

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO-CHILE



**Estudio numérico del efecto de las microesferas huecas
reforzantes de Fe, sobre las propiedades mecánicas de espumas
metálicas sintácticas de matriz AlSi12 fabricadas mediante el
proceso de infiltración.**

DIEGO ALONSO OLGUÍN SAAVEDRA

MEMORIA DE TITULACION PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía:

DR.ING. LUIS PEREZ P.

Profesor Correferente:

DR. ISMELI ALFONSO LOPEZ.

Profesor Correferente:

MAG. CS. MAURICIO CAMPILLO CANTO

NOVIEMBRE 2022

AGRADECIMIENTOS

A mi Madre y Padre que, durante este proceso de formación universitaria, siempre estuvieron apoyándome en todo momento y frente a cualquier adversidad que podía presentarse en mi camino. Gran parte de mis logros se los debo a ellos por su preocupación, animarme para no rendirme y mantener siempre la mente en alto, no solo ahora, sino que desde que nací, luego cuando comencé a ser consciente y hasta el día de hoy.

También agradecer a mi hermano Sebastián, por ser una fuente de apoyo constante, ya que por las casualidades de la vida compartimos un objetivo similar y un sueño en común, ser ingenieros y pertenecer a la casa de estudios de la UTFSM. Cuántas veces dedico parte de su tiempo para enseñarme, orientarme y ayudarme en mis estudios. De corazón lo agradezco.

Al Profesor y Dr. Luis Pérez Pozo por preocuparse de que lograra terminar este estudio. Enseñarme, guiarme y compartir sus conocimientos, como también aconsejarme de la vida y tener tiempos de reflexión, no solo en el ámbito educacional.

RESUMEN

El interés por la investigación y desarrollo de la tecnología que involucra el modelamiento teórico, empírico y computacional de las espumas sintácticas ha ido en avance, al ser una temática relativamente nueva ya presenta aplicaciones en diversas áreas como en la industria automotriz, medicina, componentes industriales, etc. Dentro de la Mecánica de Materiales se presenta como un gran desafío, es por ello que su estudio es cada vez más extenso, con el fin de poder controlar de manera más certera cada uno de los parámetros que rigen las propiedades de este tipo de materiales para la fabricación.

Una espuma sintáctica de matriz metálica, de manera similar a una espuma metálica de 2 fases (una sólida y una gaseosa), se diferencian en que la fase gaseosa continua o discontinua (la que da forma a los poros) es reemplazada por refuerzos de diversos tipos (esferas, nanotubos, etc.). Este tipo de materiales son usados en diversas aplicaciones tanto estructurales, filtración, absorción de energía, entre otros.

Dentro de los materiales más usados para el desarrollo de espumas sintácticas se encuentran diversas aleaciones del Aluminio, ya que es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre, es un metal ligero, posee bajo punto de fusión y buenas características mecánicas. Por eso es uno de los materiales con mayor demanda en la industria, además de que es fácil alearlo con otros elementos.

En el presente trabajo, se estudia numéricamente mediante Métodos de Elementos Finitos (MEF), un modelo representativo de material AlSi12 con refuerzos esféricos de hierro. La finalidad de este estudio es obtener un resultado aproximado para el comportamiento a la deformación de esta espuma sintáctica.

Con el desarrollo de estas geometrías se pretende simular el efecto compresivo de una prensa hidráulica sobre las caras planas de una probeta para así obtener una aproximación comparativa de una espuma metálica con una espuma metálica con refuerzos esféricos. También se desea seleccionar un valor apropiado en las dimensiones del sólido a ensayar, ya que se estima una posible estabilidad en el módulo de Young al diseñar la geometría en razón de su largo representativo con el diámetro de los refuerzos esféricos, es decir, encontrar el RVE (elemento de volumen representativo) en el cual, el sólido no presenta mayor variación en su módulo de elástico, esto se debe a que la elección de una porción de volumen adecuada puede contener gran parte de la información acerca de las propiedades mecánicas del sólido.

El desarrollo de este estudio busca plantear una alternativa para determinar la estructura apropiada de una espuma sintáctica, que optimice su comportamiento en relación a los resultados esperados con respecto al módulo de Young, su área de aplicación y la reducción de costos asociados a su desarrollo y uso experimental.

ABSTRACT

The interest in the research and development of the technology that involves theoretical, empirical, and computational modeling of syntactic foams has been increasing, being a relatively new topic, it already has applications in several areas. In the mechanics of materials, it is presented as a great challenge, therefore, its study is increasingly extensive, in order to control each of the parameters that govern the properties of this type of material accurately.

A metal matrix syntactic foam, similar to a two-phase metallic foam (one solid and one gaseous), differs in the fact that the continuous or discontinuous gaseous phase (the one that shapes the pores) is replaced by reinforcements of different types (spheres, nanotubes, etc.); rather, the reinforcements occupy the porous part of the metallic matrix generated by this phase. These types of materials are used in structural, filtration, and energy absorption applications, among others.

Within the most used materials for the development of syntactic foams are different Aluminum alloys, since it is one the most abundant metals in the Earth's crust, it is a light metal, it has a low melting point and good mechanical characteristics. Therefore, it is one of the materials with the highest demand in the industry; in addition, it is easy to alloy it with other elements.

In this research, a representative model of an AlSi12 specimen with spherical iron reinforcements is studied numerically using computational Finite Element Methods (FEM). The objective of this investigation is to obtain a clear and approximate result for the deformation behavior of this syntactic foam.

Through the development of these geometries simulating the compressive effect of a hydraulic press acting on the faces of a specimen, it is desired to compare the effect caused by the spherical reinforcements within the metallic matrix in its elasticity module. In order to obtain a comparative approximation between a metallic foam and a metallic foam with spherical reinforcements. Moreover, it is desired to select an appropriate value in the solid dimensions to rehearse since it is estimated a possible stability in Young's modulus when designing the geometry according to its representative length with the spherical reinforcement diameter, that is, finding the RVE (Representative Volume Element) in which the solid does not present high variation in its elastic modulus, due to there exists a volume portion capable of contain the greatest information on the mechanical properties of the solid to be tested.

The development of this study seeks to propose an alternative to determine the appropriate structure of a syntactic foam, which optimizes its behavior in relation to the expected results by the Young's modulus, the intended use, and reduce possible costs used in its development and experimental use.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
ANTECEDENTES.....	4
3.1 Aluminio	4
3.1.1 Importancia Industrial	4
3.1.2 Aleaciones	4
3.1.3 Propiedades mecánicas del aluminio.....	5
3.2 Ensayos	6
3.2.1 Prueba de tracción	6
3.2.2 Prueba de compresión	6
3.3 Curva de esfuerzo y deformación.....	7
3.3.1 Esfuerzo v/s deformación del aluminio.....	8
3.4 Módulo de Young.....	9
3.5 Materiales celulares.....	9
3.6 Espumas de celda abierta y cerrada.....	10
3.6.1 Estructura	12
3.7 Espumas metálicas	13
3.7.1 Propiedades	13
3.7.2 Comportamiento mecánico mediante compresión	15
3.7.3 Procesos de fabricación.....	16
3.8 Espumas sintácticas de matriz metálicas (MMSF's).....	23
3.8.1 Esferas huecas	24
3.8.2 Microestructura	26
3.8.3 Propiedades mecánicas.....	27
3.8.4 Módulo de Young.....	29
3.9 Aplicaciones.....	30
3.10 Espumas de aluminio	32
MARCO TEÓRICO	35

4.1	Método de elementos discretos	35
4.1.1	Ecuaciones de movimiento.....	35
4.1.2	Fuerzas de contacto	35
4.2	Teoría de elasticidad.....	36
4.2.1	Relación esfuerzo-deformación.....	36
4.3	Método de elementos finitos	37
4.4	Errores de convergencia	38
4.4.1	Convergencia.....	38
4.4.2	Forma del elemento	39
4.4.2.1	Calidad del elemento	40
4.4.2.2	Relación de aspecto	41
4.4.2.3	Relación jacobiana	42
4.4.2.4	Asimetría	44
4.4.2.5	Calidad Ortogonal	44
4.5	Homogeneización y RVE.....	45
4.5.1	Principios de la homogeneización.....	45
4.5.2	Concepto de volumen representativo (RVE).....	46
4.5.3	Análisis de elementos finitos sobre un RVE	48
4.5.3.1	Ensayo de compresión uniaxial	49
METODOLOGÍA		51
5.1	Simulación.....	52
5.2	Geometrías	55
5.3	RVE.....	57
5.4	Propiedades del material	60
5.5	Generación de mallas	61
5.5.1	Probeta.....	61
5.5.2	Esferas	62
5.6	Condiciones de contorno.....	63
5.7	Cálculo del módulo de Young.....	66
RESULTADOS.....		68
CONCLUSIONES		80
ANEXOS.....		84
7.1	Mallado	84

7.1.1	POROSAS.....	84
7.1.2	REFORZADAS.....	89
7.2	Resultados de las simulaciones	94
7.2.1	Probetas porosas.....	94
7.2.2	Probetas reforzadas	96
BIBLIOGRAFÍA.....		99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de esfuerzo-deformación de materiales ensayados que obedecen la ley de Hooke, en donde se aprecia que, en el rango elástico, la curva es inversa entre tensión y compresión [8].	7
Figura 2. La curva de esfuerzo v/s deformación de un material dúctil, muestra un comportamiento plástico lineal a medida que aumenta el esfuerzo, seguido de esto, se presenta una zona de deformación plástica homogénea.	8
Figura 3. Gráfico de esfuerzo – deformación del aluminio puro y el aluminio con recubrimiento. [9].	9
Figura 4. La micrografía muestra la estructura de materiales celulares naturales: a) corcho, b) balsa, c) esponja, d) huesos [10].	10
Figura 5. Diferentes estructuras celulares: (a) forma de panal, (b) espuma de celda abierta y (c) espuma de celda cerrada [11].	10
Figura 6. Espuma de aluminio de poro cerrado.	11
Figura 7. Espuma de aluminio de poro abierto fabricada en molde de yeso por infiltración de aluminio fundido en una espuma polimérica [6].	11
Figura 8. Las micrografías muestran diversas estructuras hechas por el hombre de materiales celulares: a) panal de abeja en caucho de silicona de caucho, b) espuma flexible de celda abierta hecha de poliuretano, c) espuma flexible de polietileno de celda cerrada [10].	12
Figura 9. Microestructura celular de una espuma de aluminio (AA 6061) aleado de celda cerrada [14].	13
Figura 10. Rangos disponibles para diversas propiedades ingenieriles de espumas porosas [10].	14
Figura 11. Curva esquemática de esfuerzo-deformación en compresión de una espuma metálica [15].	16
Figura 12. Curva esfuerzo deformación para materiales con distinto a) tamaño, b) densidad [16].	16
Figura 13. La producción de espuma de aluminio por la incorporación de una fase volátil. Se funde el metal bajo presión, y al bajar la presión bruscamente se produce la espumación [6].	18
Figura 14. Método de inyección de gas fundido ("Cymat & hydro Process").	19
Figura 15. Representación esquemática del proceso ALPORAS1 para la producción de una espuma [18].	20
Figura 16. Aparato de Gasar [18].	21

Figura 17.	Estructura esquemática de la unidad de infiltración [30].	22
Figura 18.	Proceso de fabricación Duocel [35].	23
Figura 19.	Microestructura de una espuma sintáctica con presencia de refuerzos esféricos [43].	24
Figura 20.	a) Ensayo de compresión típico de una esfera hueca y su b) gráfico de fuerza-desplazamiento [46].	25
Figura 21.	Micrografía óptica de micro balones de vidrio [47].	25
Figura 22.	Imagen por medio de rayos X de una espuma de $AlSi_{12}$ con refuerzos de esferas cerámicas huecas de CHS-2.4. En donde se aprecia la asociación existente entre ambos medios [46].	26
Figura 23.	a) Cenósfera de ceniza volátil sobre un sustrato. b) Estructura imperfecta y representación de defectos en las partículas [43].	26
Figura 24.	Microestructura de una espuma sintáctica [48].	27
Figura 25.	a) $Al_{99.5-11-AC}$ and b) $AlSi_9MgMn-11-AC$, ejemplos antes del ensayo de compresión y c) $Al_{99.5-11-AC}$, d) $AlSi_9MgMn-11-AC$, luego del test de compresión detenido a los 0.5 de tensión ingenieril [55].	28
Figura 26.	Curva típica para matrices sintácticas de sus propiedades características [56].	29
Figura 27.	Módulo de Young relativo según la porosidad para una MMSF con matriz Epoxi y esferas a) K15 y b) K46 [62].	30
Figura 28.	Principales campos de aplicación de las espumas metálicas estructurales [5].	31
Figura 29.	Sección transversal de un aglomerado de una espuma de aluminio antes y después de una prueba SHPB ("Split Hopkinson pressure bar test") [67].	33
Figura 30.	Descomposición de las fuerzas de contacto en sus componentes normal y tangencial para 2 partículas en contacto.	36
Figura 31.	Modelo de la interfaz de contacto.	36
Figura 32.	La aplicación de una fuerza sobre una chapa metálica, a) caso real, b) representación mediante MEF [73].	38
Figura 33.	Inestabilidad por falta de restricciones [74].	39
Figura 34.	Formas de celdas en una malla.	41
Figura 35.	Relación de aspecto para un triángulo.	42
Figura 36.	Relación de aspecto de un elemento finito.	42

Figura 37.	Sistema de coordenadas locales (ζ, ξ, η) y sistema global de coordenadas cartesianas (x, y, z) [78].	42
Figura 38.	Vectores para el cálculo de calidad ortogonal de la malla	45
Figura 39.	a) Varias células microestructurales de diferentes tamaños. b) Convergencia de las propiedades aparentes a los valores efectivos con el aumento del tamaño de la celda microestructural para diferentes tipos de condiciones de contorno [84].	47
Figura 40.	Representación de una microestructura periódica de un material compuesto. El RVE posee una distribución aleatoria de sus elementos.	48
Figura 41.	Dimensiones sugeridas para probetas cilíndricas.	51
Figura 42.	Ventana de Proyectos de "Ansys Workbench".	53
Figura 43.	Ventana "Engineering Data" para edición de propiedades y configuración de materiales	53
Figura 44.	Pestaña "New DesignModeler Geometry" crear o cargar una nueva geometria.	54
Figura 45.	Diagrama de procedimientos para efectuar una simulación mediante "Ansys Workbench".	55
Figura 46.	Representación de espuma porosa (izquierda) y espuma sintactica (imagen derecha, con refuerzos esféricos representadas con colores).	56
Figura 47.	La espuma porosa a), posee una proporción de RVE 3, de mismo modo las geometrías b) con un RV4, c) RVE 5,d) RVE 6 y e) RVE 7 respectivamente.	59
Figura 48.	La espuma sintactica a), posee una proporción de RVE 3, de mismo modo las geometrías b) con un RV4, c) RVE 5,d) RVE 6 y e) RVE 7 respectivamente.	60
Figura 49.	Configuración principal utilizada para la generación de malla.	62
Figura 50.	Método empleado para la generación de malla de los refuerzos esféricos.	63
Figura 51.	Comparación entre el mallado utilizado en el modelo MEF para a) la matriz y para b) las esferas huecas.	63
Figura 52.	Condición de desplazamiento en la cara superior.	64
Figura 53.	Restricciones utilizadas para la cara superior.	64
Figura 54.	Condición de desplazamiento remoto en la cara inferior.	65
Figura 55.	Restricciones aplicadas en la cara inferior.	66
Figura 56.	Selección de la condición de borde para la fuerza de reacción.	66

Figura 57.	Dirección de la deformación aplicada a a) la probeta porosa y b) la probeta con refuerzos esféricos.....	68
Figura 58.	Gráfico comparativo Modulo de Young v/s RVE para visibilizar tendencia comparativa entre la matriz porosa y con refuerzos estudiada.....	73
Figura 59.	Gráfico representativo de diferencia entre Módulos de Young de espumas porosas y reforzadas para cada RVE.	74
Figura 60.	Distribución de esfuerzos en una espuma porosa RVE 7 (seccionada).....	75
Figura 61.	Distribución de esfuerzos en una espuma sintáctica RVE 7 (seccionada).	76
Figura 62.	Zonas que presentan mayor concentración de esfuerzos para a) una probeta porosa y b) una reforzada.....	76
Figura 63.	Distribución de la deformación total en una espuma sintactica a), que posee una proporción de RVE 3, de mismo modo las geometrías b) con un RV4, c) RVE 5,d) RVE 6 y e) RVE 7 respectivamente.	78
Figura 64.	Distribución de la deformación total en una espuma porosa a), que posee una proporción de RVE 3, de mismo modo las geometrías b) con un RV4, c) RVE 5,d) RVE 6 y e) RVE 7 respectivamente.	79
Figura 65.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 3.....	84
Figura 66.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 4.....	85
Figura 67.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 5.....	86
Figura 68.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 6.....	87
Figura 69.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 7.....	88
Figura 70.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 3.	89
Figura 71.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 4.	90
Figura 72.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 5.	91
Figura 73.	Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 6.	92

Figura 74. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 7. 93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de series para aleaciones de aluminio de fundición.....	4
Tabla 2.	Tabla de valores C para cada elemento.	41
Tabla 3.	Calidad de malla según la variable de asimetría (S).....	44
Tabla 4.	Propiedades de esferas.	56
Tabla 5.	a) Tabla representativa de Alturas y Diámetros que posee cada probeta con presencia de poros y con b) refuerzos esféricos.....	57
Tabla 6.	Relación dimensional para los distintos RVE estudiados.	57
Tabla 7.	Propiedades mecánicas principales para el AlSi12.	61
Tabla 8.	Propiedades mecánicas principales para el Fe.....	61
Tabla 9.	Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 3.	69
Tabla 10.	Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 4.	69
Tabla 11.	Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 5.	69
Tabla 12.	Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 6.	70
Tabla 13.	Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 7.	70
Tabla 14.	Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 3.....	70
Tabla 15.	Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 4.....	71
Tabla 16.	Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 5.....	71
Tabla 17.	Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 6.....	71
Tabla 18.	Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 7.....	72
Tabla 19.	Valor promedio estándar obtenido para cada RVE de las matrices porosas de AlSi12.	72

Tabla 20. Valor promedio estándar obtenido para cada RVE de las matrices sintácticas de AlSi12 con refuerzos esféricos de Fe.	72
Tabla 21. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 3.	84
Tabla 22. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 4.	85
Tabla 23. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 5.	86
Tabla 24. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 6.	87
Tabla 25. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 7.	88
Tabla 26. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 3.	89
Tabla 27. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 4.	90
Tabla 28. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 5.	91
Tabla 29. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 6.	92
Tabla 30. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 7.	93
Tabla 31. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 2.	94
Tabla 32. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 4.	94
Tabla 33. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 5.	95
Tabla 34. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 6.	95
Tabla 35. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 7.	96
Tabla 36. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 3.	96

Tabla 37. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 4.....	97
Tabla 38. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 5.....	97
Tabla 39. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 6.....	98
Tabla 40. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 7.....	98

GLOSARIO

- A: Área transversal de la probeta
- E: Modulo de Young
- F: Fuerza de reacción en compresión
- Gpa: Giga Pascal
- 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
- ν : Coeficiente de Poisson
- ΔL : Variación del largo de la probeta en compresión
- ϵ : Deformación
- σ : esfuerzo
- ρ : densidad relativa
- °C: Grados Celsius
- Q: Factor de forma
- R: Relación de aspecto
- Fr: Fuerza de reacción
- p: Porosidad
- I: Momento de inercia

INTRODUCCIÓN

Las espumas metálicas corresponden a cuerpos sólidos, que presentan huecos o poros de manera distribuida en su interior y que pueden ser generados por distintos métodos de fabricación o incluso se pueden presentar en el material producto de un tratamiento de alteración física o por las propiedades que este pueda poseer. Estos espacios generados en el material lo dotan de particulares características y ventajas por su baja densidad como también otorgarle un bajo peso específico, aumentar su ductilidad, aumentar la capacidad de absorber energía, variar sus propiedades mecánicas, térmicas y acústicas [1, 2, 3].

Las espumas sintácticas de matriz metálica por sus siglas en inglés "MMSF's" a diferencia de una espuma metálica convencional de poros interconectados, se componen de esferas huecas de un material a especificar distribuidas dentro del volumen de la matriz. Dada la presencia de esta segunda fase dentro de la matriz, la geometría y junto a las propiedades de las esferas, le pueden otorgar en algunos casos una mejora en las propiedades mecánicas, como un aumento en la resistencia compresiva e hidrostática y su módulo de Young.

La incorporación de esferas huecas dentro del material de la matriz se debe a que, en las paredes de las células cerradas se producen defectos que reducen sus propiedades mecánicas en comparación con las de celda abierta, es por eso que añadir esferas elimina en cierto grado este problema y mejora el rendimiento del material de la espuma conduciendo a una baja en su densidad, en algunos casos sin disminuir sus propiedades mecánicas. [4].

Estas espumas pueden ser fabricadas de diversas formas (adición de gases, agentes espumantes, infiltración por presión, etc.), dependiendo del estado inicial del metal, puede ser por vía sólida, líquida o deposición [5].

Las técnicas más usadas son la infiltración por presión, fundición por agitación y la pulvimetalurgia, en donde la idea general es mezclar el material de la matriz junto con las esferas de manera controlada, para así obtener el porcentaje de porosidad deseado. La solución generada posee una distribución aleatoria de estos refuerzos que ocuparan el lugar de los poros, por lo que es importante tener en cuenta esto para efectos de cálculos y de análisis que se quieran realizar.

El campo de aplicación de estas espumas metálicas es diverso y consta de aplicaciones tales, como en estructuras livianas, filtros, en componentes de automóviles, intercambiadores de calor, implantes óseos y elementos que requieran de una buena absorción de impacto [6].

En la actualidad, ensayar materiales para obtener propiedades puede resultar bastante costoso, además de que se debe emplear bastante tiempo para elaborar un buen ensayo y de disponer de un laboratorio equipado, es por eso que el uso de herramientas computacionales y softwares para elaborar simulaciones generan una gran ventaja en el desarrollo experimental, para así poder estimar y obtener resultados de las propiedades de un material de manera poco costosa y rápida

En este estudio se desea obtener las propiedades mecánicas de una "MMSF's" de AlSi12 reforzada con esferas huecas de Fe expuesta a compresión mediante simulaciones numéricas, con el método de elementos finitos (MEF) aplicadas a través de un software. Se ensayarán diversos casos de RVE (elemento de volumen representativo) para compararlos entre sí y obtener un resultado preciso acerca de las propiedades del material base y como varía al ser dotado de refuerzos.

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Las espumas constituidas por matriz y microesferas huecas metálicas se denominan espumas sintácticas de matriz metálica (ESMM). Estos materiales presentan mejoras significativas en comparación a las espumas metálicas convencionales, gracias a que presentan menor cantidad de defectos estructurales, ya que las microesferas que se utilizan para formar los poros también actúan como refuerzo de la matriz, asimismo, estas microesferas tienen tamaño, forma y espesor uniforme, con lo que existe un mayor control sobre la cantidad y morfología de los poros encapsulados en la matriz.

El objetivo general de esta memoria de título es estudiar numéricamente, mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), el efecto de las microesferas huecas reforzantes de Fe (Globomet, 97% de Fe), sobre las propiedades mecánicas de espumas metálicas sintácticas de matriz AlSi12 (Aluminio 4044) fabricadas mediante el proceso de infiltración. De esta manera, este trabajo busca aportar con una herramienta que permita establecer, predecir y ajustar los parámetros de fabricación que dominan el comportamiento mecánico de estas ESMM en términos de sus propiedades mecánicas, logrando así reducir tiempos y costos asociados a su estudio y desarrollo experimental.

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

1. Estudiar los parámetros relevantes en el proceso de fabricación de espumas metálicas de AlSi12 mediante la técnica de infiltración.
2. Desarrollar modelos 3D de las espumas porosas sin refuerzos y espumas reforzadas con esferas huecas de Fe.
3. Caracterizar numéricamente las espumas en estudio utilizando un software comercial para análisis por elementos finitos como herramienta de cálculo.
4. Analizar los resultados numéricos y gráficos obtenidos mediante el software, luego de la realización de ensayos de compresión efectuados a la espuma metálica, para la obtención del módulo de Young, usando distintos Elementos de Volumen Representativos (RVE).

ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Aluminio

Elemento químico cuyo símbolo es Al y número atómico 13. Es un metal no ferromagnético y el tercero más abundante en la corteza terrestre formando un 8% de esta. Posee propiedades que lo hacen ser bastante útil en ingeniería de materiales, debido a su baja densidad ($2812,5 \text{ [kg/m}^3\text{]}$), además de tener una alta conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión, es fácil de mecanizar, además de tener bajo costo.

El aluminio es uno de los metales con más uso en la modernidad y para el ser humano le es de utilidad para satisfacer grandes necesidades propias del ser, como tecnológicas en el desarrollo industrial.

3.1.1 Importancia Industrial

Al ser un material blando y maleable, es que se usa mucho en la industria, tanto en cantidad como en diversidad de usos, siendo polivalente, usado tanto de forma pura, aleado con otros materiales como en compuestos no metálicos. Su relación existente entre su peso y resistencia le da un rol clave dentro de la industria mayormente automotriz y aeronáutica, en la fabricación de tubos, recipientes y entre otros aparatos.

3.1.2 Aleaciones

El aluminio puro no se encuentra en la naturaleza y suele estar en combinación con otros elementos y minerales, es un metal demasiado activo como para encontrarse libre, siendo los principales la bauxita y la criolita. En estado puro es un material muy blando, por lo que se alea para mejorar sus propiedades mecánicas principalmente con magnesio, cobre, zinc y silicio.

Sus aleaciones para forja se clasifican en series, desde la 1000 a la 8000 mientras que las de fundición poseen una nomenclatura de 3 dígitos (tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de series para aleaciones de aluminio de fundición.

Aleaciones de Aluminio para fundición	
Aluminio Puro (99 % de Al)	1xx.x
Aluminio -Cobre (Duraluminio Al-Cu)	2xx.x
Aluminio- Silicio-Cobre (Si-Cu y/o Mg)	3xx.x
Aluminio-Silicio (Al-Si)	4xx.x
Aluminio-Magnesio (Al-Mg)	5xx.x
Aluminio-Cinc (Al-Zn)	7xx.x
Aluminio-Estaño (Al-Sn)	8xx.x
Aluminio-Otros Elementos (Al-X)	9xx.x
Aluminio-Serie no Usuales	6xx.x

3.1.3 Propiedades mecánicas del aluminio

A temperatura ambiente, la resistencia a la tracción (150 - 450 MPa), el límite elástico (100 - 300 MPa) y el módulo de elasticidad (69 - 73 GPa) son moderados, y las durezas algo bajas, en general no adecuadas para soportar grandes presiones superficiales; la resistencia a la fatiga es aceptable y la resiliencia es normalmente elevada excepto para los aluminios más resistentes (Al-Cu y Al-Zn). El comportamiento a temperaturas elevadas es escaso: a partir de $100 \div 150$ °C según las aleaciones, la fluencia comienza a manifestarse de forma acusada y disminuyen considerablemente las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, límite elástico y dureza) y, a partir de 350 °C la resistencia sólo se mantiene en valores residuales; en el intervalo $200 \div 300$ °C, el mejor comportamiento mecánico se halla en los grupos Al-Cu y Al-Mg. En cambio, las propiedades a bajas temperaturas son excelentes, la resistencia aumenta y la resiliencia, el límite elástico y el alargamiento se mantienen hasta temperaturas operativas de -195 °C [7]. Para aleaciones con silicio, su porcentaje varía entre el 5 % al 20%, al igual que el Cu este dota de dureza al aluminio, aumentando su resistencia y su fluidez en la colada del material teniendo una temperatura de fusión aproximada de entre 550 y 650°C, además proporciona una excelente resistencia a la corrosión. Las aleaciones de este tipo son muy dúctiles siendo su principal aleación para la fundición de piezas complejas, pero con buenas cualidades de moldeo.

3.2 Ensayos Mecánicos

3.2.1 Prueba de tracción

Consiste en someter una probeta normalizada de cierto material a un esfuerzo axial de tracción en crecimiento. Este ensayo tiene por objetivo medir la resistencia de un material expuesto a una carga P , estática o aplicada de forma gradual. De este ensayo se puede obtener datos como el alargamiento ΔL , módulo de elasticidad, límites de fluencia, elástico y de proporcionalidad. El material a ensayar durante la prueba de tracción se puede comportar de manera frágil o dúctil, como también más plástico o elástico. Las lecturas registradas a partir de este ensayo permiten elaborar el diagrama de esfuerzo-deformación.

3.2.2 Prueba de compresión

El ensayo de compresión a diferencia del de tracción, la dirección del esfuerzo es en el sentido contrario (figura 1), en dirección a la sección de la probeta a modo de comprimirla, la finalidad de este ensayo es determinar las propiedades de un material o bien el comportamiento de un sistema bajo a esta sollicitación.

Para aquellos materiales que obedecen la Ley de Hooke, el diagrama de esfuerzo-deformación se extiende de manera inversa en el rango elástico, esto se debe a que, en tensión, el esfuerzo y la deformación son positivas mientras que en compresión son negativas, además de que la deformación elástica en compresión por lo general es mayor a la de tensión (figura 1).

El método de compresión estándar de metales se realiza en una habitación a temperatura ambiente remitiéndose a la norma *ASTM E9 2009*. que indica que el espécimen empleado en la prueba de compresión generalmente es un cilindro o prismas recto liso con dimensiones de acuerdo a la norma ASTM [8].

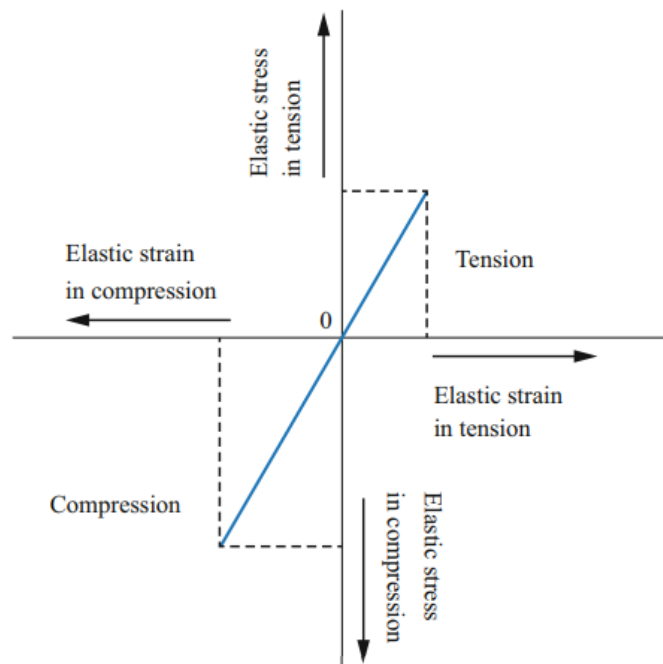


Figura 1. Diagrama de esfuerzo-deformación de materiales ensayados que obedecen la ley de Hooke, en donde se aprecia que, en el rango elástico, la curva es inversa entre tensión y compresión [8].

3.3 Curva de esfuerzo y deformación

Un material dúctil es aquel material que puede deformarse hasta tal punto en que no llegara a romperse bajo la acción de una fuerza que actúe sobre este, por lo general son materiales del tipo metálicos. Los materiales dúctiles toleran métodos de fabricación o manejo por deformación plástica soportando una gran cantidad de uso y exposición de fuerzas sobre ellos. Por lo general se requiere de una gran fuerza para lograr que un material de este tipo se fracture (figura 2), debido a que sus átomos son capaces de acomodarse y adecuarse unos sobre otros, estirando el material sin romperse.

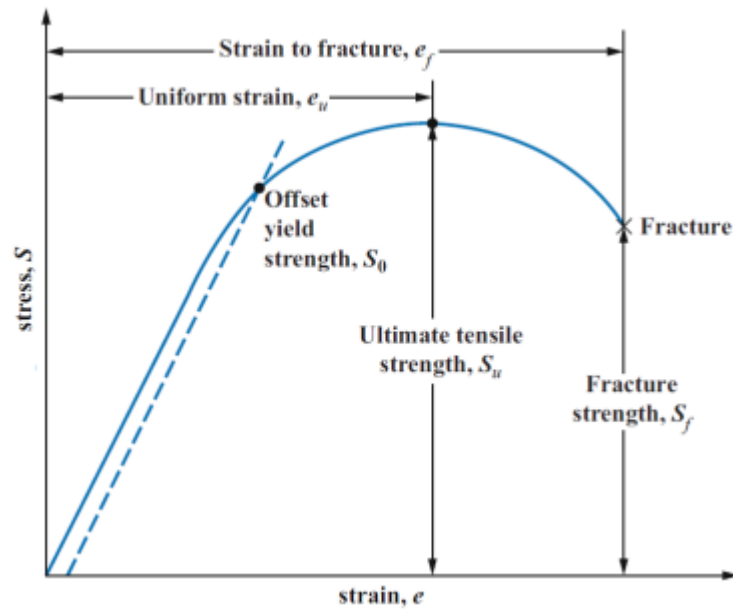


Figura 2. La curva de esfuerzo v/s deformación de un material dúctil, muestra un comportamiento plástico lineal a medida que aumenta el esfuerzo, seguido de esto, se presenta una zona de deformación plástica homogénea.

Las propiedades elásticas lineales que se pueden determinar con esta curva son el límite elástico, el módulo de elasticidad. Por lo general el ensayo para obtener dichos datos es por medio de tracción estática [8].

3.3.1 Esfuerzo v/s deformación del aluminio

El aluminio es un material dúctil y posee una curva de esfuerzo-deformación como los aceros que poseen esta cualidad, para mejorar sus propiedades y soportar mayores cargas, este se combina con otros elementos. En un inicio la curva de esfuerzo v/s deformación tiene un comportamiento lineal hasta un punto en que posee una transición gradual de una deformación plástica-elástica y homogénea, en este punto su deformación es irreversible, mientras que, si se aumenta más la carga, el material se fractura y colapsa.

El diagrama de esfuerzo-deformación variará de acuerdo con el tipo de aleación de aluminio a ensayar, el grado de pureza, su temperatura, el tipo recubrimiento como se presenta en la (figura 3), etc.

