

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

VALPARAISO-CHILE



**“Caracterización numérica de un material
compuesto de Al reforzado con microesferas huecas
de Al₂O₃”**

LUIS ALFREDO HERNANDEZ GONZALEZ

MEMORIA DE TITULACION PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL MECANICO

PROFESOR GUIA: DR. ING. LUIS PEREZ POZO

PROFESOR CORREFERENTE: DR. ISMELI ALFONSO

Agosto 2022

Resumen

La realización de la presente memoria de título busca obtener, mediante el método de elementos finitos, la caracterización de las propiedades mecánicas de espumas metálicas de Aluminio reforzadas con microesferas huecas de Alumina utilizando el software comercial ANSYS WORKBENCH. Para esto se desarrollan 9 modelos computacionales, con diferentes tamaños de refuerzo y una porosidad aproximada de 55%. Todos estos modelos se estudian mediante la simulación de un ensayo de compresión con deformación conocida, de manera de lograr obtener la fuerza de reacción y por consecuencia, el módulo de Young efectivo del material compuesto.

El principal objetivo de este trabajo es determinar la influencia del espesor de pared de los refuerzos en el comportamiento elástico del material, con el fin de avanzar en el estudio y comprensión de los distintos factores que gobiernan las características de un material compuesto para acercar cada vez más su utilización a niveles industriales.

En los antecedentes generales, se presenta el marco teórico de esta investigación, el cual permite un mejor entendimiento del comportamiento mecánico de las espumas sintéticas, así como sus principales propiedades mecánicas y los factores que las regulan, tales como el tamaño del refuerzo y la porosidad.

Junto a lo anterior, se presentan los diferentes métodos de fabricación actuales, las aplicaciones mas prometedoras y las bases teóricas para la correcta utilización del método de elementos finitos, el cual es utilizado para este trabajo de título.

Luego del análisis de los resultados obtenidos, se concluye que a medida que aumenta el espesor de pared del refuerzo, mayor es el módulo de Young obtenido para la espuma, llegando a superar el del metal matriz. Además, se observa que a medida que

disminuye el tamaño de los refuerzos, mayor es el módulo obtenido debido a que las secciones transversales de la geometría son cada vez mayores, evitando la concentración de esfuerzos en paredes internas muy delgadas.

Abstract

Through the realization of the present title report, it is sought to obtain, through the finite element method and the ANSYS WORKBENCH commercial software, the characterization of the mechanical properties of Aluminum metallic foams with spherical reinforcements of Alumina. For this, 9 three-dimensional models are developed in the shape of a test tube, with different sizes of reinforcement and an approximate porosity of 55%. All these models are studied by simulating a compression test with known deformation, in order to obtain the reaction force and, consequently, the Young's modulus of the composite material.

The main objective of this work is to determine the influence of the wall thickness of the reinforcements on the elastic behavior of the material, in order to advance in the study of new composite materials and possible applications.

In the general background, the theoretical framework of this research is presented, which allows a better understanding of the mechanical behavior of syntactic foams, as well as their main mechanical properties, such as reinforcement size, porosity and distribution, among others.

After analyzing the results obtained, it is concluded that as the wall thickness of the reinforcement present in the matrix increases, the Young's modulus obtained for the foam is greater, exceeding the value of the modulus of the solid material. In addition, it is observed that as the size of the reinforcements decreases, the modulus obtained is greater.

Índice General

Introducción	11
1. Objetivos	12
1.1 Objetivos Generales	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Antecedentes teóricos	13
2.1 Sólido celular	13
2.2 Espumas Metálicas.....	15
2.2.1 Tipos de espumas metálicas.....	16
2.3 Espuma sintáctica.....	17
3.3.2 Esferas huecas	19
3.3.3 Microestructura	24
3.3.3.1 Interfaz pared-matriz.....	25
3.3.3.2 Daño en partículas de refuerzo.....	26
3.3.3.3 Tratamiento térmico	26
3.3.4 Métodos de fabricación.....	26
3.3.4.1 Fundición por agitación	27
3.3.4.2 Fundición por infiltración	29
3.3.4.3 Pulvimetalurgia	29
3.3.5 Comportamiento mecánico	30
3.3.7 Aplicaciones.....	34
3.3.7.1 Industria automotriz	35
3.3.7.2 Industria aeroespacial.....	36
3.4 Método de Elementos Finitos	37
3.4.1 Discretización.....	39
3.4.2 Mallado	40
3.4.2.1 Calidad de elemento.....	40
3.4.2.2 Relación de aspecto.....	40
3.4.2.3 Calidad ortogonal	41

4	Estudios relacionados.....	42
4.1	Respuesta mecánica de los compuestos de matriz de aluminio reforzado con microbalones de cerámica bajo carga compresiva	42
4.2	Comportamiento a compresión de espumas sintácticas de matriz de aluminio reforzadas con esferas huecas de hierro	45
4.3	Propiedades compresivas de vidrio expandido y esferas huecas de alúmina en espumas sintácticas de matriz de aluminio reforzada híbrida	49
5	Metodología	52
5.1	Simulación	52
5.2	Geometrías	53
5.3	Propiedades mecánicas	55
5.4	Mallado	57
5.5	Condiciones de contorno.....	60
5.6	Cálculo del módulo de Young	63
5.7	Resultados	64
6	Conclusiones	73
7	Referencias.....	75
8.	Anexos	81
8.1	Espumas	81
8.2	Tablas de resultados.....	94

Figuras

Figura 1 : Tipos de solidos celulares según su configuración[1]	14
Figura 2: Espuma de celda abierta	16
Figura 3: Espuma de celda cerrada [4].....	17
Figura 4: Esquema comparativo de matriz porosa, densa y con refuerzos	19
Figura 5: Microglobos de vidrio	20
Figura 6: Cenoesferas de ceniza de volante	21
Figura 7: Esquema de particula esferica con diferentes relaciones de radio.....	22
Figura 8: Relación entre el módulo de Young relativo de un refuerzo esférico en comparación a su relación entre radios.....	24
Figura 9: Microestructura de espuma reforzada con esferas huecas de alumina [11].....	25
Figura 10: Proceso de fabricación de una probeta metálica con refuerzos porosos mediante el proceso de Fundicion por agitación [5].....	28
Figura 11: Curva de deformación ingenieril para una probeta con refuerzos metálicos. [28]	31
Figura 12: Modelo cualitativo de deformación ingenieril de una espuma sintáctica para diferentes tratamientos térmicos [29].....	32
Figura 13: Modos de falla en espumas con matriz elástica y matriz frágil. [29]	33
Figura 14: Caracteristicas relevantes de las espumas sintacticas para la industria automotriz [29].....	36
Figura 15: Perfil aerodinamico compuesto por una espuma metalica, patentado por la empresa Rolls Royce [31]	37
Figura 16: Geometria con refuerzos porosos de 2,5 [mm].....	38
Figura 17 Relaciones de aspecto[35]	40
Figura 18: Representacion de la calidad ortogonal.[35]	41
Figura 19: Resultados de los experimentos realizados por Kiser [4].....	44
Figura 20: Proceso de fabricacion correspondiente a infiltracion por presion[37]	47
Figura 21:Modelo FEM utilizado en el estudio[37].....	48
Figura 22: Curva de deformacion ingenieril obtenida en el estudio[37].....	48

Figura 23: Resultados numericos del estudio[12].....	51
Figura 24: Ventana de modulo estructural del software ANSYS WORKBENCH.....	53
Figura 25: Geometria con refuerzos porosos de diametro 2,5 [mm]	55
Figura 26: Propiedades mecanicas utilizadas para los refuerzos de Alumina.....	56
Figura 27 : Propiedades mecánicas correspondientes a la matriz de Aluminio.	56
Figura 28 : Parámetros de mallado en ANSYS WORKBENCH.....	57
Figura 29: Modelo mallado con parámetros seleccionados.	58
Figura 30: Mallado de refuerzos esféricos.....	59
Figura 31: Parámetros de mallado para los refuerzos esféricos	59
Figura 32: Condición de contorno Desplazamiento.....	61
Figura 33: Parámetros de condición de contorno Desplazamiento.....	61
Figura 34: Condición de contorno de Desplazamiento remoto.....	62
Figura 35: Parámetros de la condición de contorno Desplazamiento remoto.....	63
Figura 36 : Grafico con resultados de simulaciones FEM, modelos analíticos y experimentales realizados por Kiser [4].....	68
Figura 37: Grafico con resultados de simulaciones para diferentes relaciones de t/R para cada una de las geometrías.	69
Figura 38: Estrés maximo en matriz de Aluminio para una probeta con poros de 2,5 [mm] y porosidad aproximada del 55%.....	70
Figura 39 Probeta con tamaño de poro $d = 2,5$ [mm] y porosidad aproximada del 55 %.....	70
Figura 40: Deformacion para una probeta con $t/R = 0,12$ y refuerzos de $D=2,5$ [mm] con porosidad del 55,16 %.....	72
Figura 41: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (a).....	82
Figura 42: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (b)	84
Figura 43: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (c).....	84
Figura 44: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (d)	86
Figura 45: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (e).....	88
Figura 46: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (f)	90
Figura 47: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (g)	91

Figura 48: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (h)	93
Figura 49: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (i)	94

Tablas

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el estudio [11]	42
Tabla 2: Composicion en peso de las diferentes matrices[32]	46
Tabla 3 Caracteristicas mecanicas del material de refuerzo[32]	46
Tabla 4: Fraccion en volumen de refuerzo y porosidad de las diferentes geometrias[12]	50
Tabla 5: Dimensiones geométricas de las geometrías simuladas	54
Tabla 6: Tamaño de refuerzos esféricos y porosidad	54
Tabla 7: Modulo de Young para diferentes tamaños de refuerzo esférico a una porosidad del 50% aprox	65
Tabla 8 : Modulo de Young obtenido con el modelo analítico para diferentes valores de t/R	66
Tabla 9: Modulo de Young obtenido con el método FEM para diferentes valores de t/R	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (a)	81
Tabla 11: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (b)	83
Tabla 12: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (c)	84
Tabla 13: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (d)	85
Tabla 14: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (e)	87
Tabla 15: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (f)	89
Tabla 16: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (g)	91
Tabla 17: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (h)	92
Tabla 18: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (i)	93
Tabla 19: Fuerzas resultantes para cada geometría	95
Tabla 20: Modulo de Young calculado mediante modelo analítico	95

Introducción

Un material compuesto se produce a partir de la combinación de dos o más materiales tradicionales con el propósito de obtener un tercer material con propiedades específicas mejoradas. Las espumas metálicas sintácticas corresponden a un tipo de material compuesto que se conforma por dos fases, una matriz metálica y la otra consiste en refuerzos de partículas huecas.

Las denominadas espumas metálicas sintácticas corresponden a materiales compuestos conformados por partículas huecas, también llamados micro balones, los cuales refuerzan la matriz metálica. Su estudio y aplicaciones en ingeniería son de gran interés debido a que combinan las propiedades mecánicas características de un metal con las ventajas estructurales de una espuma, obteniendo materiales ligeros con alta resistencia a la compresión y una gran capacidad de absorción de energía combinada con una baja densidad, características que los convierten en candidatos ideales para aplicaciones en industrias tales como la automotriz, naval, aeroespacial, construcción y aplicaciones biomédicas entre otras.

1. Objetivos

1.1 Objetivos Generales

El principal objetivo de este trabajo es lograr caracterizar mediante el método de elementos finitos el efecto del espesor de las partículas de refuerzo sobre las propiedades mecánicas de la espuma que componen. Específicamente, refuerzos de Alumina (Al_2O_3) sobre una matriz de Aluminio. Con esto, se busca plantear una alternativa para determinar la configuración que permita mejorar el desempeño de este tipo de materiales bajo cargas compresivas.

1.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general de este trabajo de título, es necesario definir y abordar los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un modelo CAD de la espuma sintáctica de Aluminio con los respectivos refuerzos de Alumina.
- Simular y caracterizar numéricamente la espuma mediante la utilización del software comercial ANSYS.
- Analizar los resultados obtenidos para diferentes espesores de las esferas.
- Presentar las conclusiones del trabajo realizado.

2. Antecedentes teóricos

2.1 Sólido celular

Un sólido celular se define como aquella estructura compuesta por dos fases claramente diferenciadas. Una de ellas corresponde a la fase sólida llamada matriz (por ejemplo, un metal o un polímero) y la otra corresponde a una fase gaseosa, la cual puede ser continua en el caso de los sólidos de celda abierta, o discontinua en el caso de los sólidos celulares de celda cerrada. Una de sus principales características es su densidad relativa (p), definida como la relación entre la densidad del material y la densidad del sólido macizo.

Debido a las interesantes propiedades mecánicas mencionadas anteriormente, en la actualidad este tipo de materiales se utilizan a menudo como núcleo en una estructura tipo sándwich, dicho núcleo resiste las cargas que producen aplastamiento y las paredes sostienen la estructura ante flexión. Hoy en día, se utilizan este tipo de configuraciones para embalajes, partes de barcos, vehículos, entre otros.

Según su configuración, los sólidos celulares se pueden dividir en dos grandes grupos. El primero de ellos corresponde al grupo con una configuración estocástica, donde se pueden identificar los sólidos de celda abierta y de celda cerrada. El otro gran grupo que se puede identificar es el correspondiente a una configuración periódica, la cual puede ser en 2D o en 3D, en este grupo se pueden identificar estructuras conocidas como las de un panal de abeja [1].

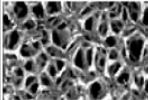
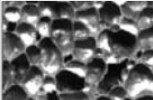
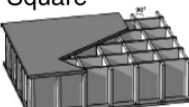
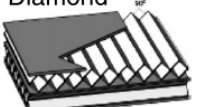
Cellular materials					
Stochastic		Periodic			
Open cell	Closed cell	2D		3D (lattice)	
		Honeycombs	Prismatic	Truss	Textile
		Hexagonal 	Triangular 	Tetrahedral 	Diamond textile 
		Square 	Diamond 	Pyramidal 	Diamond collinear 
		Triangular 	Navtruss 	3D kagome 	Square textile 

Figura 1 : Tipos de solidos celulares según su configuración[1]

2.2 Espumas Metálicas

Las espumas metálicas pertenecen a la familia de materiales celulares de estructura porosa aleatoria. Este tipo de material no difiere mucho en concepto al de una espuma tradicional, ya que la mayor parte de él está formada por poros que se pueden (o no) conectar entre sí. Poseen propiedades mecánicas, térmicas, acústicas y eléctricas que son altamente deseables en aplicaciones de ingeniería. Pese a esto, la dificultad de controlar la distribución interna y el tamaño de celda de las espumas, hace que su desempeño sea poco constante y difícil de predecir para aplicaciones industriales masivas. [2]

Actualmente, las espumas más estudiadas son las de Aluminio, por su combinación entre alta rigidez y una baja densidad. Además, se encuentran disponibles estudios con matrices de diferentes metales, tales como Niquel, Cobre, Titanio, Zinc [3].

La principal característica de una espuma metálica es la porosidad, también llamada fracción volumétrica. Esta puede ser calculada utilizando la siguiente relación:

$$p = 1 - \frac{\rho_{espuma}}{\rho_{sólido}}, \quad (1)$$

donde ρ_{espuma} corresponde a la densidad de la espuma y $\rho_{sólido}$ a la densidad del material base de la matriz. Si la porosidad es menor a 0.7, el sólido se clasifica como espuma, en caso contrario se denomina sólido celular [3].

2.2.1 Tipos de espumas metálicas

Dependiendo de su estructura interna, las espumas se pueden clasificar como espumas de celda abierta y espumas de celda cerrada[4]:

Espumas de celda abierta: Están formadas por poros interconectados (como una esponja) como muestra la Figura 2. Dada su configuración, este tipo de celdas permite que un fluido pase a través de ella, maximizando también el área de contacto beneficiando la transferencia de calor en su interior. En este tipo de espumas, la superficie efectiva de contacto puede llegar a ser de 10 a 1000 veces mayor que la del material denso. Esto combinado con una alta conductividad térmica del material matriz, las hace candidatas perfectas para intercambiadores de calor, catalizadores, absorción de sonido, entre otras aplicaciones. [4]

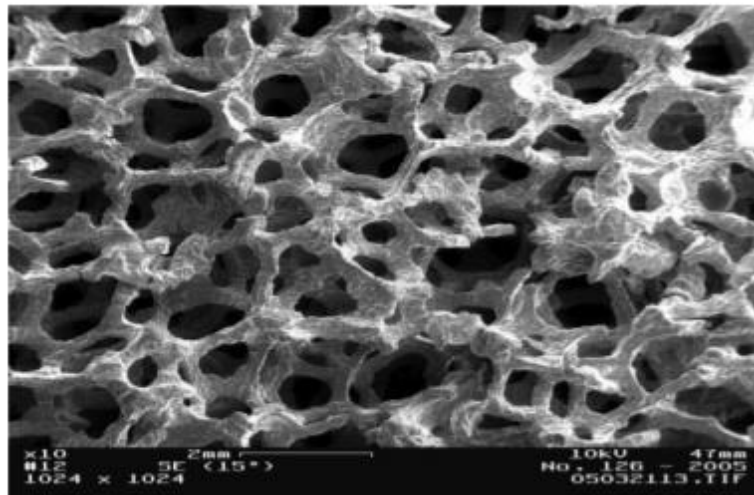


Figura 2: Espuma de celda abierta

-Espumas de celda cerrada: Contrario al caso anterior, este tipo de espumas posee poros aislados como se ve en la Figura 3. Por lo general, las espumas de celda cerrada tienen mayor resistencia a la compresión debido a su mayor densidad. Así mismo, son considerablemente más caras de producir.[4]

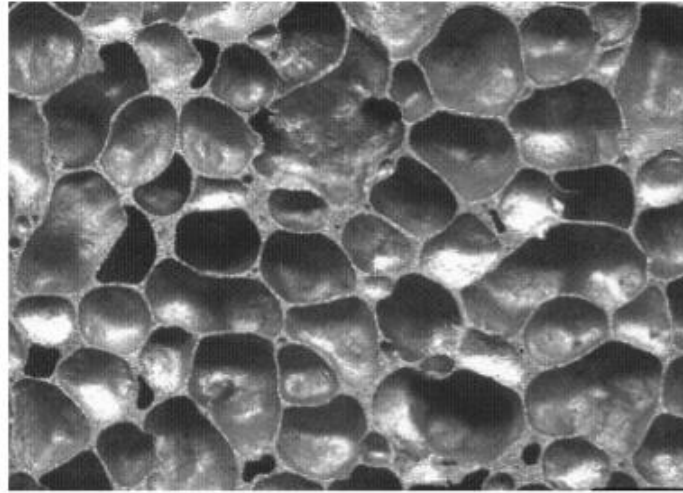


Figura 3: Espuma de celda cerrada [4]

2.3 Espuma sintáctica

Las espumas sintácticas de matriz metálica son materiales ligeros de alta resistencia específica. Es un tipo de material compuesto que combina la alta resistencia del metal que compone la matriz con las capacidades mecánicas de los diferentes materiales que se agregan como refuerzos obteniendo una baja densidad sin un gran perjuicio en las propiedades mecánicas.

