 0,09 | 0,01 | 565,7 | 56,57 |
| 0,307 | | 78,54 | 44.817 | 10 | 0,10 | 0,01 | 570,6 | 57,06 |
| 0,383 | **0,38** | 50,27 | 22.882 | 8 | 0,08 | 0,01 | 455,2 | 45,52 |
| 0,370 | | 63,62 | 30.186 | 9 | 0,09 | 0,01 | 474,5 | 47,45 |
| 0,383 | | 78,54 | 37.642 | 10 | 0,10 | 0,01 | 479,3 | 47,93 |
| 0,435 | **0,44** | 50,27 | 19.791 | 8 | 0,08 | 0,01 | 393,7 | 39,37 |
| 0,440 | | 63,62 | 24.079 | 9 | 0,09 | 0,01 | 378,5 | 37,85 |
| 0,435 | | 78,54 | 29.414 | 10 | 0,10 | 0,01 | 374,5 | 37,45 |

Tabla 43. Datos obtenidos para las probetas de celda abierta.

| Fracción Volumétrica [-] | | Área [mm2] | Fuerza [N] | Altura [mm] | Desplazamiento [mm] | Deformación [-] | Esfuerzo [Mpa] | Módulo Elastico [Gpa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,00** | | 50,27 | 55.292 | 8 | 0,08 | 0,01 | 1.100 | 110,0 |
| 0,133 | **0,13** | 50,27 | 42.760 | 8 | 0,08 | 0,01 | 850,6 | 85,06 |
| 0,133 | | 63,62 | 53.874 | 9 | 0,09 | 0,01 | 846,8 | 84,68 |
| 0,134 | | 78,54 | 66.203 | 10 | 0,10 | 0,01 | 842,9 | 84,29 |
| 0,205 | **0,21** | 50,27 | 34.657 | 8 | 0,08 | 0,01 | 689,4 | 68,94 |
| 0,209 | | 63,62 | 44.046 | 9 | 0,09 | 0,01 | 692,3 | 69,23 |
| 0,207 | | 78,54 | 54.124 | 10 | 0,10 | 0,01 | 689,1 | 68,91 |
| 0,309 | **0,31** | 50,27 | 26.685 | 8 | 0,08 | 0,01 | 530,8 | 53,08 |
| 0,308 | | 63,62 | 34.515 | 9 | 0,09 | 0,01 | 542,5 | 54,25 |
| 0,302 | | 78,54 | 43.285 | 10 | 0,10 | 0,01 | 551,1 | 55,11 |
| 0,376 | **0,38** | 50,27 | 19.402 | 8 | 0,08 | 0,01 | 386,0 | 38,60 |
| 0,378 | | 63,62 | 24.379 | 9 | 0,09 | 0,01 | 383,2 | 38,32 |
| 0,380 | | 78,54 | 30.711 | 10 | 0,10 | 0,01 | 391,0 | 39,10 |
| 0,436 | **0,44** | 50,27 | 16.106 | 8 | 0,08 | 0,01 | 320,4 | 32,04 |
| 0,436 | | 63,62 | 19.826 | 9 | 0,09 | 0,01 | 311,6 | 31,16 |
| 0,434 | | 78,54 | 25.675 | 10 | 0,10 | 0,01 | 326,9 | 32,69 |