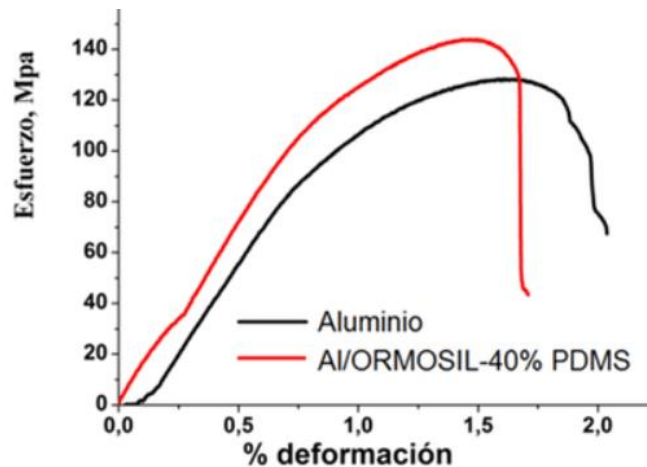


Figura 3. Gráfico de esfuerzo – deformación del aluminio puro y el aluminio con recubrimiento. [9].

3.4 Módulo de Young

Es un parámetro que caracteriza a aquellos materiales que tienen un comportamiento elástico, es decir, que obedecen la ley de Hooke. El módulo de Young (E), corresponde a la pendiente en un gráfico de esfuerzo (σ) y deformación (ε).

3.5 Materiales celulares

Los materiales en la naturaleza en ocasiones exhiben geometrías y estructuras particulares que son importantes de estudiar y entender su composición para que el ser humano pueda usarlos y adecuarlos a sus necesidades de diversas maneras. Un sólido celular se compone de una estructura única que les permite tener propiedades como una densidad muy baja pese a su volumen, es por eso por lo que se desea su integración en diversos aspectos de la ingeniería e incluso la vida cotidiana.

Una característica de estos materiales celulares es que en su interior poseen una red de interconexiones de células que llenan este espacio, optimizando la resistencia a la carga y con una baja densidad. Un ejemplo cotidiano de estos materiales son la madera, el corcho, los panales artificiales y espumas (figura 4).

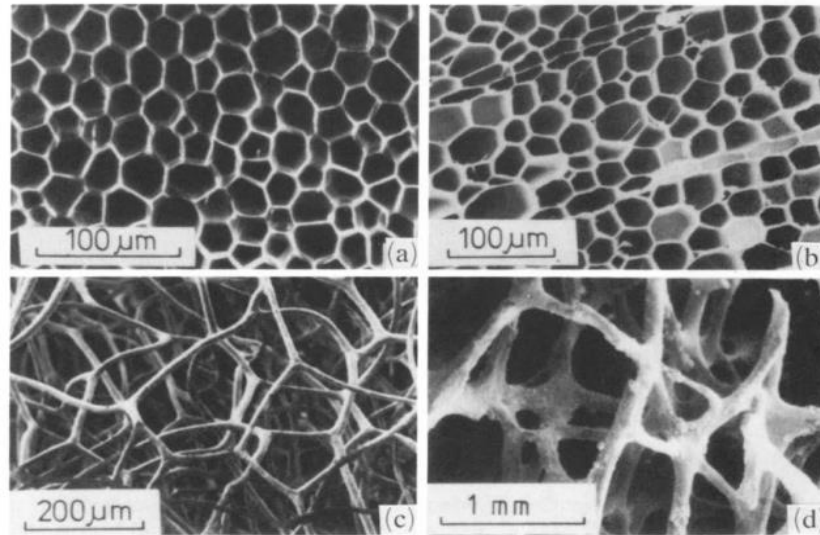


Figura 4. La micrografía muestra la estructura de materiales celulares naturales: a) corcho, b) balsa, c) esponja, d) huesos [10].

Los materiales celulares se componen de dos fases, una continua sólida y otra gaseosa continua o discontinua, además se pueden clasificar de acuerdo con su morfología y topología (figura 5).

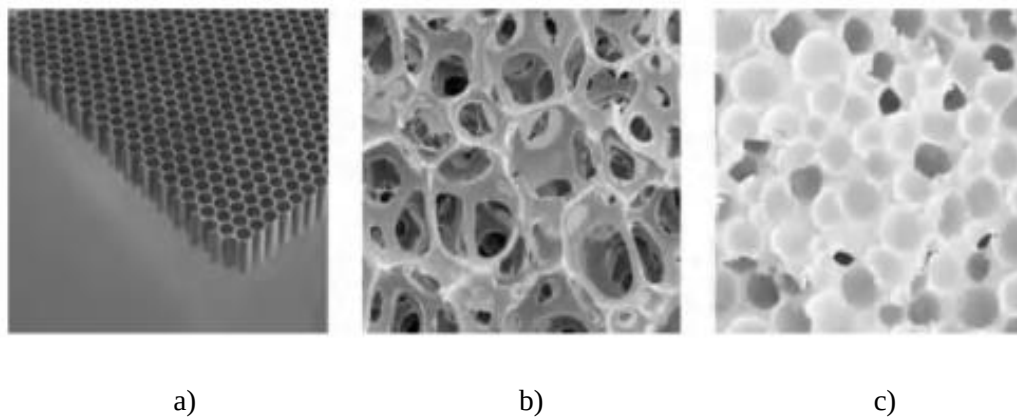


Figura 5. Diferentes estructuras celulares: (a) forma de panal, (b) espuma de celda abierta y (c) espuma de celda cerrada [11].

3.6 Espumas de celda abierta y cerrada

En las espumas de celda cerrada (figura 6), el gas presente en la estructura se mantiene dentro de esta, para así generar una fase sólida continua y una gaseosa discontinua. Sus poros no están interconectados entre sí y sus paredes celulares son de mayor espesor. En comparación a las de celda abierta, su densidad es superior al igual que sus propiedades mecánicas.

Las espumas de celda abierta (figura 7) se caracterizan por tener una fase de gas continua y dispersa en la fase sólida, esto se traduce en una interconexión de poros que les confiere una alta permeabilidad permitiéndoles su uso en intercambiadores de calor, filtros y también en prótesis óseas [12, 13]. Estas espumas también son las que más porosidad poseen, siendo controladas al variar la longitud y espesor de los ligamentos. Los ligamentos presentes en el sólido lo dotan de una baja rigidez estructural, son altamente deformables y fallan fácilmente a cargas por compresión, esto se produce por su sección transversal reducida y son susceptibles a sufrir pandeo.

En la práctica por lo general no se obtienen estructuras de celdas puramente abiertas o cerradas, sino que intermedias, es decir, con tendencia a abierta o cerrada, pero con un cierto porcentaje de la otra.

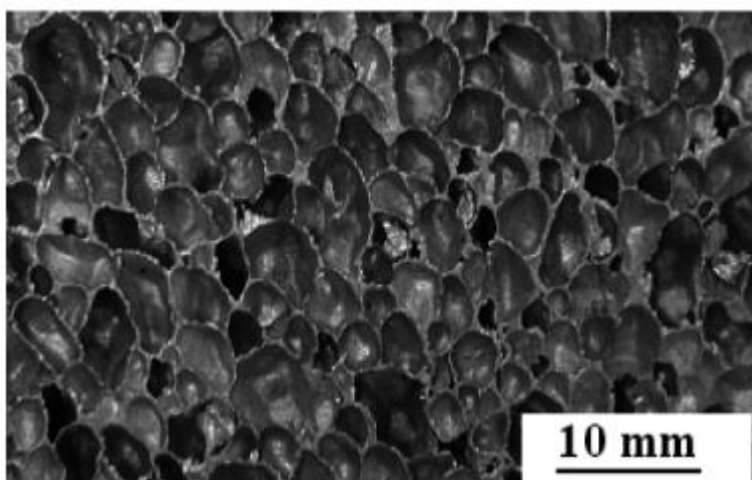


Figura 6. Espuma de aluminio de poro cerrado.

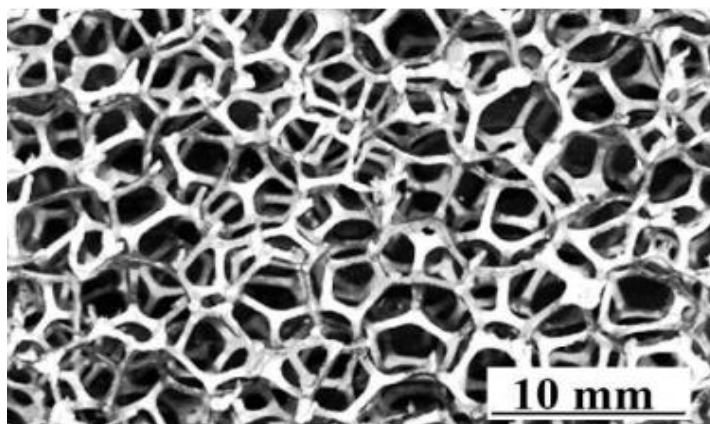


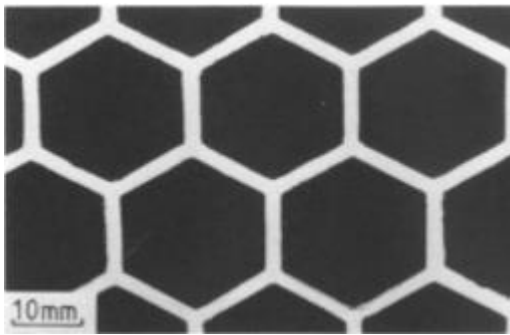
Figura 7. Espuma de aluminio de poro abierto fabricada en molde de yeso por infiltración de aluminio fundido en una espuma polimérica [6].

3.6.1 Estructura

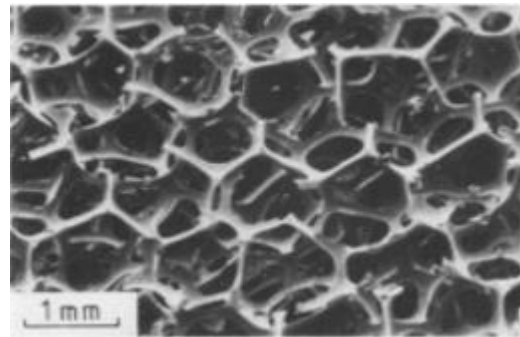
Los materiales celulares se pueden clasificar de acuerdo con la forma de su estructura.

Células bidimensionales: En este tipo, las paredes celulares poseen un patrón u orden común, en el caso de un panal, este posee celdas prismáticas paralelas que dan origen a una estructura bidimensional, en la mayoría de las celdas del tipo panal sus celdas tiene forma hexagonal, aunque también hay caso en donde se puede encontrar con celdas triangulares o rectangulares.

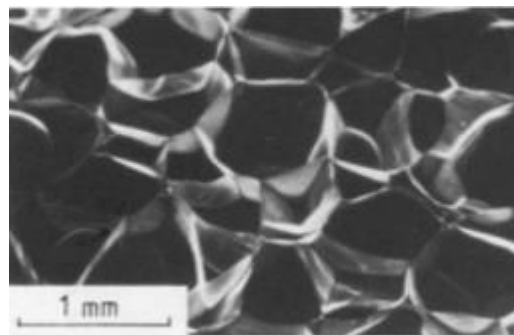
Células tridimensionales: La orientación de las paredes de este tipo de celdas es aleatoria espacialmente. Un material celular de este tipo puede poseer celdas poliédricas lo que da origen a una estructura tridimensional. Existe una distinción entre estas células, si las paredes celulares están cerradas entre sí, esta será de celda cerrada, pero si las células se interconectan entre sí, esta será de celda abierta.



a)



b)



c)

Figura 8. Las micrografías muestran diversas estructuras hechas por el hombre de materiales celulares: a) panal de abeja en caucho de silicona de caucho, b) espuma flexible de celda abierta hecha de poliuretano, c) espuma flexible de polietileno de celda cerrada [10].

3.7 Espumas metálicas

3.7.1 Propiedades

Las espumas metálicas tienen propiedades físicas y mecánicas bastante interesantes (una elevada rigidez con un peso específico bajo, buenas propiedades térmicas y acústicas, una gran resistencia mecánica y gran permeabilidad a los gases) y constituyen una nueva clase de material que hoy en día es tema de innumerables estudios para diversas aplicaciones. Se conforman de una estructura porosa compuesta de una matriz metálica sólida, con células de algún gas. La mayor parte en la estructura de una espuma está conformada por los poros generados tanto abiertos como cerrados. Dada sus buenas propiedades, es que son utilizadas en sistemas destinados a la absorción de impactos, intercambiadores de calor, aislantes térmicos y filtros.

Actualmente las espumas de aluminio son muy estudiadas, compitiendo con los materiales compuestos dado su bajo coste y otorgando grandes ventajas, pero en general, el mercado de espumas metálicas sigue siendo muy joven, lo que implica en un elevado coste para su producción y es por ello por lo que se estudian diversos materiales y métodos de fabricación.

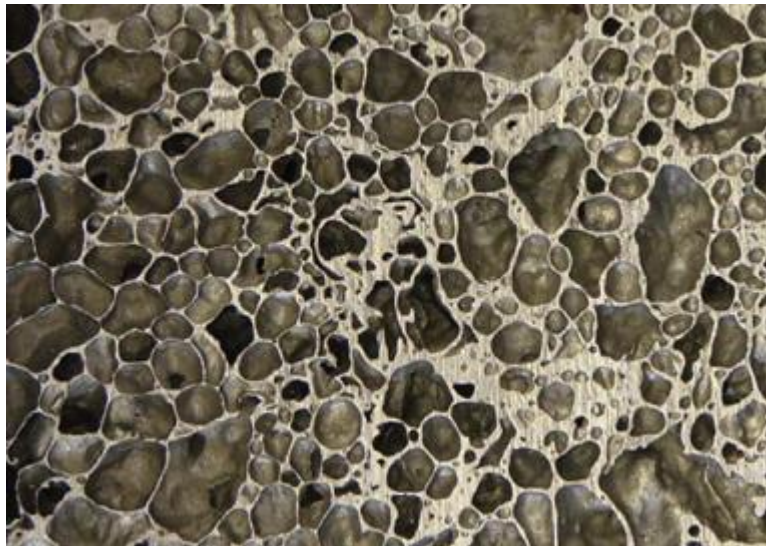


Figura 9. Microestructura celular de una espuma de aluminio (AA 6061) aleada de celda cerrada [14].

Las características de una espuma metálica dependen de los siguientes factores.

Porosidad: Se define porosidad como el volumen vacío encerrado en una espuma metálica y se calcula como el cociente entre el volumen de vacío y el volumen total de la muestra. Mientras mayor sea el volumen usado entre los poros, menor será la masa de la espuma.

Tamaño de poro: Corresponde al diámetro de una de las caras de un dodecaedro, utilizado para aproximar cada uno de los poros presentes en la espuma. Debido a que es difícil controlar el tamaño de estos, es que se usa un valor promedio estadístico de la muestra.

Densidad de poro: Corresponde a la cantidad de poros por pulgada contados de manera lineal.

Dichas propiedades hacen a las espumas, una alternativa bastante ventajosa en comparación a otros materiales.

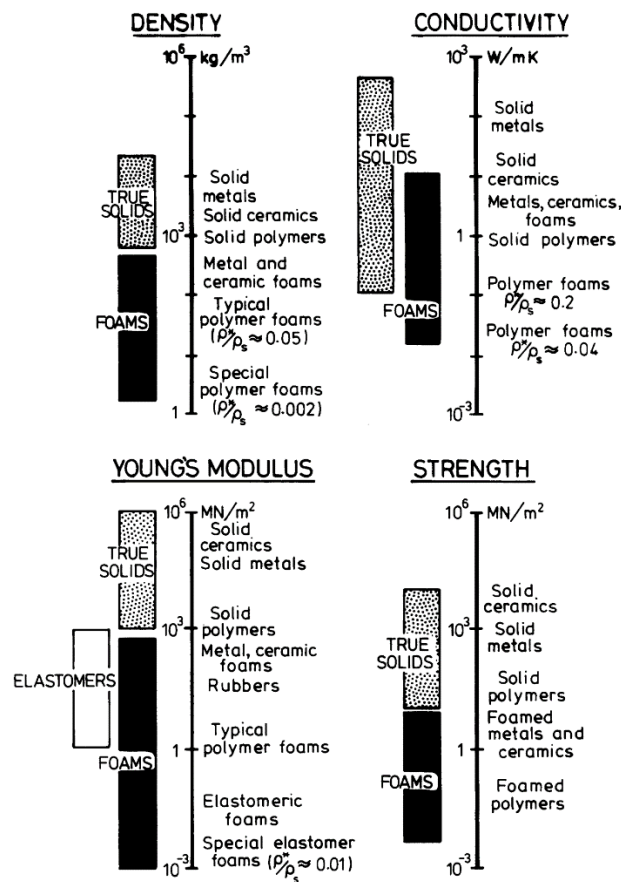


Figura 10. Rangos disponibles para diversas propiedades ingenieriles de espumas porosas [10].

Entre otras propiedades que tienen las espumas metálicas es su alta absorción de energía, propiedades térmicas y de transporte térmico bajas e inclusive propiedades de absorción acústica y de filtración.

Dada la presencia de una fase gaseosa dentro de la matriz, los hace relativamente livianos en comparación a los sólidos, lo que implica un reducido peso. La densidad relativa ρ_r define la cantidad de material usado (ρ_{espuma}) en relación con la de un sólido 100% denso ($\rho_{sólido}$).

$$\rho_r = \frac{\rho_{espuma}}{\rho_{sólido}} \quad (1)$$

La porosidad p se define como el cociente entre el volumen de gas presente (V_{gas}) y el Volumen del cuerpo sólido ($V_{sólido}$).

$$p = \frac{V_{gas}}{V_{sólido}} = 1 - \rho_r \quad (2)$$

Autores como Gibson y Ashby [3] presentan las propiedades P de un sólido celular con la densidad relativa ρ_r . Esto quiere decir que se puede obtener la relación aproximada de cualquier propiedad con la densidad relativa del sólido mediante una ley de escalado simple (ecuación 3) donde A y n son el coeficiente y el exponente, ambos obtenidos de manera empírica:

$$\frac{P_{espuma}}{P_{sólido}} = A * (\rho_r)^n \quad (3)$$

Para la creación de una espuma metálica con la posibilidad de controlar estrictamente los parámetros involucrados en su procesamiento verán condicionadas las propiedades resultantes a través de la densidad y estructura relativa. Es por aquello que las espumas metálicas se consideran materiales que pueden ser manejados y adaptados, esto quiere decir, pueden ser diseñados tanto en densidad como en su estructura para cumplir los requisitos solicitados.

3.7.2 Comportamiento mecánico mediante compresión

Para una espuma metálica, existen 3 regímenes de interés en su diagrama de esfuerzo-deformación (figura 11) al ser sometida a un ensayo de compresión. En una primera parte se presenta una zona donde la curva posee un comportamiento lineal, esta es debido a las deformaciones elásticas que se presentan en las celdas de la matriz, en esta parte la espuma es deformable y puede volver a su estado inicial siempre y cuando no se sobrepase su límite elástico. Pasado este punto la curva se vuelve aparentemente constante formando una especie de meseta, el cual corresponde a un colapso de las celdas debido a la carga ejercida sobre la matriz, en esta existe deformación plástica. Seguido de esta fase, comienza la fase de densificación, el cual corresponde a el colapso total de la estructura, en esta

etapa las caras opuestas del material a ensayar tienden a juntarse. La rigidez del material en esta etapa se asemeja a la del material base.

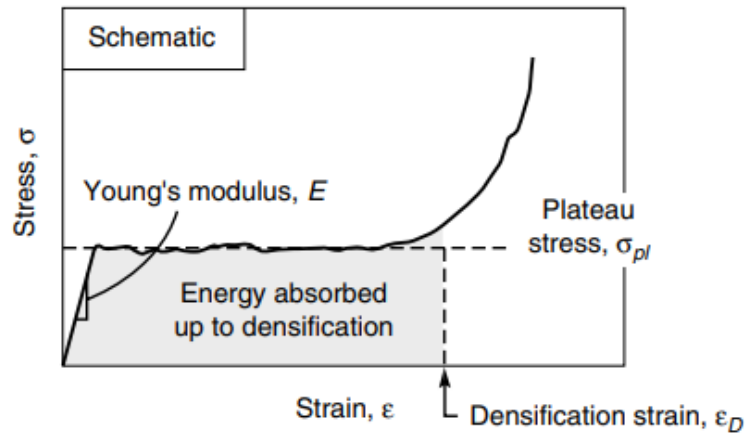


Figura 11. Curva esquemática de esfuerzo-deformación en compresión de una espuma metálica [15].

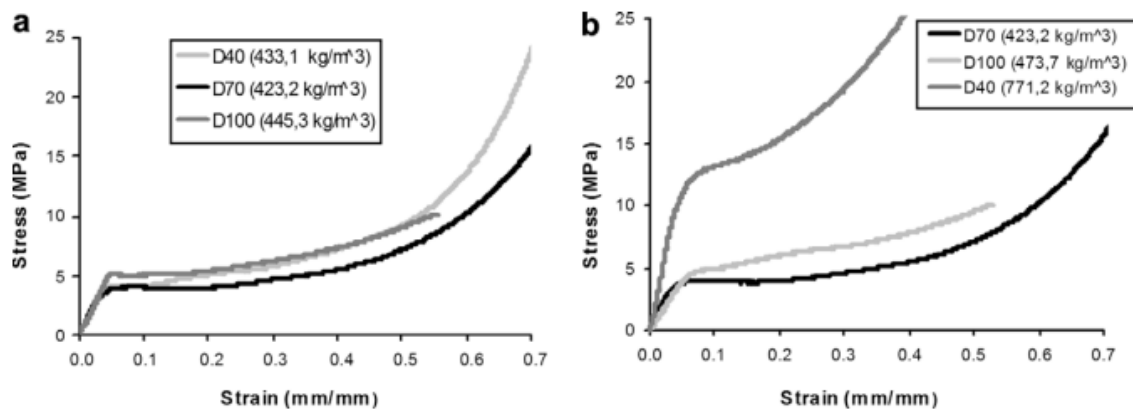


Figura 12. Curva esfuerzo deformación para materiales con distinto a) tamaño, b) densidad [16].

3.7.3 Procesos de fabricación

Los primeros ensayos para producir espumas metálicas datan del año 1920 [17], aunque algunos ensayos metalúrgicos son más antiguos respecto a su producción.

Dado el avance de la tecnología a manos de las grandes industrias, es que cada vez se solicitan nuevos materiales, de diferentes formas y composiciones, es por ello por lo que el desarrollo de espumas metálicas se ha profundizado cada vez más.

Existen diversos métodos de fabricación de espumas metálicas, y estos difieren en la naturaleza de la espuma, en la complejidad de procesamiento, el control que se pueda tener sobre sus parámetros. Los procesos de fabricación definen las propiedades que se obtendrán como su nivel de porosidad, su forma, escala y la uniformidad e interconexión de las regiones porosas.

Métodos de producción para espumas de celda cerrada

Vía metalurgia líquida también conocida como la ruta de fusión, la estructura celular se prepara mediante metalurgia líquida, sus ventajas son tanto económicas como continuas y simples, el poder derretir un metal, lo hace fácil y de bajo costo, ya que se pueden manejar en grandes cantidades, con buenas tolerancias y las impurezas se pueden eliminar de diversas formas como la adición de un fundente derretido o otras técnicas de purificación [18], para espumar el metal líquido, se puede llevar a cabo inyectando un gas directamente o mediante la adición de un agente soplador que a cierta temperatura se descompone, desprendiendo gases para generar la espuma. Uno de los mayores problemas es la rapidez con la que escapan del metal fundido las burbujas generadas por su baja densidad, es por eso que se busca, además, adicionar partículas refractarias que aumenten la masa fundida [18]. En general los agentes espumantes se tratan térmicamente de modo que retrasen su descomposición para así obtener espumas de mejor calidad.

También existe la ruta de polvo para la fabricación de espumas, pero pese a no ser popular es útil para el desarrollo de espumas metálicas de alta calidad pero que a su vez es bastante caro como lo es el método "Fraunhofer process" patentado [19, 20] por Fraunhofer-Institute in Bremen.

Algunos métodos usados para la creación de espumas metálicas de celda cerrada son:

a) Sistemas de aleación con una fase volátil

El sistema de aleación con una fase volátil (figura 13) fue desarrollado en 1948. Este involucra una expansión rápida de metal fundido a alta presión y temperatura en presencia de un metal volátil.

En primer lugar, se funde un metal en el interior de un vaso a presión con otro metal cuyo punto de fusión sea menor, al calentarse a una temperatura tal que el componente volátil se vaporice primero. La elevada presión hace que el metal ya fundido se sobresature de vapor. Seguido de eso, la presión escapa de forma repentina causando una rápida expansión de la fase volátil que está contenida en el metal fundido, produciendo una espuma que se enfría y solidifica con poros cerrados de diámetros

entre 1 a 3 mm. La velocidad de espumado de este proceso lo hace ser un sistema complejo al momento de obtener una estructura celular uniforme y también reproducible.

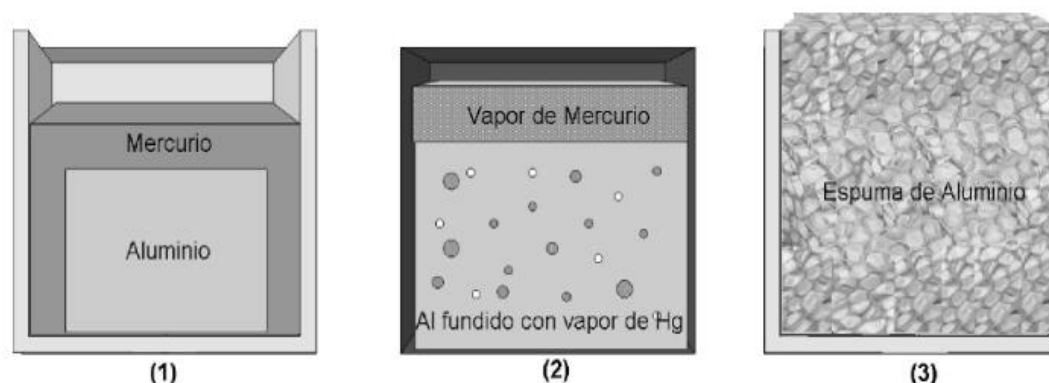


Figura 13. La producción de espuma de aluminio por la incorporación de una fase volátil. Se funde el metal bajo presión, y al bajar la presión bruscamente se produce la espumación [6].

Los metales volátiles que se suelen usar como el mercurio, cadmio, zinc, magnesio son muy peligrosos y a la temperatura que se maneja el proceso hace que se expandan de manera muy rápida. Existe una manera de evitar su uso, aplicando presión externa de hidrógeno y mezclando la masa fundida con amoníaco, controlando la presión externa para evitar que escape [21].

b) Adición directa de gas al metal (Cymat & hydro Process)

Es el método más usado y el más sencillo de realizar, este concepto de inyección de gas (figura 14) se vio por primera vez en el año 1991 en una patente de Ruch y Kirkevåg [22], pero en el año 1992 se desarrolló y patentó a manos de Jin et. al. ALCAN International Ltd., Canadá [18]. Por lo general este método se utiliza para el aluminio y aleaciones de este. El aluminio se funde con la adición de partículas (SiC, Alúmina, Titanio, Diboruro de Titanio, Circonio y partículas de Magnesio.) que constituyen aproximadamente al 10-20% de fracción de volumen para así aumentar la viscosidad del metal en estado líquido. La adición de estas partículas que tienen un tamaño medio entre 5 a 20 μm y un espesor de pared de 50 a 85 μm [23] es controlada especialmente para obtener una estructura sólida lo más homogénea posible, ya que la viscosidad depende de la morfología de la espuma resultante. El gas (Aire, Argón, Nitrógeno, CO₂) es inyectado en la masa fundida mientras el metal es agitado por unas hélices o por un método de vibración de manera que se generan burbujas finas y homogéneas de gas. Las burbujas tienden a subir rápidamente aglomerándose en la parte superior del metal, la cual se solidifica y se retiran las capas superiores en estado líquido mediante una cinta transportadora. Según Kenny, et.al. [24, 25] el tamaño medio de la celda es inversamente proporcional al grosor

medio de la pared celular. La densidad es controlable ajustando el flujo de gas y otros parámetros de la tobera [25].

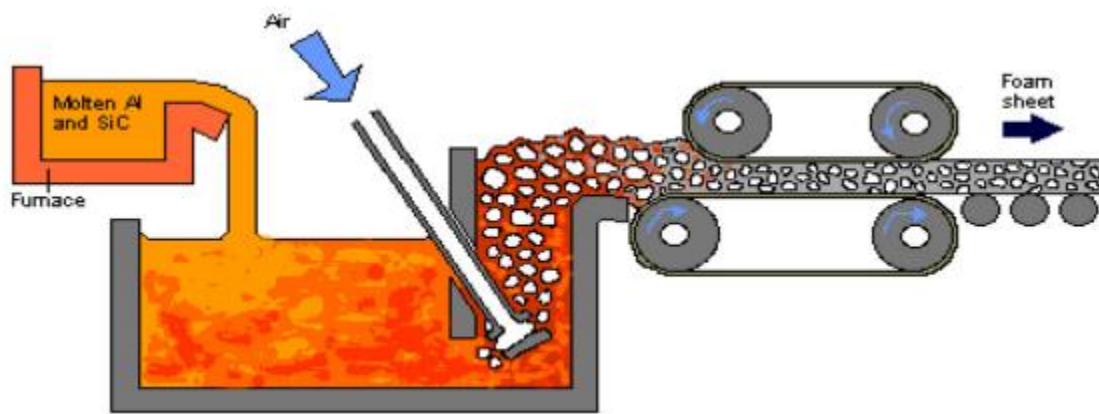


Figura 14. Método de inyección de gas fundido ("Cymat & hydro Process").

c) Adición directa de agente espumante a una masa fundida espesada (ALPORAS)

Este es un método instantáneo de producir espuma metálica (figura 15) en el que el agente espumante se agrega en la masa ya fundida, y no se debe purgar un gas en esta. Se derrite este agente para mejorar la viscosidad mediante la adición de 1-2% de Ca como agente espesante y 1-2% de agente espumante (hidruros, TiH_2 , CaH_2 , etc.) en forma de polvos para llevar a cabo la espuma [18]. El agente espumante se descompone a la temperatura de formación de espuma, liberando un gran volumen de gas hidrógeno encargado de crear burbujas en el metal fundido, dando mayor control sobre la localización y tamaño de poros. La calidad de la espuma dependerá de los agentes espumantes utilizados, la temperatura, viscosidad de la masa fundida y la velocidad de enfriamiento. Mientras más uniforme sea el mezclado, mejor será la espuma. A mayor velocidad de agitación conlleva a generar más sitios de nucleación en la masa fundida al dispersar las partículas del agente espumante de forma más uniforme, la viscosidad por otro lado se mejora con agentes espesante como el Ca, SiC, alúmina, etc., para así evitar que las burbujas floten o se escapen del metal. Como resultado de este proceso se generan células cerradas de densidades relativas en el intervalo de 0,2 y 0,9 [18].

La Compañía de Alambre Shinko desarrolló el método ALPORAS, mezclando aproximadamente 1,5 % de Ca o Mg en una fundición de aluminio a 680 °C, para aumentar su viscosidad. Después de que la viscosidad alcanza el valor deseado se agrega 1,6 % de TiH_2 , el cual libera gas (hidrógeno) y titanio que entra en solución sólida. Esto provoca la espumación del aluminio fundido con porosidades entre

84 y 95 %, tamaños de poro promedio de 2 a 10 mm y densidades típicamente entre 0,18 y 0,24 g/cm³, fabricándose piezas de dimensiones 2050 × 650 × 450 mm, de un peso superior a 160 Kg [6].

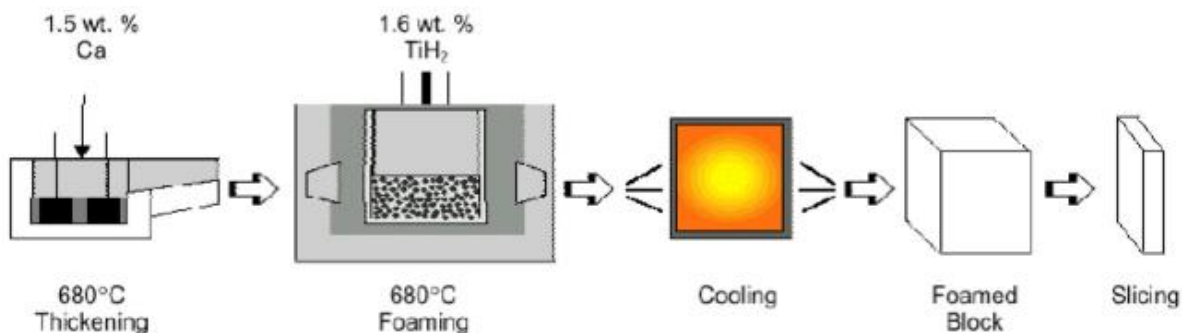


Figura 15. Representación esquemática del proceso ALPORAS1 para la producción de una espuma [18].

Métodos de producción para espumas de celda abierta

a) Solidificación direccional en metales fundidos saturados de gas

El proceso GASAR (figura 16) (desarrollado en la Academia Estatal de Metalurgia de Ucrania, en 1993, significa reforzado con gas), aprovecha la capacidad que ciertos metales tienen de formar un sistema eutéctico con el hidrógeno, este metal fundido bajo una atmósfera de hidrógeno a alta presión (sobre los 5 MPa), genera una fundición homogénea cargada de hidrógeno. Si esta temperatura baja, la fundición sufre una transición eutéctica a un sistema heterogéneo de dos fases (sólido + gas). Cuando la fundición se solidifica gradualmente, en una base fría de crisol, el gas formado en esta transformación eutéctica queda atrapado en el metal en forma de largos poros paralelos y alineados en la dirección del enfriamiento, esto quiere decir que su morfología depende de la dirección del enfriamiento, la presión del gas, el metal o aleación a usar la presencia de inclusiones no disueltas y la temperatura de fusión [6]. Se han fabricado espumas usando aluminio, níquel, cobre, hierro, magnesio y otras aleaciones, con porosidades entre 5 y 75 %, diámetros de poro entre 10 μm y 10 mm y longitudes de poro de 100 μm a 300 mm. La uniformidad de los poros es variable, tendiendo a ser mejor en la primera parte del metal solidificado (cerca de la base enfriada del crisol) que en las partes superiores. Este proceso produce espumas de baja porosidad y calidad [6].