El comportamiento mecánico de estos materiales puede variar al modificar el espesor, la fracción de volumen y/o el tamaño de las partículas, permitiendo aumentar o disminuir la capacidad de absorción de energía del material junto con su resistencia mecánica. [5]. Dichos materiales presentan características que los hacen particularmente interesantes para ser usados en transporte, estructuras, industria aeroespacial y otros campos[6]. En la gran mayoría de los casos, la matriz está compuesta de aluminio[6], magnesio [7], titanio [8] , zinc [9] y hierro [10].

Espumas metálicas reforzadas con diferentes tipos de materiales, pueden llegar a presentar valores de fluencia incluso mayores al del metal matriz. En la Figura 4 se puede apreciar una comparación cualitativa entre los resultados esperados para un material sólido, una espuma y una espuma reforzada con microesferas huecas. Como se aprecia, es posible aumentar el límite de fluencia de un material dependiendo de la configuración elegida.

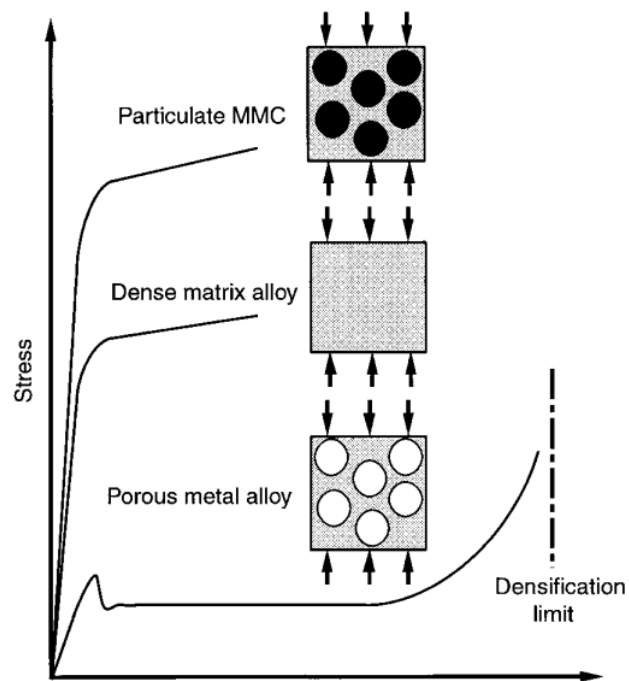


Figura 4: Esquema comparativo de matriz porosa, densa y con refuerzos

Los refuerzos pueden dividirse en refuerzos estructurales huecos, como por ejemplo: esferas cerámicas, esferas metálicas o esferas de vidrio [12] , y en refuerzos porosos, como lo son la piedra pómez y la perlita expandida [13].

3.3.2 Micro esferas huecas

Las esferas huecas de refuerzo juegan un papel importante en las propiedades mecánicas resultantes de la espuma sintáctica. La correcta elección del material, geometría y sus propiedades definirán en su mayoría, las características del material a obtener. Actualmente existe una gran variedad de partículas disponibles, incluidas

Al₂O₃, SiC, Carbón y vidrio. Además, se han utilizado cenizas volantes y esferas huecas de perlita expandida como refuerzo. [14].

Las partículas huecas de vidrio, generalmente llamadas micro globos de vidrio, se han utilizado ampliamente en la fabricación de espumas sintácticas de matriz polimérica. Sin embargo, su uso en espumas sintácticas de metal está limitado por la temperatura de fusión. En la Figura 5 se aprecian micro globos de vidrio recubiertos con níquel. Dicho recubrimiento mejora la unión entre el refuerzo y la matriz, evitando el contacto directo para inhibir posibles reacciones químicas no deseadas.

Las cenizas volantes se muestran en la Figura 6, este tipo de refuerzo se encuentra entre los materiales más comúnmente usados para reforzar matrices de metal [14]. Son subproductos de la combustión del carbón y se generan en grandes cantidades en centrales térmicas. Estas partículas ayudan a sintetizar espumas de bajo costo para compensar el costo adicional relacionado con la síntesis y el mecanizado. Sin embargo, al ser subproductos de desecho, las cenizas volantes contienen numerosos defectos en sus estructuras que pueden perjudicar el comportamiento de la espuma.[15]

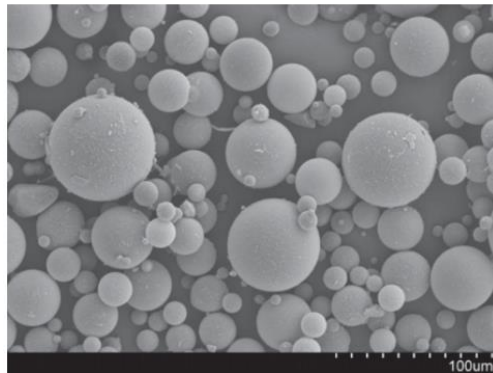


Figura 5: Microglobos de vidrio

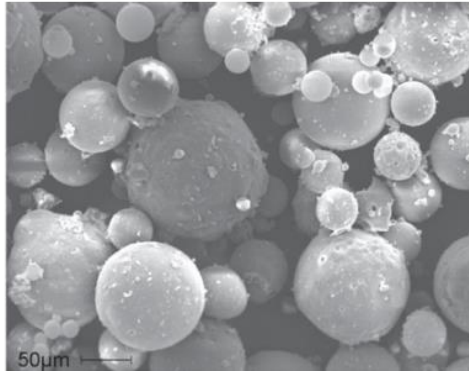


Figura 6: Ceno esf eras de ceniza de volante

En el presente trabajo, se estudia la aplicaci3n de esferas huecas de Alumina reforzando una matriz de Aluminio, las cuales fueron fabricadas por el Martin Marietta Astronautics Group. Se estudia la aplicaci3n de esferas de tres diámetros diferentes (1, 1.5 y 2.5 [mm]) con la misma porosidad (~55%).

3.3.2.1 Características mecánicas

En la actualidad existen una gran variedad de tamaños y formas para partículas de refuerzo. Además, hay varias razones por las que resultaría interesante utilizar partículas con diferentes formas como cubos, prismas o rectángulos, esto permitiría obtener más del 95% del volumen lleno de partículas huecas para obtener espumas sintácticas ultraligeras. Además, es posible obtener propiedades direccionales usando refuerzos de formas y geometrías específicas. Sin embargo, controlar el proceso de fabricaci3n es demasiado complejo por lo que la gran mayoría de la literatura existente es acerca de refuerzos esféricos [14].

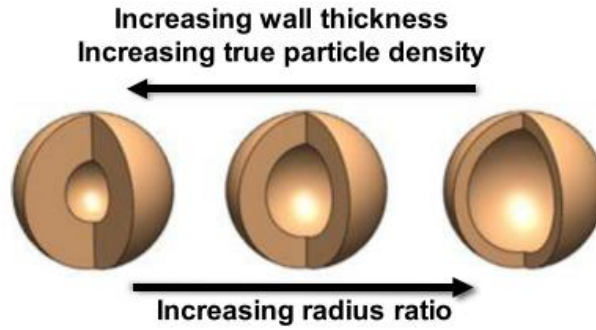


Figura 7: Esquema de partícula esférica con diferentes relaciones de radio

La Figura 7, muestra una ilustración de partículas esféricas huecas. En ella se puede observar que partículas del mismo tamaño pueden tener densidades considerablemente diferentes en función de su espesor de pared. Los parámetros más relevantes de una partícula se muestran en la Figura 8. En la literatura se ha definido un parámetro llamado “relación de radios” para caracterizar las partículas, el cual se define como [16]:

$$\eta = \frac{Ri}{Ro}, \quad (2)$$

donde Ri y Ro corresponden a los radios internos y externos respectivamente. Este parámetro se puede relacionar con el espesor de pared (t) de la siguiente manera:

$$t = Ro(1 - \eta), \quad (3)$$

Además, Es posible obtener valores estimados para la relación de radios y para el espesor de pared midiendo solo la densidad de las partículas huecas (ρ_{mb}) y la densidad del material que las constituye (ρ_g) mediante la siguiente relación:

$$\eta = \left(1 - \frac{\rho_{mb}}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

Todas las propiedades de las partículas huecas dependen del espesor de pared. El módulo elástico efectivo de la partícula (E_{mb}) es diferente al del material (E_g) y se obtiene como [14]:

$$E_{mb} = \frac{E_g(1 - 2v_g)(1 - \eta^3)}{(1 - 2v_g) + \frac{(1 + v_g)}{2}\eta^3}, \quad (5)$$

Donde v_g es el coeficiente de Poisson del material de la partícula. Esta dependencia del módulo de elasticidad en función del espesor de pared permite diseñar espumas sintéticas con propiedades específicas. La Figura 8 presenta el módulo elástico relativo de la partícula (respecto al material) en función de la relación entre los radios. Para relaciones entre los radios muy pequeñas, el módulo elástico permanece prácticamente constante, lo que permite quitar peso de la estructura sin perder capacidad. Para una relación entre radios de 0,5, la partícula conserva aproximadamente un 75% de su módulo.

Es importante mencionar que el espesor de pared puede no ser constante en toda la partícula. Las zonas delgadas se convierten en zonas débiles donde se pueden iniciar grietas que lleven a la falla estructural.

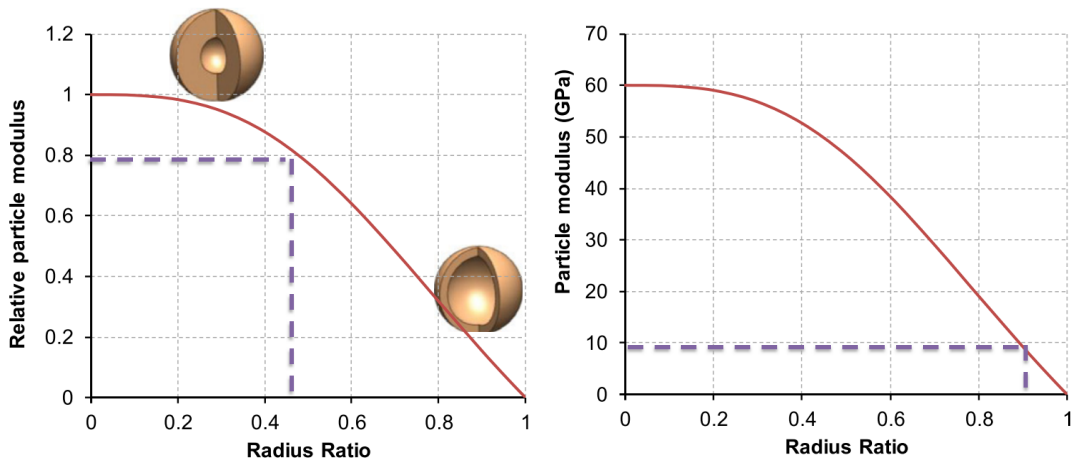


Figura 8: Relación entre el módulo de Young relativo de un refuerzo esférico en comparación a su relación entre radios

3.3.3 Microestructura

La microestructura de una espuma sintáctica de metal consta de tres fases claramente diferenciadas; la matriz, la esfera y el vacío interior. En la Figura 9 se puede apreciar una micrografía donde se evidencia la ruptura de una gran cantidad de esferas luego del proceso de fabricación. Trabajos previos han demostrado que este agrietamiento se debe a la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica entre las partículas de refuerzo y la matriz. Además de esto, se logra apreciar una nueva fase entre la esfera y la matriz, este compuesto corresponde a Dióxido de zirconio (ZrO_2) el cual no tiene efecto aparente sobre el comportamiento mecánico de la espuma resultante.[11]

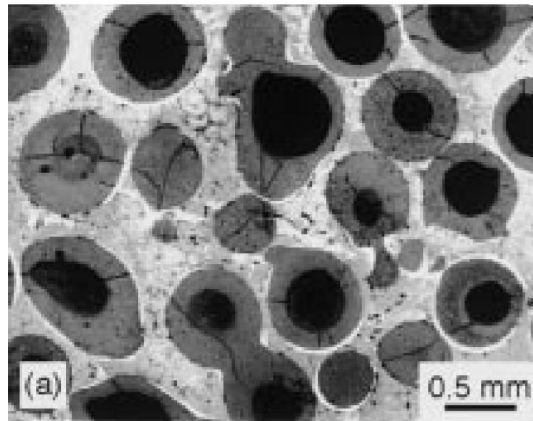


Figura 9: Microestructura de espuma reforzada con esferas huecas de Alúmina [11]

3.3.3.1 Interfaz pared-matriz

Una de las principales preocupaciones al momento de fabricar espumas sintéticas es la interfase partícula-matriz. Las temperaturas utilizadas en los procesos de fabricación, el tipo de material y el método utilizado, pueden dar a lugar reacciones químicas entre la pared externa del refuerzo y la matriz, dando origen a diferentes elementos, como es el caso de espumas de Al-Si reforzadas con microesferas huecas de vidrio, donde estas últimas reaccionan con las partículas de SiO_2 presente en la aleación, dando origen a MgAl_2O_4 (espinela). La posibilidad de que ocurran reacciones interfaciales depende del sistema del material y las condiciones de procesamiento, como la temperatura de fusión, el tiempo de mezclado y la velocidad de enfriamiento [14].

3.3.3.2 Daño en partículas de refuerzo

Cualquier método de síntesis da como resultado la fractura de algunas de las partículas huecas, lo que debe minimizarse. La optimización de procesos puede minimizar la fractura de estas, pero puede no eliminarla por completo debido a que algunas pueden ser defectuosas o poseer paredes muy delgadas. [14]

3.3.3.3 Tratamiento térmico

Se sabe que la diferencia en la capacidad calorífica de la matriz y la partícula da como resultado diferentes temperaturas de la partícula y la matriz durante el enfriamiento en los métodos de síntesis de solidificación. Este gradiente de temperatura cambia el tamaño de grano de la matriz. En varias espumas sintéticas, se encuentra que el tamaño de grano de la matriz es más fino que el de la aleación de matriz procesada en las mismas condiciones. Estos efectos deben controlarse cuidadosamente para obtener el conjunto deseado de propiedades en la espuma sintética.[14]

3.3.4 Métodos de fabricación

La preparación de las espumas sintéticas se puede dividir en tres categorías [5] . La primera corresponde a los métodos de infiltración, por ejemplo, infiltración por vacío [17], infiltración con presión mecánica [18], infiltración por gravedad [19] e infiltración por gas a presión [20], el cual es el más usado. El principal problema de este último es que, si se utilizar una presión levemente mayor a la necesaria, los

refuerzos tienden a fallar. El segundo grupo corresponde a la pulvimetalurgia [21] y la última categoría corresponde a los métodos de fundición por agitación [22]. Dependiendo del proceso escogido, se pueden obtener diferentes propiedades mecánicas debido a las diferencias presentes en la matriz, tales como densidad, fracción volumétrica y distribución de las esferas.

3.3.4.1 Fundicion por agitación

Uno de los métodos más simples para fabricar espumas sintácticas es el de agitación. En este método las partículas de refuerzo se mezclan mediante la rotación de aspas con el metal fundido. Luego de solidificado el material, la espuma se extrae del recipiente. Una de las ventajas de este método, es la capacidad de controlar la porosidad de la espuma resultante, esto ya que se tiene mayor control sobre la cantidad de esferas introducidas, su tamaño y espesor de pared, lo que permite obtener espumas sintácticas con propiedades específicas según sea el requerimiento[23]. Sin embargo, algunos problemas con la humectabilidad y con la flotabilidad de las partículas agregadas han sido reportados en la literatura [24]. Debido a esto, es que algunas técnicas requieren agregar agentes espesantes como partículas de Ca, tal como se ve en la Figura 10, para aumentar la viscosidad del metal fundido. Esta sustancia adicional puede alterar las propiedades de las espumas [25]. Además, las partículas de refuerzo pueden estar sujetas a daños o agrietamientos producto del contacto con las aspas o con las demás partículas.

En el estudio de [26] se fabricó una espuma sintáctica por el método de fundición por agitación, en este estudio el bloque de la matriz fue llevado y mantenido a 780 °C en un crisol de grafito mediante un horno de resistencias. Se agregó aproximadamente un 4% en peso de partículas de Ca y se agitó a 100-200 RPM durante 10 minutos para

dispersar de manera uniforme las partículas de Ca y aumentar la viscosidad de la masa fundida. Luego se agregan las partículas de refuerzo precalentadas y se continua la agitación durante 3-5 minutos hasta que estas estén distribuidas uniformemente en la masa. Luego de esperar 2 minutos el crisol se retira del horno y se enfría a temperatura ambiente para obtener la espuma sintáctica [25].

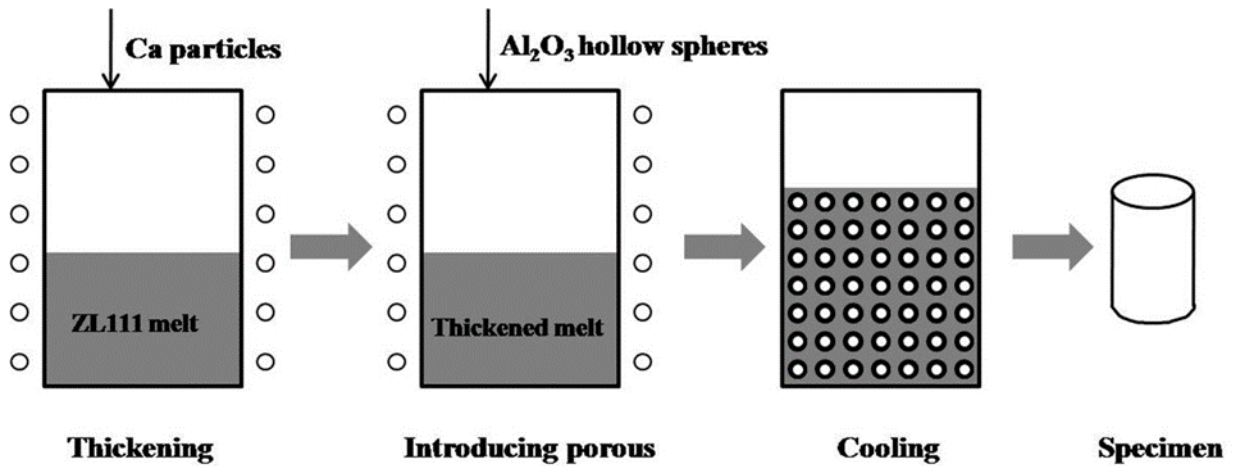


Figura 10: Proceso de fabricación de una probeta metálica con refuerzos porosos mediante el proceso de Fundicion por agitación [5]

3.3.4.2 Fundición por infiltración

Debido a los problemas que presenta el método de agitación, diferentes tipos de métodos de infiltración se han desarrollado. En este tipo de técnicas las partículas están contenidas en un molde y se infiltran forzando el metal fundido sobre las partículas (asistido por presión o vacío) o viceversa [25]. Mientras que un pequeño número de partículas pueden sufrir daños en el proceso, al no ser necesario agregar agentes espesantes las propiedades mecánicas de la espuma no se verán alteradas.