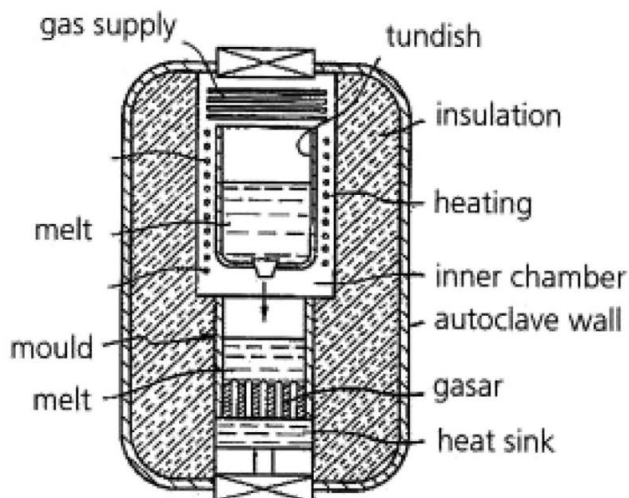


Figura 16. Aparato de Gasar [18].

b) Sinterización de polvos metálicos

Siendo un método sencillo, consiste en sinterizar metales en polvo, producidos por atomización de gas [26] por lo general, a una temperatura cercana al punto de fusión, para así fusionar las partículas y producir un metal con poros interconectados. Este proceso se lleva a cabo en un vacío o también en una atmósfera inerte, para así evitar una posible oxidación de la superficie. El resultado de este proceso se obtiene luego de pasados 1 a 2 horas y su porosidad dependerá de la eficacia de empaquetamiento de polvo. Los agentes espumantes químicos que liberan un gas a alta temperatura pueden ayudar a aumentar la porosidad siempre y cuando las temperaturas de sinterización sean lo suficientemente altas para permitir un flujo plástico limitado [27].

c) Método de infiltración por presión

El proceso de infiltración (figura 17) fue diseñado y ensamblado para determinar el valor de la longitud infiltrada en función de los parámetros de infiltración (presión de infiltración, tiempo y temperatura). En primer lugar el equipo se impregna de un gas como el argón, el metal usado para la matriz se coloca sobre un arreglo de esferas en un molde sellado de forma hermética, calentándose hasta su punto de fusión para que el metal líquido y todo el equipo haya alcanzado la temperatura de infiltración (50 °C por sobre la temperatura de fusión del metal), pueda infiltrarse entre las esferas durante el tiempo de infiltración establecido [28], para que esto pueda llevarse a cabo de forma adecuada, se utiliza un gas a alta presión generando un vacío y un movimiento centrifugo, compresión o agitación. Luego de esto, para conseguir la solidificación de la matriz, se expone a temperatura

ambiente o es enfriada de forma directa. El gradiente de temperatura de enfriamiento se puede usar para mejorar las propiedades mecánicas y la microestructura de la espuma [29].

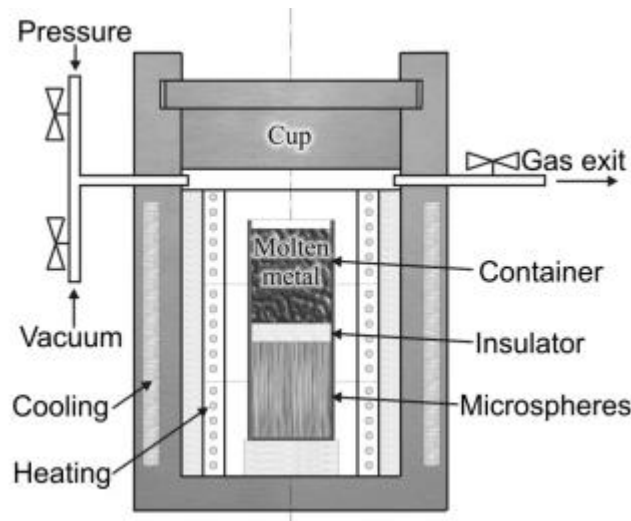


Figura 17. Estructura esquemática de la unidad de infiltración [30].

Las principales ventajas de este proceso son:

- Es de fácil control
- Buena reproducibilidad
- Distribución uniforme de las partículas esféricas.
- Buena unión interfacial entre la matriz metálica y las partículas esféricas.
- El volumen que pueden llegar a ocupar las esferas en relación con la matriz es de aproximadamente un 63% [31].

d) Replicación de una estructura de espuma polimérica

Dada la facilidad de producción de espumas poliméricas de celdas abiertas y de alta porosidad con estructuras celulares uniformes, dio como consecuencia su uso como plantilla para producir espumas metálicas mediante procesos de infiltración [32, 33, 34].

El polímero, que por lo general es poliuretano, se infiltra con yeso y se quema para así también quemar el polímero. El molde es llenado con metal fundido ayudado por combinaciones de vacío y presión externa, seguido de esto el yeso se disuelve.

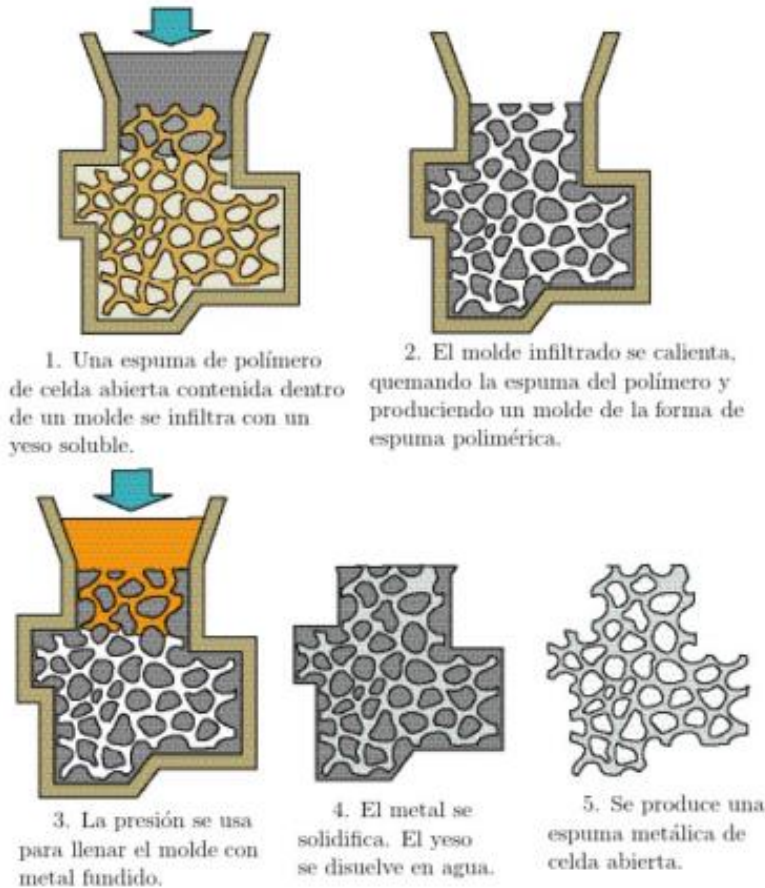


Figura 18. Proceso de fabricación Duocel [35].

Este proceso se puede llevar a cabo con variados metales y aleaciones generando alta porosidad, pero comparte algunas de las ventajas y desventajas de los procesos que emplean plantillas de sal. El acabado final de la celda se verá afectado por el proceso de infiltración completa de un molde irregular y la disolución completa del yeso.

3.8 Espumas sintácticas de matriz metálicas (MMSF's)

Existen diversas formas de clasificar las espumas metálicas, una de ellas son las espumas compuestas. Estas se forman de más de un material, ya que están reforzadas con fibras, nanotubos o esferas huecas, que cumplen la función de dotar con nuevas propiedades mecánicas al material base.

Estas espumas compuestas con esferas huecas se denominan espumas sintácticas, y su matriz suele ser de un material de baja densidad como el aluminio y aleaciones de este, magnesio, zinc, hierro y entre otras [36, 37, 38, 39]. Las esferas huecas dentro de la matriz suelen ser de materiales cerámicos [40] como el carburo de silicio [41] Al_2O_3 o también esferas huecas metálicas as [42] como el hierro.

A las espumas de matriz metálica y refuerzos esféricos, se les denomina espuma sintáctica de matriz metálica. Este tipo de matriz posee mejoras y ventajas en comparación a una espuma metálica convencional en su módulo elástico y resistencia, ya que el espacio que ocupaban los poros, lo usan las esferas huecas que lo dotan de un comportamiento distintos (figura 19), gracias al material, geometría y la pared de la esfera de refuerzo.

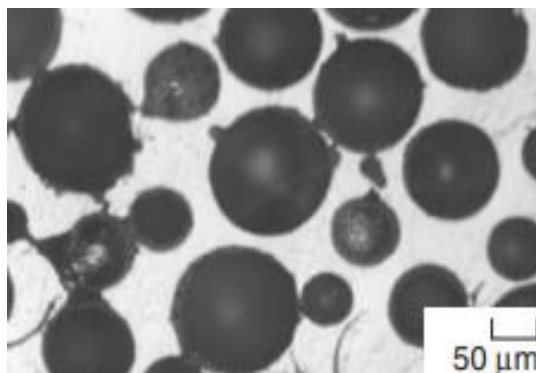


Figura 19. Microestructura de una espuma sintáctica con presencia de refuerzos esféricos [43].

3.8.1 Esferas huecas

Las partículas huecas de pared delgada son beneficiosas en la síntesis de matrices de baja densidad. Además de aportar con una diferente propiedad mecánica a la matriz metálica, también proporciona mayor estabilidad dimensional a la espuma reduciendo el coeficiente de dilatación térmica [44].

Existen dos tipos de partículas huecas utilizadas en la creación de espumas sintácticas.

El primer tipo son las microesferas que son fabricadas de manera comercial, en donde hay una amplia variedad de diámetros, espesores y distribución de tamaños, las cuales son sometidas a minuciosos controles de calidad, para así garantizar su resistencia y dimensiones. También pueden ser sometidas a baños para así evitar que se produzcan reacciones que debiliten la unión entre ambas fases [45, 43]. También existen las macroesferas con un diámetro aproximado de 0.5 mm. En la (figura 20) se presenta el ensayo de compresión de una esfera comercial con su respectiva grafica de esfuerzo – deformación, mientras que en la (figura 22) y se puede ver la cercanía entre esferas, ya que entre estas se pueden generar espesores de pared celulares bastantes pequeños y el grado de asociación entre las esferas y el metal base que la contiene (figura 23).

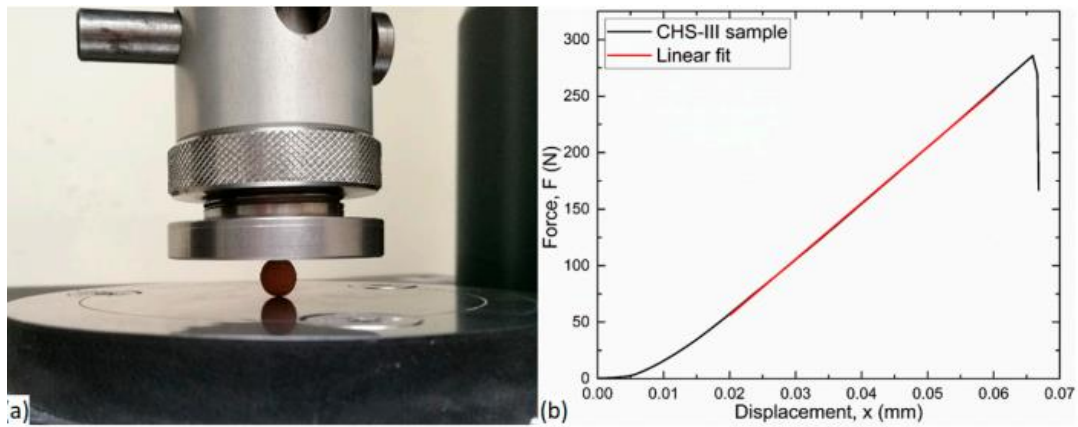


Figura 20. a) Ensayo de compresión típico de una esfera hueca y su b) gráfico de fuerza-desplazamiento [46].

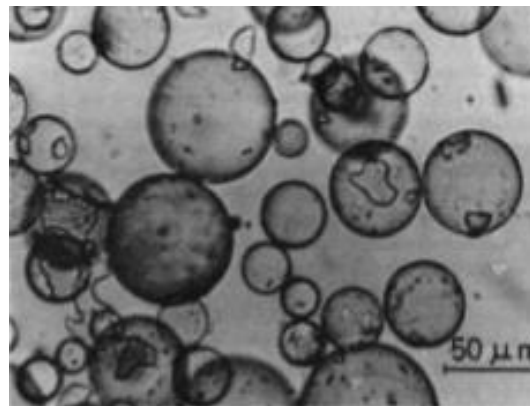


Figura 21. Micrografía óptica de micro balones de vidrio [47].

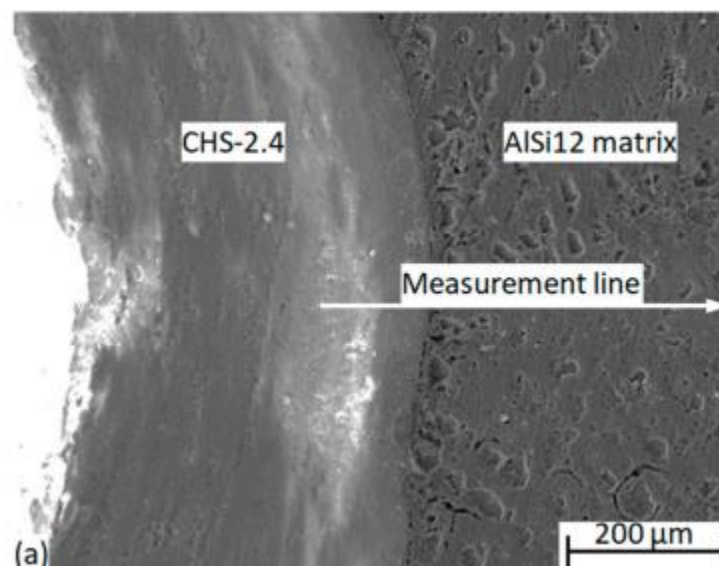


Figura 22. Imagen por medio de rayos X de una espuma de AlSi_{12} con refuerzos de esferas cerámicas huecas de CHS-2.4. En donde se aprecia la asociación existente entre ambos medios [46].

Otro tipo de partículas utilizadas son las cenósferas de ceniza volante (figura 23), producidas durante el proceso de combustión del carbón siendo un subproducto de desechos industriales. El uso de este tipo de partículas es bastante positivo en el ahorro económico para adquirirlas y en la reducción contaminante producida por la producción de metales. Las partículas de ceniza volante poseen de forma predominante en su estructura SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

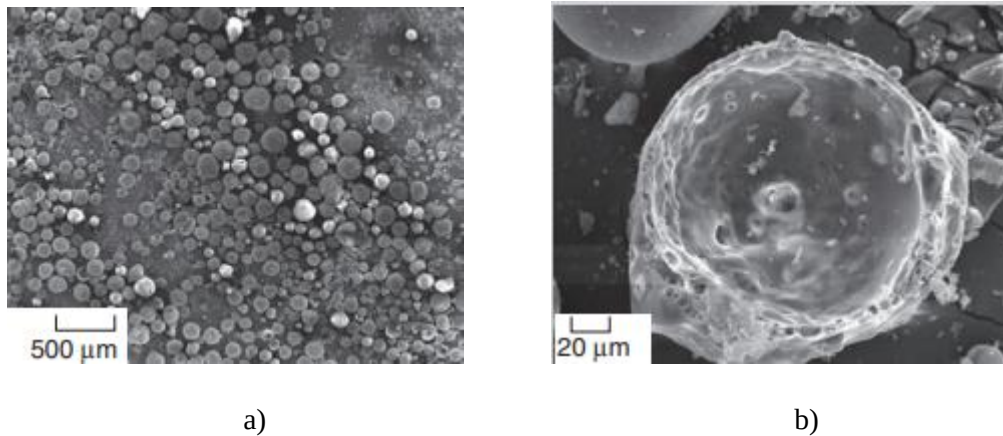


Figura 23. a) Cenósfera de ceniza volátil sobre un sustrato. b) Estructura imperfecta y representación de defectos en las partículas [43].

3.8.2 Microestructura

La microestructura de una espuma sintáctica posee dos componentes principales, el material de la matriz y las partículas huecas. Pero en la realidad estas se componen de tres fases, siendo la tercera la porosidad que se genera producto del vacío presente en la estructura de la matriz (figura 24), lo cual afecta sus propiedades mecánicas.

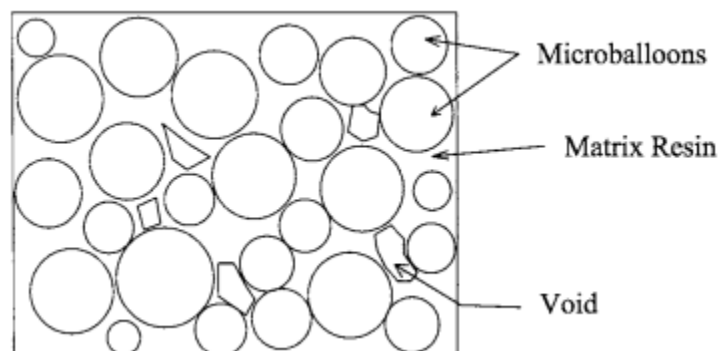


Figura 24. Microestructura de una espuma sintáctica [48].

Las propiedades de las espumas sintácticas dependen en gran medida de la relación espesor de pared y diámetro de la esfera (t/D) de las esferas huecas como de las propiedades de la matriz. Algunos factores que afectan sus propiedades son:

- La presencia de porosidades no deseadas o inclusiones.
- La composición final de la matriz, ya que en algunos casos suelen existir reacciones en las interfases partícula-matriz, dando lugar a nuevos compuestos [49].
- El diámetro de esfera, su espesor de pared, tratamiento térmico y fracción de volumen de esfera.

3.8.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de una MMSF's dependen de factores como el material de la matriz, la fracción volumétrica, la distribución y propiedades de las esferas huecas y el método empleado en la fabricación de la espuma sintáctica.

Gracias a la baja densidad de las MMSF's es que se pueden crear estructuras de gran volumen y bajo peso, manteniendo alta la rigidez y resistencia de esta. Dependiendo del material a usar de matriz, se pueden obtener densidades entre 0,15 a 1 g/cm³ y resistencias de compresión entre 10 y 100[MPa] [48].

Si las esferas de refuerzo poseen un diámetro uniforme y con un orden aleatorio, se puede lograr un volumen ocupado por estos de aproximadamente un 63,7% en una probeta cilíndrica [48].

Lehmhus & Weise et al. [50] investigaron el comportamiento mecánico de una espuma de hierro reforzada con esferas huecas de vidrio bajo un ensayo de compresión cuasiestática y alta velocidad de deformación, en donde se demostró que las espumas sintácticas de matriz de hierro y esferas de vidrio poseen un mayor límite de elasticidad en comparación a una espuma de matriz de hierro sin refuerzos, en condiciones de porosidad similares.

Las propiedades mecánicas se estudian bajo ensayos de cargas compresivas, de acuerdo con un estudio previo realizado, se concluye que las espumas perlíticas poseen mayor fuerza de compresión y absorción de energía que las ferríticas [51].

La resistencia a compresión de una MMSF's depende en un alto grado de las esferas huecas, esto debido a que la deformación inelástica se concentra en las paredes de estas, causantes de las fallas en espumas de celda abierta. Esto les permite soportar de 5 a 10 veces más presión hidrostática [52]. Las

propiedades mecánicas pueden verse mejoradas variando el tamaño de las esferas, mientras menor sea su diámetro, mayor será la resistencia a compresión. La relación entre el espesor de pared y diámetro de la esfera también influyen en las propiedades mecánicas de una espuma sintáctica [53].

Existen estudios de espumas sintácticas con refuerzos de distintos diámetros dentro de la matriz, en donde las esferas más pequeñas se ubican entre las de mayor tamaño, lo cual asegura una mayor porosidad, mejorando así la porosidad de un 55,6% a 59% en dicho estudio [54].

En la literatura se mencionan dos tipos principales de falla (figura 25), i) la falla por deformación plástica y colapso, este tipo de falla es común para espumas metálicas convencionales y para MMSF's en los que la fase que corresponde a la de las esferas se deforma plásticamente como en las esferas de hierro, ii) falla por escisión siendo este tipo de falla común para esferas huecas rígidas en donde la fuerza de fractura de las inclusiones son relativamente altas.

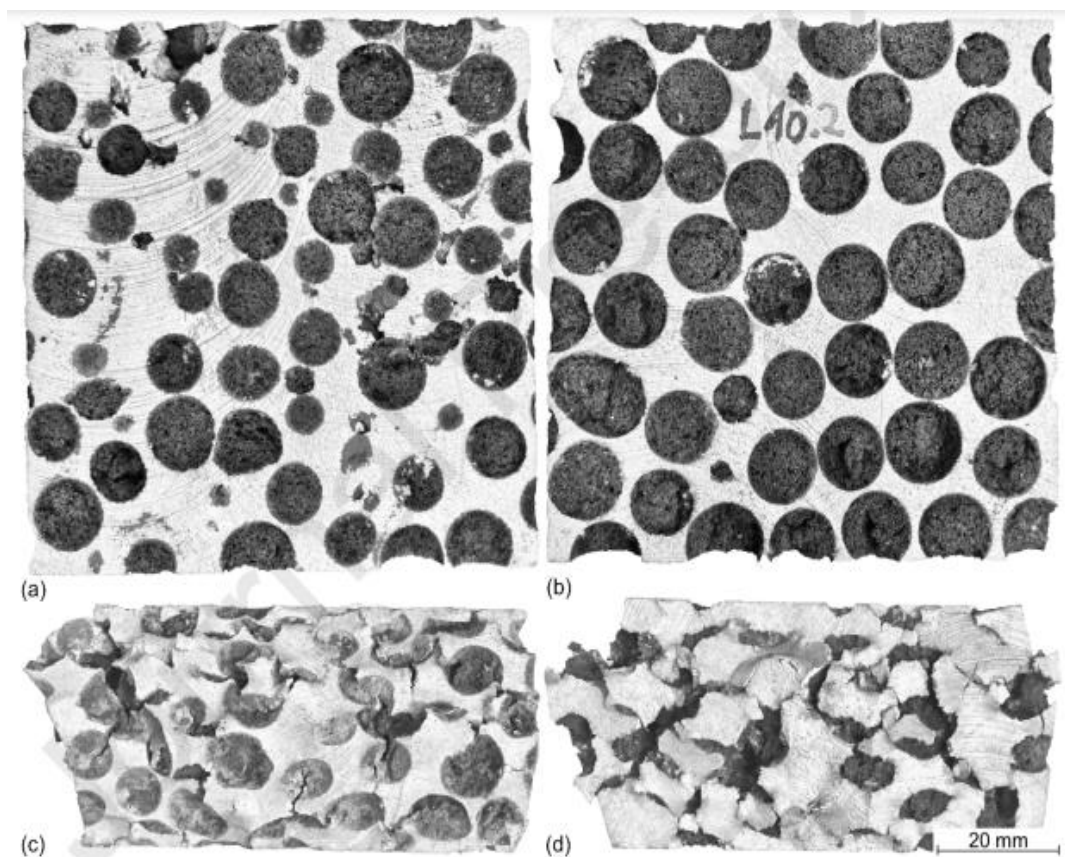


Figura 25. a) Al99.5-11-AC and b) AlSi₉MgMn-11-AC, ejemplos antes del ensayo de compresión y c) Al99.5-11-AC, d) AlSi₉MgMn-11-AC, luego del test de compresión detenido a los 0.5 de tensión ingenieril [55].

3.8.4 Módulo de Young de espumas sintácticas de matriz metálica

El Módulo de Young es una de las propiedades más importantes para caracterizar a las espumas sintácticas (figura 26). En el análisis espumas sintácticas se asocia con el desplazamiento generado por las acciones a las que son sometidas, por lo que es necesaria conocer y establecer los desplazamientos permisibles para garantizar su funcionalidad.

Las MMSF's se caracterizan por ser altamente rígidas en comparación a una espuma metálica de poros abiertos. [56]

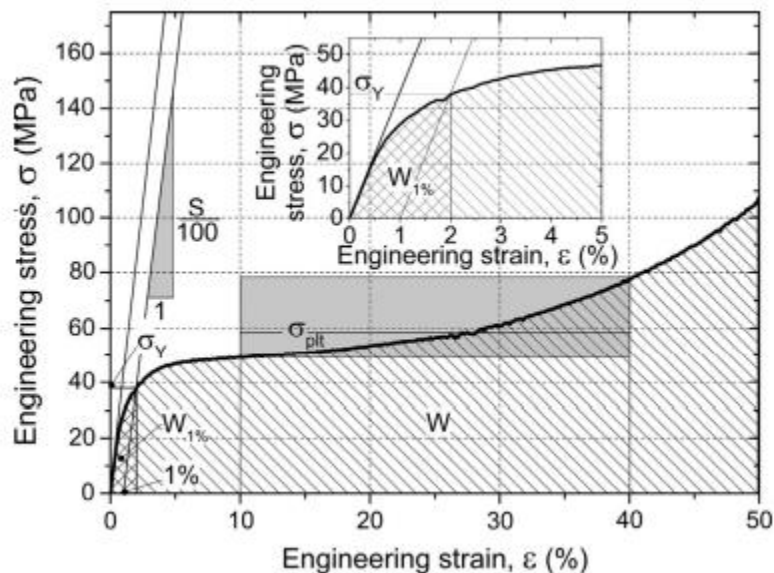


Figura 26. Curva típica para matrices sintácticas de sus propiedades características [56].

Representa un diagrama típico de esfuerzo - deformación de una espuma sintáctica, estas curvas pueden carecer de un máximo local, por lo que no es posible ser definida la resistencia a la compresión y esto dependerá del comportamiento del refuerzo que se esté usando, en este caso su materialidad es de hierro hueco. Siendo distinto el mecanismo de falla de una esfera cerámica que es más frágil [57, 58, 59, 60, 61].

El efecto de la porosidad o el porcentaje de volumen que ocupan las esferas de refuerzo varía el módulo de Young, pero según el estudio realizado por Porfiri & Gupta [62], aumentar o disminuir este porcentaje depende del material del refuerzo en comparación al material de la matriz. En este estudio se usó una matriz de resina epoxi con dos tipos de refuerzos distintos. Para el caso del refuerzo K15 el Módulo de Young disminuye con el aumento de la porosidad mientras que para el refuerzo

K46 pasa totalmente lo contrario. Esto ocurre porque el Módulo de Young del refuerzo K46 es mayor al del refuerzo K15 y el de la matriz (figura 27).

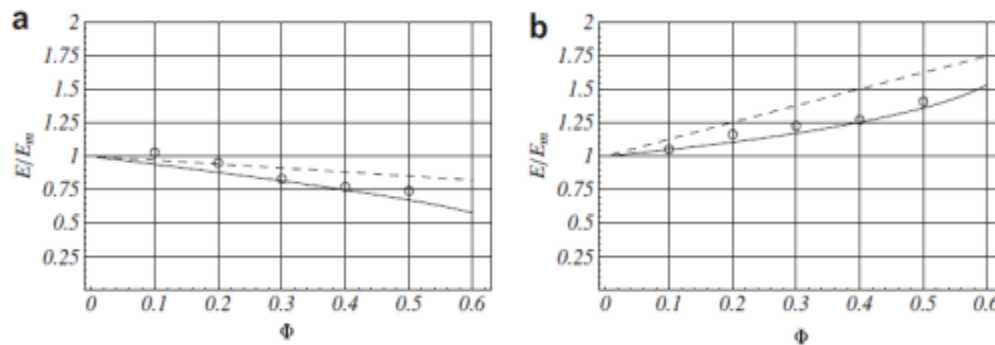


Figura 27. Módulo de Young relativo según la porosidad para una MMSF con matriz Epoxi y esferas a) K15 y b) K46 [62].

Al variar la relación t/D también se puede obtener un considerable cambio en las propiedades de la matriz, al aumentar el espesor de pared, tiende a la resistencia de la esfera de refuerzo completamente sólida, lo que también traerá como consecuencia un aumento en el módulo de Young de la MMSF [62].

3.9 Aplicaciones

Industria automotriz

La creciente demanda de automóviles y la seguridad que aportan, los ha llevado a fabricarlos más pesados en muchos casos, entrando en conflicto con otras demandas como la de consumo de combustible, mientras que en algunos países como Japón y algunos de Europa, los automóviles deseados, son de baja longitud. Lo que conlleva también a fabricar motores más pequeños y otras estructuras más que den comodidad a los pasajeros. Es por ello por lo que el uso de espumas sintéticas o porosas son esenciales para satisfacer estas demandas, logrando mejor aislación acústica, mayor seguridad en el impacto por choque, usando materiales deformables y crear compartimentos que aporten en la disipación de calor generada por el motor del vehículo.

La siguiente imagen muestra los tres campos de aplicación de las espumas metálicas, especialmente de aluminio.

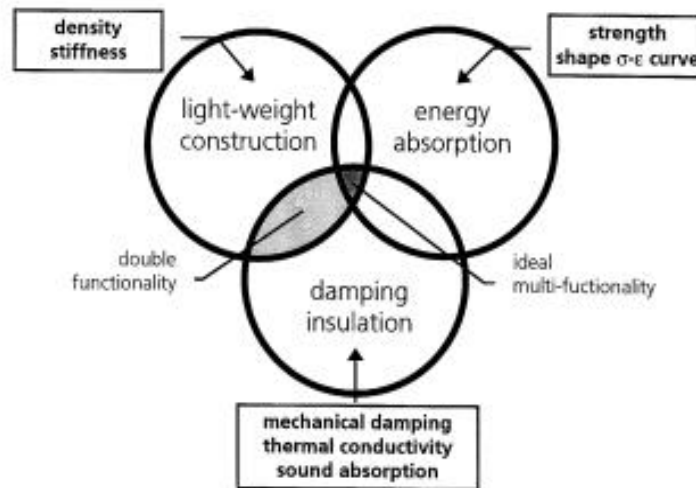


Figura 28. Principales campos de aplicación de las espumas metálicas estructurales [5].

Industria Aeroespacial

La idea de construcción del aspecto de una nave espacial es que este sea ligero, es por ello que se emplean materiales porosos. En donde el uso de paneles tipo panal de abeja o laminado tipo sándwich de aluminio conducen a un aumento del rendimiento y aminora los costes.

En esta industria se busca una mayor resistencia al pandeo y al aplastamiento, mientras que por otro lado la ventaja isotrópica de estos paneles espumosos. También se pretende conseguir una buena resistencia a elevadas temperaturas que puedan provocarse debido a fallas en el mecanismo y por la reinserción en la atmosfera, la combustión que se produce para poder impulsar un cohete espacial y otros factores puede provocar incendios en su estructura por lo que se busca la integridad de la estructura el mayor tiempo posible. Boeing (EE. UU.) ha evaluado el uso de paneles tipo sándwich de titanio usando métodos de atrapamiento de gas en el interior de la espuma del panel y también sándwiches de aluminio para los brazos de la cola de los helicópteros [5].

Construcción naval

La construcción ligera ha ganado espacio en la industria naval, los buques de pasajeros modernos se pueden construir íntegramente de extrusiones, láminas y paneles tipo abeja de aluminio. Largos paneles porosos con núcleos, ambos de aluminio, prometen ser un elemento importante de estas estructuras. Si las caras de estos paneles se unen al material del núcleo con adhesivo de poliuretano de alta elasticidad, se obtienen estructuras rígidas y con un buen comportamiento de amortiguación. En la construcción naval es importante la unión de paneles tipo sándwich de espuma de manera eficaz

e introducir elementos de sujeción adecuados [63], también se han usado espumas metálicas en plataformas, ascensores, mamparos estructurales y taquillas pirotécnicas [64].

Industria Biomédica

Las aleaciones de titanio, cobalto-cromo se usan para prótesis e implantes dentales, debido a su biocompatibilidad. Para asegurar el crecimiento del tejido, se produce una capa porosa del mismo material biocompatible o de otro sobre la prótesis mediante pulverización térmica. De otra manera también se podría usar titanio o espuma de titanio para tales aplicaciones de modo que la densidad se distribuya y adapte para cumplir con los requisitos del módulo de resistencia de dicho componente. No hay unanimidad sobre cómo deben diseñarse los implantes para garantizar la máxima resistencia y funcionalidad. Las espumas de magnesio pueden usarse como implantes biodegradables, usados como soportes de carga mientras el hueso todavía crece, pero es absorbido por el cuerpo en una etapa posterior de reconvalecencia [65].

Intercambiadores de calor y máquinas de refrigeración.

Las espumas altamente conductoras a base de cobre o aluminio se pueden usar como intercambiadores de calor. Para este caso se usan estructuras de celda abierta. El calor se puede eliminar o agregar a gases o líquidos, dejándolos fluir por la espuma y enfriando o calentando la espuma al mismo tiempo, según lo que se solicite. Gracias a este tipo de estructura de celda abierta, se minimizan las caídas de presión. Una aplicación de estas son los disipadores de calor que usan los microcomponentes electrónicos, los con una alta densidad de disipación de potencia como en el caso de los chips de computadoras. Las espumas metálicas pueden funcionar mejor si se seleccionan de modo que la conductividad se mantenga lo más alta posible con su resistencia al flujo lo más baja. Estos dos parámetros son contradictorios, por lo que su selección debe ser de manera equilibrada de acuerdo con los requisitos necesarios [5].

3.10 Espumas de aluminio

Un metal poroso, es el resultado de la combinación de un metal base y gases que forman burbujas que logran ocupar entre un 50% y 90% de la estructura total, consiguiendo densidades muy bajas y propiedades que dependen del metal y por otro lado la estructura porosa. El resultado de la fabricación de una espuma metálica es un material que posee diversos rangos de propiedades térmicas, mecánicas y acústicas [66].

Las espumas sintácticas se componen de refuerzos esférico, hueco en su interior, de diversos materiales, tamaños, forma, espesores, y que se ubican dentro de la matriz metálica. A diferencia de

una espuma metálica convencional, las espumas sintácticas, presentan una disminución en los defectos estructurales, ya que las esferas juegan el rol de también reforzar la matriz.

Las espumas fabricadas a base de aluminio son materiales porosos que poseen una amplia gama de propiedades físicas y mecánicas, son de interés por su alta rigidez con un peso específico muy bajo. Una espuma de aluminio es un material relativamente isotrópico y su generación presenta una distribución aleatoria de poros su interior (figura 29).



Figura 29. Sección transversal de un aglomerado de una espuma de aluminio antes y después de una prueba SHPB ("Split Hopkinson pressure bar test") [67].

Las propiedades mecánicas y físicas de las espumas de aluminio dependen de la densidad, en el rango de $0,4-0,8\text{g/cm}^3$ y suelen ser buenas en la absorción de sonidos, protección electromagnética, absorción de impactos y vibraciones. No suelen ser inflamables y son muy estables a altas temperaturas [68].

Los poros de las matrices de aluminio, son esencialmente esféricos y parcialmente cerrados, por lo general se encuentran interconectados.

Estas espumas se dividen en dos tipos, las de poros cerrados, las cuales tienen aplicaciones estructurales, poseen gran rigidez y aislamiento acústico, mientras que las de poros abiertos cuentan con buenas propiedades específicas (superficiales, térmicas, etc.) [69] y son usadas usualmente en disipadores de calor.

La obtención de espumas de aluminio se logra bajo diversos métodos como la inyección de gas en el metal fundido como en los procesos de Hydro/Alcan, ALPORAS, precursor espumante, también existen los métodos que aprovechan sistemas de aleación específicos como el sistema de aleación con una fase volátil y la solidificación direccional, hay métodos basados en la unión de materiales como la sinterización de polvos metálicos y fibras sin consolidación, la sinterización con esferas huecas en el metal base, y también está el método que usa como molde una estructura celular, que se emplea en la investigación, el procedimiento por infiltración [6].

En el presente trabajo se desarrollarán modelos aproximados de espumas sintácticas de AlSi_{12} reforzadas con esferas huecas de hierro fabricadas por el método infiltración. La matriz de AlSi_{12} combina una baja densidad y alta resistencia mecánica, posee un bajo punto de fusión ($570^{\circ}\text{C} \pm 10$), una muy buena capacidad de fundición y fluidez, siendo ideal para desarrollarse mediante el proceso de infiltración [70, 71].

MARCO TEÓRICO

4.1 Método de elementos discretos

El método de elementos discreto (DEM) que fue introducido por Cundall [72] y usado para describir el comportamiento mecánico de uniones o ensambles de discos y esferas, este modelo se basa en un esquema numérico en donde las partículas que interaccionan entre si se controla por las fuerzas de contacto normales y tangenciales, y su movimiento se controla partícula por partícula.

4.1.1 Ecuaciones de movimiento

El método de elementos discretos se basa en el movimiento que poseen las partículas, tanto traslacional como rotacional, cuyas ecuaciones que lo describen son las de dinámica del cuerpo rígido. Este método también adiciona las fuerzas de amortiguamiento que evitan las vibraciones de las partículas sin contacto para así disipar la energía cinética provocada. En donde se tiene que para el i -ésimo elemento la fuerza F es proporcional a la masa m_i por la aceleración $\ddot{u}_i$ como se muestra en la (ecuación 4) y de la misma forma el momento aplicado T_i es proporcional al producto entre el momento de inercia I_i y la velocidad angular $\dot{w}_i$ (ecuación 5).

$$m_i \ddot{u}_i = F_i \quad (4)$$

$$I_i \dot{w}_i = T_i \quad (5)$$

4.1.2 Fuerzas de contacto

Una vez obtenida la interacción entre las partículas, se deben calcular las fuerzas presentes producidas por el contacto entre ellas. Estas fuerzas representadas por F_i y F_j que corresponden a la partícula i y la partícula j , satisfacen la igualdad $F_i = -F_j$, haciendo el cambio $F = F_i$, y al descomponerlo en su componente normal y tangencial se tiene:

$$F = F_n + F_t = f_n n + F_t \quad (6)$$

Donde n corresponde a un vector unitario normal que une el centro de las partículas con dirección exterior a la partícula i y las fuerzas f_n y F_t se obtienen al hacer un modelo constitutivo (figura 30) para el contacto de las partículas.

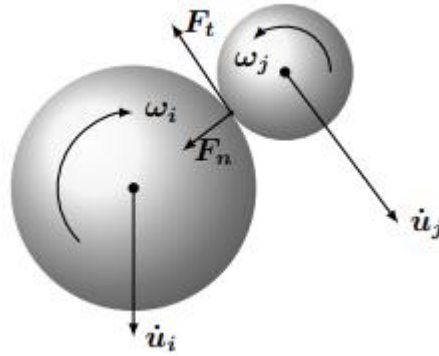


Figura 30. Descomposición de las fuerzas de contacto en sus componentes normal y tangencial para 2 partículas en contacto.

La interfaz del contacto se caracteriza por la rigidez normal y tangencial k_n y k_t respectivamente, el coeficiente de Coulomb μ y el coeficiente de amortiguamiento c_n . La fuerza de contacto normal se descompone en una parte elástica f_{ne} y una parte de amortiguamiento f_{nd} ; f_{ne} es proporcional a la rigidez normal k_n y a la penetración de las superficies de las partículas δ_{rn}

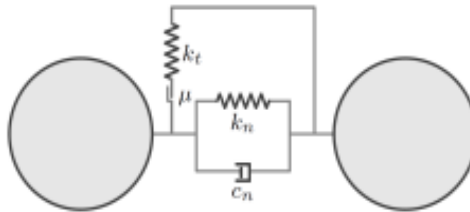


Figura 31. Modelo de la interfaz de contacto.

4.2 Teoría de elasticidad

4.2.1 Relación esfuerzo-deformación

La expresión generalizada de un material elástico lineal isótropo se conoce como ley de Hooke, que relaciona las componentes de esfuerzo y deformación.

$$\sigma = D\varepsilon \quad (7)$$

Donde D es la matriz que contiene las constantes elásticas, la cual es simétrica, considerándose materiales isotrópicos (de 9 a 21 constantes) la matriz D se reduce a la siguiente expresión:

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

SIMETRICA

Siendo E , el Módulo de Young y ν , el coeficiente de Poisson.

4.3 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM) originalmente se desarrolló para resolver problemas relacionados al ámbito del análisis estructural. Al tiempo después también se aplicó su uso en el campo del electromagnetismo. Es por aquello que hoy en día esta herramienta se ha vuelto imprescindible para el simulado de geometrías complejas que, dada la cantidad de parámetros, variables y la naturaleza del problema, suele ser difícil o prácticamente imposible de resolver sin el uso de computadoras con grandes características.

Este método, explicado de forma general, es la división de un continuo en un conjunto de elementos discretos que están interconectados por una serie de puntos llamados nodos.

La solución de este sistema sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema se unifica como uno completo por el ensamblaje de los elementos. El comportamiento en el interior de cada elemento pasa a ser definido por el comportamiento de los nodos, mediante las funciones de forma e interpolación.

Por lo tanto, el método se basa en transformar un cuerpo de origen continuo a uno discreto y aproximado, a esta transformación se le denomina modelo discreto (figura 32).

El método propone un infinito número de variables desconocidas, sean sustituidas por una cantidad controlada de elementos cuyo comportamiento es fácil de definir. Aquellas divisiones pueden tener formas dependiendo del tamaño y forma del objeto presentado en el problema.

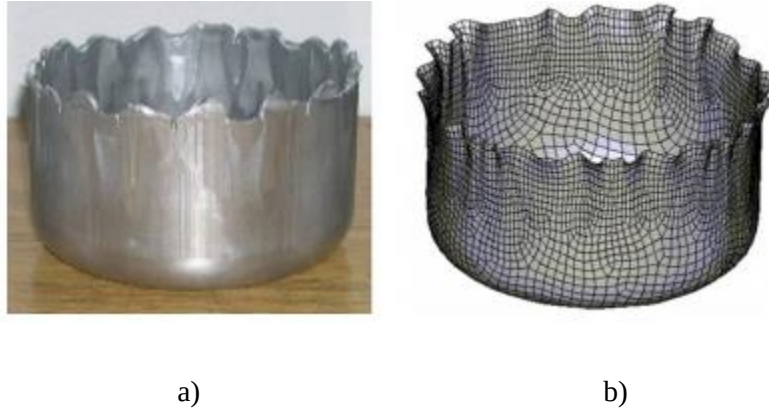


Figura 32. La aplicación de una fuerza sobre una chapa metálica, a) caso real, b) representación mediante MEF [73].

4.4 Errores de convergencia

4.4.1 Convergencia

Cada solución de elementos finitos implica una solución a un sistema de ecuaciones cuya matriz de rigidez es una combinación de la información en cada elemento, el vector de grados de libertad desconocido y el vector de fuerza conocido. Si la matriz de rigidez es singular, la solución falla. Las razones más comunes por las que la matriz de coeficientes se vuelve singular son las siguientes [74]:

Inestabilidad estructural debido a la falta de restricciones en el análisis estructural estático.

Esto da como resultado la traslación y rotación del cuerpo rígido, lo que hace que la matriz de rigidez sea singular. Como ejemplo de este fenómeno, la Figura 33 muestra tres configuraciones de restricción (de izquierda a derecha) aplicadas a la misma estructura cuadrada bidimensional, sujeto a una carga de tracción distribuida en la dirección x .

Configuración 1: tiene dos restricciones que suprimen el desplazamiento en la dirección y y a lo largo de la base de la estructura. Sin restricciones que impidan el desplazamiento en la dirección x , la estructura puede moverse libremente en la dirección x bajo las cargas aplicadas, lo que da como resultado una matriz de rigidez singular.

Configuración 2: las compensaciones en las direcciones x e y se suprimen en el mismo punto (abajo a la izquierda). Aunque esta configuración evita las traslaciones de cuerpo rígido, no evita la rotación

alrededor del nodo de la esquina donde se aplican las restricciones de desplazamiento, provocando que la matriz de rigidez sea singular.

Configuración 3: Dos ángulos están restringidos en la dirección y , uno de ellos también está restringido en la dirección x . Esta es una configuración estable que suprime todos los movimientos posibles del cuerpo rígido, lo que da como resultado una matriz de rigidez que no es singular y, por lo tanto, una solución excepcionalmente exitosa.

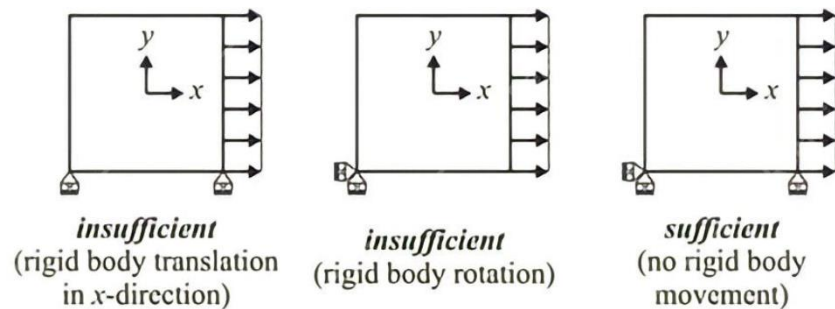


Figura 33. Inestabilidad por falta de restricciones [74].

En el análisis de elementos finitos, los problemas relacionados con la no linealidad se resuelven mediante pasos iterativos. Esta no linealidad resulta de las propiedades del material o de la geometría (gran esfuerzo) de la estructura. Una solución adecuada se aborda en pequeños pasos, conocidos como iteraciones convergentes. Si el problema depende del tiempo, entonces se toman pequeños pasos en el dominio del tiempo. Si el problema no depende del tiempo (por ejemplo, en plasticidad), estos pequeños pasos se realizan entre diferentes cargas aplicadas. Al final de cada iteración, ANSYS® verifica si la solución cumple con los criterios de afinidad [75, 76]. Si no se cumple el criterio, se vuelve a realizar el último paso con un tamaño de paso más pequeño. Esto se repite hasta que se cumple el criterio. Sin embargo, existe un límite en el número de iteraciones que convergen, y si no se puede alcanzar una solución convergente dentro de estos límites, ANSYS finaliza la solución.

4.4.2 Forma del elemento

Las ecuaciones bien condicionadas son el resultado de emplear elementos cuadrados, triángulos equiláteros bidimensionales o cúbicos tridimensionales. La convergencia puede verse afectada si la forma geométrica es muy distorsionada como para que estos elementos ideales puedan adaptarse a este.

Para evitar que el programa ANSYS no se vea afectado durante el proceso debido a la geometría simulada, es que, posee verificaciones incorporadas de elementos, de manera que no afecte la matriz de elementos finitos. Estos elementos distorsionados ocurren cuando el algoritmo de mapeo libre es usado para el ensamble. Es evitable con el uso de mallas mapeadas [77]. El programa genera una advertencia si la forma del elemento es distorsionada, por lo que después de esto, se puede continuar el análisis o modificar la cuadrícula del elemento. Si el elemento posee una distorsión lo suficientemente caótica, se genera un error trayendo por consecuencia la detención y cancelación del análisis.

Generalmente cuando se da lugar a una malla generada de manera automática, el programa suele dar advertencias en donde el usuario debe decidir si continúa con el análisis o mejora de manera localizada el mallado. ANSYS verifica la relación de aspecto, el ángulo máximo de esquina, la desviación de lados paralelos para los cuadriláteros, la proporción del jacobiano y la información necesaria para ser evaluada por el usuario.

4.4.2.1 Calidad del elemento

Es un factor de forma que toma valores entre 0 y 1, en donde se compara la forma deseada de las celdas (Figura 34) y la forma final de la malla de un sólido, esto quiere decir, se basa en la relación existente entre el volumen y la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes de los elementos bidimensionales o la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para los elementos tridimensionales. Para un valor próximo a 1 corresponde a un elemento con forma ideal, mientras que el valor 0 es una mala representación del elemento.

Para elementos bidimensionales:

$$Q = C * \left(\frac{\text{área}}{\Sigma(\text{lado elemento})^2} \right) \quad (9)$$

Para elementos tridimensionales:

$$Q = C * \left[\frac{\text{Volumen}}{\sqrt{[\Sigma(\text{lado elemento})^2]^3}} \right] \quad (10)$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de C para cada tipo de elemento:

Tabla 2. Tabla de valores C para cada elemento.

Elemento	Valor de C
Triangulo	6.928203
Cuadrilátero	4.0
Tetraedro	124.707658
Hexágono	41.569219
Pirámide	96

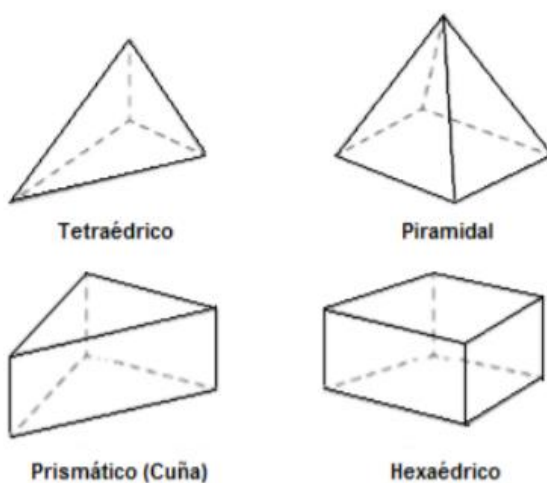


Figura 34. Formas de celdas en una malla.

4.4.2.2 Relación de aspecto

La relación de aspecto se define como la razón entre la arista más larga y la más corta de la cara de un elemento, para triángulos (figura 35) se calcula de la siguiente manera: R_n

$$R_n = \frac{2h_n}{a_n\sqrt{3}} \quad (11)$$

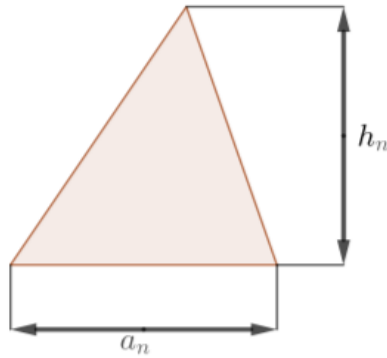


Figura 35. Relación de aspecto para un triángulo.

Para un triángulo equilátero, el valor de esta relación es 1, un valor alto de relación de aspecto puede provocar errores insatisfactorios, provocados por la distorsión de elementos (figura 36).

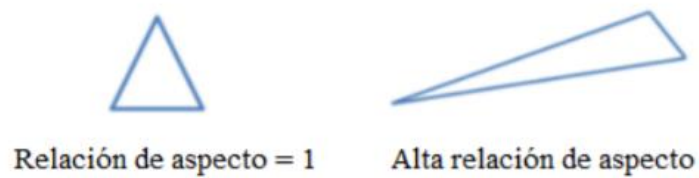


Figura 36. Relación de aspecto de un elemento finito.

4.4.2.3 Relación jacobiana

Las transformaciones curvilíneas transforman las coordenadas x, y, z a las coordenadas locales ζ, η, ξ .

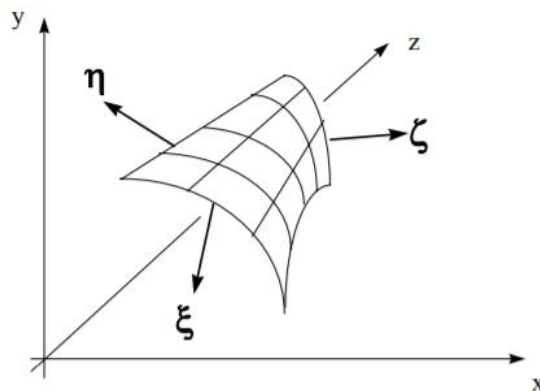


Figura 37. Sistema de coordenadas locales (ζ, ξ, η) y sistema global de coordenadas cartesianas (x, y, z) [78].

Estas transformaciones introducen un cambio de variable en las ecuaciones integrales que describen el comportamiento de los elementos, principalmente en las derivadas de las funciones de forma [79].

$$\frac{\partial N_j}{\partial x_i} = J^{-1} \frac{\partial N_j}{\partial \zeta_i} \quad (12)$$

donde N_j son las funciones de forma y J es la matriz Jacobiana de la transformación. Una vez realizada la transformación, la integración es más sencilla en el sistema de coordenadas local (ζ, η, ξ) , que en el cartesiano (x, y, z) en el cual los dominios están distorsionados.

Los diferenciales de volumen en cada sistema de coordenadas vienen relacionados de la forma,

$$dV = \det \det (J) d\zeta d\eta d\xi \quad (13)$$

Debido a esta transformación se pueden presentar diversos problemas:

1. $\det(J)$ puede tomar el valor cero a causa de una mala discretización, por lo que la solución no es posible.
2. El proceso de elaboración del jacobiano posee un mayor costo computacional.
3. El jacobiano puede estar mal condicionado, es decir, $\det(J)$ puede tomar valores cercanos a cero.

Todo lo anteriormente nombrado puede introducir errores numéricos en la solución esperada, debido principalmente a un cálculo erróneo de J^{-1} .

ANSYS® define la relación jacobiana (JR) como

$$JR = \frac{\max\{\det(J)\}}{\min\{\det(J)\}} \quad (14)$$

donde $\max\{\det(J)\}$ y $\min\{\det(J)\}$ representa el máximo y mínimo valor del determinante de la matriz Jacobiana, respectivamente.

Para un tetraedro de 10 nodos, en cada esquina se calcula la matriz Jacobiana para obtener diversos valores de determinantes y finalmente calcular JR . Si el máximo y el mínimo valor del determinante tienen signos opuestos, la relación jacobiana se asigna arbitrariamente a -100 y el elemento es claramente inaceptable para la discretización.

4.4.2.4 Asimetría

La asimetría es una de las principales medidas de calidad para una malla. La asimetría determina qué tan cerca de lo ideal es un elemento. Un valor de 0 indica un elemento equilátero (mejor) y un valor de 1 indica un elemento completamente degenerado (la peor). Los elementos degenerados se caracterizan por nodos que son casi coplanares. Para elementos tetraédricos se calcula mediante el método de desviación de volumen equilátero.

$$Oblicuidad = \frac{\text{tamaño óptimo de elemento} - \text{tamaño de elemento}}{\text{tamaño óptimo de elemento}} \quad (15)$$

Los valores se encuentran de 0 a 1, con valores cercanos a 0 el elemento es más asimétrico lo que indica una buena calidad. La Tabla 3 muestra la calidad de malla según la medida de la asimetría ("skewness").

Este parámetro determina qué tan cercana a la forma ideal se encuentra una celda, representado por un rango entre 0 y 1 como se presenta en la tabla 3, donde el valor 0 corresponde a una celda equilátera (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 3. Calidad de malla según la variable de asimetría (S).

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

4.4.2.5 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 ($\vec{A}_i$), un vector que va desde el centroide de la celda al centroide de esa cara

$(\vec{f}_i)$ y un vector desde el centroide de la celda al centroide de la celda adyacente a esa cara ($\vec{c}_i$) como se presenta en la figura 38. El valor de la calidad ortogonal se determina mediante la ecuación 16, donde el subíndice i corresponde a cada cara del elemento.

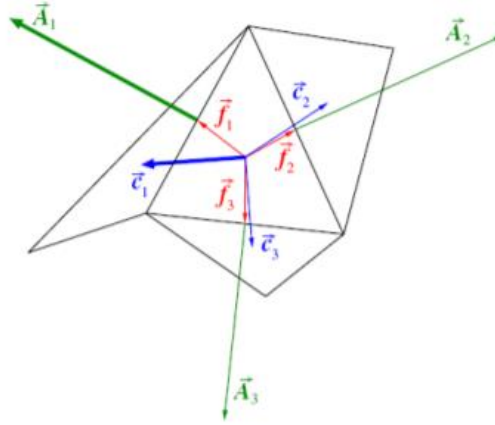


Figura 38. Vectores para el cálculo de calidad ortogonal de la malla

$$Calidad\ ortogonal = \min \left\{ \frac{\vec{A}_l * \vec{f}_l}{|\vec{A}_l| * |\vec{f}_l|}; \frac{\vec{A}_l * \vec{c}_l}{|\vec{A}_l| * |\vec{c}_l|} \right\} \quad (16)$$

4.5 Homogeneización y RVE

4.5.1 Principios de la homogeneización.

Los principios básicos computacionales de la homogeneización han evolucionado gradualmente a partir de los conceptos empleados en otros métodos de homogeneización y encajan bien en el esquema de homogeneización de cuatro pasos establecido por Suquet [80]:

1. Definición de un elemento de volumen representativo microestructural (RVE) del cual se supone conocido el comportamiento mecánico de las partes individuales.
2. Formulación de las condiciones de contorno microscópicas a partir de las variables de entrada macroscópicas y su aplicación en la RVE.
3. Cálculo de las variables de salida macroscópicas del análisis de la RVE microestructural deformada.
4. Obtención de la relación entre las variables macroscópicas de entrada y salida.

La idea del concepto de RVE, es establecer un valor límite mediante las fases mencionadas, es decir, encontrar una porción de volumen de modo que represente la totalidad del modelo de prueba de modo que se pueda usar un método estratégico para dar solución a la problemática deseada, sin afectar en el resultado final.

4.5.2 Concepto de volumen representativo (RVE)

El enfoque de homogeneización computacional, así como la mayoría de otras técnicas de homogeneización, se basan en el concepto de un elemento de volumen representativo (RVE). Un RVE es un modelo de una microestructura material utilizado para obtener la respuesta del correspondiente continuo macroscópico homogeneizado en un punto material macroscópico. Por lo tanto, la elección adecuada de la RVE determina en gran medida la precisión del modelado de un material heterogéneo.

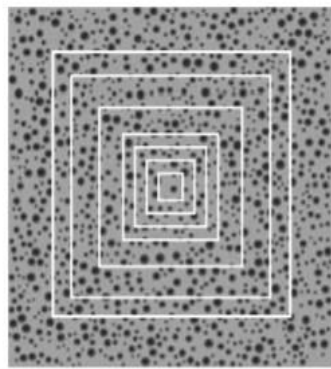
Hay dos formas significativamente diferentes de definir un RVE según Drugan y Willis [81]. La primera definición es:

Para que una muestra de RVE sea estadísticamente representativa de la estructura global, debe incluir virtualmente una muestra de todas las configuraciones microestructurales posibles que se dan en el compuesto. Claramente, en el caso de una estructura no regular y una microestructura no uniforme tal definición conduce a un RVE considerablemente grande. Por lo tanto, los RVE que cumplen rigurosamente con esta definición rara vez son utilizados en análisis de homogeneización reales. Este concepto suele emplearse cuando se construye un modelo computacional de la microestructura basado en información estadística obtenida experimentalmente

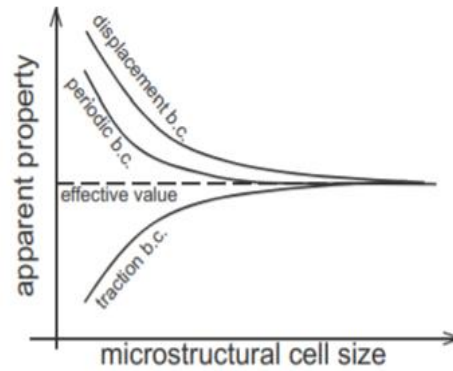
Otra definición caracteriza a un RVE como la estructura de volumen más pequeña que representa con suficiente precisión la propiedad macroscópica general de interés. Esto generalmente conduce a tamaños de RVE mucho más pequeños que la definición estadística descrita anteriormente. Sin embargo, en este caso el mínimo tamaño de RVE requerido también depende del tipo de comportamiento del material (por ejemplo, para comportamiento elástico por lo general los RVE son mucho más pequeños y suficientes que para comportamientos plásticos), ruta de carga macroscópica y diferencia de propiedades entre heterogeneidades. Además, el tamaño mínimo de RVE, que resulta en una buena aproximación de las propiedades generales del material, no siempre conduce a distribuciones adecuadas de los micro campos dentro del RVE. Esto puede ser importante si, por ejemplo, el inicio del daño microestructural o la evolución de microestructuras son de interés.

Esta última definición de RVE está íntimamente relacionada con la establecida por Hill [82], quien argumentó que un RVE está bien definido si refleja la microestructura material y si las respuestas

bajo desplazamiento uniforme y las condiciones de contorno de tracción coinciden. Si una célula microestructural no contiene suficiente información microestructural, sus respuestas generales, las condiciones de límite de tracción y desplazamiento uniforme serán diferentes. Las propiedades homogeneizadas determinadas de esta manera se denominan "aparentes", una noción introducida por Huet [83]. Las propiedades aparentes obtenidas por aplicación de condiciones de contorno de desplazamiento uniforme en una microestructura generalmente sobreestiman las propiedades efectivas reales, mientras que las condiciones de contorno de tracción conducen a una subestimación. Dado un tamaño de celda microestructural, las condiciones de contorno periódicas proporcionan una mejor estimación de las propiedades generales, que el desplazamiento uniforme y condiciones de contorno de tracción uniforme. El aumento del tamaño de la célula microestructural conduce a una mejor estimación de las propiedades globales y finalmente, a una "convergencia" de los resultados obtenidos con las diferentes condiciones de contorno al efecto real propiedades efectivas del material compuesto como se presenta en la figura 39.



a)



b)

Figura 39. a) Varias células microestructurales de diferentes tamaños. b) Convergencia de las propiedades aparentes a los valores efectivos con el aumento del tamaño de la celda microestructural para diferentes tipos de condiciones de contorno [84].

La teoría de homogeneización es ampliamente usada en materiales compuestos, formados por una distribución aleatoria o periódica de materiales componentes (figura 40).

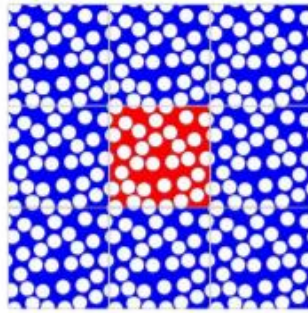


Figura 40. Representación de una microestructura periódica de un material compuesto. El RVE posee una distribución aleatoria de sus elementos.

En este caso la distribución y proporciones de los materiales componentes, debe ser constante en su dominio, de otra forma se considera como otro material. El RVE debe albergar muchas heterogeneidades para contener la información suficiente del compuesto, lo que dificulta la solución computacional del problema. En cambio, en medios más simples, la información de la microestructura puede ser contenida en un elemento de volumen. El RVE se modela como un medio ortotrópico homogéneo con ciertas propiedades efectivas que describen las propiedades en promedio del material compuesto. El medio macroscópicamente homogéneo puede ser descrito gracias al macro-esfuerzo y la macro-deformación que son derivados al promediar el esfuerzo y la deformación sobre el volumen de RVE.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon \, dV \quad (17)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma \, dV \quad (18)$$

4.5.3 Análisis de elementos finitos sobre un RVE

Para el estudio en un medio discretizado las ecuaciones 19 y 20 pasan a ser las siguientes:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V_{rve}} \sum_i^n \varepsilon_i V_i \quad (19)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V_{rve}} \sum_i^n \sigma_i V_i \quad (20)$$

donde V_{rve} es el volumen del RVE y ϵ_i , σ_i y V_i es la deformación, el esfuerzo y el volumen, respectivamente, de cada elemento por elementos finitos de una malla de n elementos en la discretización.

Los esfuerzos y deformaciones promedio de acuerdo al RVE utilizado, para la relación de Hooke en un material ortotrópico con las propiedades aparentes corresponden a:

$$\begin{pmatrix} \bar{\epsilon}_x \\ \bar{\epsilon}_y \\ \bar{\epsilon}_z \\ \bar{\epsilon}_{xy} \\ \bar{\epsilon}_{xz} \\ \bar{\epsilon}_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{yz}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_y \\ \bar{\sigma}_z \\ \bar{\sigma}_{xy} \\ \bar{\sigma}_{xz} \\ \bar{\sigma}_{yz} \end{pmatrix} \quad (21)$$

SIMETRICA

4.5.3.1 Ensayo de compresión uniaxial

Las espumas generalmente son usadas por sus buenas propiedades compresivas, su estudio se centró axialmente en la dirección z , la ecuación 22 que describe el Módulo de Young aparente en esa dirección

$$\bar{\epsilon}_z = -\bar{\sigma}_x \frac{\nu_{xy}}{E_x} - \bar{\sigma}_y \frac{\nu_{yz}}{E_y} + \bar{\sigma}_z \frac{1}{E_z} \quad (22)$$

Al dividir la ecuación 22 por σ_z que corresponde al esfuerzo promedio predominante por sobre los demás, se obtiene:

$$\frac{\bar{\epsilon}_z}{\bar{\sigma}_z} = -\frac{\bar{\sigma}_x}{\bar{\sigma}_z} \frac{\nu_{xy}}{E_x} - \frac{\bar{\sigma}_y}{\bar{\sigma}_z} \frac{\nu_{yz}}{E_y} + \frac{\bar{\sigma}_z}{\bar{\sigma}_z} \frac{1}{E_z} \quad (23)$$

La ecuación obtenida al hacer esta aproximación para el Módulo de Young aparente en la dirección z es:

$$E_z = \frac{\bar{\sigma}_z}{\bar{\varepsilon}_z} \quad (24)$$

El uso de las ecuaciones 19 y 20 puede ser complicado para un post-procesamiento de la interfaz de ANSYS®. Es por ello que aplicando las condiciones de Dirichlet a la superficie en donde la espuma se comprime y considerando que el trabajo realizado por el desplazamiento ($W = \frac{1}{2} F u_z$) debe ser igual a la energía de deformación interna homogénea ($U = \frac{1}{2} \bar{\sigma}_z \bar{\varepsilon}_z V_{rve}$) [85, 86, 87] es posible calcular las deformaciones y esfuerzo promedio de una manera menos compleja.

$$\bar{\varepsilon}_z = \frac{u_z}{H} \quad (25)$$

$$\bar{\sigma}_z = \frac{F_z}{A_h} \quad (26)$$

Siendo u_z el desplazamiento aplicado en la parte superior de la geometría, H la altura, F_r la fuerza de reacción que actúa en el modelo y A_h el área transversal homogénea.

Considerando las ecuaciones 24, 25 y 26 se tiene finalmente la ecuación para el Módulo de Young en la dirección z del RVE.

$$E_z = \frac{F_r * H}{A_h * u_z} \quad (27)$$

METODOLOGÍA

En el presente capítulo, se explicará el método empleado para llevar a cabo una simulación en el programa "ANSYS Workbench 2021 R2" de acuerdo con el objetivo previamente planteado y el ajuste de parámetros correspondientes.

Mediante el uso de elementos finitos se pretende analizar el comportamiento mecánico aproximado de espumas sintácticas de matriz de AlSi12, reforzada con esferas huecas de hierro. Es por eso por lo que se utiliza a modo de ensayo una probeta cilíndrica con un porcentaje de porosidad del 60% lo más estable posible, cuyo volumen de porosidad corresponde a esferas reforzantes modeladas aleatoriamente. El diámetro de dichas esferas se mantiene constante, con un valor de 3 mm y espesor constante. Mientras que la proporción geométrica de la probeta varía de acuerdo con la siguiente proporción presente en la ecuación 28 según la norma *ASTM E09* para probetas cortas a temperatura ambiente como se muestra en la figura 41 [88].

Specimens	Diameter		Length		Approx L/ D Ratio
	in.	mm	in.	mm	
Short	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25. ± 1.	0.8
	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25. ± 1.	2.0
Medium	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.50 ± 0.05	38. ± 1.	3.0
	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	2.38 ± 0.12	60. ± 3.	3.0
	1.00 ± 0.01	25.0 ± 0.2	3.00 ± 0.12	75. ± 3.	3.0
	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	3.38 ± 0.12	85. ± 3.	3.0
Long	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	6.38 ± 0.12	160. ± 3.	8.0
	1.25 ± 0.01	32.0 ± 0.2	12.50 min	320 min	10.0

^A Other length-to-diameter ratios may be used when the test is for compressive yield strength.