3.3.4.3 Pulvimetalurgia

La esencia de este tipo de procesos es mezclar un polvo del metal matriz con partículas huecas. La mezcla se compacta a presión en un molde y luego se sinteriza en un horno para obtener el resultado final. Se han desarrollado variaciones de este proceso, donde se incluyen espesantes a la mezcla, sinterización en varias etapas o la aplicación de vacío para eliminar el aire durante el proceso [14]. Este método se ha implementado para la fabricación de muchos materiales compuestos de matriz metálica, pese a esto, en el caso específico de las espumas sintácticas se debe ser cuidadoso con la selección de la presión de compactación, ya que esta puede producir el aplastamiento de las esferas huecas.

3.3.5 Comportamiento mecánico

La curva de esfuerzo-deformación de una espuma sintáctica se muestra en la Figura 11. Esta curva se divide en tres etapas: (i) la etapa de deformación elástica, donde el esfuerzo crece de manera lineal con la deformación hasta un valor máximo, luego viene una meseta, donde el esfuerzo disminuye ligeramente y se mantiene constante durante un largo tramo de deformación. En esta zona se aprecian variaciones en el valor del esfuerzo debido a los defectos y grietas presentes en la superficie de las esferas de reforzamiento [5].

Una de los aspectos mecánicos más importantes a estudiar de las espumas metálicas corresponde a las propiedades compresivas. Conocer su comportamiento bajo compresión, permite conocer las posibles aplicaciones donde pueden resultar útiles. Por esta misma razón es que gran parte de la literatura se encarga de estudiar dicho comportamiento. Las propiedades dinámicas de las espumas sintácticas también son relevantes puesto que se ha estudiado la posibilidad de utilizar estos materiales en aplicaciones donde estén sometidas a vibración o cargas cíclicas. [14]

La forma típica de la gráfica esfuerzo-deformación de compresión para espumas sintácticas metálicas se aprecia en la Figura 11. En esta se logran diferenciar cuatro zonas relevantes en la curva. La primera representa la zona elástica definida por la recta al inicio de la curva, la siguiente zona representa el límite de fluencia al final de la región elástica o también se conoce como resistencia a la compresión en algunos estudios, por lo general este punto se relaciona con la aparición de los primeros daños en el material y con el comienzo de la fractura de algunas partículas. La fractura de una partícula redistribuye los esfuerzos en el área adyacente, lo que desata una reacción en cadena donde las partículas cercanas que poseen defectos o paredes delgadas son las primeras en colapsar y en continuar la cadena [27]. La tercera zona corresponde a la zona de meseta, en esta zona se mantiene relativamente constante el

esfuerzo hasta que se alcanza una zona de deformación considerablemente grande. Es en esta zona donde se produce la absorción de energía de las espumas debido a la fractura continua de las partículas de refuerzo.

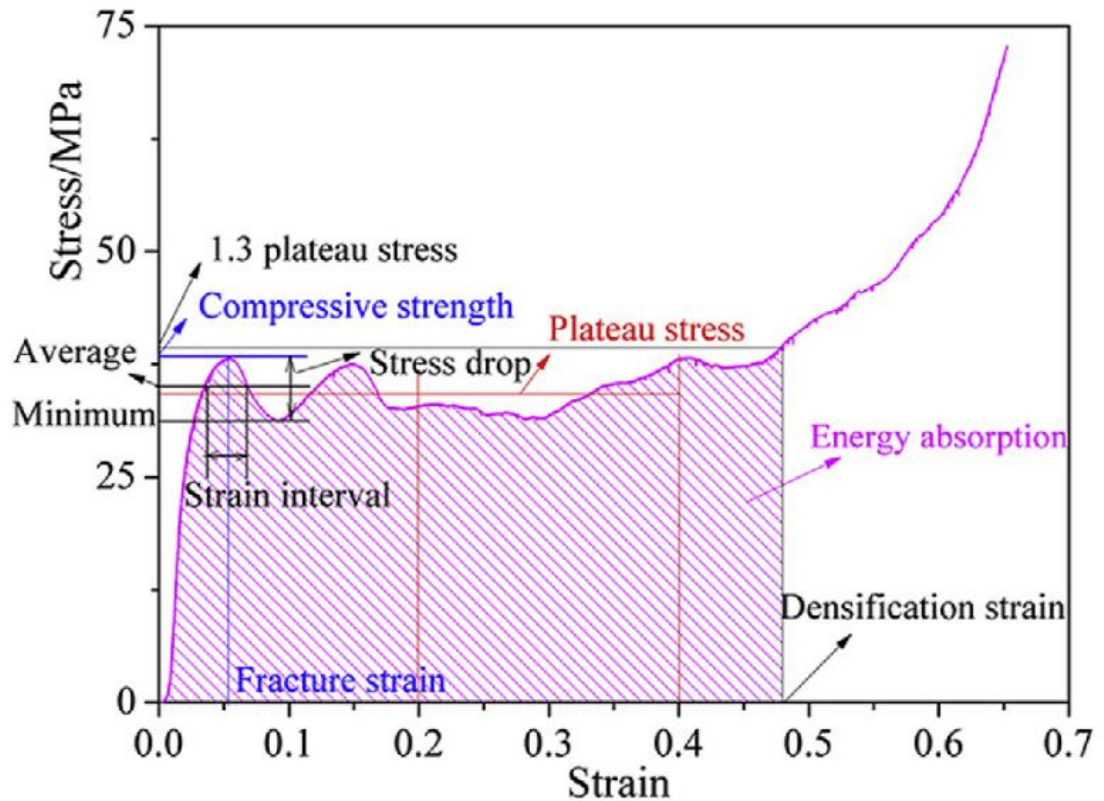


Figura 11: Curva de deformación ingenieril para una probeta con refuerzos metálicos. [28]

Dada la gran cantidad de estudios y observaciones relacionadas a las espumas sintéticas metálicas, los investigadores enfatizan que pueden existir diferentes curvas esfuerzo-deformación dependiendo de las aleaciones y tratamientos térmicos utilizados como se ve en la Figura 12 [29]. Por ejemplo, debido al endurecimiento por deformación y al tratamiento térmico la curva 1 tiene una meseta con tendencia

creciente mientras que la curva dos presenta una tendencia decreciente respectivamente. La curva 3 representa una matriz de Aluminio reforzada y la curva 4 representa la curva teórica ideal.

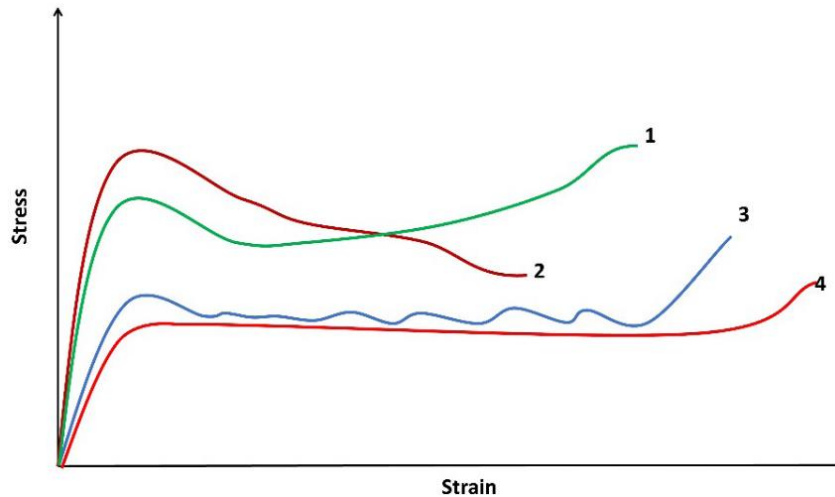


Figura 12: Modelo cualitativo de deformación ingenieril de una espuma sintáctica para diferentes tratamientos térmicos [29]

Generalmente se reconocen dos tipos de deformaciones para las espumas sintácticas de aluminio. Si la resistencia de la aleación de Aluminio es menor que la del material de refuerzo, se observa una falla tipo 1 en la Figura 13. Esta se caracteriza por una deformación tipo barril y una deformación constante hasta la densificación. En caso contrario, si la resistencia de la matriz es mayor que la del material reforzante, se observa un comportamiento como el del tipo 2 en la Figura 13. Por lo general, posterior a una deformación tipo 1 el bloque permanece casi completamente unido, solo se desprenden pequeños fragmentos del cuerpo principal. Caso contrario ocurre en una deformación tipo 2, donde el bloque termina dividido en dos o más secciones.

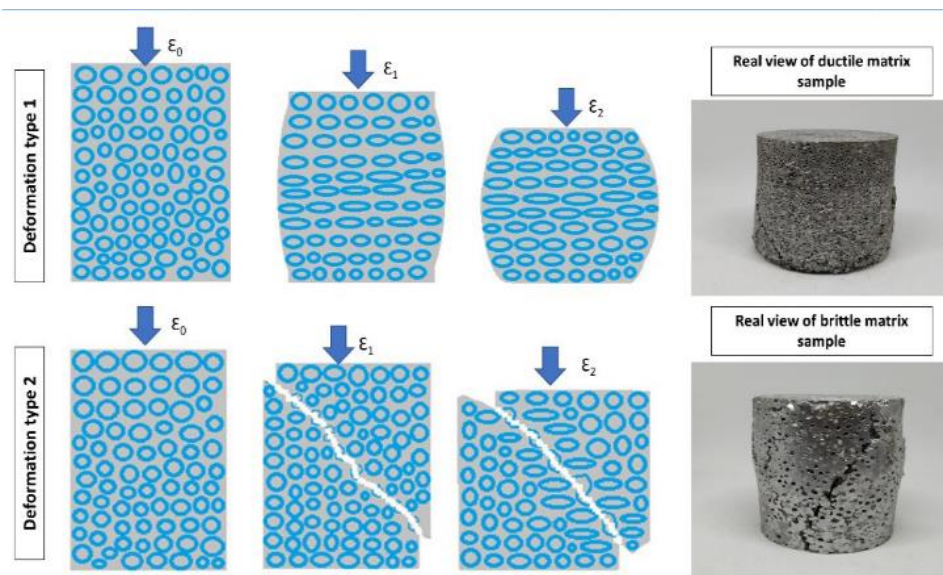


Figura 13: Modos de falla en espumas con matriz elástica y matriz frágil. [29]

3.3.6 Módulo de Young

El módulo de Young o modulo elástico efectivo es una de las propiedades mecánicas más importantes para el estudio de las espumas metálicas y su obtención numérica corresponde al objetivo principal de este trabajo de título.

De manera de poder comparar los resultados de este trabajo con modelos analíticos, se utilizarán dos expresiones que permiten predecir el módulo de Young de las espumas considerando su nivel de porosidad y el espesor de pared de los refuerzos huecos. El primero corresponde al modelo presentado por M.Y. He, B. Wu, F.W. Zok [30]:

$$\frac{E}{E_m} = \frac{2(1 - 2\nu)}{5 - 7\nu - 9(1 - \nu)^2 y} , \quad (6)$$

Donde ν corresponde al coeficiente de Poisson del material de la matriz, correspondiente a 0,3 [-] , E al modulo de Young de la espuma sintáctica y E_m corresponde al modulo de Young de la matriz.

$$y = \left\{ 2 - \nu \left(1 + \frac{E_m}{E_c} \right) + \left(\frac{E_m}{E_c} \right) \left[\frac{(1 - \nu) \left(2 + \left(1 - \frac{t}{R} \right)^3 \right)}{2 \left(1 - \left(1 - \frac{t}{R} \right)^3 \right)} \right] \right\}^{-1} , \quad (7)$$

El segundo modelo corresponde a la regla de las mezclas:

$$E = E_m V_m + E_r V_m [GPa] , \quad (8)$$

3.3.7 Aplicaciones

Dentro de las potenciales aplicaciones de las espumas sintácticas de Aluminio, la más prometedora es su aplicación en la industria automotriz, ya que es un candidato perfecto para mejorar algunos aspectos claves como un peso ligero, buena capacidad de absorción y amortiguación de energía [29].

En el competitivo mundo industrial actual, desde la industria automotriz hasta la aeroespacial y la construcción, muchos sectores se esfuerzan por reducir los costos de fabricación sin sacrificar la calidad, por lo que los materiales de ingeniería avanzados

como compuestos, espumas y espumas sintácticas se han vuelto más atractivos para muchas empresas. Las espumas de Al estándar tienen poros que provienen de algunos gases que reducen el peso pero pueden causar algunas desventajas como dificultades para controlar el tamaño y la forma de los poros. Las espumas sintácticas de aluminio tienen un gran potencial para aplicaciones reales porque no solo son más livianos que los compuestos tradicionales de Al reforzado con partículas, sino que también responden mejor que las espumas de Al convencionales en cargas mecánicas debido a su distribución uniforme de tamaño / forma[29].

3.3.7.1 Industria automotriz

Junto con la creciente conciencia de la contaminación ambiental y las reglas sólidas sobre la emisión total de gases, la industria automotriz se esfuerza por resolver los problemas de peso total y eficiencia del combustible. En este contexto, es cierto que las espumas sintácticas, que pueden utilizarse como pilares, cajas de protección u otros componentes estructurales en un automóvil, pueden cumplir con los requisitos mecánicos ilustrados en la Figura 14, así como con la reducción de peso total.[29]

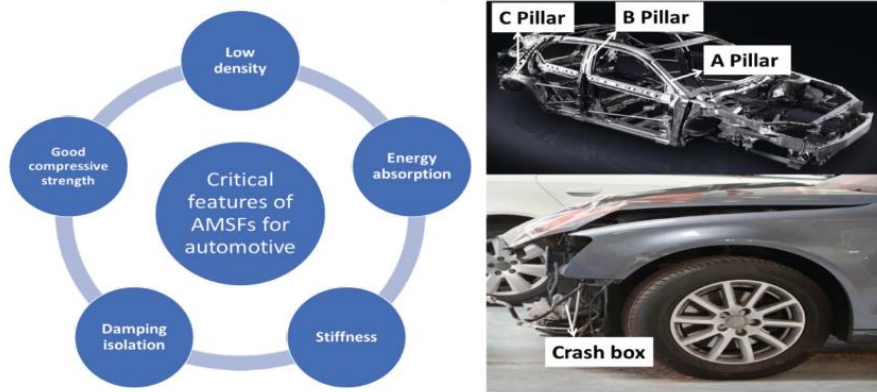


Figura 14: Características relevantes de las espumas sintacticas para la industria automotriz [29]

3.3.7.2 Industria aeroespacial

Una posible y promisoría aplicación de las espumas sintacticas ha sido estudiada por fabricantes de turbinas. La compañía Rolls-Royce registro una patente [31] en la cual describe un perfil aerodinámico compuesto por una espuma en su interior y laminas de metal en el exterior. Según la patente, este perfil puede ser fabricado con espumas sintacticas con matriz de titanio, niquel, aluminio o aleaciones de acero, tal como se ve en Figura 15.

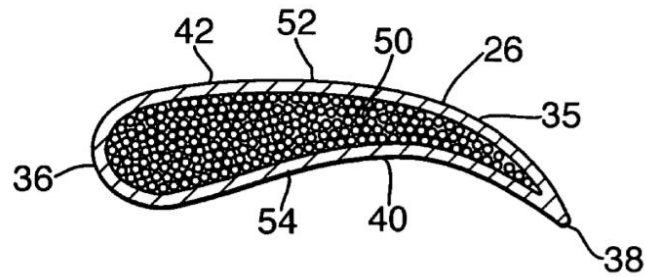


Figura 15: Perfil aerodinámico compuesto por una espuma metálica, patentado por la empresa Rolls Royce [31]

3.4 Método de Elementos Finitos

El método de elementos finitos, también conocido como FEM, por sus siglas en inglés, permite determinar el comportamiento de una estructura sustituyendo la solución continua, exacta y en muchos casos imposible de resolver utilizando los métodos tradicionales de ecuaciones diferenciales por una solución discontinua o discreta, dividiendo la estructura en un numero finito de elementos conectados entre sí, donde los resultados obtenidos para un nodo, permite resolver el siguiente, obteniendo una solución aproximada.[32]

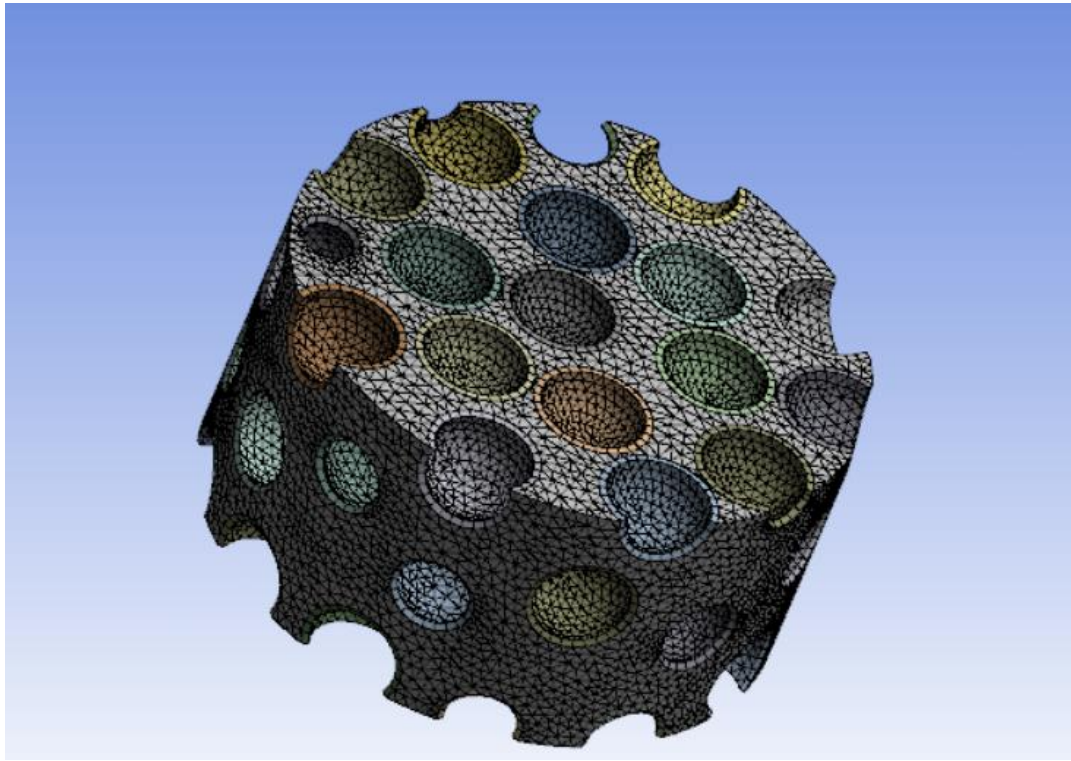


Figura 16: Geometría con refuerzos porosos de 2,5 [mm]

La idea general del método FEM es dividir un continuo en un conjunto de elementos interconectados por puntos, llamados nodos. Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del continuo lo hacen también para cada elemento de este. Así, es posible pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de estas, a un sistema de ecuaciones lineales o no.[33]

Dentro de cualquier sistema a analizar se pueden identificar:

- Condiciones de borde: Variables conocidas y que determinan la evolución del sistema.
- Dominio: Espacio geométrico donde se analiza el sistema.

- Incógnitas: Variables del sistema a determinar.

3.4.1 Discretización

La discretización corresponde al proceso de modelado de un cuerpo en el cual este se subdivide en un sistema conformado por elementos más pequeños (y finitos) interconectados por medio de nodos, los que forman superficies y se comportan como volúmenes de control independientes, estos son afectados por las condiciones de borde que afectan al cuerpo como un todo y a los volúmenes inmediatamente continuos.

Existen dos métodos generales asociados a la comprensión y correcta aplicación del método FEM. El primero de ellos corresponde al método de flexibilidad o también llamado método de fuerza, el cual se basa en utilizar las cargas internas del modelo como las incógnitas del problema. Para obtener las ecuaciones que gobiernan el problema, primero se emplean las ecuaciones de equilibrio, para posteriormente introducir ecuaciones algebraicas adicionales generadas por las ecuaciones de compatibilidad. El segundo método es el denominado método de desplazamiento, este método asume el desplazamiento de cada nodo del dominio como una incógnita.[34]

3.4.2 Mallado

3.4.2.1 Calidad de elemento

El factor de calidad se calcula por cada elemento del modelo. Este parámetro permite entregar una medición cuantitativa de la calidad, esta calidad varía entre 0 y 1, siendo 1 la mejor calidad.[32]

3.4.2.2 Relación de aspecto

Es un parámetro de forma de los elementos. Se relaciona con la simetría, tal como se ve en la Figura 17. Está definido como el cociente entre el lado más largo y el más corto. El ideal es que sea 1, lo que representa que la forma del elemento es la deseada.[35]

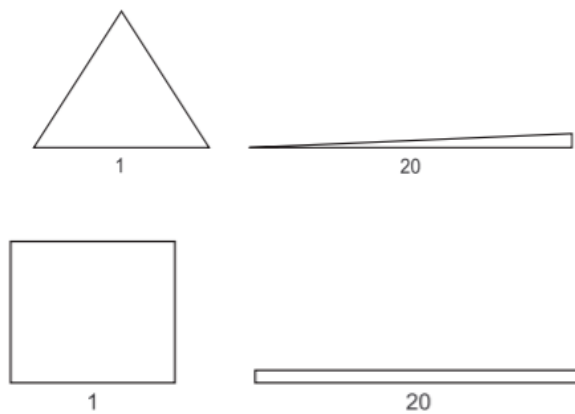


Figura 17 Relaciones de aspecto[35]

3.4.2.3 Calidad ortogonal

Al igual que los demas parametros, esta toma valores entre 0 y 1, donde el 1 representa la calidad ideal. Para obtenerla se definen 3 vectores como se ve en la Figura 18, un vector normal a una cada 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 ($\vec{c}_i$). El valor numerico se determina utilizando la siguiente relación [36]:

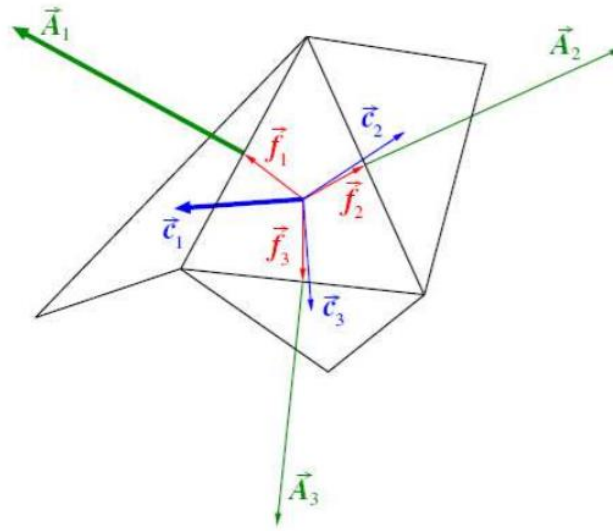


Figura 18: Representación de la calidad ortogonal.[35]

$$Calidad\ ortogonal = \min \left\{ \frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| \cdot |\vec{f}_i|}, \frac{\vec{A}_i \cdot \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| \cdot |\vec{c}_i|} \right\}$$

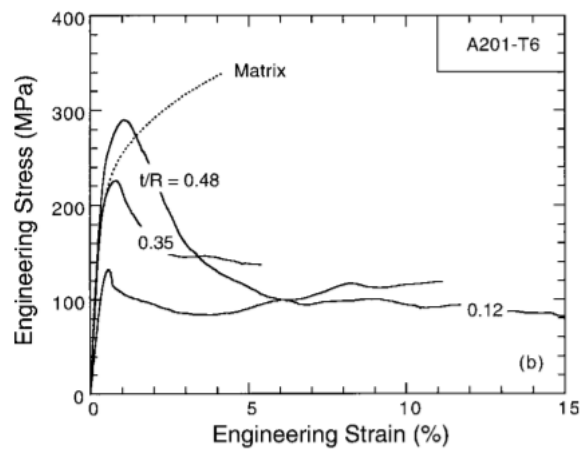
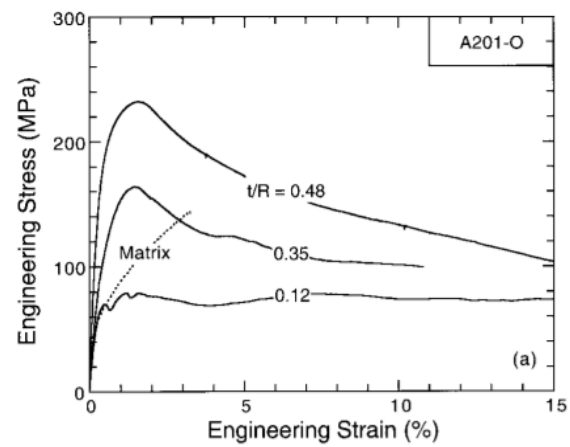
4 Estudios relacionados

4.1 Respuesta mecánica de los compuestos de matriz de Aluminio reforzado con microbalones de cerámica bajo carga compresiva.

Kiser [11] estudió en detalle el efecto de la relación espesor-diámetro. En su ensayo, tres geometrías con diferentes valores de espesor de pared y diámetros fueron infiltrados en aleaciones de aluminio A201 y A360. En ambos casos los materiales fueron fabricados con el método de Fundición asistido por vacío. Las curvas de esfuerzo-deformación en compresión dejan en evidencia que el esfuerzo máximo de compresión aumenta a medida que se aumenta el valor de la relación t/D , hasta en un factor de 3 veces. Este comportamiento se observó en las tres matrices (A201-O, A201 y A360-T6-O). Los resultados de este estudio se muestran en la Figura 19. El módulo de Young tanto de la matriz y de los refuerzos se encuentran en la Tabla 1:

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el estudio [11]

Material	Modulo de Young [Gpa]
A201	60,0
A360	70,0
Al2O3	300,0



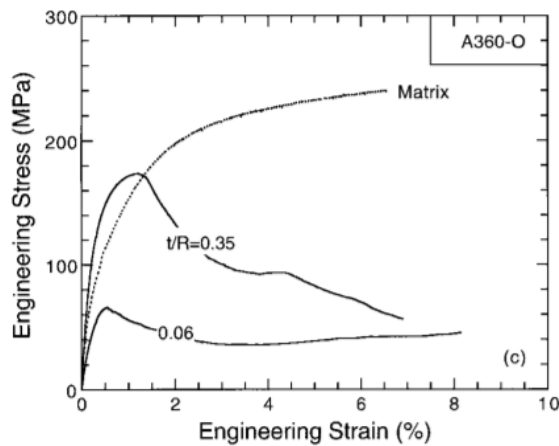


Figura 19: Resultados de los experimentos realizados por Kiser [4].

Una de las matrices de A201 fue sometida a un tratamiento termico de recocido completo (O) mientras que la otra fue sometida a un tratamiento termico de solucion, temple y maduracion artificial (T6). Las condiciones para el tratamiento O se consiguen llevando el material fundido a 415 °C durante 2,5 [hrs] en el horno, luego viene un proceso de enfriamiento da la tasa de 1 °C/min hasta 260 °C. seguido por aire a temperatura ambiente. La matriz sometida al T6, comienza con un tratamiento en una solucion por 2 hrs a 510 °C y 20 hrs a 525 °C seguido de un enfriamiento con agua a temperatura ambiente hasta 155 °C.

La matriz de A360, es sometida a un proceso recocido para aliviar tensiones residuales a 330 °C durante 3 hrs, seguido por un proceso de enfriamiento a menos de 1 °C/min hasta casi 100°C y posteriormente enfriamiento con aire a temperatura ambiente.

Las principales conclusiones de estudio son las siguientes:

- En todos los casos el esfuerzo máximo fue alcanzado con deformaciones relativamente pequeñas, alrededor del 1-2%. Este esfuerzo aumento con el aumento de la relación entre el espesor de pared y el diámetro. Además, este esfuerzo máximo se asocia con el colapso de las microesferas y el comienzo de la deformación.
- El efecto del tratamiento de templado T6, es considerablemente menor a lo que se podría esperar. Si bien, otorga a la matriz una curva menos pronunciada, lo que indicaría una mayor capacidad de absorción de energía, los valores máximos de estrés son modestamente mayores que los de su respectiva matriz sin tratamiento.

4.2 Comportamiento a compresión de espumas sintácticas de matriz de aluminio reforzadas con esferas huecas de hierro

En este trabajo [37] se analiza el comportamiento mecánico bajo compresión de cuatro tipos diferentes de espumas sintácticas de metal comparándolo con los datos obtenidos de simulaciones numéricas. Los tipos de matrices y sus composiciones se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2: Composición en peso de las diferentes matrices[37]

Matriz	Principales componentes (% en peso)					
	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Otros</i>
Al99.5	99,5	0,1	0,1	-	-	0,3
AlSi12	86	12,8	0,1	0,1	-	1
AlMgSi1	97	1,1	0,5	1,1	-	0,3
AlCu5	95	-	-	-	4,5	0,5

El material de refuerzo corresponde a esferas huecas de hierro suministradas por la empresa Globomet. Sus propiedades se presentan a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3: Características mecánicas del material de refuerzo[37]

Material	Fe
Diametro [mm]	1,92±0,07
Espesor de pared [um]	23±0,6
Módulo de young [Gpa]	95,9
Densidad [g/cm3]	0,093

Para su fabricación se empleó el método de infiltración por presión. Para esto se utilizó un molde cilindro recubierto internamente con grafito en el cual se depositan las esferas. Luego de esto, el molde se envuelve en una red de acero inoxidable y se calienta en un horno durante 30 minutos a 300 °C. De manera paralela el metal de la matriz se lleva 50°C sobre su temperatura de fusión. Luego se deposita el material fundido sobre el arreglo de esferas y mediante la inyección a presión de Argón (a 400 [kPa]) se obliga al material a infiltrarse entre los espacios del arreglo de esferas.

Luego de enfriada la mezcla, se retira el molde y se realiza el maquinado hasta obtener probetas cilíndricas con 14 [mm] de altura y de diámetro. Este esquema se representa en la Figura 20.

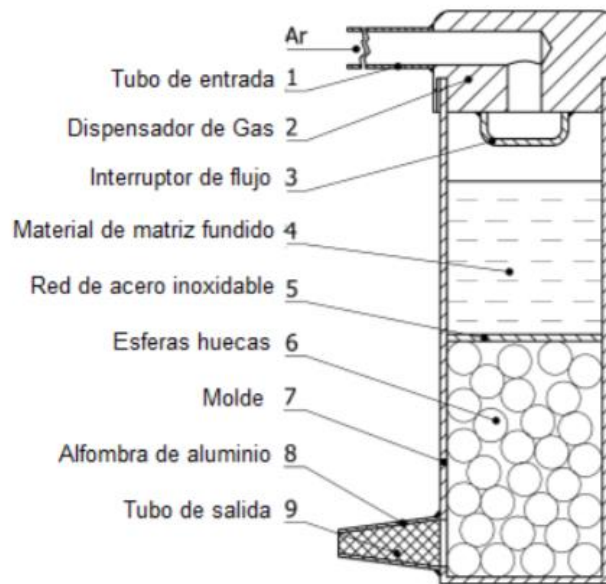


Figura 20: Proceso de fabricación correspondiente a infiltración por presión[37]

Para realizar el análisis de elementos finitos se creó una geometría con una distribución aleatoria de esferas con las mismas características geométricas y mecánicas del modelo real, la que se aprecia en la Figura 21. Se sometieron ambos modelos a un ensayo de compresión hasta un 50% de deformación y se compararon los resultados que se aprecian en la Figura 22.

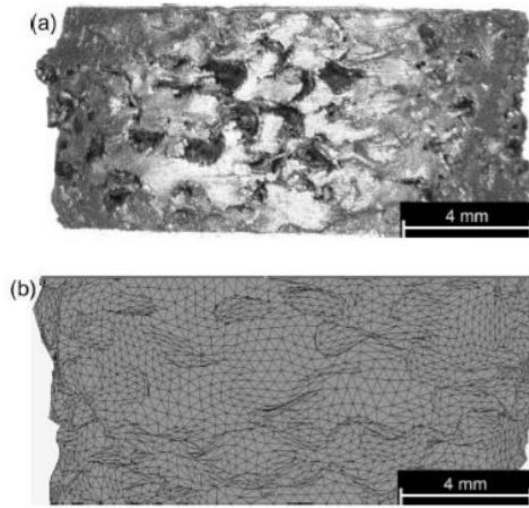


Figura 21:Modelo FEM utilizado en el estudio[37].

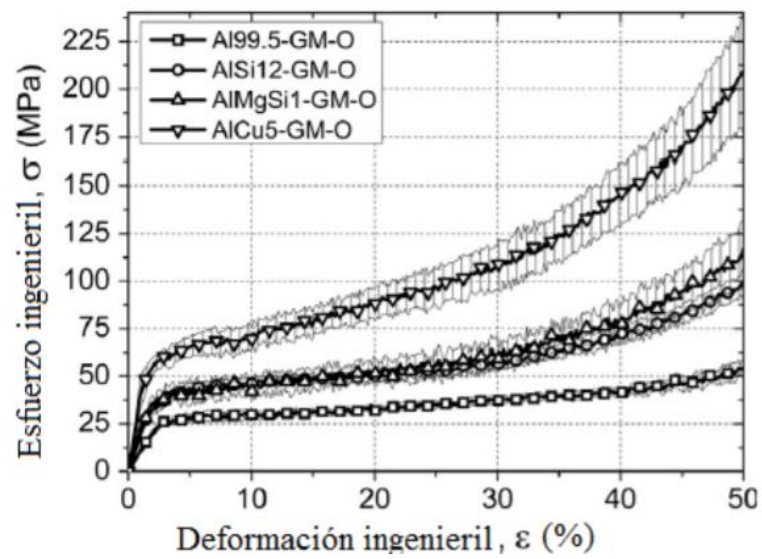


Figura 22: Curva de deformación ingenieril obtenida en el estudio[37].

Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

- La curva de esfuerzo-deformación obtenida, presenta una zona de meseta larga y de ascenso lento, lo que indica una alta capacidad para la absorción de energía.
- El modelo computacional es una buena aproximación a los valores reales medidos en el ensayo de compresión. Estos están dentro del 5% para las propiedades características y dentro del 10% para toda la curva.

4.3 Propiedades compresivas de vidrio expandido y esferas huecas de alúmina en espumas sintácticas de matriz de aluminio reforzada híbrida

En este estudio [12] se prepararon espumas sintácticas de matriz de aluminio reforzadas con esferas huecas de Alúmina y vidrio expandido y espumas sintácticas con un solo refuerzo mediante el método de fundición por agitación. La porosidad alcanzada alcanza un valor de 52,24%. Se realizaron ensayos de compresión para estudiar las características mecánicas tanto de los refuerzos como las espumas independientemente.

Las fracciones en volumen y las porosidades resultantes de los 7 modelos estudiados se presentan a continuación:

Tabla 4: Fracción en volumen de refuerzo y porosidad de las diferentes geometrías[12]

Curva	Fracción en volumen		Porosidad%
	V _{HS} %	V _{EG} %	
1	0	43,92	50,99
2	0	47,16	54,06
3	43,31	0	43,96
4	47,55	0	46,24
5	37,65	12,55	47,38
6	26,12	26,12	49,87
7	12,6	37,8	51,46

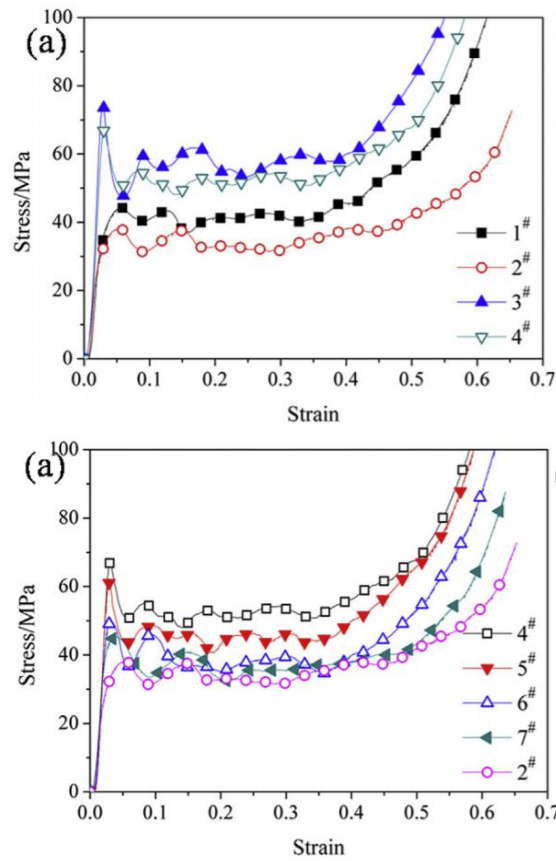


Figura 23: Resultados numericos del estudio[12]

Las principales conclusiones de este estudio se muestran a continuación:

- Independientemente del tipo de refuerzo, las propiedades mecánicas de las espumas con refuerzos más pequeños (2-3 [mm]) son más altas que las espumas con refuerzos de 3-4 [mm].
- Utilizar la regla de las mezclas para predecir las propiedades del material reforzado es una buena aproximación a los valores reales.