Figura 41. Dimensiones sugeridas para probetas cilíndricas.

$$\frac{H}{D} = 0.8 \quad (28)$$

En donde H será la altura de la probeta y D su diámetro.

De acuerdo con esta proporción, es que se realizan simulaciones para diversos RVE, con el fin de obtener una estimación del Módulo de Young, en donde este se comporte de manera estable y constante de acuerdo con lo mencionado en la sección 4.52 que indica: es posible contener gran parte de la información de un material compuesto para un RVE adecuado.

Adicionalmente se ensaya una probeta porosa (60% de porosidad) de celda abierta, hecha de material AlSi12 con el objetivo de hacer un análisis comparativo entre la espuma porosa y la reforzada con esferas para así obtener con mayor precisión el comportamiento mecánico de estas y la influencia de las esferas huecas de hierro en el Módulo de Young.

5.1 Simulación

La herramienta computacional en uso para llevar a cabo las simulaciones es el software ANSYS Workbench, el cual posee una plataforma con variadas aplicaciones de acuerdo a distintos requerimientos y solicitudes que definen un problema a resolver, entre ellas están aplicaciones para vibraciones, mecánica de fluidos, dinámica y estática de estructuras, entre otras.

Para proceder a simular la probeta, se deben seguir los siguientes pasos.

1. Dado que el problema a resolver requiere de un análisis estático de estructura, ya que se desea simular el ejercicio llevado a cabo por una prensa hidráulica, se debe ingresar a la ventana "Analysis Systems" y arrastrar el icono de "Static Structural" al cuadro de "Project Schematic" (figura 42).

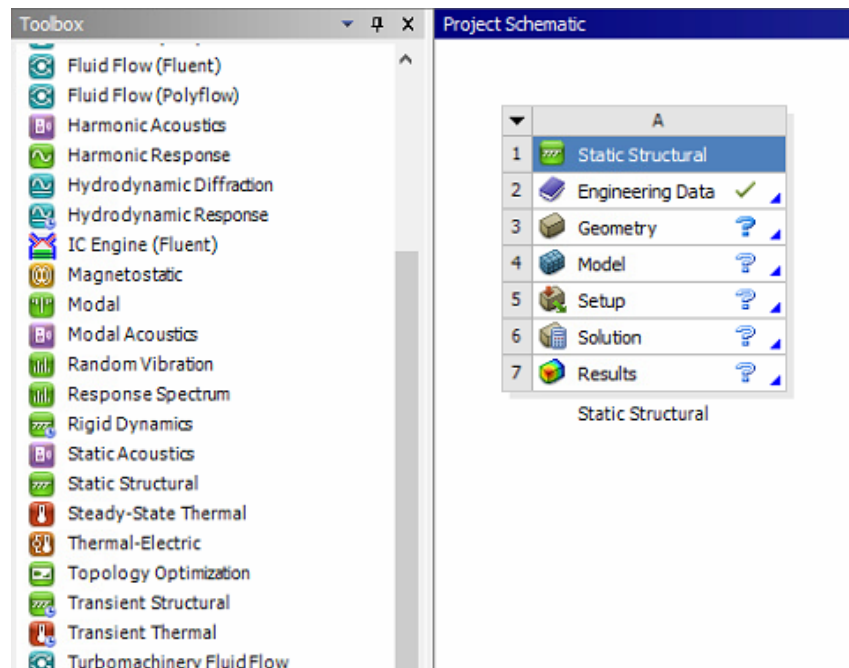


Figura 42. Ventana de Proyectos de "Ansys Workbench".

- En la ventana "Engineering data" (figura 43) se deben ingresar los datos y propiedades de los materiales que definen nuestro sólido. El programa trae una librería ya cargada de los materiales más generales, pero también cuenta con la opción de poder ingresar los datos de un nuevo material o editar uno ya existente.

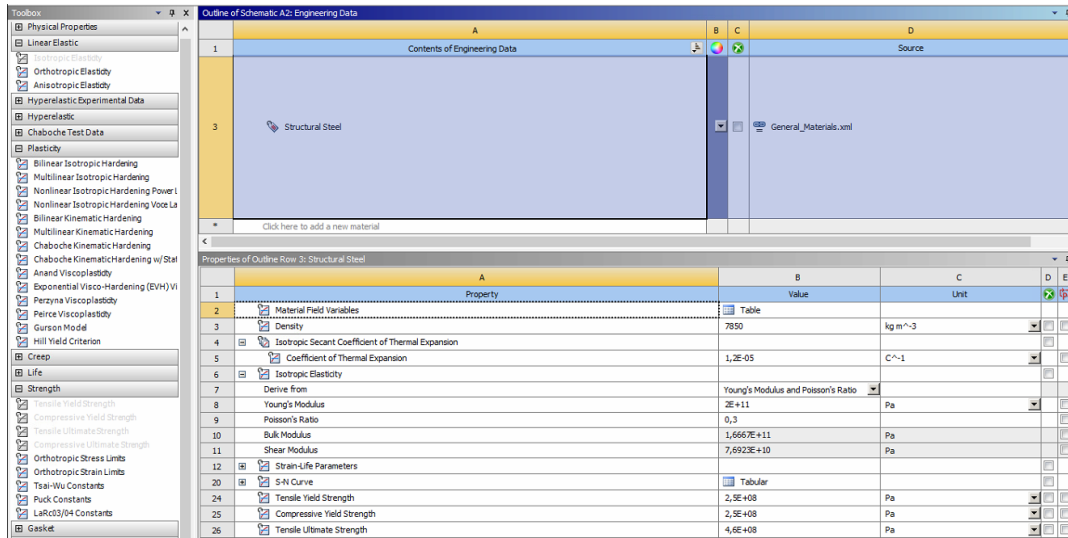


Figura 43. Ventana "Engineering Data" para edición de propiedades y configuración de materiales

- Ingresar con click derecho en "Geometry" (figura 44), seguido por darle click a la pestaña de "New DesignModeler Geometry", la cual nos permitirá cargar nuestra geometría y poder dar una primera visualización tridimensional del sólido.

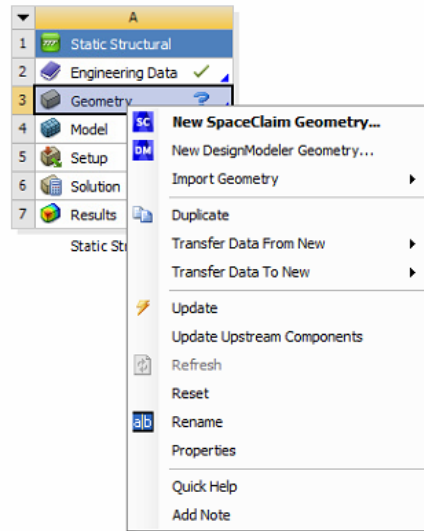


Figura 44. Pestaña "New DesignModeler Geometry" crear o cargar una nueva geometria.

Para este caso se cargará un archivo "script" el cual contendrá la información de la probeta.

4. Ejecutar la ventana "Model", en la cual se definirá y configura la malla, las condiciones de contorno, las restricciones, desplazamiento y el tipo de análisis que se desea obtener (desplazamientos, deformaciones, esfuerzos, fuerzas de reacción y entre otros coeficientes). Mediante el botón "Solve" se ejecuta la simulación para un aspecto específico indicado o para simular completamente el sólido, en base a los parámetros seleccionados.

Diagrama procedimientos de simulación "Ansys Workbench" (figura 45)

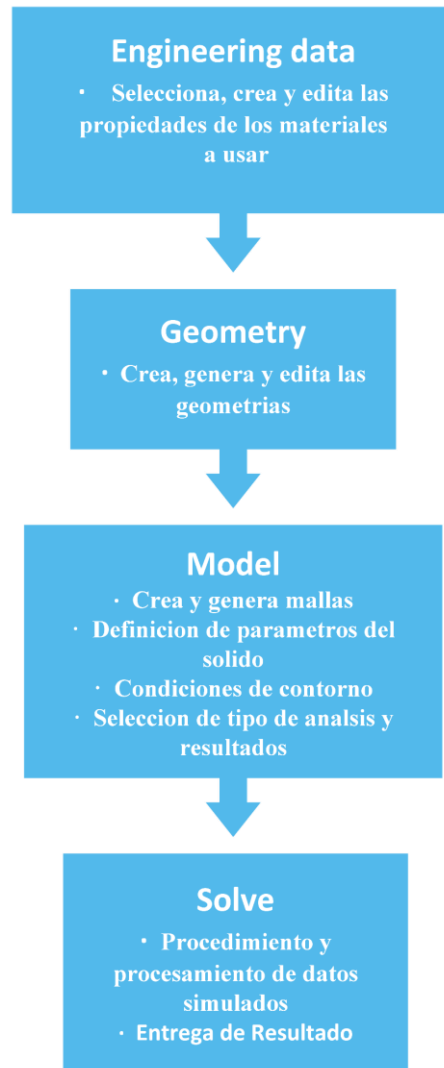


Figura 45. Diagrama de procedimientos para efectuar una simulación mediante "Ansys Workbench".

5.2 Geometrías

Las geometrías por simular serán cilíndricas porosas y geometrías cilíndricas reforzadas con esferas huecas como se presentan en la figura 46. Estas geometrías poseen unas porosidades aproximadas del 60%, tanto para las espumas de celda cerrada (que simulan a las que son fabricadas mediante infiltración), mientras que las con refuerzos esféricos de hierro, estos poseen un diámetro de 3 mm, y un espesor de pared de 0.13 mm como se muestra en la tabla 4, el material de la matriz será del compuesto AlSi12.

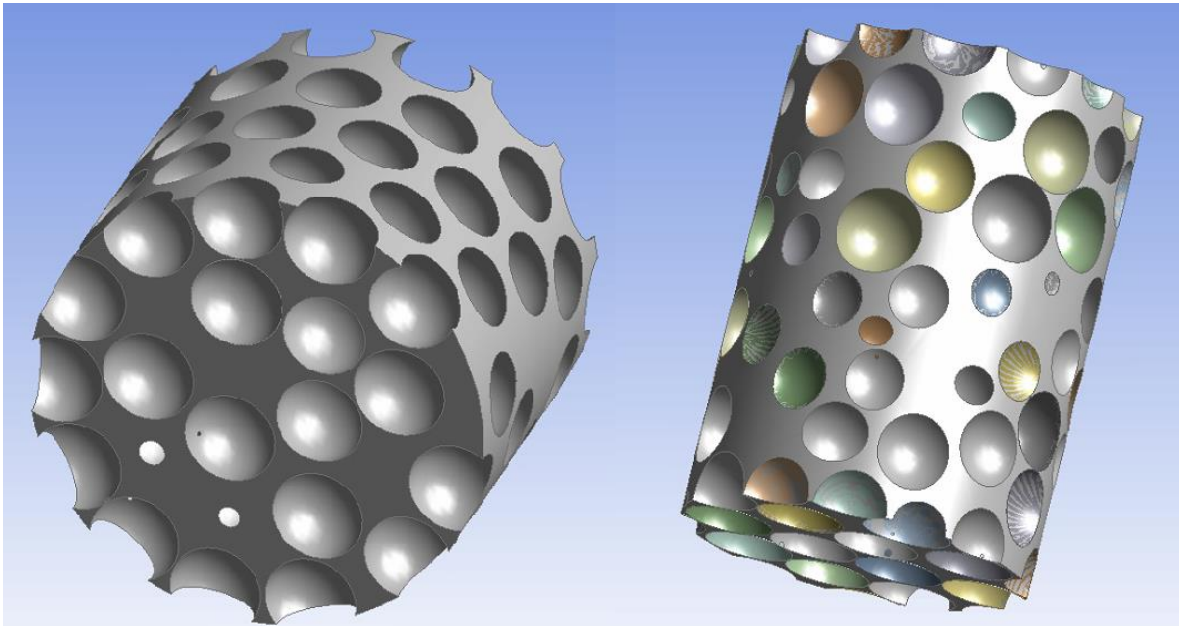


Figura 46. Representación de espuma porosa (izquierda) y espuma sintáctica (imagen derecha, con refuerzos esféricos representadas con colores).

Tabla 4. Propiedades de esferas.

PROPIEDADES GEOMETRICAS REFUERZO ESFERICO de HIERRO	
Diametro Nominal	3 [mm]
Espesor de pared	0,13 [mm]
Densidad	7,86 [g/cm ³]

La geometría cilíndrica de la probeta a ensayar obedece la siguiente relación:

$$\frac{H}{D} = 0.8 \quad (29)$$

con los siguientes valores de H (altura de la probeta) y D (diámetro de la probeta) presentados en la Tabla 5:

Tabla 5. a) Tabla representativa de Alturas y Diámetros que posee cada probeta con presencia de poros y con b) refuerzos esféricos.

PROBETA POROSA		PROBETA CON REFUERZOS ESFERICOS	
ALTURA	DIAMETRO	ALTURA	DIAMETRO
16,8	21	16,8	21
14,4	18	14,4	18
12	15	12	15
9,6	12	9,6	12
7,2	9	7,2	9

a) b)

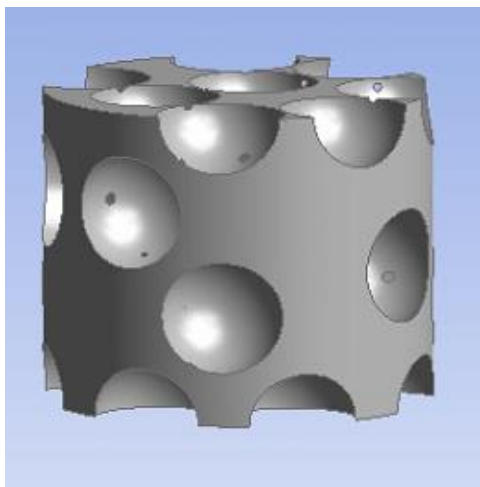
5.3 Elemento de volumen representativo (RVE)

Establecida las dimensiones de H, D y el diámetro de las esferas de refuerzo, es que se desea obtener un valor apropiado para el RVE, con el que sea capaz de contener la mayor información posible de las propiedades del material a ensayar, la tabla 6 muestra las dimensiones de la probeta obedeciendo la relación $H/D=0.8$ y el diámetro de las esferas de refuerzos y en la (figura 47) y (figura 48) se presentan los modelos para las geometrías porosas, geometrías con refuerzos y sus distintos RVE.

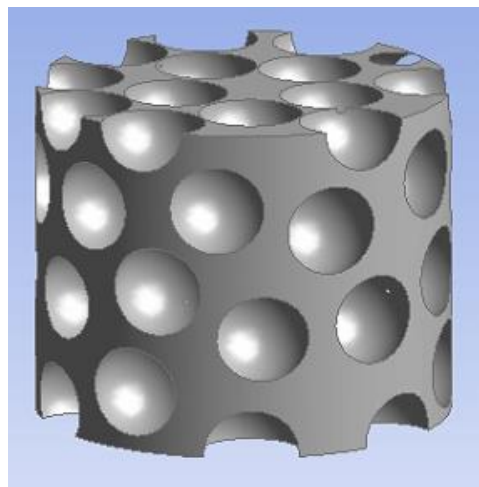
PROBETA	H [mm]	D [mm]	d	RVE [-]
	7,2	9	3	3
	9,6	12	3	4
	12	15	3	5
	14,4	18	3	6
	16,8	21	3	7

Tabla 6. Relación dimensional para los distintos RVE estudiados.

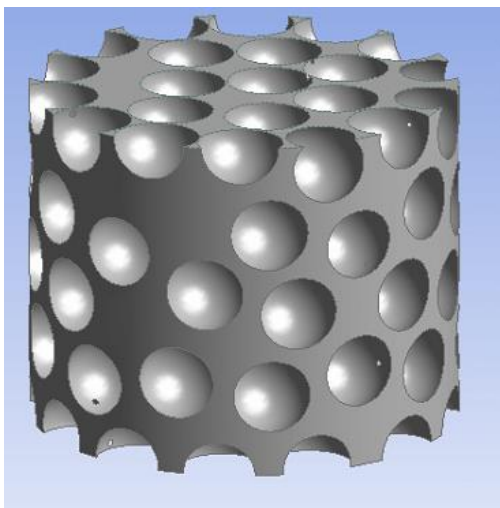
- **Geometrías porosas**



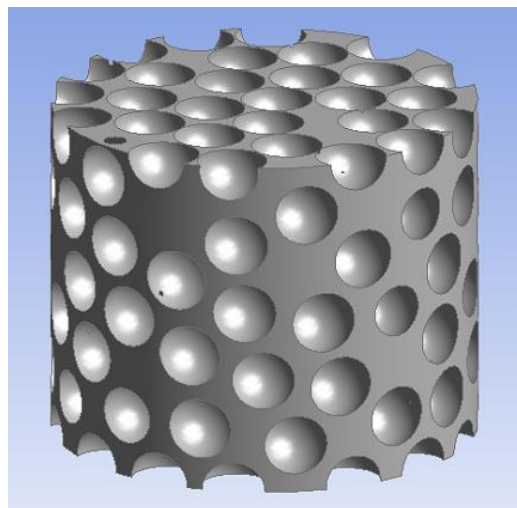
a)



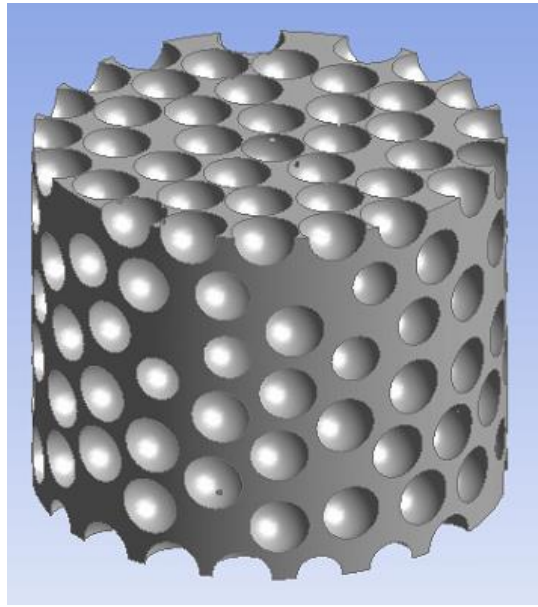
b)



c)



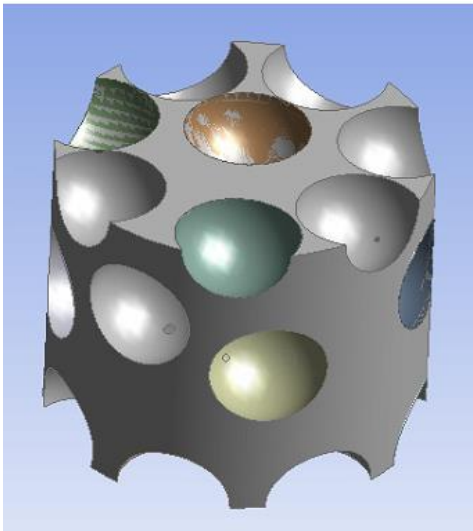
d)



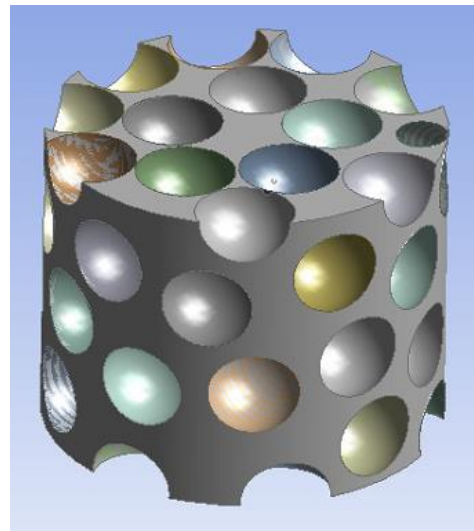
e)

Figura 47. La espuma porosa a), posee una proporción de RVE 3, de mismo modo las geometrías b) con un RV4, c) RVE 5, d) RVE 6 y e) RVE 7 respectivamente.

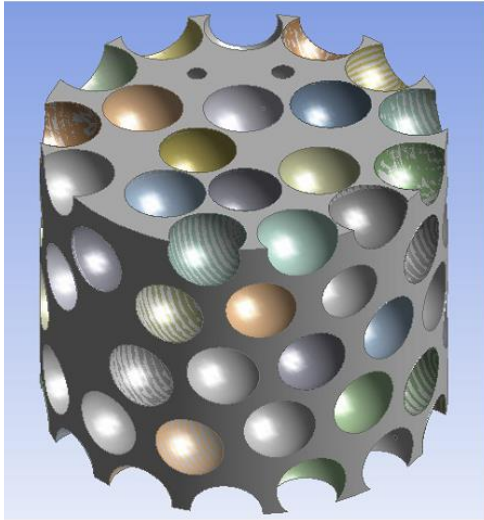
- **Geometrías con refuerzos esféricos**



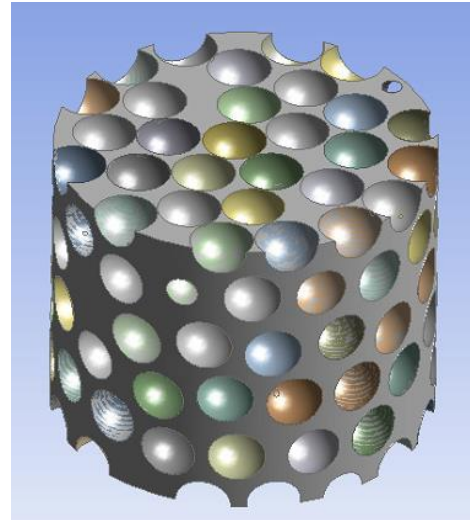
a)



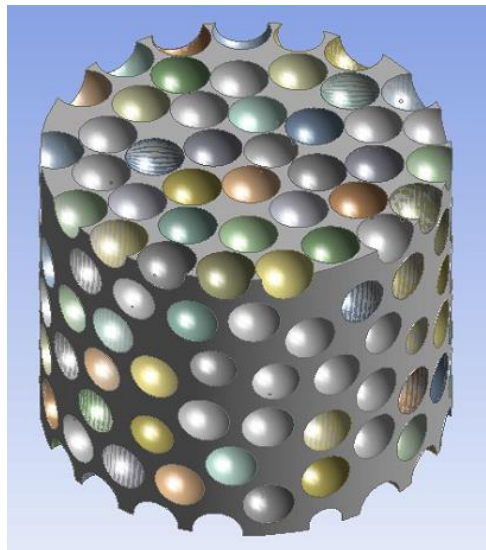
b)



c)



d)



e)

Figura 48. La espuma sintáctica a), posee una proporción de RVE 3, de mismo modo las geometrías b) con un RV4, c) RVE 5, d) RVE 6 y e) RVE 7 respectivamente..

5.4 Propiedades del material

El material usado para la simulación correspondiente a la matriz de las espumas sintácticas es AlSi12, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 7 y en la Tabla 8 se especifican las del Fe puro, material de las esferas.

Density	2650,0 kg/m ³
Structural 	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	7e+10 Pa
Poisson's Ratio	0,33000
Bulk Modulus	6,8627e+10 Pa
Shear Modulus	2,6316e+10 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	2e-05 1/°C
Tensile Ultimate Strength	2,4e+08 Pa
Tensile Yield Strength	1,3e+08 Pa

Tabla 7. Propiedades mecánicas principales para el AlSi12.

Density	7860,0 kg/m ³
Structural 	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	9,59e+10 Pa
Poisson's Ratio	0,29300
Bulk Modulus	7,7214e+10 Pa
Shear Modulus	3,7084e+10 Pa

Tabla 8. Propiedades mecánicas principales para el Fe.

Para poder ingresar estas propiedades al programa, se debe abrir la pestaña “engineering data” y editarla, también se puede agregar un nuevo material compuesto como el “AlSi12”, el cual no está cargado en la librería de materiales del programa.

5.5 Generación de mallas

5.5.1 Modelo MEF de la probeta

Para el mallado de la probeta cilíndrica, se espera obtener buenos resultados al realizar un ajuste apropiado de ella, es por aquello que los parámetros característicos (calidad del elemento, relación de aspecto, asimetría, calidad ortogonal y entre otros) deben ser lo suficientemente buenos como para representar una simulación correcta y cercana a la realidad, la matriz se construye de elementos tetraédricos. Además de estas consideraciones, se deben tener en cuenta los posibles errores que se pueden producir al generar el mallado, ya que la probeta compuesta por refuerzos esféricos posee una

geometría compleja, es natural que el programa arroje una serie de advertencias o errores de ajustes, como usuario, deben ser examinados y tratados de forma tal que no afecte en el resultado final y esperado. En la figura 49 se presentan los parámetros principales seleccionados, esta configuración es usada en general para todas las simulaciones realizadas, siempre y cuando no se produzcan errores que puedan alterar la simulación, con el fin de tener puntos de comparación en común.

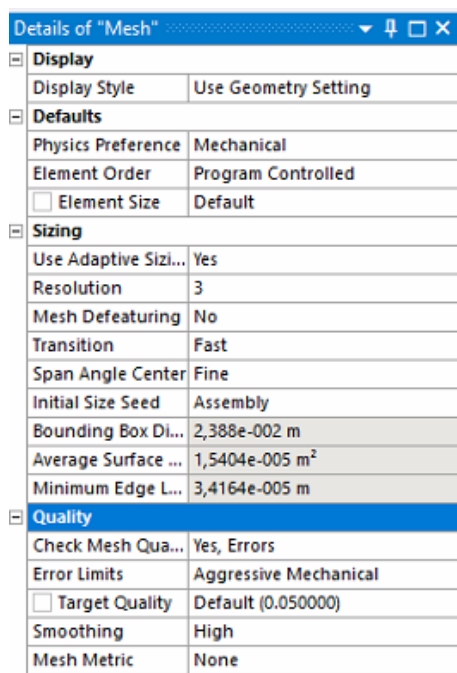


Figura 49. Configuración principal utilizada para la generación de malla.

5.5.2 Esferas

Para las esferas de Fe se utiliza el método de triángulos para la construcción de la malla, permitiendo que la pared de la esfera este conformada por elementos triangulares (figura 50) de su mismo espesor. El espesor utilizado para las esferas es de 0.13 [mm] en dirección interna ("inner thickness"), ya que la esfera corresponde a un elemento de coraza ("shell"), de 3 mm de diámetro, evitando así la intersección de esferas con la matriz.

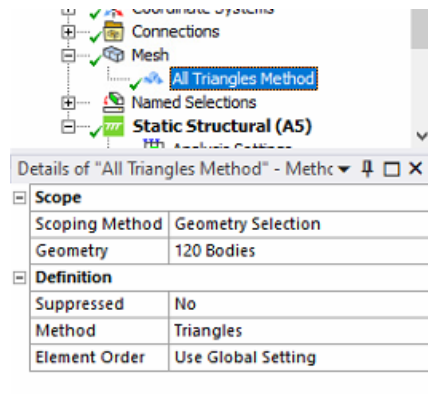


Figura 50. Método empleado para la generación de malla de los refuerzos esféricos.

El uso 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 51).

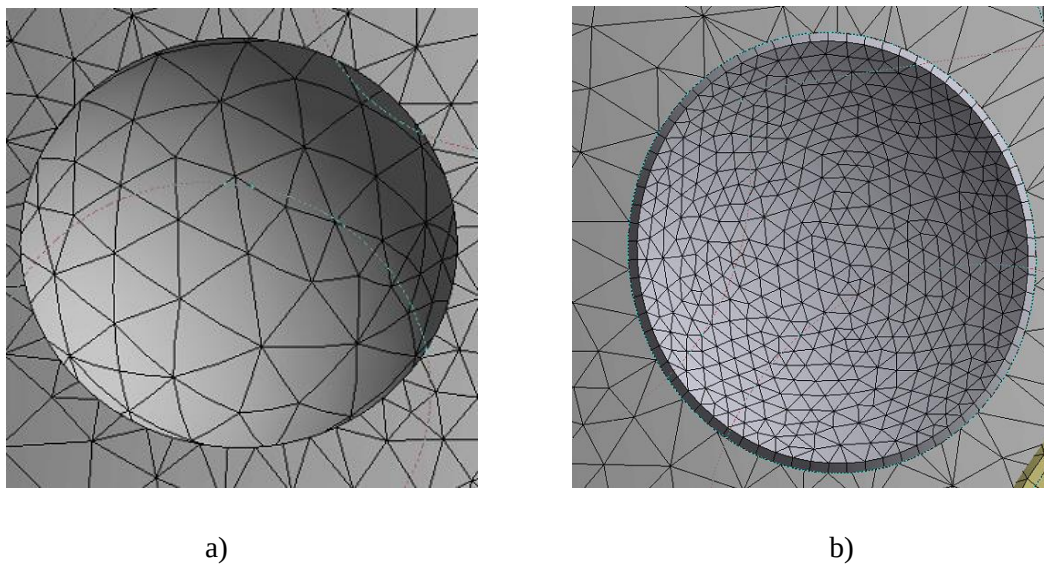


Figura 51. Comparación entre el mallado utilizado en el modelo MEF para a) la matriz y para b) las esferas huecas.

5.6 Condiciones de contorno

La forma de representar de manera computacional y física los problemas es estableciendo las condiciones de contorno, las fuerzas presentes, desplazamientos y parámetros que representen a la geometría como también los que influyen en esta.

En primera instancia, se debe simular el proceso de compresión uniaxial sobre la probeta. La primera condición de contorno corresponde a prohibir el desplazamiento de una de las caras de la probeta

cilíndrica, esto es, generar un desplazamiento igual a 0 mm en el eje z, lo que causa que la cara inferior en este caso quede inmovilizada. Esto se logra en el programa creando la condición de desplazamiento ("displacement") en el cual está permitido el movimiento en el eje x e y, mientras que en el eje z debe ser 0 como se muestra en la Figura 53.

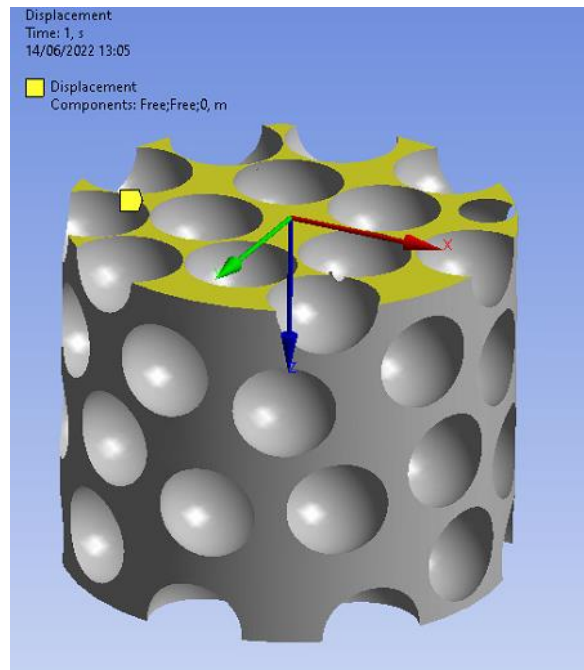


Figura 52. Condición de desplazamiento en la cara superior.

Details of "Displacement"	
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Selection
Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Free
Y Component	Free
☐ Z Component	0, m (ramped)
Suppressed	No

Figura 53. Restricciones utilizadas para la cara superior.

Como segunda condición de contorno, se debe crear un desplazamiento remoto (remote "displacement"), que corresponde a un acoplamiento de los nodos en la cara superior de la probeta,

esto implica una deformación uniforme a lo largo de los puntos de esta cara, este desplazamiento se produce bajo el efecto de una fuerza externa. El movimiento en los ejes x e y es restringido mientras que en el eje z actúa el desplazamiento axial en dirección interna a la probeta correspondiente al 1% de la altura de la probeta original (RVE7), esto quiere decir 0.168 mm (máxima deformación permitida y definida por el usuario), además su comportamiento debe ser acoplado (en "behaviour" seleccionar "coupled"), este mismo desplazamiento y parámetros se aplicarán al resto de probetas. En la figura 55 se puede apreciar dicha condición.

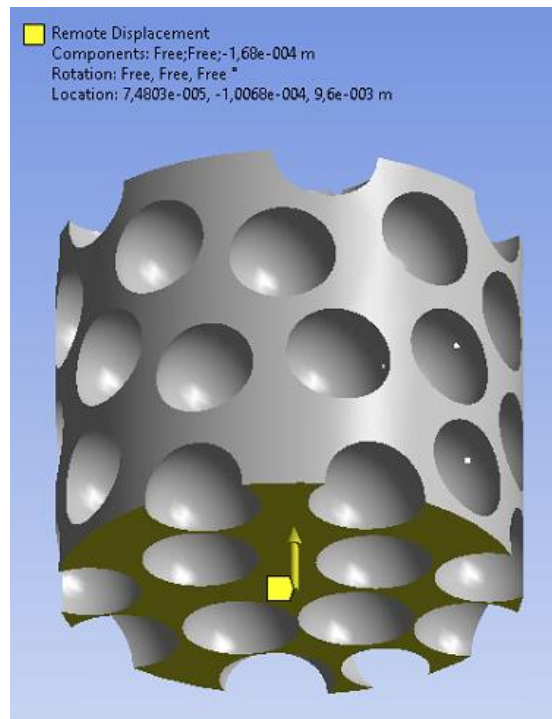


Figura 54. Condición de desplazamiento remoto en la cara inferior.

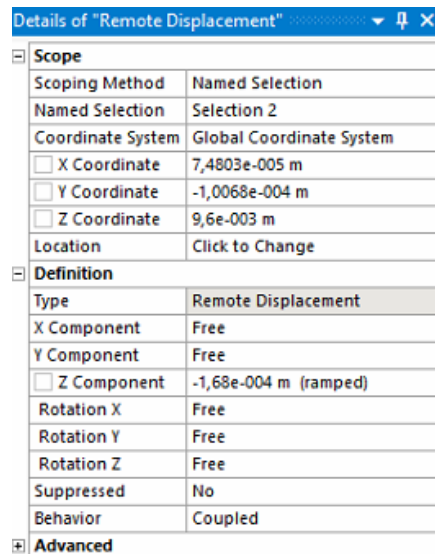


Figura 55. Restricciones aplicadas en la cara inferior.