5 Metodología

En esta sección se describe la metodología para la realización del estudio mediante el método FEM utilizando el software ANSYS. Para esto, se realizan una serie de simulaciones de ensayos de compresión sobre espumas sintéticas de matriz de Aluminio reforzadas con esferas huecas de Alumina con una porosidad promedio de 55 %. Para esto se seleccionan las propiedades mecánicas de los respectivos materiales, se definen las condiciones de contorno apropiadas para la realización del ensayo de compresión y finalmente, utilizando los datos obtenidos, se determina el módulo de Young de las diferentes probetas.

5.1 Simulación

El proceso de simulación a realizar en el software ANSYS WORKBENCH, se describe a continuación:

1. Ingresar a la pestaña *Static Structural*, la cual permite realizar análisis estructurales.
2. Ingresar las propiedades mecánicas relevantes para el estudio. Para esto ingresar a la pestaña correspondiente a *Engineering Data*.
3. Cargar la geometría en la pestaña *Geometry*. En esta pestaña se puede modificar la geometría en caso de ser necesario. Se pueden modificar las dimensiones generales de la espuma, y agregar o sustraer esferas de refuerzo.

4. Abrir la pestaña *Model*, pestaña donde se configura y genera el mallado, se aplican las condiciones de contorno, restricciones y desplazamientos. Aquí es necesario seleccionar el tipo de análisis (Fuerza de reacción, deformación, esfuerzos, etc.). Una vez ingresados y configurados todos los parámetros, se inicia la simulación para obtener los datos requeridos.

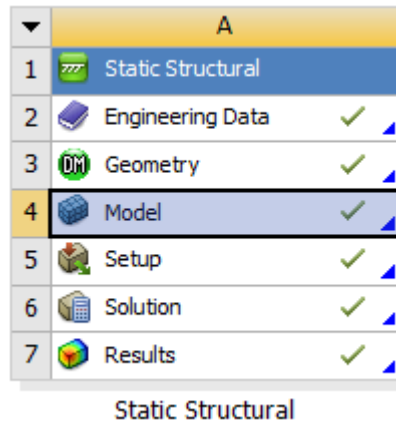


Figura 24: Ventana de modulo estructural del software ANSYS WORKBENCH

5.2 Geometrías

Para asegurar resultados confiables todas las geometrías cumplen la restricción propuesta por S.K. Sebsadji [38], en este estudio se concluye que el valor representativo de volumen (RVE) de todas las geometría debe ser tener valores entre 2,4 a 3,7 como mínimo para garantizar simulaciones numéricas confiables.

El valor representativo de volumen se define por:

$$RVE = \frac{D_{probeta}}{d_{refuerzo}}, \quad (9)$$

Las propiedades geométricas de las probetas son las siguientes:

RVE		
D[mm]	d[mm]	N [-]
6	1	6
12	2,5	4,8
12	1,5	8

Tabla 5: Dimensiones geométricas de las geometrías simuladas.

Todas las geometrías en estudio tienen una porosidad aproximada del 55 %. Su distribución según tamaño de los refuerzos se puede ver a continuación:

Tamaño esfera [mm]	Porosidad [%]
2,5	54,09
2,5	54,62
2,5	55,06
1	52,16
1	49,17
1	48,68
1,5	54,56
1,5	55,16
1,5	55,86

Tabla 6: Tamaño de refuerzos esféricos y porosidad.

En la Figura 25 se muestra una geometría con refuerzos porosos con un diámetro de 2,5 [mm] :

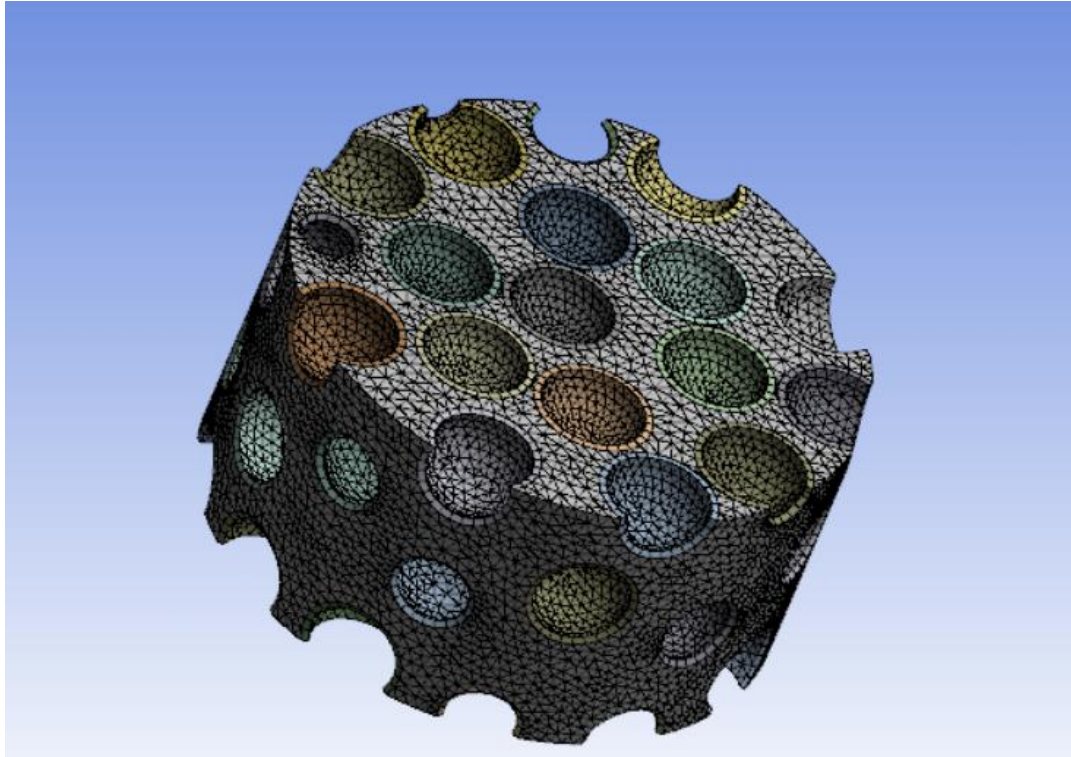


Figura 25: Geometría de ejemplo

5.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del Aluminio son las correspondientes a una matriz de Aluminio A201 y las correspondientes a los refuerzos fueron obtenidas según las

estimación presentadas en el estudio de Kiser [11] en el Capítulo 4. Considerando que se desea estudiar el comportamiento elástico de las espumas, es que solo son necesarias las propiedades de elasticidad isotrópica, como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Junto a esto, se selecciona un comportamiento isotrópico con el objetivo de homogeneizar las propiedades del material en todos los puntos y direcciones.

En la Figura 26 se presentan las propiedades mecánicas de ambos materiales en el programa Ansys Workbench:

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	3,95	[g*cm ⁻³]
Modulo de Young	300	[GPa]
Coef de Poisson	0,3	[-]

Figura 26: Propiedades mecánicas utilizadas para los refuerzos de Alumina.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	3	[g*cm ⁻³]
Modulo de Young	60	[GPa]
Coef de Poisson	0,3	[-]

Figura 27 : Propiedades mecánicas correspondientes a la matriz de Aluminio.

5.4 Mallado

El mallado de las espumas debe garantizar buenos resultados, para lo cual se utiliza una malla cuyos parámetros relevantes (Calidad del elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal), se encuentren dentro de los límites aceptados estudiados en capítulos anteriores. En la Figura 28 se muestra la configuración de malla seleccionada en ANSYS :

Sizing	
Size Function	Adaptative
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Minimum Edge Length	0,107270 [mm]

Figura 28 : Parámetros de mallado en ANSYS WORKBENCH



Figura 29: Ejemplo de modelo mallado con parámetros seleccionados.

Para la matriz se utilizan elementos tetraédricos, mientras que para el caso de las esferas, se utiliza un método de triángulos, el que permite que la pared de la esfera esté formada por elementos triangulares de su mismo espesor y además favorece la coincidencia entre los nodos de las mallas respectivas. Para realizar esto es necesario insertar el método directamente desde la pestaña *mesh* y aplicarlo a todas las esferas del modelo.

Para este estudio se utilizaron diferentes valores para la relación entre el diámetro de las microesferas huecas y el espesor de pared, este último debe estar dirigido hacia adentro (*top*) de manera que la malla de las esferas no se intercepte con los nodos de la malla de la matriz, evitando así la interferencia entre mallas.

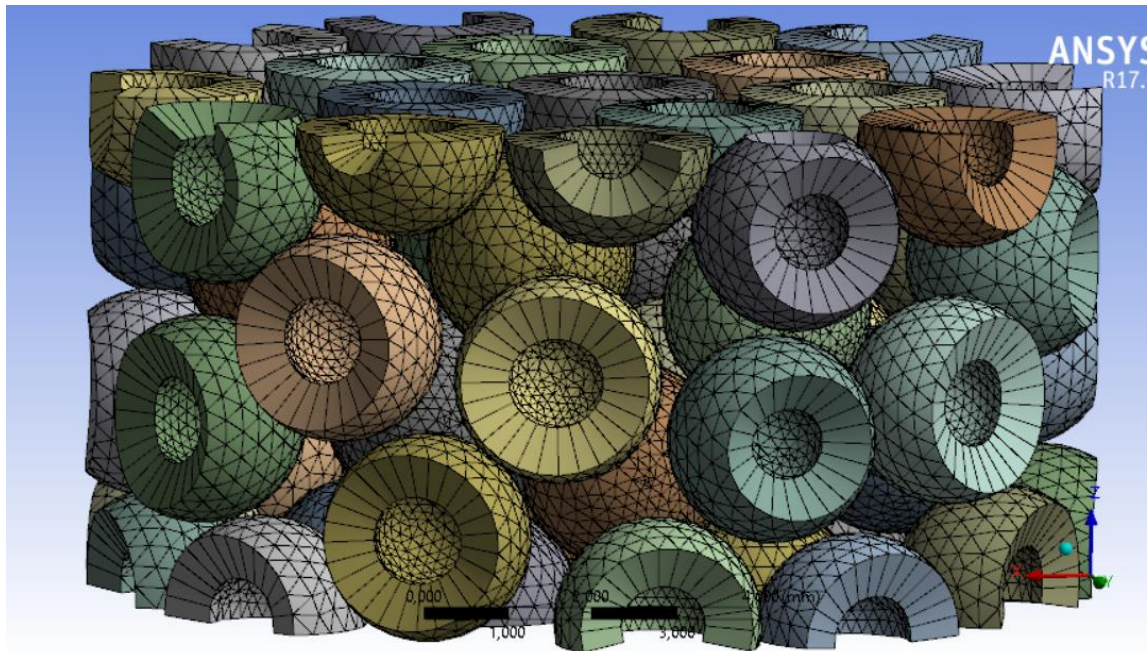


Figura 30: Mallado de refuerzos esféricos

Scope	
Scoping Method	Named selection
Named Selection	Esferas
Definition	
Suppresed	No
Method	Triangles
Element Midside Nodes	Use Global Setting

Figura 31: Parámetros de mallado para los refuerzos esféricos

5.5 Condiciones de contorno

Para lograr representar de la manera más fiel posible las condiciones que dominan un ensayo de compresión, es que es de vital importancia seleccionar las condiciones de contorno adecuadas para definir el modelo. Esto permitirá obtener la fuerza de reacción que será utilizada para el cálculo del módulo de Young de cada probeta.

Para mantener fija la cara inferior de la probeta, se aplica la condición de desplazamiento igual a cero en el eje Z, permitiendo el movimiento de la cara en los ejes X e Y.

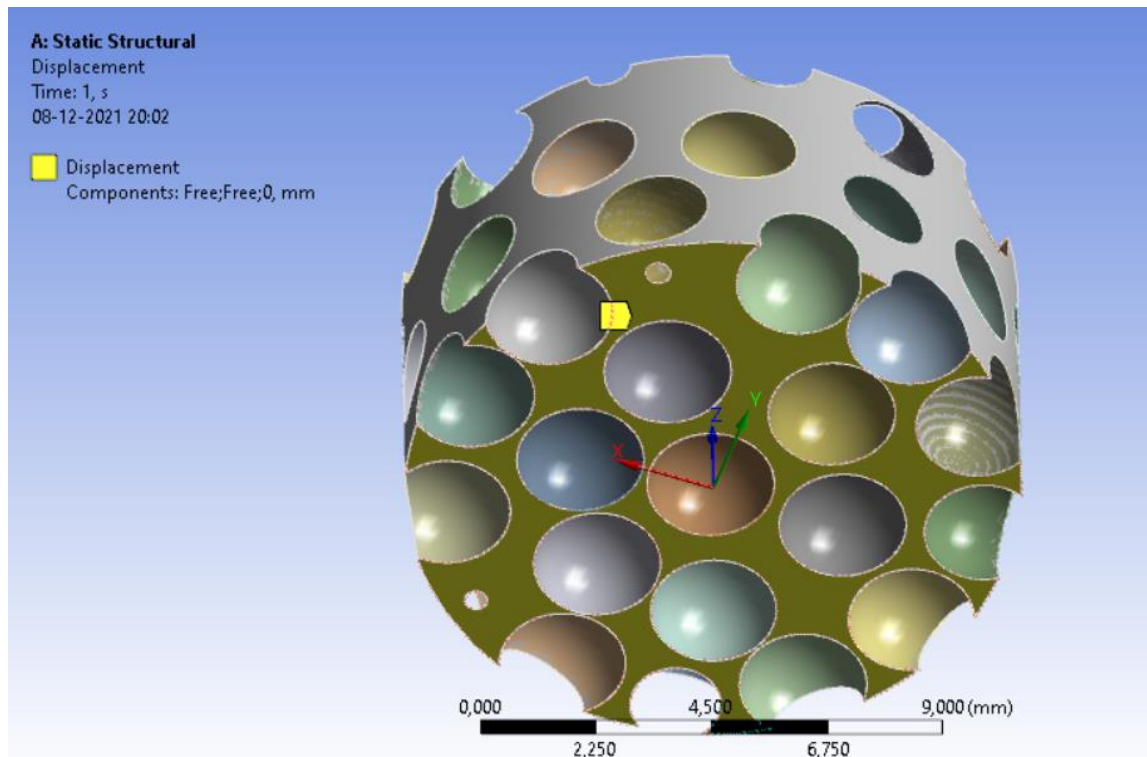


Figura 32: Condición de contorno Desplazamiento

Scope	
Scoping Method	Named selection
Named Selection	Inferior
Definition	
Type	Displacement
Definy by	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X component	Free
Y component	Free
Z component	0, mm (ramped)
Suppresed	No

Figura 33: Parámetros de condición de contorno Desplazamiento

En la cara superior, se debe aplicar la condición de desplazamiento remoto, esta condición representa un desplazamiento producido por una fuerza externa. En todas las geometrías se aplica una deformación correspondiente al 1% de su altura. Además, el comportamiento de los nodos de esta cara debe ser acoplado, es decir, que todos se someten al mismo desplazamiento. Al igual que en el caso anterior, no se aplican restricciones en el eje X e Y, mientras que en el eje Z se aplica el desplazamiento mencionado anteriormente.

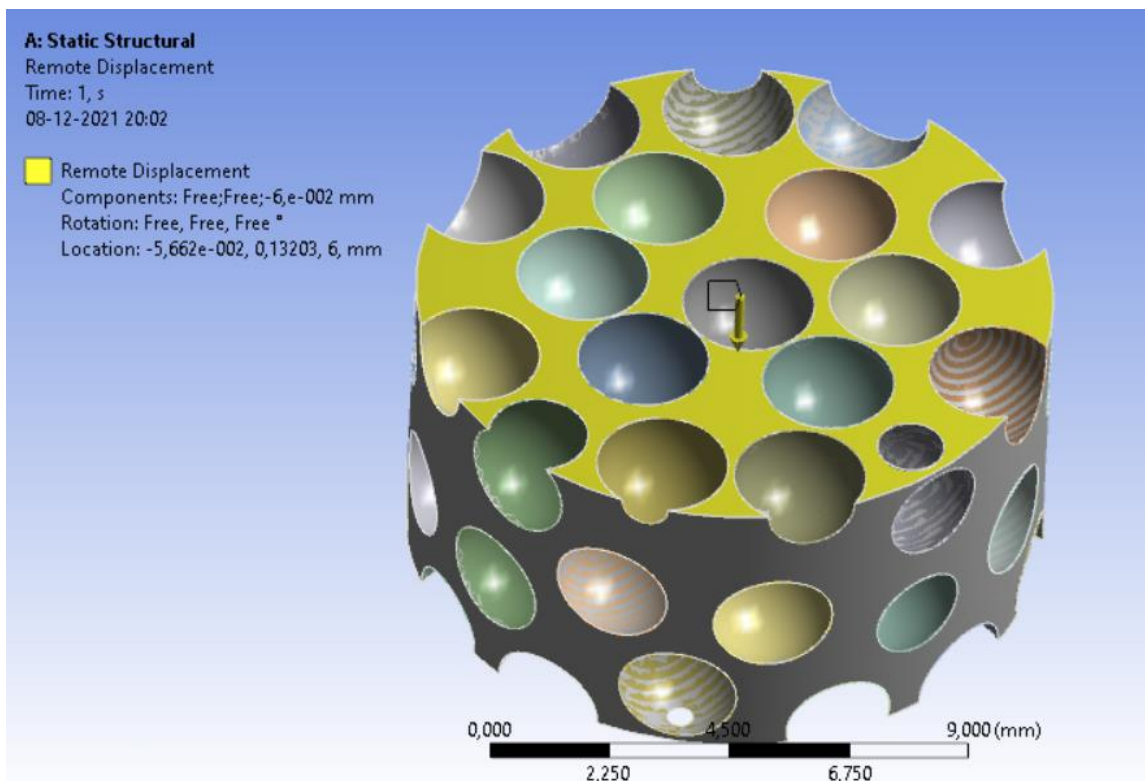


Figura 34: Condición de contorno de Desplazamiento remoto

Coordinate System	Global coordinate system
X coordinate	-0,0566
Y coordinate	0,13203
Z coordinate	6
Location	Click to change
Definition	
Type	Remote displacement
X component	Free
Y component	Free
Z component	-0,06 [mm]
Rotation x	Free
Rotation y	Free
Rotation z	Free
Suppressed	No
Behavior	Coupled

Figura 35: Parámetros de la condición de contorno Desplazamiento remoto

5.6 Cálculo del módulo de Young

Con la obtención de la fuerza de reacción de cada modelo y el desplazamiento al que son sometidas las muestras, es posible realizar una serie de cálculos para determinar el módulo de Young de cada probeta. La expresión (10) permite calcular el esfuerzo resultante en cada probeta a partir de la fuerza de reacción obtenida, la deformación conocida que se aplicó a cada modelo y el área transversal de las probetas, tal como se ve a continuación:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (10)$$

Donde σ corresponde al esfuerzo, F a la fuerza de reacción y A al área transversal de cada probeta.

Para el cálculo de la deformación unitaria (ε) es necesario conocer la altura inicial de la probeta y el desplazamiento al que será sometida, como se mencionó anteriormente, este desplazamiento corresponde al 1% de la altura para todos los modelos. Así, se obtiene el valor de la deformación unitaria mediante la siguiente relación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (11)$$

Una vez conocido el valor del esfuerzo y la deformación, basta hacer uso de la Ley de Hooke en materiales sometidos a una compresión axial, para obtener el módulo de Young efectivo de cada una de las geometrías mediante la siguiente relación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (12)$$

5.7 Resultados

Las simulaciones de los diferentes modelos entregan como resultado la fuerza resultante al aplicar una deformación del 1% sobre cada una de las probetas. Dado que el principal objetivo de este trabajo de título es obtener el módulo de Young, el

comportamiento simulado solo comprende la zona de deformación elástica del grafico de deformación ingenieril vs esfuerzo.

Cada geometría se utiliza dos veces, una de estas invirtiendo las condiciones de borde, de manera de duplicar la cantidad de simulaciones sin necesidad de generar el doble de geometrías. La distribución de las microesferas dentro de la matriz es completamente aleatoria, lo que permite realizar el procedimiento descrito.

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos para cada geometría.

Tabla 7: Modulo de Young para diferentes tamaños de refuerzo esférico a una porosidad del 50% aprox.

Tamaño esfera [mm]	Porosidad [%]	Modulo de Young [Mpa]
2,5	54,09	47,87
2,5	54,62	43,07
2,5	55,06	43,89
1	52,16	95,46
1	49,17	100,60
1	48,68	101,85
1,5	54,56	74,24
1,5	55,16	89,64
1,5	55,86	92,23

Como se comenta en el apartado de Simulaciones, de manera de tener un modelo analítico para comparar los resultados obtenidos mediante FEM, se presenta el resultado obtenido para los cálculos del módulo de Young, utilizando el modelo presentando por Kiser [4].

Tabla 8 : Modulo de Young obtenido con el modelo analítico para diferentes valores de t/R

t/R [-]	Modulo de Young analitico [Mpa]	Modulo de Young relativo [-]
1	113,62	1,89
0,9	113,54	1,89
0,8	112,99	1,88
0,7	111,48	1,86
0,6	108,52	1,81
0,5	103,55	1,73
0,48	102,26	1,70
0,4	95,91	1,60
0,35	90,84	1,51
0,3	84,77	1,41
0,2	69,03	1,15
0,12	52,07	0,87
0,1	47,09	0,78
0,05	33,09	0,55

Tabla 9: Modulo de Young obtenido con el método FEM para diferentes valores de espesor de pared

t/R [-]	Modulo de Young [Mpa]	Desviacion estandar [-]
0,12	44,94	2,65
0,35	85,37	3,21
0,48	99,30	3,61

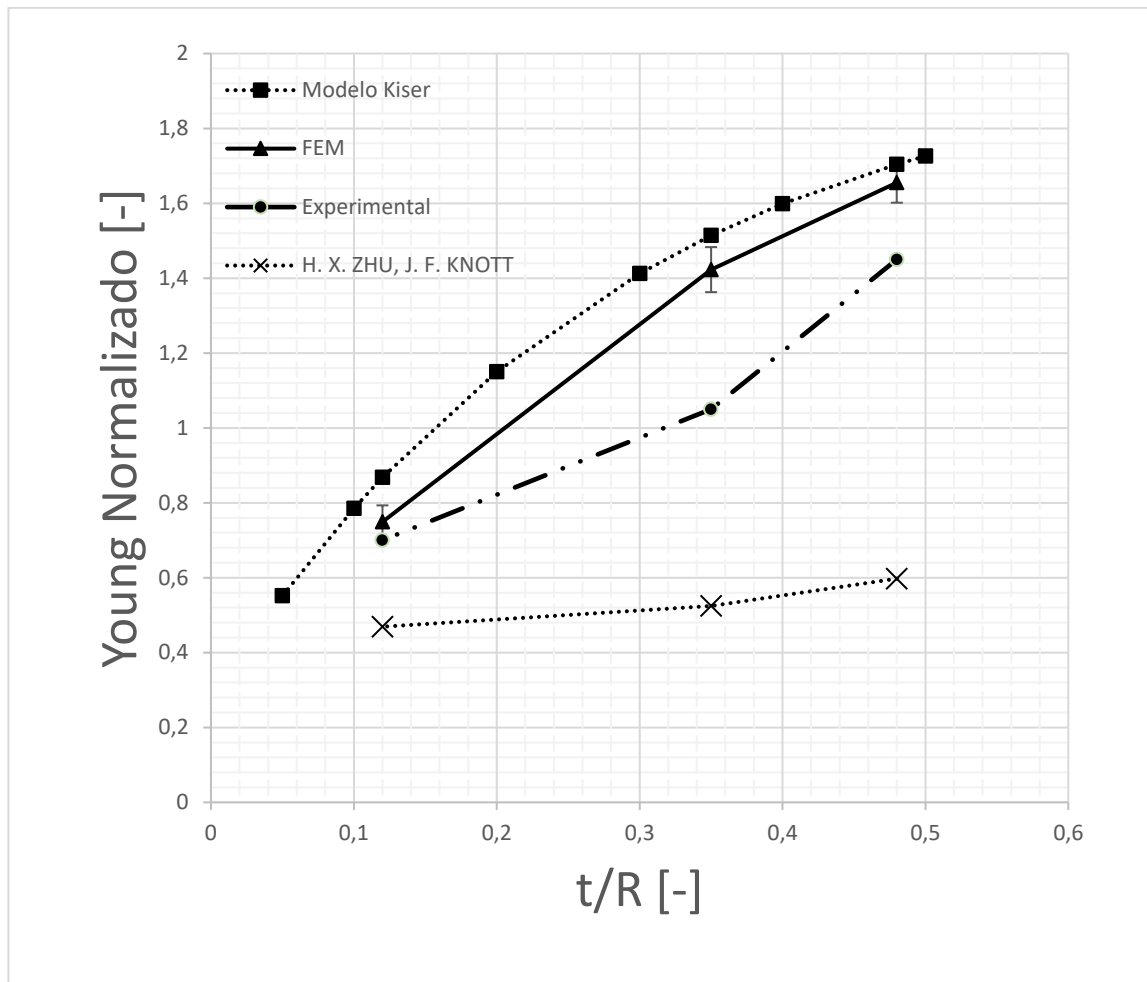


Figura 36 : Grafico con resultados de simulaciones FEM, modelos analíticos y experimentales realizados por Kiser [4]

En la Figura 36 se presentan los resultados de las simulaciones efectuadas en este trabajo de título junto a los resultados experimentales de Kiser [4], además se presentan dos modelos analíticos para la predicción del módulo de Young de espumas sintéticas. Entre el modelo de Kiser y los resultados tanto analíticos como de simulación, se aprecia una gran diferencia para la relación $t/R = 0,35$. Esta diferencia

se puede explicar debido a una mayor presencia de refuerzos esféricos fracturados en el proceso de fabricación de esta geometría.

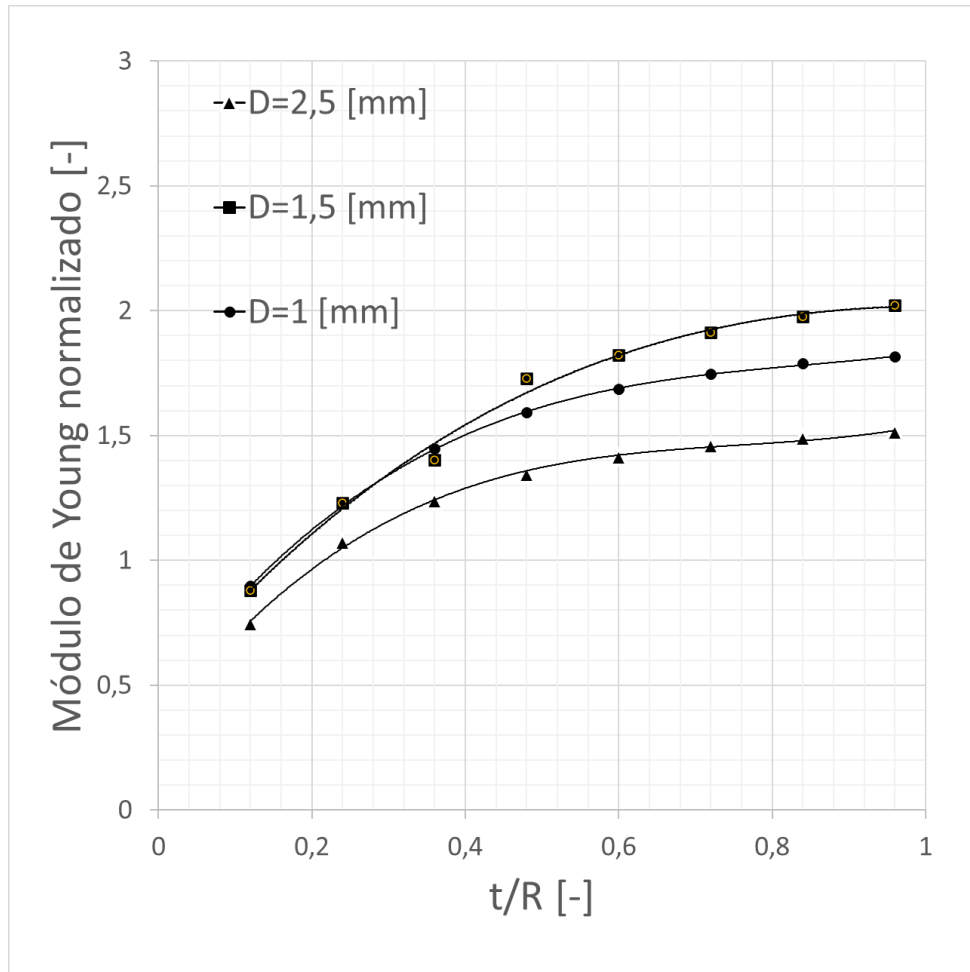


Figura 37: Grafico con resultados de simulaciones para diferentes relaciones de t/R para cada una de las geometrías.

En la Figura 38 se pueden apreciar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para cada geometría, variando su relación de espesor t/R desde 0,12 hasta

0,96. Se puede apreciar que para el caso de los refuerzos con diámetro 2,5 [mm] el resultado obtenido para el módulo de Young es considerablemente menor que para los demás casos.

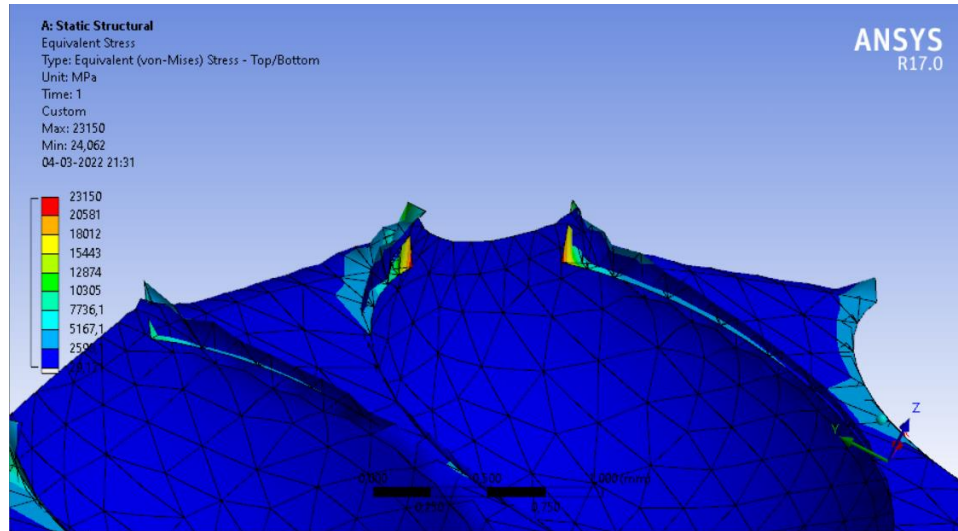


Figura 38: Esfuerzo máximo en matriz de Aluminio para una probeta con poros de 2,5 [mm] y porosidad aproximada del 55%

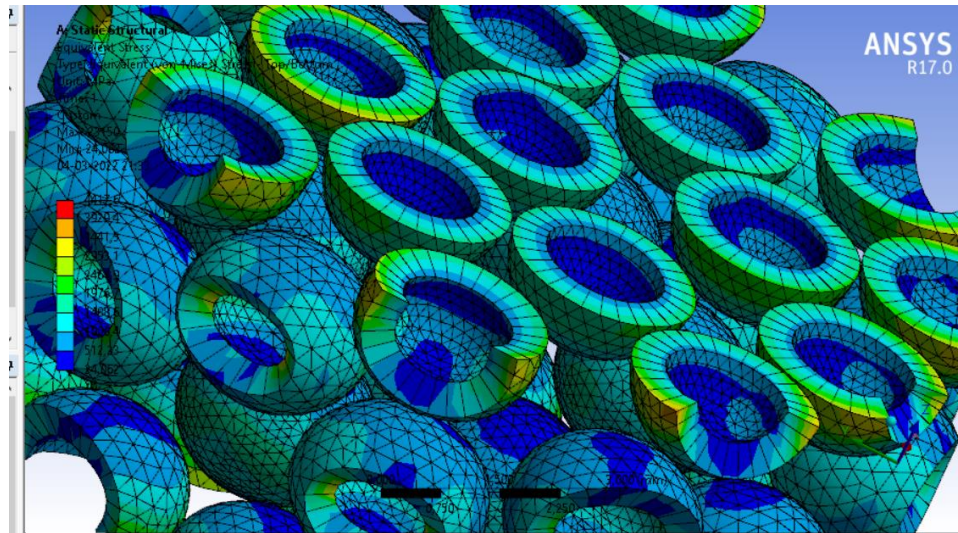


Figura 39 Probeta con tamaño de poro $d = 2,5$ [mm] y porosidad aproximada del 55 %.

Se puede observar que en la geometría de la Figura 39, correspondiente a una probeta con refuerzos de 2,5 [mm], el esfuerzo máximo ocurre en la zona de la matriz de Aluminio con un valor de 23150 [MPa] mientras que el valor mínimo corresponde a 4416 [MPa] concentrándose en la superficie externa de la probeta donde se producen los cambios de geometría más abruptos. Se puede apreciar que los valores más altos para los esfuerzos presentes en la matriz, se concentran en la periferia.

En la Figura 40 se muestra el detalle de los esfuerzos máximos en una probeta reforzada, ubicados en la cara superior. La existencia de estos esfuerzos puede ser producto de la condición *coupled* utilizada para generar el desplazamiento de compresión, ya que ésta obliga a la cara a no sufrir deformación en el plano XY, lo cual puede traducirse en una sobre sollicitación de las zonas susceptibles a la concentración de esfuerzos.

En la Figura 41 se presenta una probeta reforzada en la cual se observa que la uniformidad de la distribución de las deformaciones obedecen a la ubicación de los poros. En la cara superior de la geometría se ubica la mayor deformación, esto debido a que es la cara que sufre el mayor desplazamiento debido a la condición de borde aplicada.

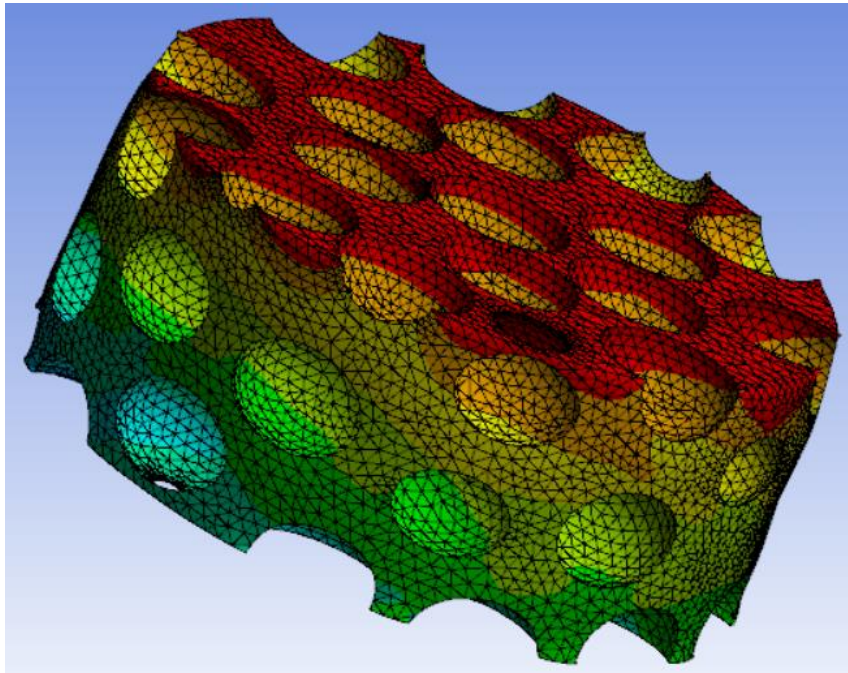


Figura 40: Deformacion para una probeta con $t/R = 0,12$ y refuerzos de $D=2,5$ [mm] con porosidad del 55,16 %

6 Conclusiones

Se logra desarrollar el modelo tridimensional apropiado para el estudio de la influencia del espesor de pared en las propiedades mecánicas de una matriz sintáctica de Aluminio.

Mediante el uso del software ANSYS WORKBENCH y aplicando el método de Elementos Finitos, se logra determinar numéricamente el módulo de Young de los diferentes modelos. Las simulaciones cumplen con todos los parámetros establecidos para una simulación satisfactoria : calidad del elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal.