En la ventana de soluciones, se debe agregar el tipo de resultado requerido por el usuario, en este caso es la fuerza de reacción, por lo tanto, dentro del software en "solutions", se debe seleccionar la ventana "Force Reaction" y finalmente la sección "Probe", una vez realizado esto, este parámetro debe estar asociado a la condición de borde de desplazamiento remoto como muestra la Figura 56 para así entregar el resultado solicitado.

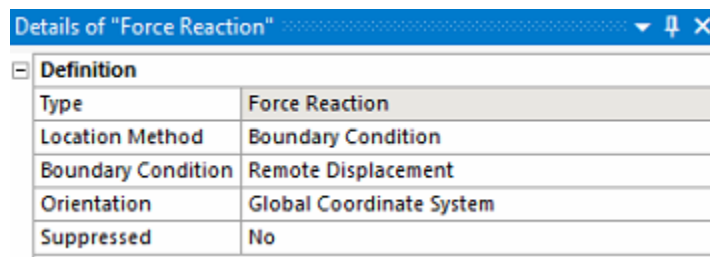


Figura 56. Selección de la condición de borde para la fuerza de reacción.

5.7 Cálculo del módulo de Young aparente

Obtenidos los resultados de la fuerza de reacción, se procede a calcular el Módulo de Young teniendo en cuenta el desplazamiento que se aplicó como condición de borde. La ecuación 30 permite calcular el esfuerzo (σ) a partir de la fuerza de reacción (F) debido a la deformación y el área transversal inicial de la superficie de la probeta (A), considerándola como si no tuviera poros, ya que, si se consideran, el área superficial disminuye y dificulta la comparación de los resultados entre ellas.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (30)$$

Para el cálculo de la deformación (ε), se utiliza la ecuación 31, a partir de la relación que existe entre la variación de altura de la probeta (ΔL) y la altura inicial (L). (ΔL) corresponde a la diferencia de la altura inicial y la altura luego de generarse el desplazamiento equivalente a 0.168 mm.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (31)$$

La Ley de Hooke definida en la ecuación 32 determina el comportamiento de la muestra bajo cargas uniaxiales en la zona elástica.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (32)$$

Dicha expresión indica que tanto el esfuerzo (σ) y la deformación (ε) son directamente proporcionales y (E) representa el Módulo de Young que mide la rigidez de un material o la resistencia a ser deformado elásticamente.

RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones corresponden a la fuerza de reacción que ejerce la probeta al ser deformada, en este caso la deformación aplicada corresponde al 1% de la altura de la probeta original (RVE 7), y así para todos los casos. El comportamiento que tiene la probeta bajo esta condición de deformación se encuentra en la zona elástica, esto debido a las propiedades mecánicas de los materiales a usar.

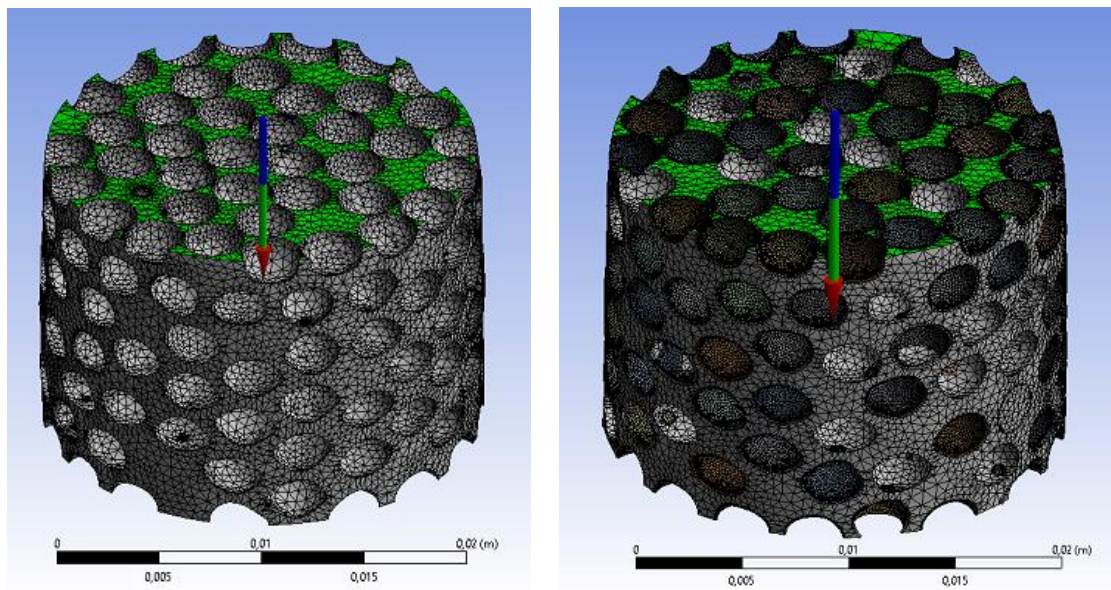


Figura 57. Dirección de la deformación aplicada a a) la probeta porosa y b) la probeta con refuerzos esféricos.

En las tablas 9 a la 18 se presentan los resultados obtenidos para el Módulo de Young y Modulo de Young normalizado para los distintos RVE estudiados.

6.1 Matrices porosas:

Tabla 9. Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 3.

RVE 3	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,60	17181	270,07	11,57	0,17
	0,61	17138	269,39	11,55	0,16
	0,61	17149	269,57	11,55	0,17
	0,61	17067	268,28	11,50	0,16
	0,61	17028	267,66	11,47	0,16
	0,61	17104	268,86	11,52	0,16
	0,61	17133	269,31	11,54	0,16
	0,57	18898	297,06	12,73	0,18
	0,60	17140	269,42	11,55	0,16
	0,61	17142	269,46	11,55	0,16
	0,61	17120	269,11	11,53	0,16

Tabla 10. Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 4.

RVE 4	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,61	25815	228,25	13,04	0,19
	0,61	25713	227,35	12,99	0,19
	0,61	25766	227,82	13,02	0,19
	0,61	25678	227,04	12,97	0,19
	0,62	25213	222,93	12,74	0,18
	0,61	25546	225,88	12,91	0,18
	0,61	25690	227,15	12,98	0,19
	0,61	25731	227,51	13,00	0,19
	0,61	25723	227,44	13,00	0,19
	0,61	26061	230,43	13,17	0,19
	0,61	26339	232,89	13,31	0,19

Tabla 11. Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 5.

RVE 5	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,60	35610	201,51	14,39	0,21
	0,61	35316	199,85	14,27	0,20
	0,60	36348	205,69	14,69	0,21
	0,60	34579	195,68	13,98	0,20
	0,59	35246	199,45	14,25	0,20
	0,59	35601	201,46	14,39	0,21
	0,60	35612	201,52	14,39	0,21
	0,59	35738	202,24	14,45	0,21
	0,60	35497	200,87	14,35	0,20
	0,59	36158	204,61	14,62	0,21
	0,60	34962	197,84	14,13	0,20

Tabla 12. Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 6.

RVE 6	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,60	43445	170,73	14,63	0,21
	0,60	43286	170,10	14,58	0,21
	0,60	43439	170,70	14,63	0,21
	0,60	43894	172,49	14,79	0,21
	0,60	44160	173,54	14,87	0,21
	0,60	43038	169,13	14,50	0,21
	0,60	43560	171,18	14,67	0,21
	0,60	44215	173,75	14,89	0,21
	0,60	43023	169,07	14,49	0,21
	0,60	42451	166,82	14,30	0,20
	0,60	43273	170,05	14,58	0,21

Tabla 13. Módulo de Young para matrices porosas de AlSi12 con RVE 7.

RVE 7	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,60	49694	143,47	14,35	0,20
	0,59	51978	150,07	15,01	0,21
	0,58	49502	142,92	14,29	0,20
	0,59	50660	146,26	14,63	0,21
	0,59	53359	154,06	15,41	0,22
	0,60	53506	154,48	15,45	0,22
	0,60	50677	146,31	14,63	0,21
	0,58	53263	153,78	15,38	0,22
	0,60	50194	144,92	14,49	0,21
	0,59	53283	153,84	15,38	0,22
	0,59	52298	150,99	15,10	0,22

6.2 Matrices reforzadas:

Tabla 14. Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 3.

RVE 3	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,60	21794	342,58	14,68	0,21
	0,61	22337	351,12	15,05	0,21
	0,58	23275	365,86	15,68	0,22
	0,61	21435	336,94	14,44	0,21
	0,61	20999	330,08	14,15	0,20
	0,61	22106	347,48	14,89	0,21
	0,61	22942	360,63	15,46	0,22
	0,61	22307	350,64	15,03	0,21
	0,60	21549	338,73	14,52	0,21
	0,61	22414	352,33	15,10	0,22
	0,61	20968	329,60	14,13	0,20

Tabla 15. Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 4.

RVE 4	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,61	40413	357,33	20,42	0,29
	0,61	39426	348,60	19,92	0,28
	0,61	38787	342,95	19,60	0,28
	0,61	41654	368,30	21,05	0,30
	0,62	38411	339,63	19,41	0,28
	0,61	39692	350,95	20,05	0,29
	0,61	40624	359,20	20,53	0,29
	0,61	41112	363,51	20,77	0,30
	0,61	40472	357,85	20,45	0,29
	0,61	42158	372,76	21,30	0,30
	0,60	44649	394,78	22,56	0,32

Tabla 16. Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 5.

RVE 5	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,60	54076	306,01	21,86	0,31
	0,61	52978	299,79	21,41	0,31
	0,60	54094	306,11	21,86	0,31
	0,60	52693	298,18	21,30	0,30
	0,60	52693	298,18	21,30	0,30
	0,59	53611	303,38	21,67	0,31
	0,60	53862	304,80	21,77	0,31
	0,59	55241	312,60	22,33	0,32
	0,59	55844	316,01	22,57	0,32
	0,59	56620	320,40	22,89	0,33
	0,60	55615	314,72	22,48	0,32

Tabla 17. Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 6.

RVE 6	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,60	65376	256,91	22,02	0,31
	0,60	69300	272,33	23,34	0,33
	0,60	68604	269,60	23,11	0,33
	0,60	67609	265,69	22,77	0,33
	0,60	68374	268,69	23,03	0,33
	0,60	67238	264,23	22,65	0,32
	0,60	69509	273,15	23,41	0,33
	0,60	66394	260,91	22,36	0,32
	0,60	68869	270,64	23,20	0,33
	0,60	67799	266,43	22,84	0,33
	0,60	65869	258,85	22,19	0,32

Tabla 18. Módulo de Young para matrices sintácticas de AlSi12 con presencia de esferas de Fe para un RVE 7.

RVE 7	Porosidad [%]	F[N]	Esfuerzo [MPa]	Young [GPa]	Young Norm [-]
	0,59	77186	222,85	22,28	0,32
	0,59	77031	222,40	22,24	0,32
	0,59	78120	225,55	22,55	0,32
	0,59	78964	227,98	22,80	0,33
	0,59	80053	231,13	23,11	0,33
	0,57	84890	245,09	24,51	0,35
	0,59	82447	238,04	23,80	0,34
	0,57	84646	244,39	24,44	0,35
	0,58	84945	245,25	24,53	0,35
	0,60	82929	239,43	23,94	0,34
	0,58	82988	239,60	23,96	0,34

6.3 Análisis de datos obtenidos

A modo de reducir la cantidad de datos y poder visibilizar de manera más clara la tendencia de estos, a partir de un porcentaje de porosidad estándar del 60%, se obtendrá un valor promedio del Módulo de Young para cada RVE, en el caso de las porosas Tabla 19 y las reforzadas Tabla 20.

Tabla 19. Valor promedio estándar obtenido para cada RVE de las matrices porosas de AlSi12.

MATRIZ POROSA		
RVE	Media M. Young [GPa]	M.Young Norm [-]
3	11,64	0,17
4	13,01	0,19
5	14,36	0,21
6	14,63	0,21
7	15,76	0,21

Tabla 20. Valor promedio estándar obtenido para cada RVE de las matrices sintácticas de AlSi12 con refuerzos esféricos de Fe.

MATRIZ CON REFUERZOS ESFERICOS		
RVE	Media M. Young [GPa]	M.Young Norm [-]
3	14,83	0,21
4	20,55	0,29
5	21,95	0,31
6	22,79	0,33
7	23,47	0,34

Para facilitar el análisis de los resultados, la siguiente Figura 58, Módulo de Young Normalizado v/s RVE representa a todas las simulaciones realizadas. En donde se compara la espuma porosa con la reforzada y también la tendencia de la curva que se desea obtener para dicho ensayo.

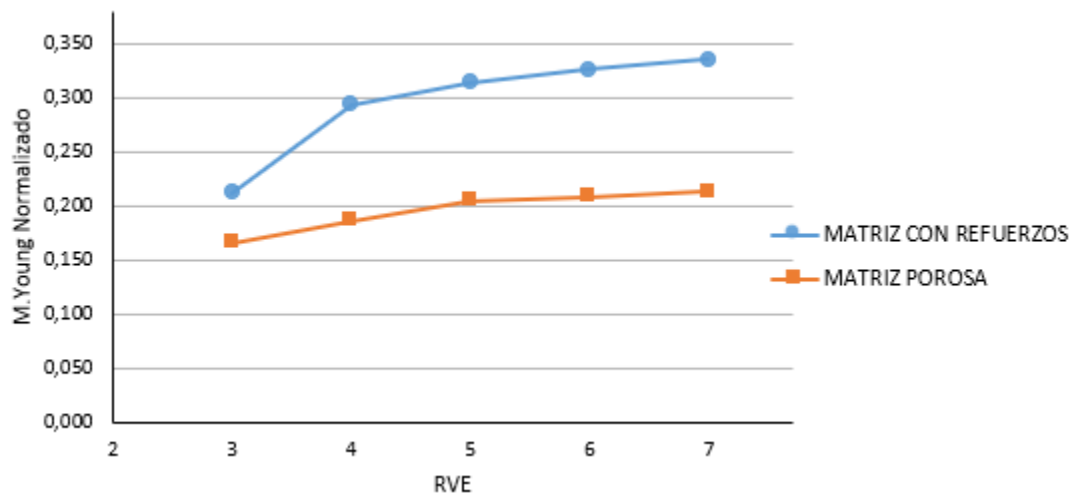


Figura 58. Gráfico comparativo Modulo de Young v/s RVE para visibilizar tendencia comparativa entre la matriz porosa y con refuerzos estudiada.

Para poder apreciar mejor la diferencia entre una matriz porosa y una con refuerzos esféricos huecos, el siguiente gráfico ilustra la diferencia en el Módulo de Young existente entre ambos y para cada RVE estudiado (figura 59).

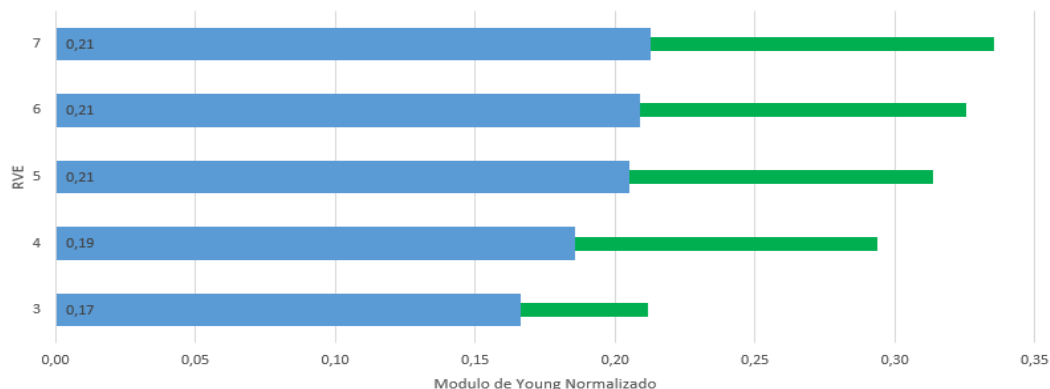


Figura 59. Gráfico representativo de diferencia entre Módulos de Young de espumas porosas y reforzadas para cada RVE.

La figura 60 representa la distribución de esfuerzos de una probeta sin refuerzos, con una porosidad estándar del 60%, en donde se aprecian las zonas con mayor sollicitación de esfuerzos. La matriz fue seccionada con el fin de tener claridad acerca de las zonas donde se presentan mayores esfuerzos, en donde los mayores esfuerzos se encuentran en la cara superior sometida al desplazamiento, resultado el cual era esperado. En la sección transversal de la probeta, existe una predominancia de esfuerzos en un rango de 375 - 1125 [MPa]. Mientras que en la periferia de los poros el rango de esfuerzo fue mayor 1500 - 1875 [MPa]. Las zonas con mayor sollicitación, ocurre en donde existe mayor cercanía entre poros, donde la pared celular posee menor espesor, con esfuerzos mayores a 3000[MPa].

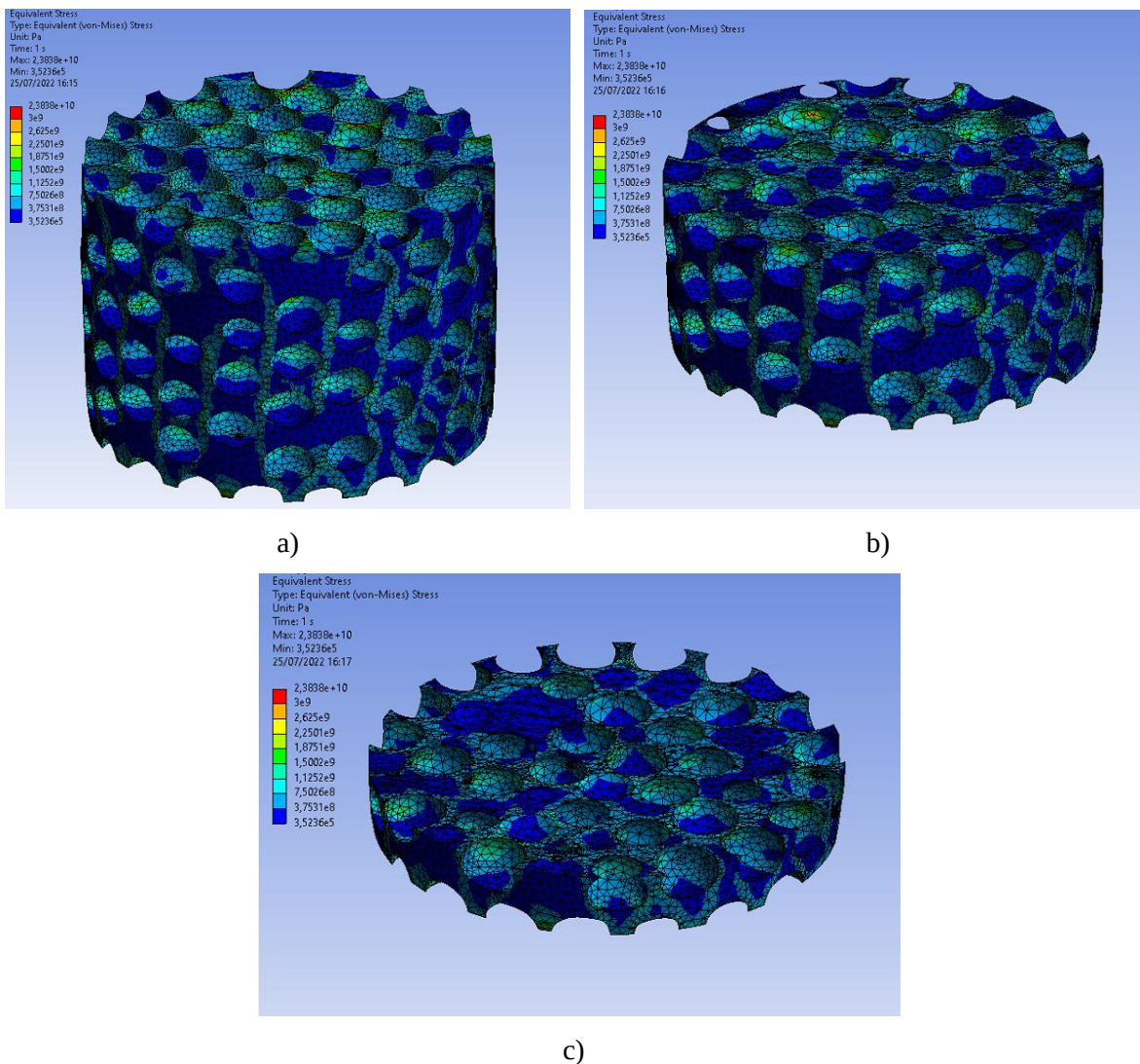
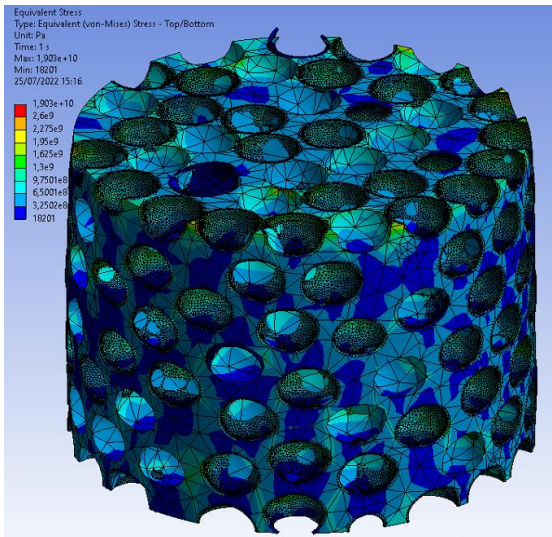
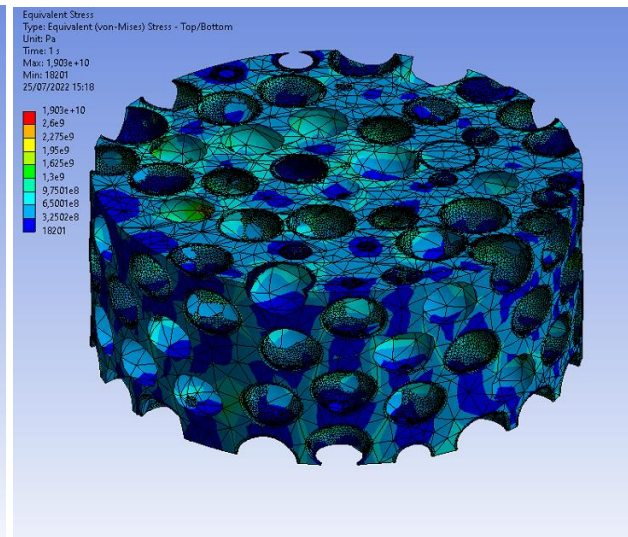


Figura 60. Distribución de esfuerzos en una espuma porosa RVE 7 (seccionada).

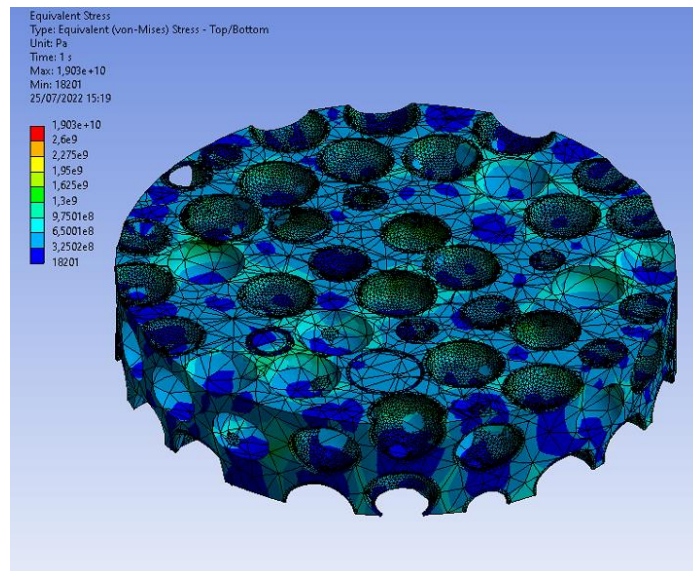
La figura 61 representa la distribución de esfuerzos de una probeta con refuerzos esféricos, al igual que en el caso anterior la probeta fue seccionada con el fin de visualizar las zonas con mayor concentración de esfuerzos. En la sección transversal de la probeta, existe una predominancia de esfuerzos en un rango de 325 - 650 [MPa]. Mientras que, en la periferia en torno a los refuerzos esféricos, el rango de esfuerzo fue de 975 - 1300[MPa]. Las zonas con mayor sollicitación, ocurre en donde existe mayor cercanía a los refuerzos, en las zonas más esquinadas y donde la pared celular posee un pequeño espesor.



a)



b)



c)

Figura 61. Distribución de esfuerzos en una espuma sintáctica RVE 7 (seccionada).

Al comparar los esfuerzos de las probetas reforzadas y sin refuerzos, se observa un comportamiento mecánico similar, pero con un rango de valores de esfuerzo mayores en la espuma sin esferas, esto indica que las esferas huecas contribuyen a la disminución de esfuerzos en la espuma y que son grandes concentradores.

En la figura 62 se muestra en detalle la zona que presenta los esfuerzos máximos en una probeta porosa y una reforzada. La existencia de estos esfuerzos se debe a la condición "coupled" utilizada para generar el desplazamiento de compresión ya que este impide la deformación en el plano xy de la cara.

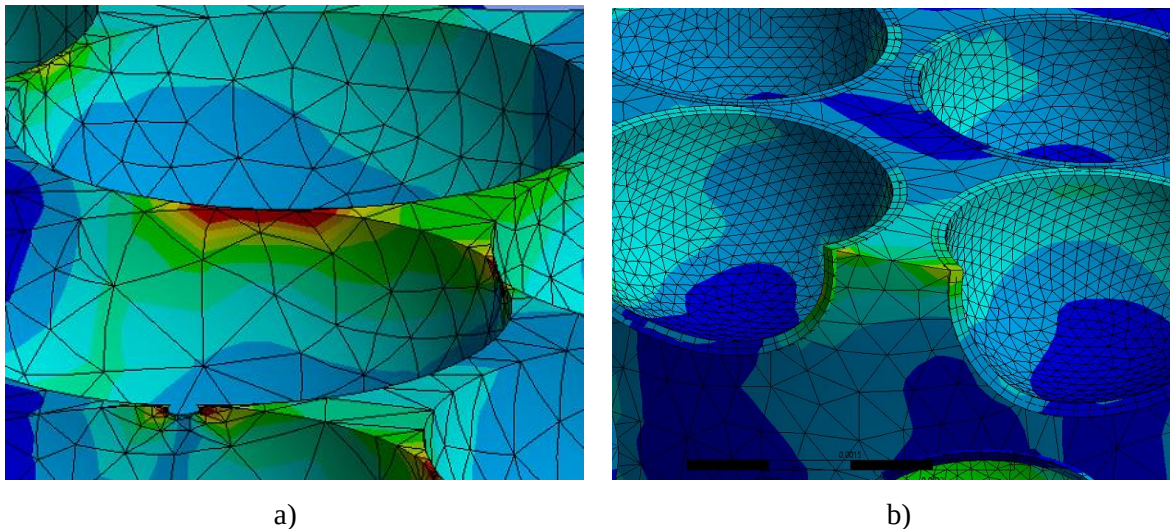


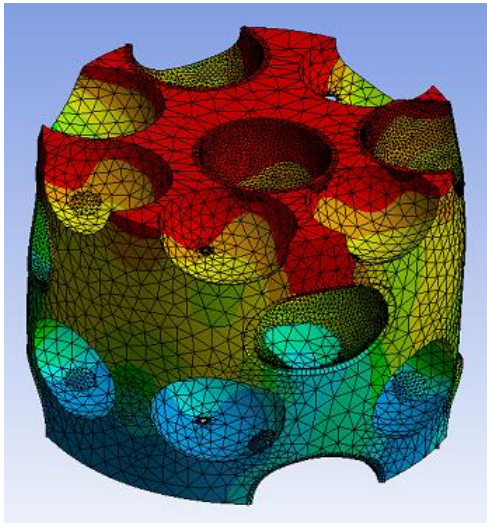
Figura 62. Zonas que presentan mayor concentración de esfuerzos para a) una probeta porosa y b) una reforzada.

La presencia de pequeñas paredes celulares formadas generadas por el espacio existente entre poros, son causante de la presencia de zonas bastante críticas para el caso de las porosas, ya que de acuerdo a donde se presenten y que tan frecuente sean en un perímetro acotado, pueden causar un colapso total en la estructura, no así en el caso de las reforzadas ya que las esferas huecas, gracias a sus propiedades, y estando bien distribuidas en el volumen de la matriz pueden soportar la suficiente carga sin tener que deformarse sosteniendo a su vez la estructura base de la probeta.

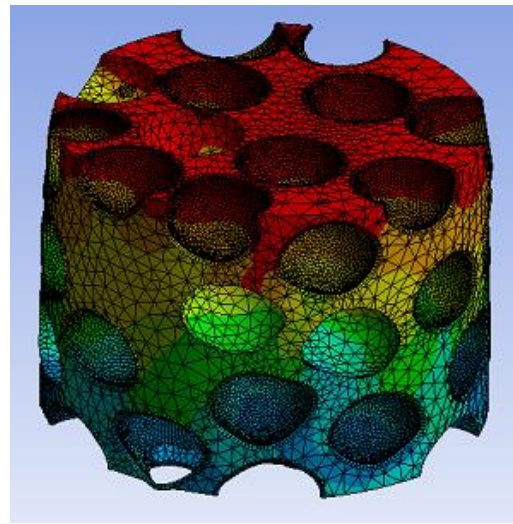
Las Figuras 63 y 64 muestran la deformación total para una probeta reforzada y una sin refuerzo respectivamente. En ambos tipos de matrices, producto del desplazamiento compresivo al cual se somete la cara superior, los nodos superiores de estos sufren la mayor deformación. En la figura 63 y figura 64 se presentan probetas reforzadas y sin refuerzos, pero para los distintos RVE a modo de

compararlas visualmente y tener claridad de la distribución de las deformaciones. Para el caso de las probetas reforzadas en comparación a las porosas, se mantiene el patrón de deformación a medida que se aumenta el RVE en donde la mayor carga la recibe la cara superior, las probetas porosas sufren una deformación mayor, esto por la presencia de zonas críticas que corresponden a paredes celulares de bajo espesor que no se encuentran respaldadas por algún agente concentrador de esfuerzos como podrían ser las esferas huecas de hierro, por lo que la estructura tiende al colapso más fácilmente.

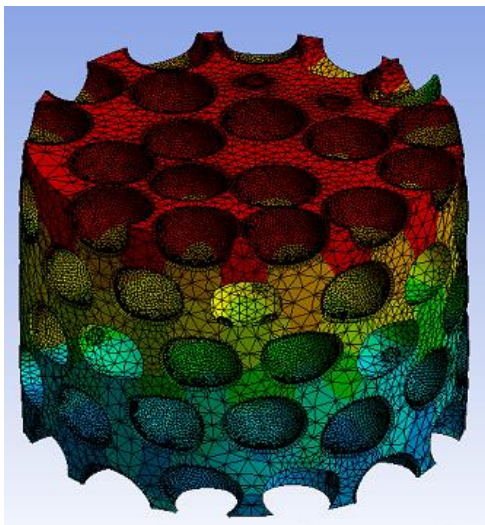
Distribución de la deformación de espumas sintácticas:



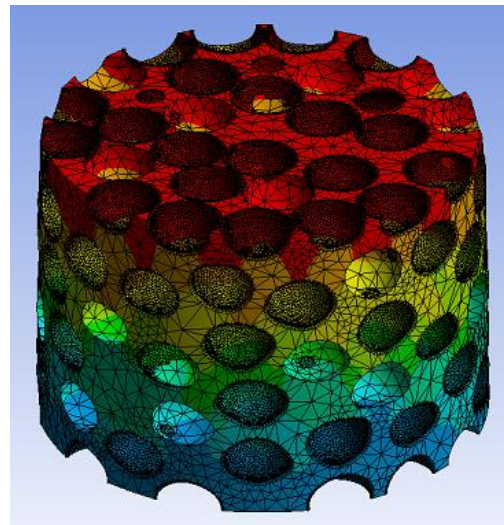
a)



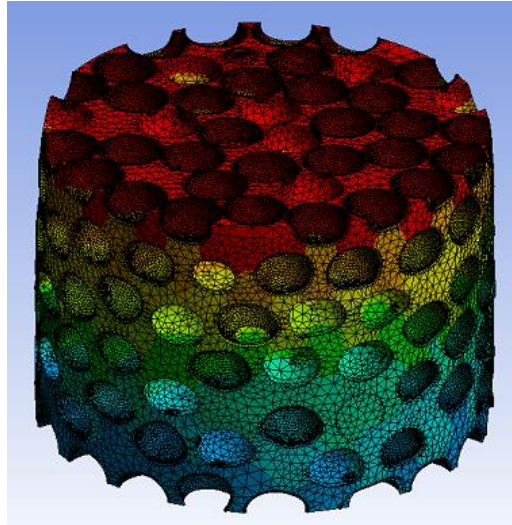
b)



c)



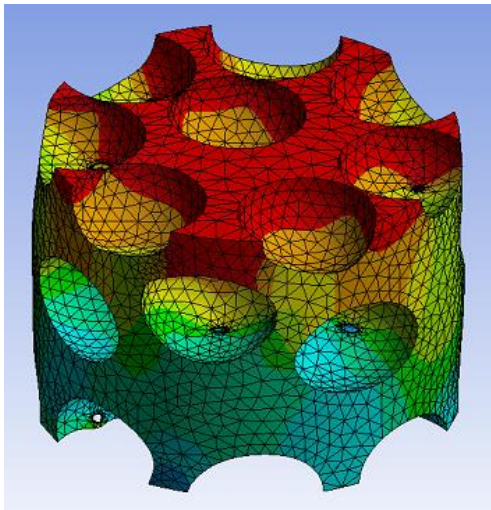
d)



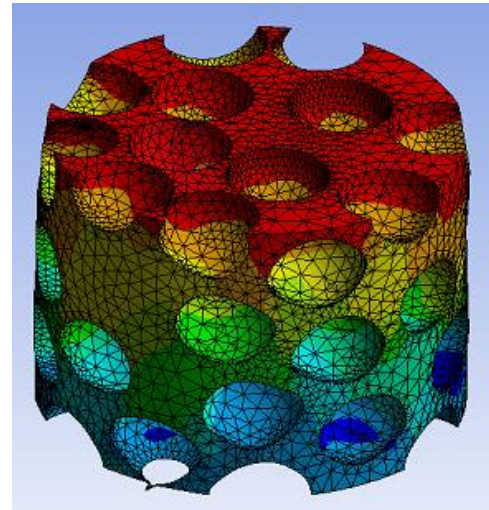
e)

Figura 63. Distribución de la deformación total en una espuma sintáctica a), que posee una proporción de RVE 3, de mismo modo las geometrías b) con un RV4, c) RVE 5, d) RVE 6 y e) RVE 7 respectivamente.