Los resultados se presentan en tablas y figuras, de las cuales se desprenden las siguientes conclusiones:

- Los resultados muestran que los refuerzos porosos de Alumina aumentan considerablemente el valor del módulo de Young obtenido para todas las geometrías. Esto se debe al alto valor que posee en comparación al módulo de Young de la matriz (6 veces mayor aproximadamente). Esta configuración permite obtener módulos de Young del material compuesto de hasta 1,6 veces más altos que el del material macizo. Siendo esta configuración de materiales un potencial candidato para su fabricación en aplicaciones industriales, especialmente en la absorción de energía bajo cargas compresivas.
- Se puede apreciar que el módulo de Young obtenido es menor a medida que se aumenta el tamaño de los refuerzos esféricos. Esto se debe a que al aumentar el diámetro de los refuerzos, los poros quedan conectados por secciones transversales mucho menores, favoreciendo la creación de paredes

celulares delgadas las cuales se deforman y fallan con mayor facilidad, disminuyendo así la resistencia a las cargas externas.

- Al analizar la distribución de esfuerzos, se aprecia que en las geometrías reforzadas, a pesar de utilizar una unión perfecta entre matriz y refuerzo, estos últimos son sometidos a esfuerzos menores, lo que indica que efectivamente cumplen la función de refuerzo para las paredes de los poros de la espuma.

Respecto a las diferencias entre los resultados experimentales y los simulados se puede indicar que:

- Al mejorar la calidad de la malla es posible que estas diferencias disminuyan, pero para ello es necesario contar con un equipo computacional de mejores características.
- Un proceso de fabricación que permita mayor control, disminuiría la fractura de los refuerzos porosos previo a la aplicación de cargas.
- Las posiciones de los poros no fueron idénticas en ambos casos, se utilizaron distribuciones estadísticas para llegar a estas, las cuales pueden aumentar levemente las diferencias.
- Las propiedades mecánicas de las espumas también dependen de su fabricación. La presión, temperatura y tiempo al que son expuestas podrían influir en los resultados.

7 Referencias

- [1] F. Zhu, G. Lu, D. Ruan, and Z. Wang, “Plastic deformation, failure and energy absorption of sandwich structures with metallic cellular cores,” *Int. J. Prot. Struct.*, vol. 1, no. 4, pp. 507–541, 2010, doi: 10.1260/2041-4196.1.4.507.
- [2] J. Marx and A. Rabiei, “Overview of Composite Metal Foams and Their Properties and Performance,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 19, no. 11, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1002/adem.201600776.
- [3] W. Huang, G. Liu, H. Li, F. Wang, and Y. Wang, “Compressive properties and failure mechanisms of gradient aluminum foams prepared by a powder metallurgy method,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/met11091337.
- [4] A. Kulshreshtha and S. K. Dhakad, “Preparation of metal foam by different methods: A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 26, no. xxxx, pp. 1784–1790, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.375.
- [5] M. M. Su, H. Wang, K. Y. Li, and H. Hao, “Microstructure and compressive properties of AL/AL₂O₃ syntactic foams,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 933 MSF, pp. 174–181, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.933.174.
- [6] B. Zhang, Y. Lin, S. Li, D. Zhai, and G. Wu, “Quasi-static and high strain rates compressive behavior of aluminum matrix syntactic foams,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 98, pp. 288–296, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.05.034.
- [7] G. Anbuezhayan, B. Mohan, D. Sathianarayanan, and T. Muthuramalingam, “Synthesis and characterization of hollow glass microspheres reinforced magnesium alloy matrix syntactic foam,” *J. Alloys Compd.*, vol. 719, pp. 125–132, 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.05.153.

- [8] D. P. Mondal *et al.*, “Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route,” *Mater. Des.*, vol. 34, pp. 82–89, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.055.
- [9] L. Pan *et al.*, “Zn-matrix syntactic foams: Effect of heat treatment on microstructure and compressive properties,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 731, pp. 413–422, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.06.072.
- [10] L. Peroni *et al.*, “Investigation of the mechanical behaviour of AISI 316L stainless steel syntactic foams at different strain-rates,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 66, pp. 430–442, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.06.001.
- [11] M. Kiser, M. Y. He, and F. W. Zok, “Mechanical response of ceramic microballoon reinforced aluminum matrix composites under compressive loading,” *Acta Mater.*, vol. 47, no. 9, pp. 2685–2694, 1999, doi: 10.1016/S1359-6454(99)00129-9.
- [12] M. Su, H. Wang, H. Hao, and T. Fiedler, “Compressive properties of expanded glass and alumina hollow spheres hybrid reinforced aluminum matrix syntactic foams,” *J. Alloys Compd.*, vol. 821, no. xxxx, p. 153233, 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.153233.
- [13] S. Broxtermann, M. Taherishargh, I. V. Belova, G. E. Murch, and T. Fiedler, “On the compressive behaviour of high porosity expanded Perlite-Metal Syntactic Foam (P-MSF),” *J. Alloys Compd.*, vol. 691, pp. 690–697, 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.08.284.
- [14] N. Gupta and P. K. Rohatgi, “Metal matrix syntactic foams,” *Compr. Compos. Mater. II*, vol. 4, pp. 364–385, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09971-9.
- [15] L. Licitra, D. D. Luong, O. M. Strbik, and N. Gupta, “Dynamic properties of

- alumina hollow particle filled aluminum alloy A356 matrix syntactic foams,” *Mater. Des.*, vol. 66, no. PB, pp. 504–515, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.03.041.
- [16] N. Gupta, E. Woldesenbet, and P. Mensah, “Compression properties of syntactic foams: Effect of cenosphere radius ratio and specimen aspect ratio,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 1, pp. 103–111, 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2003.08.001.
- [17] M. Yaseer Omar, C. Xiang, N. Gupta, O. M. Strbik, and K. Cho, “Syntactic foam core metal matrix sandwich composite: Compressive properties and strain rate effects,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 643, pp. 156–168, 2015, doi: 10.1016/j.msea.2015.07.033.
- [18] Y. Lin, Q. Zhang, X. Ma, and G. Wu, “Mechanical behavior of pure Al and Al-Mg syntactic foam composites containing glass cenospheres,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 87, pp. 194–202, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.05.001.
- [19] G. Castro, S. R. Nutt, and X. Wenchen, “Compression and low-velocity impact behavior of aluminum syntactic foam,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 578, pp. 222–229, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2013.04.081.
- [20] K. Myers, B. Katona, P. Cortes, and I. N. Orbulov, “Quasi-static and high strain rate response of aluminum matrix syntactic foams under compression,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 79, pp. 82–91, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.09.018.
- [21] M. D. Goel, V. Parameswaran, and D. P. Mondal, “High Strain Rate Response of Cenosphere-Filled Aluminum Alloy Syntactic Foam,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 28, no. 8, pp. 4731–4739, 2019, doi: 10.1007/s11665-019-

04237-2.

- [22] Y. Y. Zhao and X. F. Tao, “Behaviour of Metal Matrix Syntactic Foams in Compression,” 2009.
- [23] Q. Yang, Y. Wei, Z. Miao, P. Gao, and B. Yu, “The processing and structure of steel matrix syntactic foams prepared by infiltration casting,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 933 MSF, pp. 129–135, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.933.129.
- [24] M. S. O. F. Ultrathin, “ULTRATHIN S i O 2 FILMS,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 135, pp. 28–29, 1991.
- [25] S. Broxtermann, M. M. Su, H. Hao, and T. Fiedler, “Comparative study of stir casting and infiltration casting of expanded glass-aluminium syntactic foams,” *J. Alloys Compd.*, vol. 845, 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.155415.
- [26] M. Su, H. Wang, and H. Hao, “Compressive Properties of Aluminum Matrix Syntactic Foams Prepared by Stir Casting Method,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 1900183, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1002/adem.201900183.
- [27] L. Bardella, F. Malanca, P. Ponzo, A. Panteghini, and M. Porfiri, “A micromechanical model for quasi-brittle compressive failure of glass-microballoons/thermoset-matrix syntactic foams,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 34, no. 11, pp. 2605–2616, 2014, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.11.045.
- [28] M. Su, H. Wang, H. Hao, and T. Fiedler, “Compressive properties of expanded glass and alumina hollow spheres hybrid reinforced aluminum matrix syntactic foams,” *J. Alloys Compd.*, vol. 821, no. xxxx, p. 153233, 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.153233.
- [29] Ç. BOLAT, İ. C. AKGÜN, and A. GÖKSENLİ, “On the Way to Real Applications: Aluminum Matrix Syntactic Foams,” *Eur. Mech. Sci.*, vol. 4, no.

- 3, pp. 131–141, 2020, doi: 10.26701/ems.703619.
- [30] H. M. Zbib and H. T. Zhu, “On the Mechanics of Plastic Deformation in Metal Matrix Composites,” *Stud. Appl. Mech.*, vol. 41, no. C, pp. 97–118, 1994, doi: 10.1016/B978-0-444-81800-3.50009-2.
- [31] F. Application, P. Data, P. Examiner, and D. P. Bryant, “(12) United States Patent (10) Patent No .:,” vol. 2, no. 12, 2009.
- [32] lucia maria aversa Villela, “El metodo de los elemento finitos aplicado al analisis estructural,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [33] A. Carnicero, “Introduccion al metodo de elementos finitos,” pp. 1–25, 2017.
- [34] A. J. PÉREZ, “Principios del método de análisis por elementos finitos y descripción de algor fea.,” *Principios del método análisis por Elem. finitos y descripción algor fea.*, pp. 19–52, 2013, [Online]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/jimenez_p_a/capitulo2.pdf.
- [35] ANSYS, “ANSYS 13.0 Meshing User’s Guide,” *Knowl. Creat. Diffus. Util.*, vol. 15317, no. November, pp. 724–746, 2010.
- [36] D. D. E. I. Mecánica, C. Ignacio, and Ó. Escobar, ““ Caracterización numérica de espumas de Cobre reforzadas con esferas huecas de hierro , mediante el método de elementos finitos ,”” 2018.
- [37] A. Szlancsik, B. Katona, K. Bobor, K. Májlínger, and I. N. Orbulov, “Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres,” *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 230–237, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.011.
- [38] S. K. Sebsadji and K. Chouicha, “Determining periodic representative volumes

of concrete mixtures based on the fractal analysis,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 49, no. 21, pp. 2941–2950, 2012, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2012.05.017.

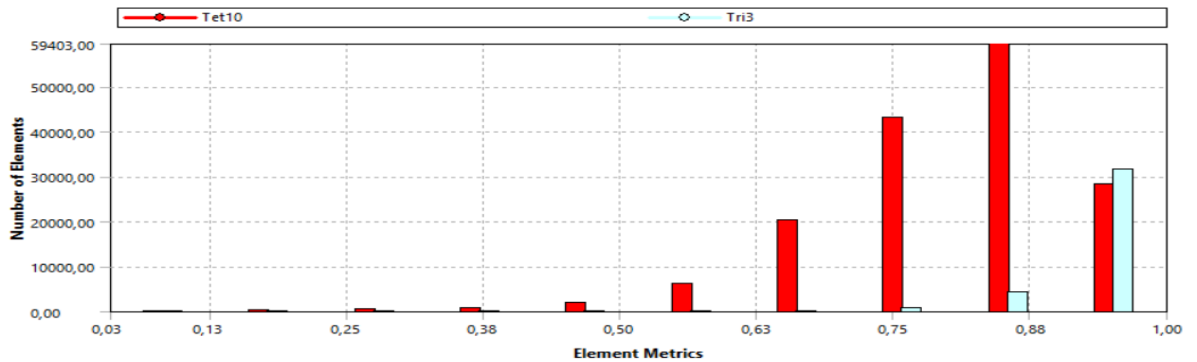
8. Anexos

8.1 Espumas

a) Espuma con refuerzos de 2.5 [mm], relación de espesor $t/R = 0,12$ y porosidad 54,09 %

54,09				
	Calidad de elementos	Relación de aspecto	Asimetría	Calidad ortogonal
Minimo	0,0327	1,0002	0,0000	0,0846
Maximo	1,0000	49,0170	0,9998	1,0000
Promedio	0,8292	1,8037	0,2237	0,8627
Desv estanda	0,1209	0,6456	0,1544	0,1009

Tabla 10: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (a)



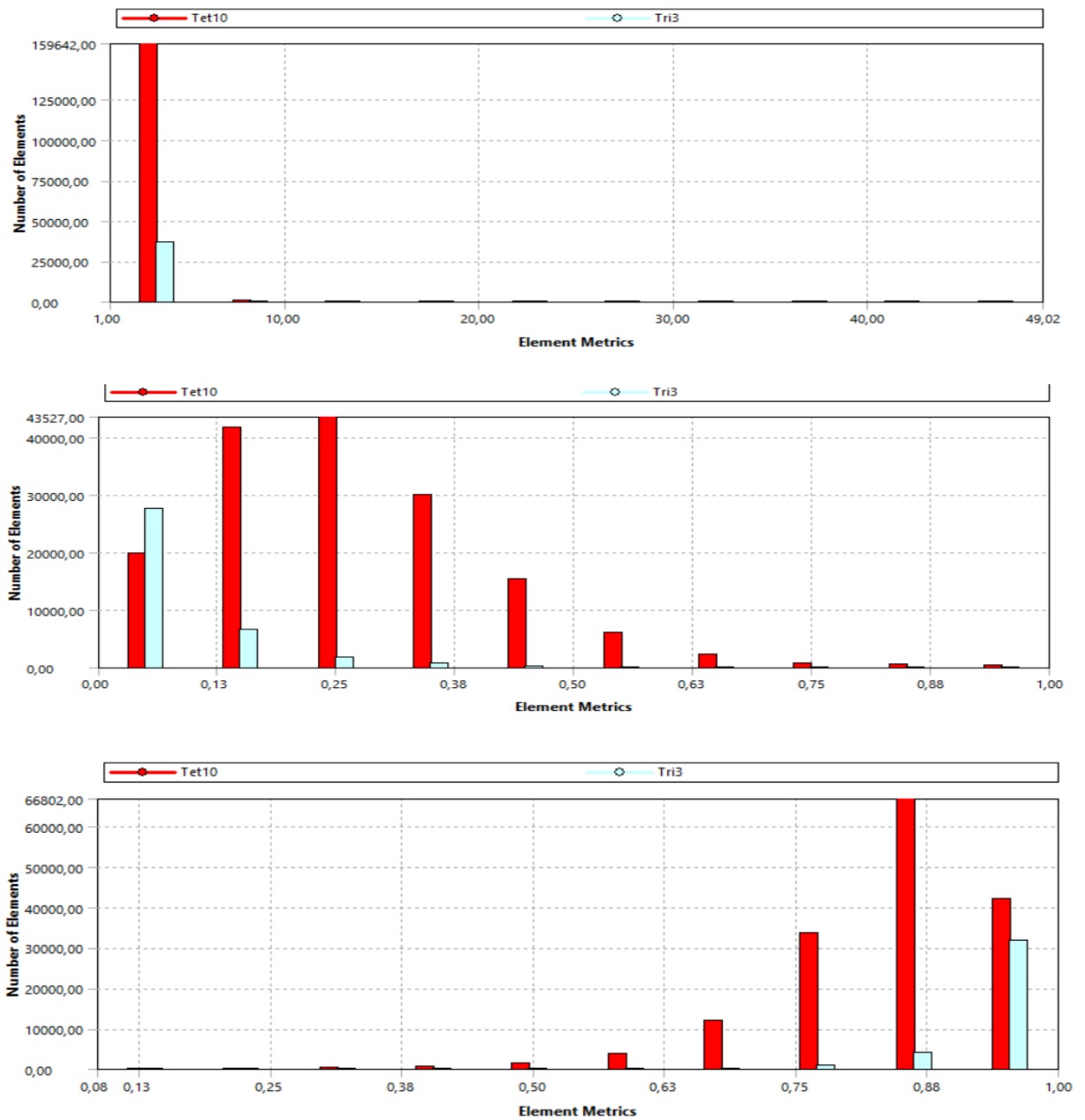
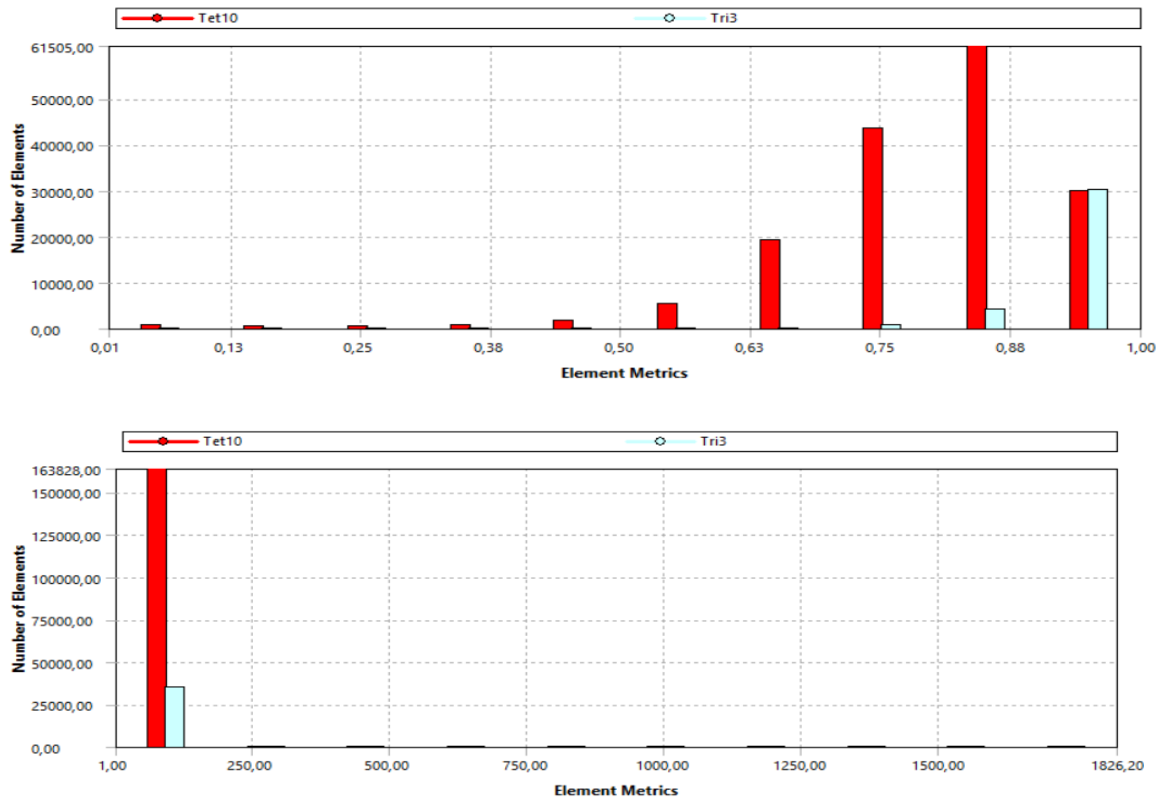