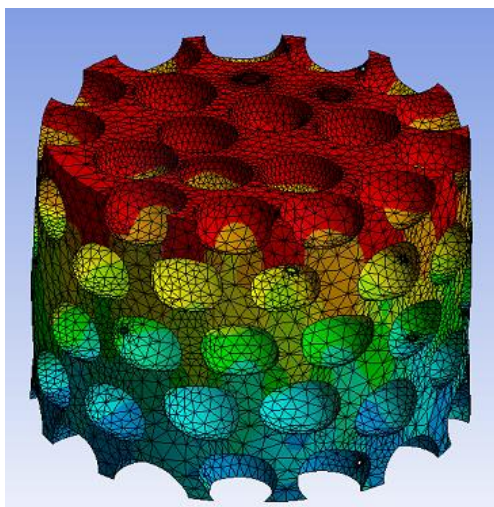
istribución de la deformación de espumas porosas:



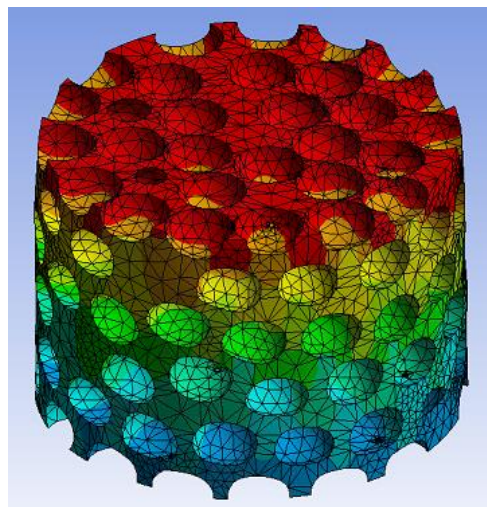
a)



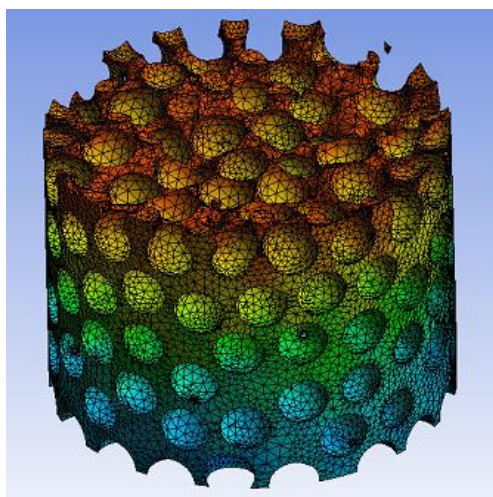
b)



c)



d)



e)

Figura 64. Distribución de la deformación total en una espuma porosa a), que posee una proporción de RVE 3, de mismo modo las geometrías b) con un RV4, c) RVE 5, d) RVE 6 y e) RVE 7 respectivamente.

CONCLUSIONES

Es factible el desarrollo de modelos computacionales de espumas con diversas características físicas y mecánicas mediante el programa "Ansys Workbench", logrando a su vez el control, edición y variación del código script para generar la geometría adecuada, como también editar de acuerdo a los parámetros de materialidad que conforman el sólido

Mediante la utilización del software "Ansys Workbench" empleando el método de elementos finitos, se determina numéricamente mediante simulaciones el módulo de Young efectivo de manera satisfactoria, por medio del módulo de Young aparente se obtuvieron todos los resultados requeridos en relación al RVE, cumpliendo con los parámetros de mallado: calidad de elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal.

De acuerdo con los datos obtenidos en el capítulo 'Resultados' mediante gráficos, tablas de datos y análisis de estos, se desprenden las siguientes conclusiones:

Al mantener un porcentaje de porosidad de aproximadamente un 60%, se desprende que una probeta de matriz porosa presenta un Módulo de Young menor al de una matriz con refuerzos esféricos de Fe, esto quiere decir que una espuma sintáctica con refuerzos de un material adecuado y distinto al de la matriz base, pueden dotar de nuevas características y propiedades tanto físicas como mecánicas a esta probeta. Para este caso el Fe mejora las propiedades mecánicas de la probeta de AlSi12. Ya que, si se pretende aumentar el módulo de Elasticidad manteniendo constante el porcentaje de porosidad, influyen todos los parámetros asociados a estos refuerzos como las propiedades mecánicas de este, la geometría en relación a tamaño, espesor y distribución dentro de la matriz.

Se observa que las "MMSFs" reforzadas tienen un mayor Módulo de Young que las espumas sin refuerzo (con la misma relación geometría), diferencia que se incrementa al aumentar las dimensiones de las probetas hasta el punto en que se genera una diferencia casi constante entre ambas probetas. Lo anterior se explica por lo siguiente:

Para ambos ensayos, comparándolos con igual RVE para cada caso, se genera una diferencia significativa entre la probeta porosa con la reforzada en relación al modulo de elasticidad.

Para los primeros casos en donde el RVE o elemento de volumen representativo es pequeño con valores 3, 4 y 5 el Módulo de Young presenta un crecimiento notable. Para el caso de la espuma porosa, el crecimiento fue lineal, pasando de un Módulo de Young de 11,64 a 14,36 [GPa], mientras que para la espuma sintáctica de AlSi12 con refuerzos de Fe, su Modulo de Young fue de 14,83 a 21,95 [GPa], esto es una diferencia que se encuentra en el rango del 20% y 33% para espumas reforzadas entre un RVE 3 y un RVE 5 respectivamente, es decir que para estos casos la elección del RVE no es la adecuada para el modelado, la espuma porosa presenta heterogeneidades geométricas del material, ya que a menor RVE el espacio vacío de los poros (con un diámetro constante de 3 [mm]) en una probeta pequeña, siempre ocuparan un 60% del volumen de la probeta, es decir, la cantidad de poros presentes será muy pequeña, respetando el espacio ocupado por ellas generará una gran disminución de su sección transversal dando como consecuencia paredes celulares amplias y delgadas para un volumen pequeño, por lo que estas zonas serán muy débiles al exponerse a un ensayo de compresión simulado y tenderán a fracturarse de manera más fácil dada la carga ejercida axialmente sobre la probeta.

Para una espuma sintáctica de AlSi12 con esferas de hierro, se presenta una heterogeneidad considerable en la selección del RVE dada la diferencia existente en las propiedades mecánicas de ambos materiales empleados, es decir, para un RVE pequeño al igual que en el caso anterior la probeta presenta un 60% de su volumen con esferas huecas, con un diámetro constante de 3 [mm] en donde el espacio empleado por estas, también generarán zonas débiles en la matriz de AlSi12 con espesores de pared celular pequeños. Al exponerse a deformación de un 1% axialmente dada la simulación de una carga. Inicialmente el esfuerzo se lo lleva la matriz de AlSi12 hasta el punto en que comienza a deformarse y empieza a actuar el refuerzo esférico el cual, dada su geometría, es un muy buen concentrador de esfuerzos y de gran resistencia, por lo que este alto porcentaje de diferencia en el Módulo de Young es debido a la dificultad que se presenta al intentar deformar una geometría esférica y de material más resistente que el de la misma matriz.

Para valores de RVE 6 y 7 el caso que se presenta es distinto al anterior, se puede apreciar un pequeño aumento en el Módulo de Young, para el caso de las probetas porosas un aumento de 14,63 a 15,76 [GPa] y las probetas reforzadas 22,79 a 23,47 [GPa]. Este crecimiento gráficamente presenta una curva casi constante y paralela al eje x en dichos puntos. Esto indica que la información entregada por la simulación a partir de dicho RVE comienza a no presentar variaciones, aunque se aumente dicho volumen. Esto cobra sentido al tener en cuenta que, al aumentar el volumen de la probeta, manteniendo los parámetros de porosidad, geometría del poro y también de los refuerzos, además que

existe una distribución más homogénea de estos al interior de la matriz, la información entregada por la simulación será más acertada.

Las simulaciones de las espumas permitieron obtener una curva convergente a partir de un RVE 6 tanto para el caso de las espumas sintácticas como las espumas porosas, pero se decidió establecer como punto de referencia el entero siguiente (RVE 7) para evitar variabilidad en los resultados. La variación que existe entre una simulación para el RVE 6 y RVE 7 para probetas no reforzadas es de aproximadamente 2% mientras que para una probeta con presencia de injertos esféricos es de un 3%, siendo variaciones pequeñas lo cual refuerza la idea de convergencia. Este valor de Elemento de Volumen Representativo es de gran importancia para trabajos futuros, ya que para parámetros similares a los del caso de estudio en relación a porcentaje de porosidad, tamaño de poro y morfología del refuerzo, se pueden llevar a cabo simulaciones muy acertadas, sin la necesidad de generar sólidos demasiado complejos y con gran volumen. Ya que una simulación de esta clase aumenta su complejidad y tiempos de solución mientras más grande y compleja pueda ser la probeta.

A pesar de que ambas espumas poseen similares geometrías, una espuma reforzada con esferas de Fe presenta un mayor Módulo de Young para un porcentaje de porosidad del 60%. Esto se debe a que la influencia de un material distinto al del metal base presenta propiedades mecánicas superiores, pese a que sean esferas huecas estas son grandes concentradores de esfuerzo y actúan como refuerzo para las paredes celulares, mientras que una matriz porosa posee debilidad en las paredes internas existentes entre poros. El esfuerzo máximo ocurre en la periferia de las esferas mientras que, en las espumas porosas en las denominadas zonas críticas, donde la pared celular es de pequeño espesor por la pequeña distancia que se puede generar entre poros, estas zonas pueden generar colapsos localizados y por consecuencia en la estructura general.

Para efectos de simulaciones el uso de una porción de volumen representativo, resulta ser un método bastante práctico y acertado, en donde efectivamente existe un RVE que contenga la información necesaria para determinar las propiedades mecánicas de un material compuesto. Este elemento debe ser un reflejo de la microestructura del material y si las respuestas bajo desplazamiento uniforme y condiciones de límite de tracción coinciden. Aumentar el tamaño de la celda microestructural conduce a una mejor estimación de las propiedades globales y, finalmente, a una convergencia de los resultados obtenidos con las diferentes condiciones de contorno a las propiedades efectivas reales del material compuesto.

En resumen, en los medios periódicos un volumen relativamente simple puede albergar toda la información de la microestructura a diferencia de los medios de distribución aleatoria de

heterogeneidades en donde se debe contar muchas de estas para contener la información suficiente del compuesto dificultando la solución computacional del modelo

ANEXOS

7.1 Mallado

7.1.1 POROSAS

RVE 3

Tabla 21. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 3.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	1,29E-02	1,166	2,93E-04	2,40E-07
Valor maximo	0,99992	1227,9	1	0,98801
Promedio	0,57309	6,196	0,50183	0,49671
Des. Estandar	0,28641	17,852	0,30136	0,29967

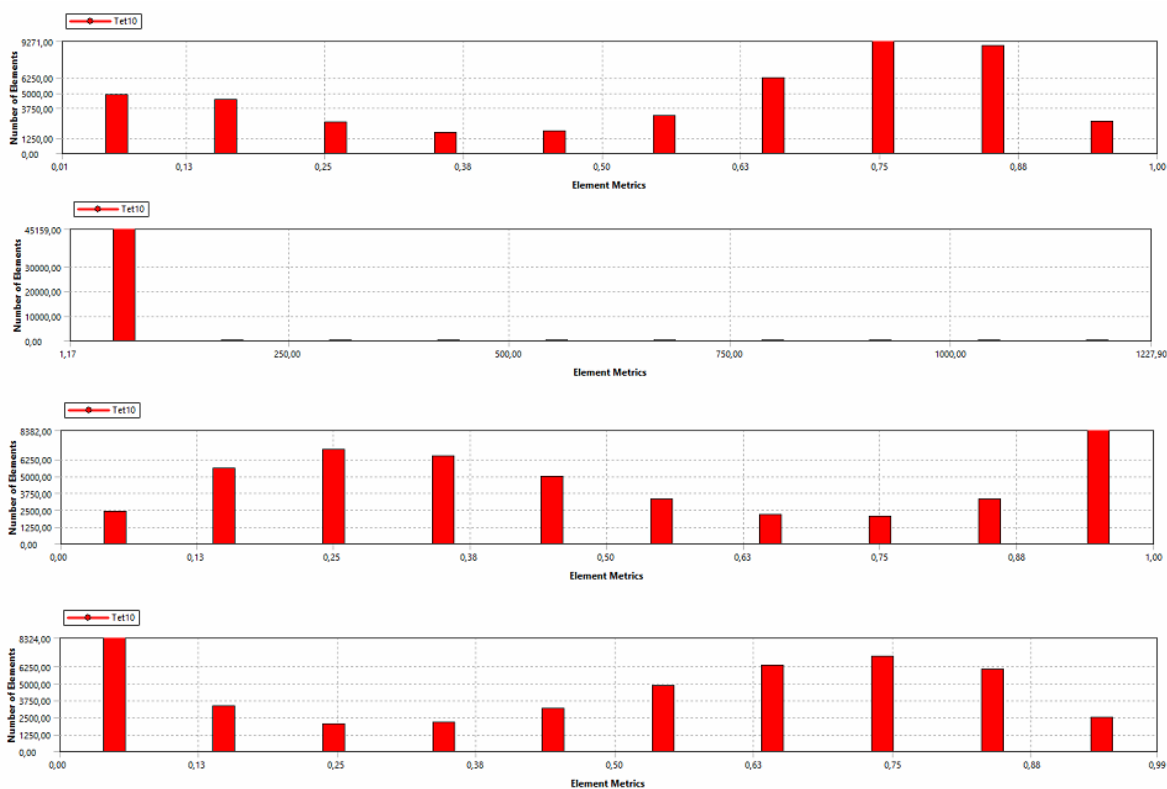


Figura 65. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 3.

RVE 4

Tabla 22. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 4.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	2,52E-02	1,1715	1,24E-03	3,42E-05
Valor maximo	0,99995	138,59	0,99997	0,98855
Promedio	0,66538	3,0981	0,41527	0,58313
Des. Estandar	0,20155	4,312	0,23555	0,23373

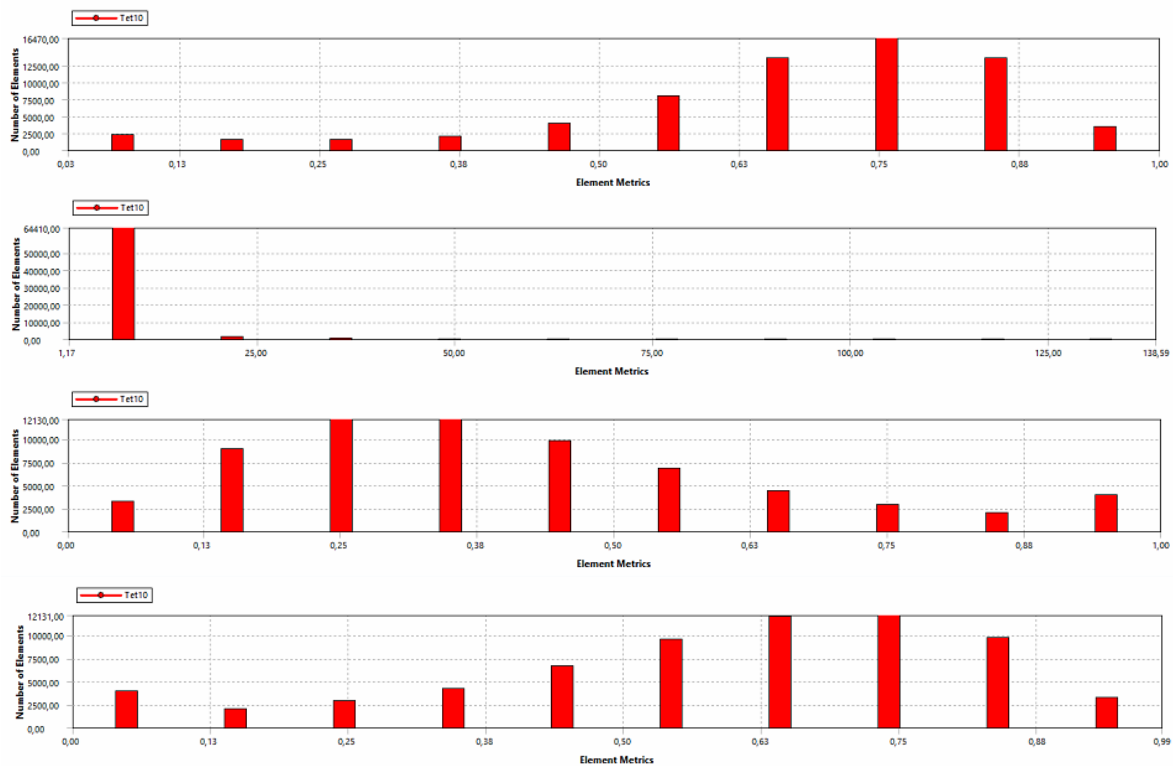


Figura 66. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 4.

RVE 5

Tabla 23. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 5.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	1,02E-02	1,1791	1,11E-03	9,26E-08
Valor maximo	0,9946	1643,4	1	0,98566
Promedio	0,6578	3,5549	0,4199	0,57856
Des. Estandar	0,20709	14,299	0,23979	0,23804

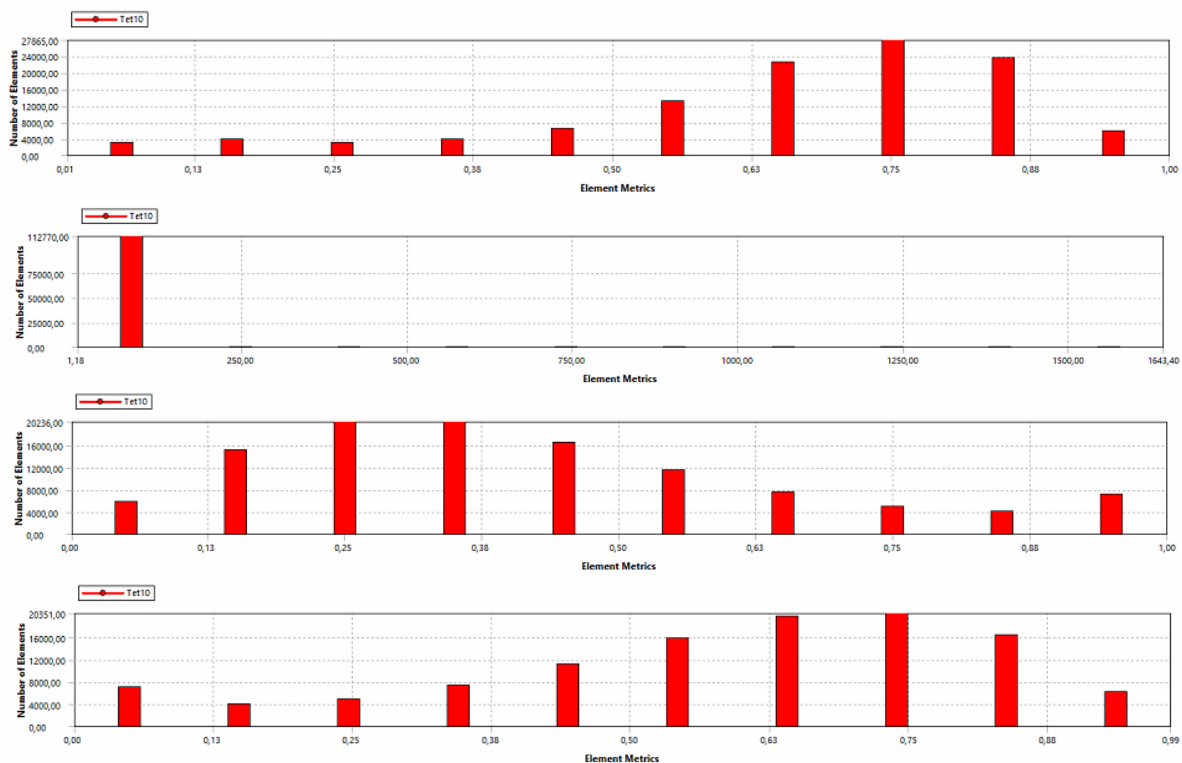


Figura 67. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 5.

RVE 6

Tabla 24. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 6.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	1,00E-02	1,1698	1,46E-03	6,05E-07
Valor maximo	0,9918	309,65	1	0,98426
Promedio	0,56879	3,864	0,46448	0,53324
Des. Estandar	0,22979	7,3665	0,25847	0,25623

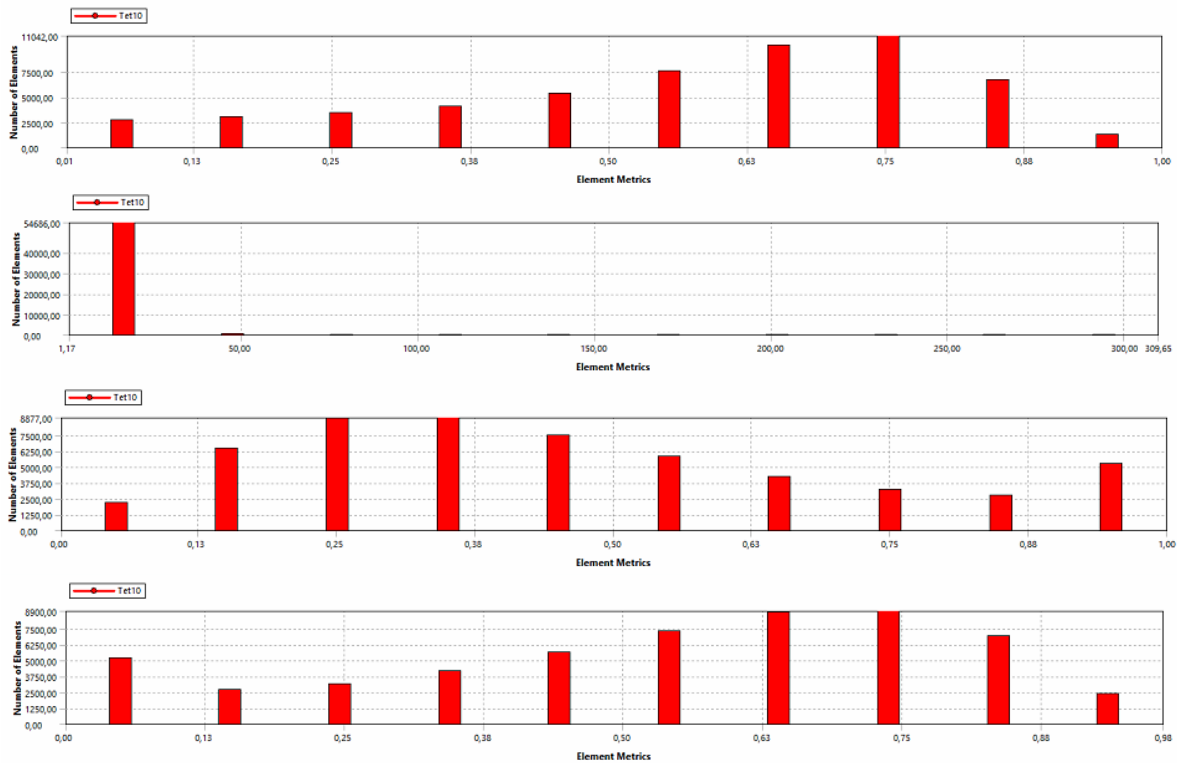


Figura 68. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 6.

RVE 7

Tabla 25. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 7.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	1,01E-02	1,1704	1,02E-03	1,37E-07
Valor maximo	0,99995	1756	1	0,98936
Promedio	0,65064	3,6828	0,42504	0,57344
Des. Estandar	0,21421	11,946	0,24766	0,24596

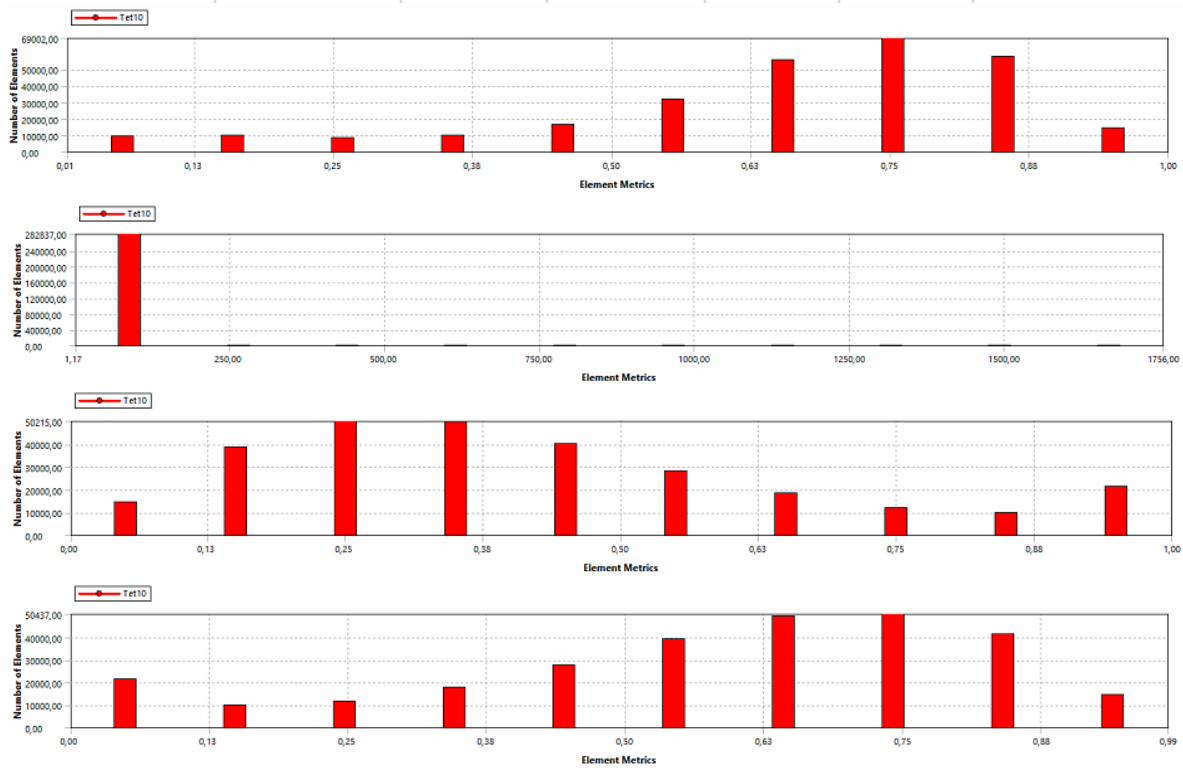


Figura 69. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma porosa RVE 7.

7.1.2 REFORZADAS

RVE 3

Tabla 26. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 3.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	1,50E-02	1,0013	2,91E-06	5,46E-07
Valor maximo	1	780,81	1	1
Promedio	0,74957	3,6957	0,30411	0,70997
Des. Estandar	0,28168	9,5499	0,30822	0,31724

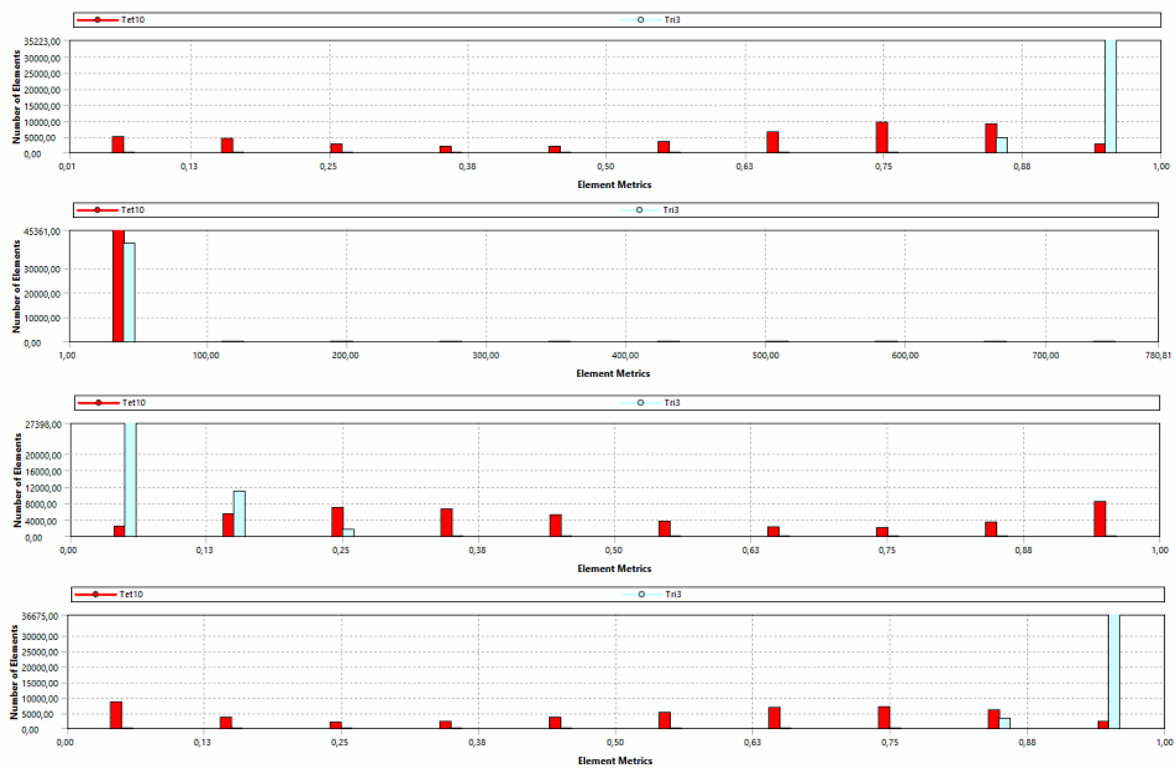


Figura 70. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 3.

RVE 4

Tabla 27. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 4.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	2,53E-02	1,0005	4,83E-07	4,33E-05
Valor maximo	1	96,067	0,99996	1
Promedio	0,8644	1,8065	0,17865	0,8421
Des. Estandar	0,1756	2,4288	0,21007	0,21676

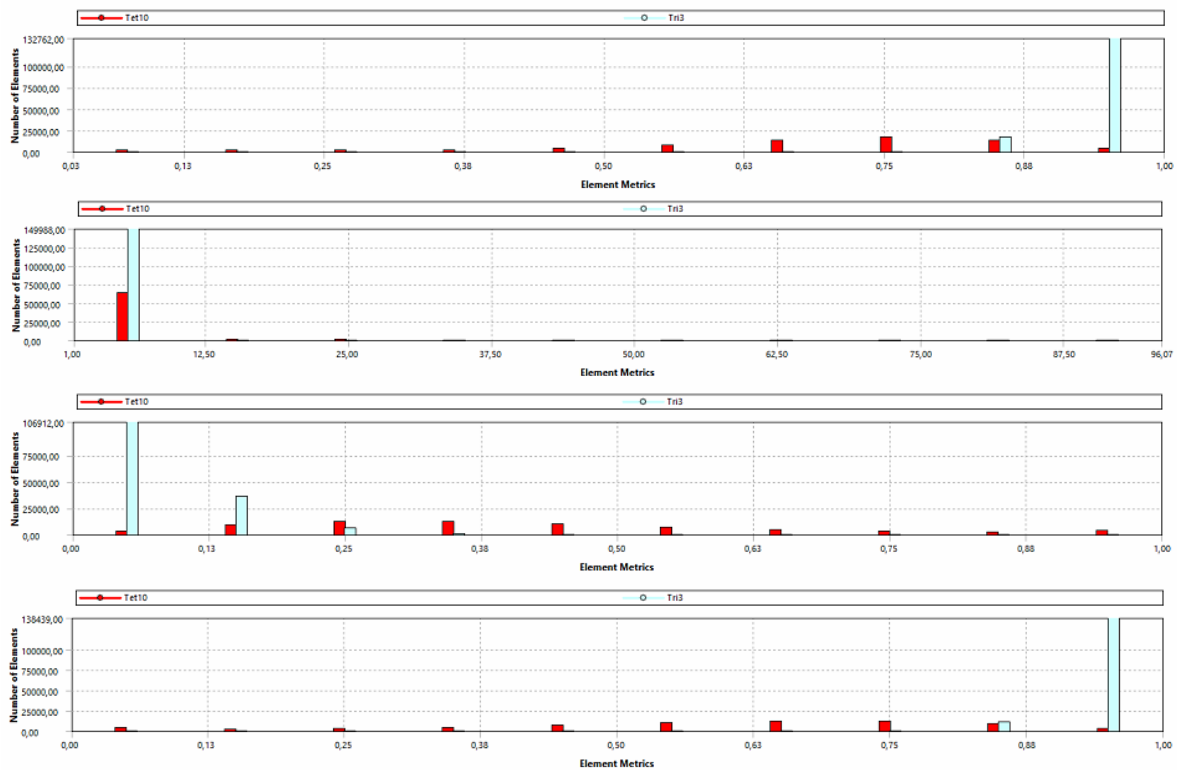


Figura 71. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 4.

Tabla 28. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 5.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	1,40E-02	1,0006	5,20E-07	4,38E-07
Valor maximo	1	633,04	1	1
Promedio	0,85942	1,9151	0,18177	0,83617
Des. Estandar	0,18548	4,5558	0,2196	0,22617

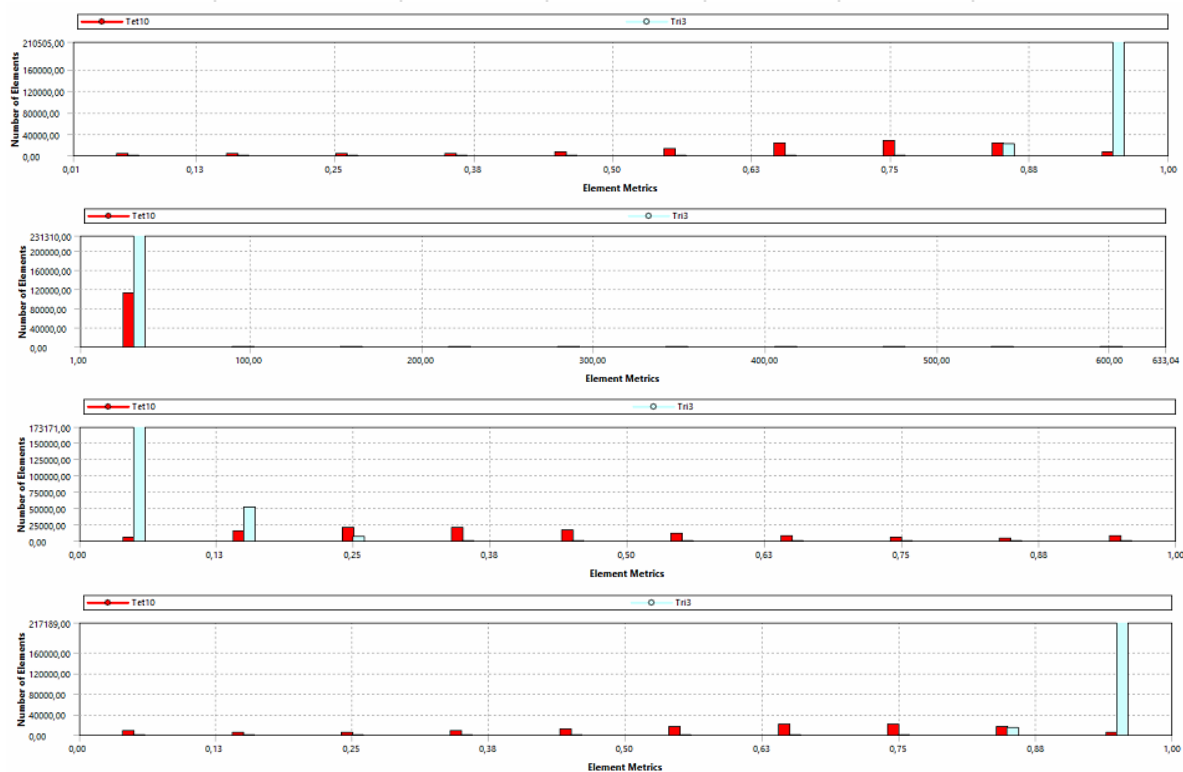


Figura 72. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 5.

RVE 6

Tabla 29. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 6.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	1,01E-02	1	2,22E-15	3,01E-07
Valor maximo	1	506,84	1	1
Promedio	0,88204	1,6655	0,15495	0,88189
Des. Estandar	0,16231	2,9535	0,17987	0,17757

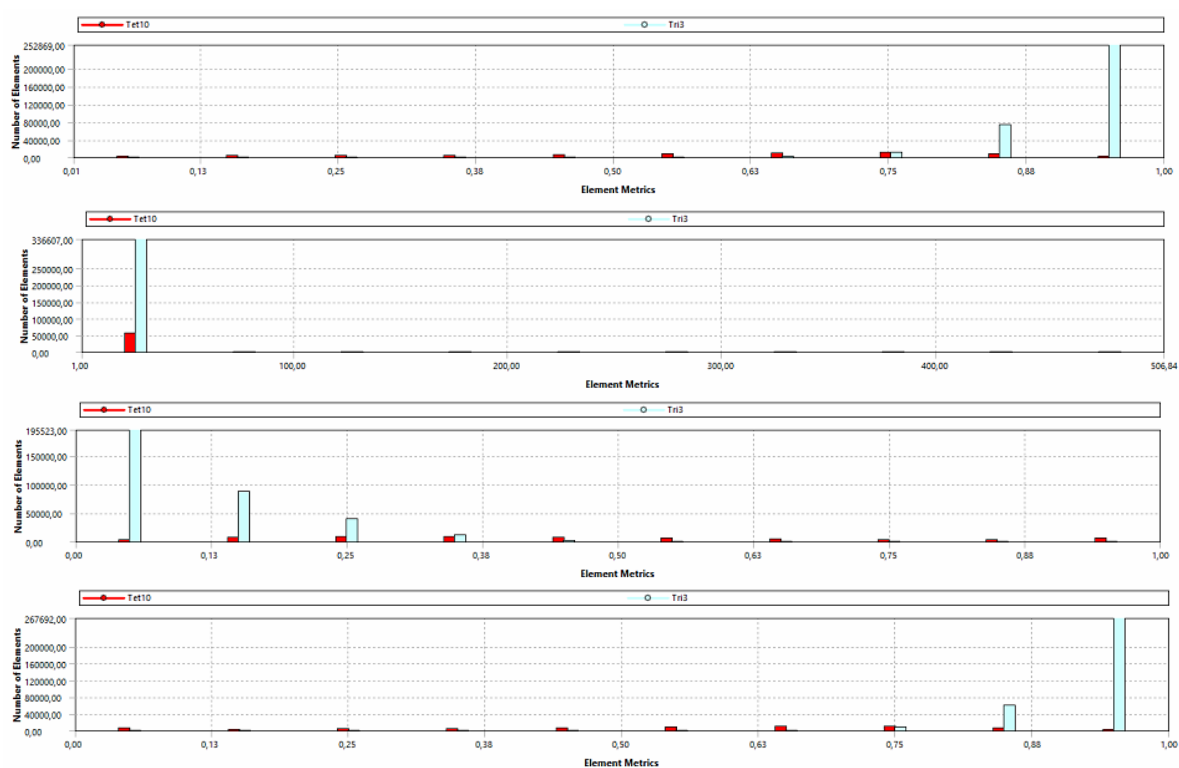


Figura 73. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 6.

Tabla 30. Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 7.

	Calidad de Elementos	Relacion de aspecto	Asimetria	Calidad ortogonal
Valor minimo	1,86E-02	1,0006	6,92E-07	1,86E-06
Valor maximo	1	446,28	1	1
Promedio	0,84689	1,9605	0,19512	0,81928
Des. Estandar	0,19668	3,2871	0,23317	0,23946

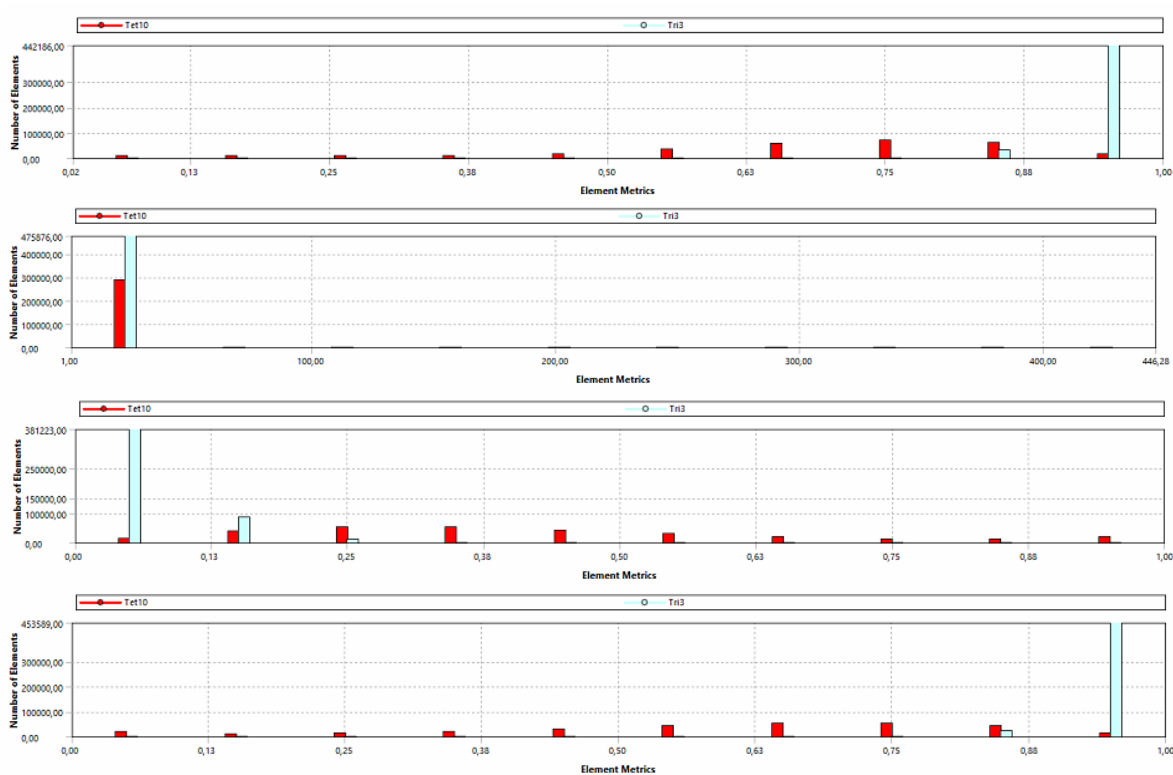


Figura 74. Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma con presencia de refuerzos esféricos RVE 7.

7.2 Resultados de las simulaciones

7.2.1 Probetas porosas

Tabla 31. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 2.

V. espuma [mm ³]	V.poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
180,98	277,0642089	0,6048853	17181	270,0682545	11,57435377	0,165347911
180,76	277,2842089	0,605365603	17138	269,3923373	11,54538588	0,164934084
180,82	277,2242089	0,605234612	17149	269,5652463	11,55279627	0,165039947
180,61	277,4342089	0,605693083	17067	268,2762878	11,49755519	0,164250788
180,26	277,7842089	0,606457201	17028	267,6632465	11,47128199	0,163875457
180,67	277,3742089	0,605562091	17104	268,857891	11,52248104	0,164606872
180,85	277,1942089	0,605169116	17133	269,3137422	11,54201752	0,164885965
194,93	263,1142089	0,574429725	18898	297,0577891	12,7310481	0,181872116
180,94	277,1042089	0,604972628	17140	269,4237753	11,54673323	0,164953332
180,91	277,1342089	0,605038124	17142	269,4552133	11,54808057	0,16497258
180,79	277,2542089	0,605300108	17120	269,1093951	11,53325979	0,164760854

Tabla 32. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 4.

V. espuma [mm ³]	V.poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
421,88	663,8544211	0,611433522	25815	228,2547142	13,04312653	0,186330379
421,5	664,2344211	0,611783516	25713	227,3528362	12,99159064	0,185594152
420,08	665,6544211	0,613091386	25766	227,8214591	13,01836909	0,185976701
418,73	667,0044211	0,614334784	25678	227,0433683	12,97390676	0,185341525
416,11	669,6244211	0,616747897	25213	222,9318656	12,73896375	0,181985196
418,58	667,1544211	0,614472939	25546	225,876232	12,90721326	0,184388761
421,66	664,0744211	0,61163615	25690	227,1494716	12,9799698	0,18542814
422,74	662,9944211	0,610641431	25731	227,5119911	13,00068521	0,185724074
423,24	662,4944211	0,610180914	25723	227,4412556	12,99664318	0,185666331
424,14	661,5944211	0,609351982	26061	230,4298318	13,16741896	0,188105985
424,66	661,0744211	0,608873043	26339	232,8878914	13,30787951	0,190112564

Tabla 33. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 5.

V. espuma [mm ³]	V.poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
852,45	1268,125041	0,598009982	35610	201,5113786	14,3936699	0,205623856
835,23	1285,345041	0,60613042	35316	199,8476789	14,27483421	0,203926203
840,52	1280,055041	0,603635814	36348	205,6876043	14,69197174	0,209885311
843,44	1277,135041	0,602258829	34579	195,6771121	13,97693658	0,199670523
859,8	1260,775041	0,594543941	35246	199,45156	14,24654	0,203522
868,46	1252,115041	0,590460143	35601	201,460449	14,39003207	0,205571887
857,95	1262,625041	0,595416345	35612	201,5226963	14,39447831	0,205635404
860,23	1260,345041	0,594341165	35738	202,2357104	14,44540789	0,20636297
854,3	1266,275041	0,597137577	35497	200,8719294	14,34799496	0,204971357
864,28	1256,295041	0,592431306	36158	204,6124243	14,61517316	0,208788188
845	1275,575041	0,60152318	34962	197,8444487	14,13174634	0,201882091

Tabla 34. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 6.

V. espuma [mm ³]	V.poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
1456,3	2208,053671	0,602576571	43445	170,7280618	14,63383387	0,20905477
1455,7	2208,653671	0,602740311	43286	170,1032313	14,58027697	0,208289671
1459,2	2205,153671	0,601785163	43439	170,7044833	14,63181285	0,209025898
1473,8	2190,553671	0,597800831	43894	172,4925203	14,78507317	0,211215331
1474,2	2190,153671	0,597691672	44160	173,5378342	14,87467151	0,212495307
1472,5	2191,853671	0,598155601	43038	169,1286529	14,49674167	0,20709631
1468,8	2195,553671	0,599165329	43560	171,1799832	14,67256999	0,209608143
1476,8	2187,553671	0,596982133	44215	173,7539706	14,89319748	0,212759964
1450	2214,353671	0,604295838	43023	169,0697066	14,49168914	0,207024131
1464,5	2199,853671	0,600338796	42451	166,8218886	14,29901902	0,2042717
1450,2	2214,153671	0,604241258	43273	170,0521445	14,5758981	0,208227116

Tabla 35. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta porosa RVE 7.

V. espuma [mm ³]	V.poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
2355,6	3463,257913	0,595178292	49694	143,4747527	14,34747527	0,204963932
2400	3418,857913	0,587547928	51978	150,0690364	15,00690364	0,214384338
2418,8	3400,057913	0,584317054	49502	142,9204171	14,29204171	0,204172024
2412,2	3406,657913	0,585451297	50660	146,2637536	14,62637536	0,208948219
2407,5	3411,357913	0,586259016	53359	154,0562106	15,40562106	0,220080301
2352,7	3466,157913	0,595676671	53506	154,4806238	15,44806238	0,220686605
2355,6	3463,257913	0,595178292	50677	146,3128354	14,63128354	0,209018336
2425,5	3393,357913	0,583165625	53263	153,7790428	15,37790428	0,219684347
2343,4	3475,457913	0,597274923	50194	144,9183349	14,49183349	0,207026193
2413,6	3405,257913	0,5852107	53283	153,8367861	15,38367861	0,219766837
2372,5	3446,357913	0,592273942	52298	150,992929	15,0992929	0,215704184

7.2.2 Probetas reforzadas

Tabla 36. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 3.

V. espuma [mm ³]	poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
180,98	277,064209	0,6048853	21794	342,5800326	14,6820014	0,209742877
180,76	277,284209	0,605365603	22337	351,1154532	15,0478051	0,214968645
192,46	265,584209	0,579822217	23275	365,8598815	15,6797092	0,223995846
180,61	277,434209	0,605693083	21435	336,9369092	14,4401532	0,206287904
180,26	277,784209	0,606457201	20999	330,0834222	14,1464324	0,202091891
180,67	277,374209	0,605562091	22106	347,4843627	14,892187	0,212745528
180,85	277,194209	0,605169116	22942	360,6254523	15,4553765	0,220791093
180,79	277,254209	0,605300108	22307	350,643883	15,027595	0,214679928
180,94	277,104209	0,604972628	21549	338,7288759	14,5169518	0,207385026
180,91	277,134209	0,605038124	22414	352,3258167	15,0996779	0,215709684
180,79	277,254209	0,605300108	20968	329,596133	14,1255486	0,201793551

Tabla 37. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 4.

V. espuma [mm ³]	poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
421,28	664,454421	0,611986143	40413	357,3293731	20,4188213	0,291697447
421,5	664,234421	0,611783516	39426	348,602377	19,9201358	0,284573369
420,08	665,654421	0,613091386	38787	342,9523765	19,5972787	0,279961124
418,73	667,004421	0,614334784	41654	368,3022222	21,0458413	0,300654875
416,11	669,624421	0,616747897	38411	339,6278066	19,4073032	0,277247189
418,58	667,154421	0,614472939	39692	350,9543334	20,0545333	0,286493333
421,66	664,074421	0,61163615	40624	359,1950227	20,5254299	0,293220427
422,74	662,994421	0,610641431	41112	363,50989	20,7719937	0,296742767
423,24	662,494421	0,610180914	40472	357,8510476	20,4486313	0,292123304
424,14	661,594421	0,609351982	42158	372,7585606	21,3004892	0,304292703
438,8	646,934421	0,595849601	44649	394,7838363	22,5590764	0,322272519

Tabla 38. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 5.

V. espuma [mm ³]	poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
852,45	1268,12504	0,598009982	54076	306,0075628	21,8576831	0,312252615
835,23	1285,34504	0,60613042	52978	299,7941538	21,4138681	0,305912402
840,52	1280,05504	0,603635814	54094	306,1094219	21,8649587	0,312356553
843,44	1277,13504	0,602258829	52693	298,1813837	21,2986703	0,304266718
843,44	1277,13504	0,602258829	52693	298,1813837	21,2986703	0,304266718
859,8	1260,77504	0,594543941	53611	303,376201	21,6697286	0,309567552
857,95	1262,62504	0,595416345	53862	304,7965705	21,7711836	0,311016909
860,23	1260,34504	0,594341165	55241	312,6001142	22,3285796	0,318979708
868,44	1252,13504	0,590469574	55844	316,0123962	22,572314	0,322461629
864,28	1256,29504	0,592431306	56620	320,4036579	22,8859756	0,326942508
845	1275,57504	0,60152318	55615	314,7165212	22,4797515	0,321139307

Tabla 39. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 6.

V. espuma [mm ³]	poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
1456,3	2208,05367	0,602576571	65376	256,9114459	22,0209811	0,314585444
1455,7	2208,65367	0,602740311	69300	272,3317915	23,342725	0,3334675
1459,2	2205,15367	0,601785163	68604	269,5966843	23,1082872	0,330118389
1473,8	2190,55367	0,597800831	67609	265,6865814	22,7731356	0,325330508
1474,2	2190,15367	0,597691672	68374	268,6943574	23,0345862	0,332879542
1472,5	2191,85367	0,598155601	67238	264,2286435	22,6481694	0,323545278
1468,8	2195,55367	0,599165329	69509	273,1531096	23,4131237	0,334473195
1476,8	2187,55367	0,596982133	66394	260,9119331	22,36388	0,319484
1450	2214,35367	0,604295838	68869	270,6380685	23,1975487	0,331393553
1450,4	2213,95367	0,604186678	67799	266,4332342	22,8371344	0,326244777
1450,2	2214,15367	0,604241258	65869	258,8488135	22,1870412	0,316957731

Tabla 40. Tabla de resultados para % de porosidad y Modulo de Young para una probeta con refuerzos esfericos RVE 7.

V. espuma [mm ³]	poros [mm ³]	% Porosidad	F[N]	Sigma Z [Mpa]	Young [GPa]	Young Norm.
2389	3429,85791	0,589438334	77186	222,8486791	22,2848679	0,318355256
2400	3418,85791	0,587547928	77031	222,4011686	22,2401169	0,317715955
2363,4	3455,45791	0,593837823	78120	225,5452908	22,5545291	0,322207558
2395,2	3423,65791	0,588372833	78964	227,9820576	22,7982058	0,325688654
2407,5	3411,35791	0,586259016	80053	231,1261798	23,112618	0,330180257
2474,5	3344,35791	0,574744729	84890	245,0913945	24,5091394	0,350130564
2403,5	3415,35791	0,586946436	82447	238,0380516	23,8038052	0,340054359
2483,9	3334,95791	0,573129291	84646	244,3869263	24,4386926	0,34912418
2421,4	3397,45791	0,583870231	84945	245,2501885	24,5250188	0,350357412
2352,7	3466,15791	0,595676671	82929	239,4296649	23,9429665	0,342042378
2444,9	3373,95791	0,579831638	82988	239,6000076	23,9600008	0,342285725

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. E. Warren y A. M. Kraynik, «The linear elastic properties of open-cell foams,» *Journal of Applied Mechanics*, vol. 55, nº 2, p. 341, 1988.
- [2] H. X. Zhu, N. Mills y J. Knott, «Analysis of the high strain compression of open-cell foams,» *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 45, nº 11-12, p. 1875–1904, Noviembre 1997.
- [3] L. J. Gibson y M. F. Ashby, «Cellular solids: Structure and properties,» Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 1997.
- [4] W. S. Sanders y L. J. Gibson, «Mechanics of hollow sphere foam,» *Materials Science, and Engineering*, pp. 70-85, 2003.
- [5] J. Banhart, «Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams,» *Progress in Materials Science*, vol. 46, nº 6, pp. 559-632, 2001.
- [6] J. A. Gutiérrez-Vázquez y J. Oñoro, «Espumas de aluminio: fabricación, propiedades y aplicaciones,» *Revista de Metalurgia*, vol. 44, nº 5, pp. 457-476, 2008.
- [7] J. Oliver, «Implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de estructuras soldadas de aluminio, Anexo G,» Memoria de Título, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2005.
- [8] A. Bhaduri, «Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys,» *Springer Series in Materials Science*, vol. 264, 2018.
- [9] R. Florek, F. Šimančík, M. Nosko y J. Harnúšková, «Compression Test Evaluation Method for Aluminium Foam Parts of Different Alloys and Densities,» *Powder Metallurgy Progress*, vol. 10, nº 4, pp. 207-212, 2010.
- [10] L. J. Gibson, «Modelling the mechanical behavior of cellular materials,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 110, pp. 1-36, 1989.
- [11] D. Lehmhus, M. Busse, A. S. Hermann y K. Kayvantash, «Structural Materials and Processes in Transportation,» Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2013.
- [12] C. Y. Zhao, «Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open-cells,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, nº 3-14, pp. 3618-3932, 2012.
- [13] F. Matassi, A. Botti, L. Sirleo, C. Carulli y M. Innocenti, «Porous metal for orthopedics implants,» *Clin. Cases Miner. Bone Metab.*, vol. 10, p. 111–115, 2013.
- [14] S. K. Nammi, P. Myler y G. Edwards, «Finite element analysis of closed-cell aluminium foam under quasi-static loading,» *Materials and Design*, vol. 31, nº 2, pp. 712-722, 2010.

- [15] M. F. Ashby, T. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson y H. N. Wadley, «Metal Foams: A Design Guide,» *Oxford: Elsevier*, 2000.
- [16] M. D. Giorgi, A. Carofalo, V. Dattoma, R. Nobile y F. Palano, «Aluminium Foams Structural Modelling,» *Computers and Structures*, vol. 88, n° 1-2, pp. 25-35, 2010.
- [17] D. Meller, «Produit metallique pour l obtention d objets lamines, moules ou autres, et procedes pour sa fabrication,» *French Patent, FR000000615147A*, 1926.
- [18] A. Kulshreshtha y S. K. Dhakad, «Preparation of metal foam by different methods: A review,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, n° 2, pp. 1784-1790, 2020.
- [19] J. Baumeister y H. Schrader, «Methonds for manufacturing foamable metal body and use the same,» *German Patent DE. 4101630* , 1991.
- [20] J. Baumeister, *German Patent 40 18 360 1990. US Patent. 1996;5:1992.*
- [21] J. J. Ridgway, «Cellularized metal and method of producing same,» 1967.
- [22] W. Ruch y B. Kirkevag, *International Patent Application PCT/NO90/00115*, 1990.
- [23] H. Sang, L. Kenny y I. Jin, «Process for producing shaped slabs of particle stabilized foamed metal,» *Google Pat.*, 1994.
- [24] M. Thomas, D. Kenny y H. Sang, « Particle-stabilized metal foam and its production,» *Google Patents; 1997. Materials Science and Engineering: A. 1995;199:195–203.*
- [25] L. Kenny, «Mechanical properties of particle stabilized aluminum foam,» *Materials Science Forum: Trans Tech Publ.*, pp. 1883-90, 1996.
- [26] I. Chang y Y. Zhao, *Advances in Powder Metallurgy*, 2018.
- [27] J. F. Pashak, « Cellularized light metal,» 1960.
- [28] I. N. Orbulov, «Metal matrix syntactic foams produced by pressure infiltration—The effect of infiltration parameters,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 583, pp. 11-19.
- [29] R. A. Palmer, K. Gao, T. M. Doan, L. Green y G. Cavallaro, «Pressure infiltrated syntactic foams—Process development and mechanical properties,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 464, pp. 85-92, 2007.
- [30] I. N. Orbulov y J. Dobránszky, «Producing metal matrix syntactic foams,» *Mechanical Engineering*, vol. 52, n° 1, pp. 35-42, 2008.
- [31] Y. Y. Zhao y X. F. Tao, «Behaviour of metal matrix syntactic foams in compression,» *In: Characterization of metal matrix composite materials. Mater. Sci. Tech.*, pp. 1785-94, 2009.
- [32] G. J. Davies y S. Zhen, «Metallic foams: their production, properties and applications,» *Journal of Materials Science*, vol. 18, n° 7, p. 1899–1911, 1983.

- [33] Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Sakaguchi, M. Mabuchi, M. Nakamura, T. Asahina, T. Mukai, H. Kanahashi y K. Higashi, *Journal of Materials Science Letters*, vol. 18, n° 18, p. 1477–1480, 1999.
- [34] I. Wagner, C. Hintz y P. R. Sahm, «Precision cast near net shape components based on cellular metal materials,» *Microstructural Investigation and Analysis*, pp. 40-45, 2006.
- [35] P. P. Trigo, «Caracterización numérica del efecto de la distribución de partículas espaciadoras y su dimensión fractal sobre el Módulo de Young de espumas de aluminio fabricadas por el método de infiltración,» p. 18, 2019.
- [36] P. K. Rohatgi, J. K. Kim, N. Gupta, S. Alaraj y A. Daoud, «Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique,» *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, p. 430–437, 2006.
- [37] J. D. DeFouw y P. K. Rohatgi, «Low density magnesium matrix syntactic foams,» *Supplemental Proceedings: Materials Fabrication, Properties, Characterization, and Modeling, The Minerals, Metals and Materials Society*, p. 797, 2011.
- [38] A. Daoud, «Synthesis and characterization of novel ZnAl22 syntactic foam composites via casting,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 488, p. 281–295, 2008.
- [39] B. P. Neville y A. Rabiei, «Composite Metal Foams processed through Powder Metallurgy,» *Materials and Design*, vol. 29, pp. 388-396, 2008.
- [40] Enviropheres Ltd., [En línea]. Available: <http://www.enviropheres.com/products.asp>.
- [41] G. A. R. Rivero, B. F. Schultz, J. B. Ferguson, N. Gupta y P. K. Rohatgi, «Compressive properties of Al-A206/SiC and Mg-AZ91/SiC syntactic foams,» *J. Mater. Res.*, vol. 28, p. 2426–2435, 2013.
- [42] Hollomet GmbH., [En línea]. Available: <http://www.hollomet.com/home.html>.
- [43] P. K. Rohatgi, N. Gupta, B. F. Schultz y D. D. Luong, «The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams,» *JOM*, vol. 63, n° 2, pp. 36-42, 2011.
- [44] P. Rohatgi, N. Gupta y S. Alaraj, *J. Composite Materials*, vol. 40, n° 13, p. 1163–1174, 2006.
- [45] P. Rohatgi y N. Gupta, «Metal Matrix Syntactic Foams: Processing, Microstructure, Properties and Applications,» *DEStech Publications*, 2014.
- [46] A. Szlancsik, B. Katona, A. Kemény y D. Károly, «On the Filler Materials of Metal Matrix Syntactic Foams,» *Materials*, vol. 12, n° 12, p. 2023, 2019.
- [47] «Journal of Cellular Plastics,» [En línea]. Available: <http://cel.sagepub.com/content/16/4/223.refs.htm..>
- [48] N. Gupta, Kishore, E. Woldesenbet y S. Sankaran, «Studies on compressive failure features in syntactic foam material,» *Journal of Materials Science*, vol. 36, n° 18, p. 4485–4491, 2001.

- [49] M. Hrairi, M. Ahmed y Y. Nimir, *Advanced Powder Technology*, vol. 20, n° 6, p. 548–553, 2009.
- [50] D. Luong, V. Shunmugasamy, N. Gupta, D. Lehmhus, J. Weise y J. Baumeister, «Quasi-static and high strain rates compressive response of iron and Invar matrix syntactic foams,» *Materials and Design*, vol. 66, pp. 515-531, 2015.
- [51] G. Castro y S. Nutt, « Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 535, p. 274–280, 2012.
- [52] P. R. Marur, «Numerical estimation of effective elastic moduli of syntactic foams,» *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 46, p. 1001–7, 2010.
- [53] J. A. S. Maria y e. 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.*, vol. 49, p. 1267–1278, 2014.
- [54] X. F. Tao, L. P. Zhang y Y. Y. Zhao, «Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres,» *Materials and Design*, vol. 30, n° 7, p. 2732–2736, 2009.
- [55] I. N. Orbulov, A. Szlancsik, A. Kemény y D. Kincses, «Compressive mechanical properties of low-cost, aluminium matrix syntactic foams,» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 135, p. 105923, 2020.
- [56] A. Szlancsik, B. Katona, K. Bobor, K. Májlínger y I. N. Orbulov, «Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres,» *Materials and Design*, vol. 83, pp. 230-237, 2015.
- [57] I. Orbulov y J. Ginzltler, «Compressive characteristics of metal matrix syntactic foams,» *Compos. Part A*, vol. 43, p. 553–561, 2012.
- [58] I. N. Orbulov, «Compressive properties of aluminium matrix syntactic foams,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 555, pp. 52-56, 2012.
- [59] I. N. Orbulov y K. Májlínger, «Compressive properties of metal matrix syntactic foams in free and constrained compression,» *JOM*, vol. 66, p. 882–891, 2014.
- [60] I. N. Orbulov y K. Májlínger, «Description of the compressive response of metal matrix syntactic foams,» *Materials and Design*, vol. 49, pp. 1-9, 2013.
- [61] K. Májlínger y I. N. Orbulov, «Characteristic compressive properties of hybrid metal matrix syntactic foams,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 606, p. 248–256, 2014.
- [62] M. Porfiri y N. Gupta, «Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties,» *Compos: Part B*, vol. 40, pp. 166-173, 2009.
- [63] J. Banhart, C. Schmoll y U. Neumann, In: *Faria L, editor. Proc. Conf. Materials in Oceanic Environment*, vol. 1, p. 55, 1998.

- [64] A. F. Giamei, «Metal Foams,» *In: Banhart J., Eifert H., editors. Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams*, p. 63, 1997.
- [65] M. Niemeyer, *DFG Symposium*, pp. 11-12, 1999.
- [66] C. T. G. Caro, «Efecto de las Esferas Reforzantes sobre las Propiedades,» *Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2020.
- [67] L. Peroni, M. Avalle y M. Peroni, «The Mechanical Behaviour of Aluminium Foam Structures in Different Loading Conditions,» *International journal of Impact Engineering*, vol. 35, n° 7, pp. 644-658, 2008.
- [68] D. Stauffer y A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory, 2nd ed., Taylor & Francis*, pp. 181-194, 1992.
- [69] Z. Wu y D. P. He, *Chinese Sci. Bull.*, vol. 45, pp. 348-352, 2000.
- [70] J. Marx y A. Rabiei, «Overview of Composite Metal Foams and Their Properties and Performance,» *Adv. Eng. Mater.*, vol. 19, n° 11, pp. 1-13, 2017.
- [71] M. Garcia-Avila y A. Rabiei, «Effect of sphere properties on microstructure and mechanical performance of cast composite metal foams,» *Metals*, vol. 5, n° 2, p. 822-835, 2015.
- [72] P. A. Cundall y O. D. L. Strack, «A discrete numerical model for granular assemblies,» *Géotechnique*, vol. 29, n° 1, pp. 47-65, 1979.
- [73] H. I. Demirci, M. Yasar, K. Demiray y M. Karali, «The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050 material,» *Materials and Design*, vol. 29, n° 2, pp. 526-532, 2008.
- [74] E. Madenci y I. Guven, «The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®,» 2015.
- [75] R. L. Taylor, J. C. Simo, O. C. Zienkiewicz y A. C. H. Chan, «The patch test—a condition for assessing FEM convergence,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 22, n° 1, pp. 39-62, 1986.
- [76] E. H. Dill, «The Finite Element Method for Mechanics of Solids with ANSYS Applications,» *Advances in Engineering Series*, 2011.
- [77] K. Ho-Le, «Finite element mesh generation methods: a review and classification,» *Computer-Aided Design*, vol. 20, n° 1, pp. 27-38, 1988.
- [78] E. Frías-Valero, *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación método de los elementos finitos*, 2004.
- [79] M. Bucki, C. Lobos, Y. Payan y N. Hitschfeld, «Jacobian-based repair method for finite element meshes after registration,» *Engineering with Computers*, vol. 27, n° 3, pp. 285-297, 2010.

- [80] H. Moulinec y P. Suquet, «A numerical method for computing the overall response of nonlinear composites with complex microstructure,» *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 157, n° 1-2, pp. 69-94, 1998.
- [81] W. J. Drugan y J. R. Willis, «A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites,» *Journal of the Mechanics and Physics of solid*, vol. 44, n° 4, pp. 497-524, 1996.
- [82] R. Hill, «Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles,» *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 11, pp. 357-372, 1963.
- [83] C. Huet, «Application of variational concepts to size effects in elastic heterogeneous bodies,» *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 38, n° 6, pp. 813-841, 1990.
- [84] M. G. D. Geers, V. G. Kouznetsova y W. A. M. Brekelmans, «Computational homogenization,» *CISM International Centre for Mechanical Sciences*, p. 327–394, 2010.
- [85] M. E. Ghezal, Y. Maalej y I. Doghri, «Micromechanical models for porous and cellular materials in linear elasticity and viscoelasticity,» *Computational Materials Science*, vol. 70, pp. 51-70, 2013.
- [86] C. Qiu, Z. Guan, S. Jiang y Z. Li, «A method of determining effective elastic properties of honeycomb cores based on equal strain energy,» *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, n° 2, p. 766–779, 2017.
- [87] F. Ye y H. Wang, «A simple python code for computing effective properties of 2d and 3d representative volume element under periodic boundary conditions,» *Computational Materials Science*, 2017.
- [88] ASTM International, *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*, United States, 2000.