Figura 41: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (a)
 b) Espuma con refuerzos de 2.5 [mm] y relación de espesor $t/R = 0,12$ y porosidad del 54,62 %

54,62				
	Calidad de elementos	Relación de aspecto	Asimetría	Calidad ortogonal
Minimo	0,0072	1,0000	0,0000	0,0126
Maximo	1,0000	1826,2000	1,0000	1,0000
Promedio	0,8233	2,1710	0,2299	0,8568
Desv estanda	0,1330	9,0662	0,1627	0,1165

Tabla 11: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (b)



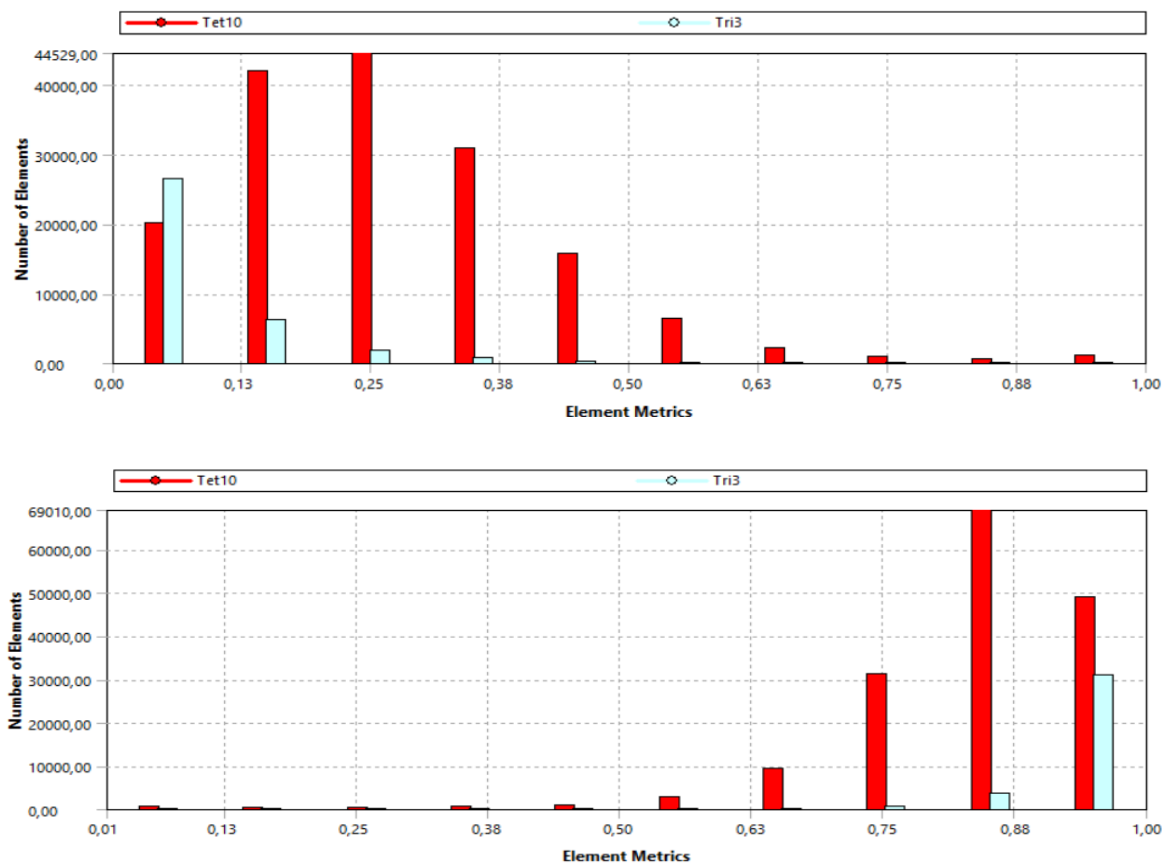


Figura 42: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (b)

c) Espuma con refuerzos de 2.5 [mm] y relación de espesor $t/R = 0,12$ y porosidad del 55,06 %.

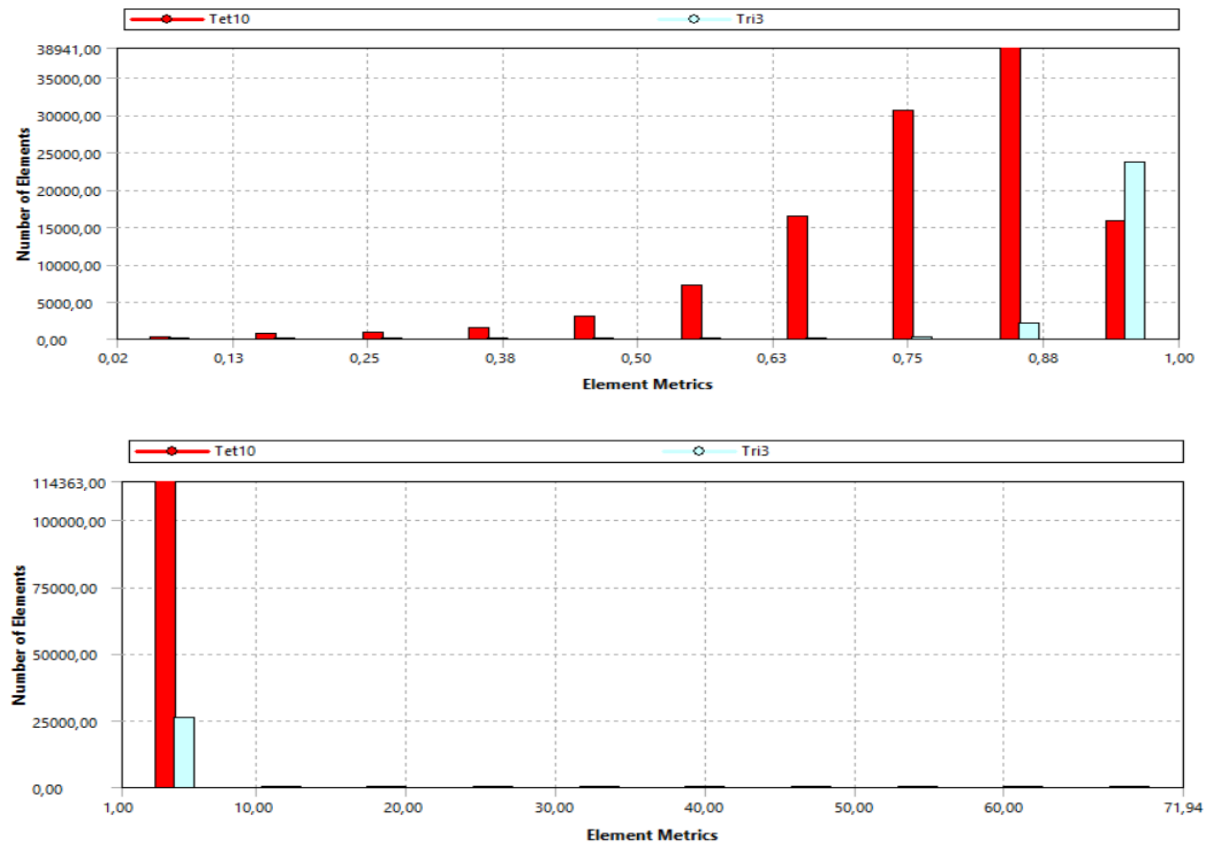
Tabla 12: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (c)

Figura 43: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (c)

d) Espuma con refuerzos de 1 [mm] y relación de espesor $t/R = 0,48$ y porosidad del 52,02 %

52,02				
	Calidad de elementos	Relación de aspecto	Asimetría	Calidad ortogonal
Minimo	0,0177	1,0000	0,0000	0,0319
Maximo	1,0000	71,9350	1,0000	1,0000
Promedio	0,8043	1,8286	0,2302	0,8567
Desv estanda	0,1486	0,7694	0,1679	0,1146

Tabla 13: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (d)



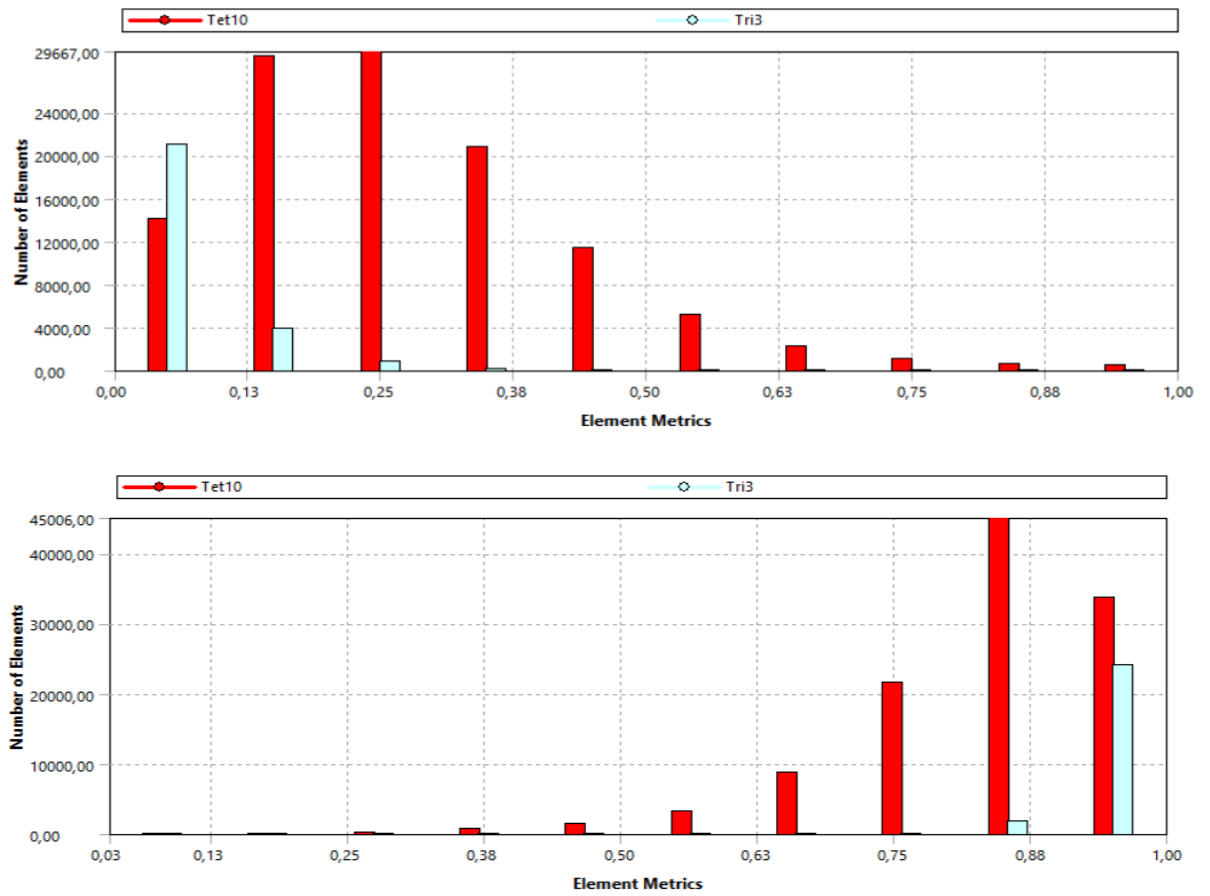
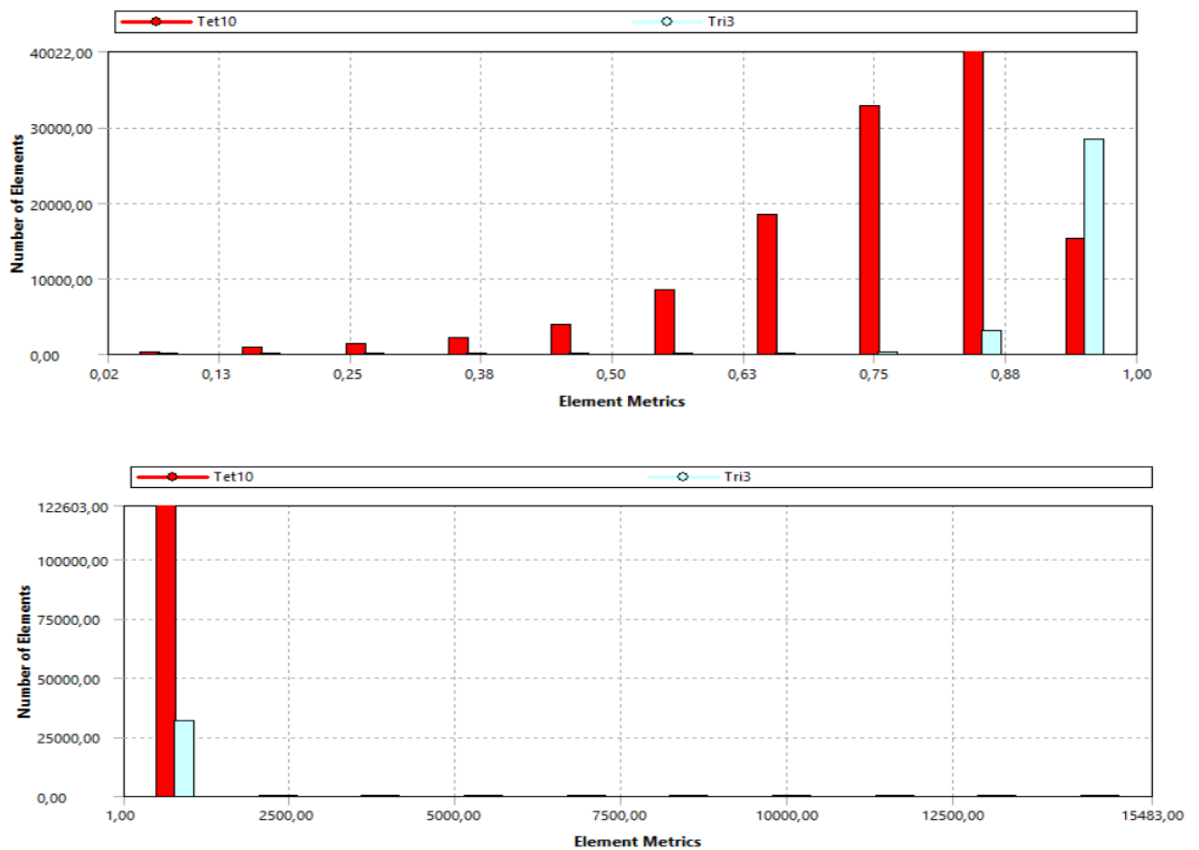


Figura 44: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (d)

e) Espuma con refuerzos de 1 [mm] y relación de espesor $t/R = 0,48$ y porosidad del 53,52 %

53,52				
	Calidad de elementos	Relación de aspecto	Asimetría	Calidad ortogonal
Minimo	0,0186	1,0000	0,0000	0,0003
Maximo	1,0000	15483,0000	1,0000	1,0000
Promedio	0,8000	1,9362	0,2328	0,8541
Desv estanda	0,1550	39,4420	0,1728	0,1187

Tabla 14: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (e)



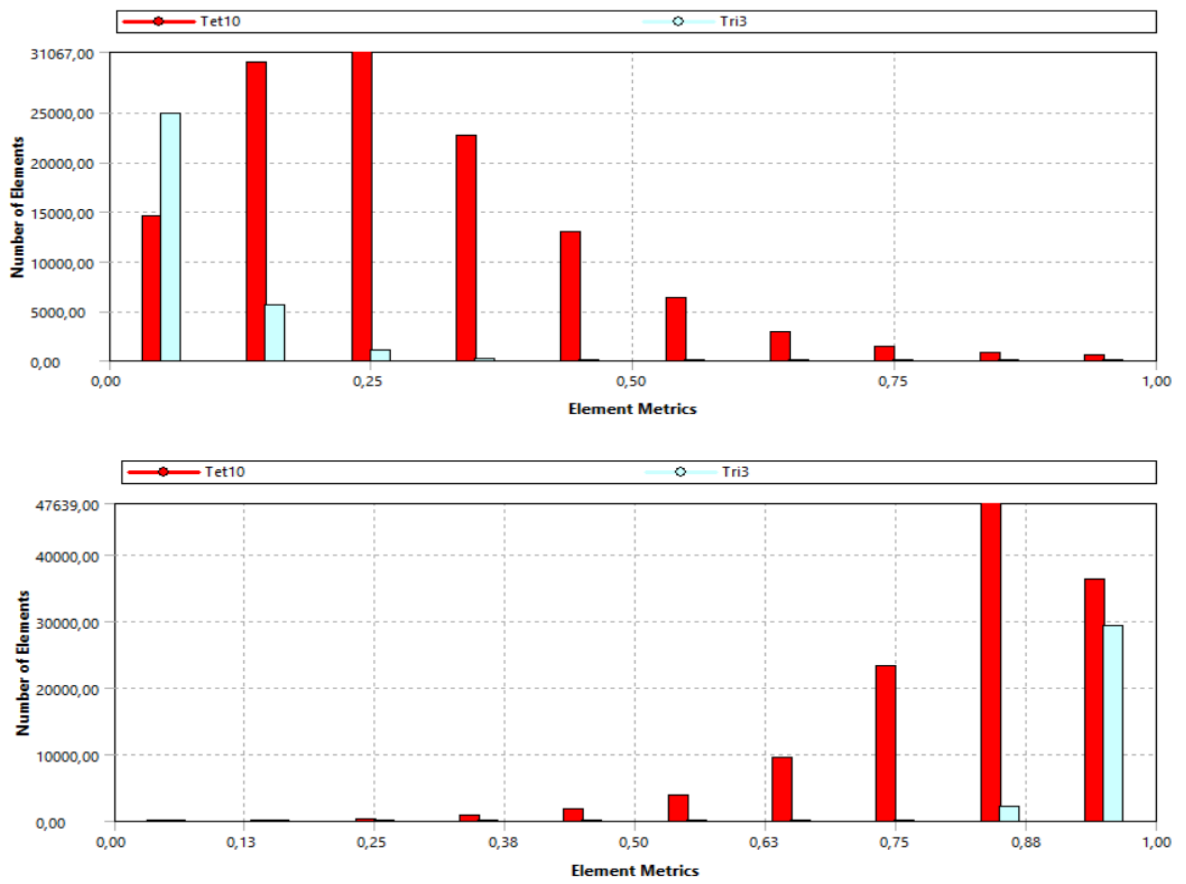
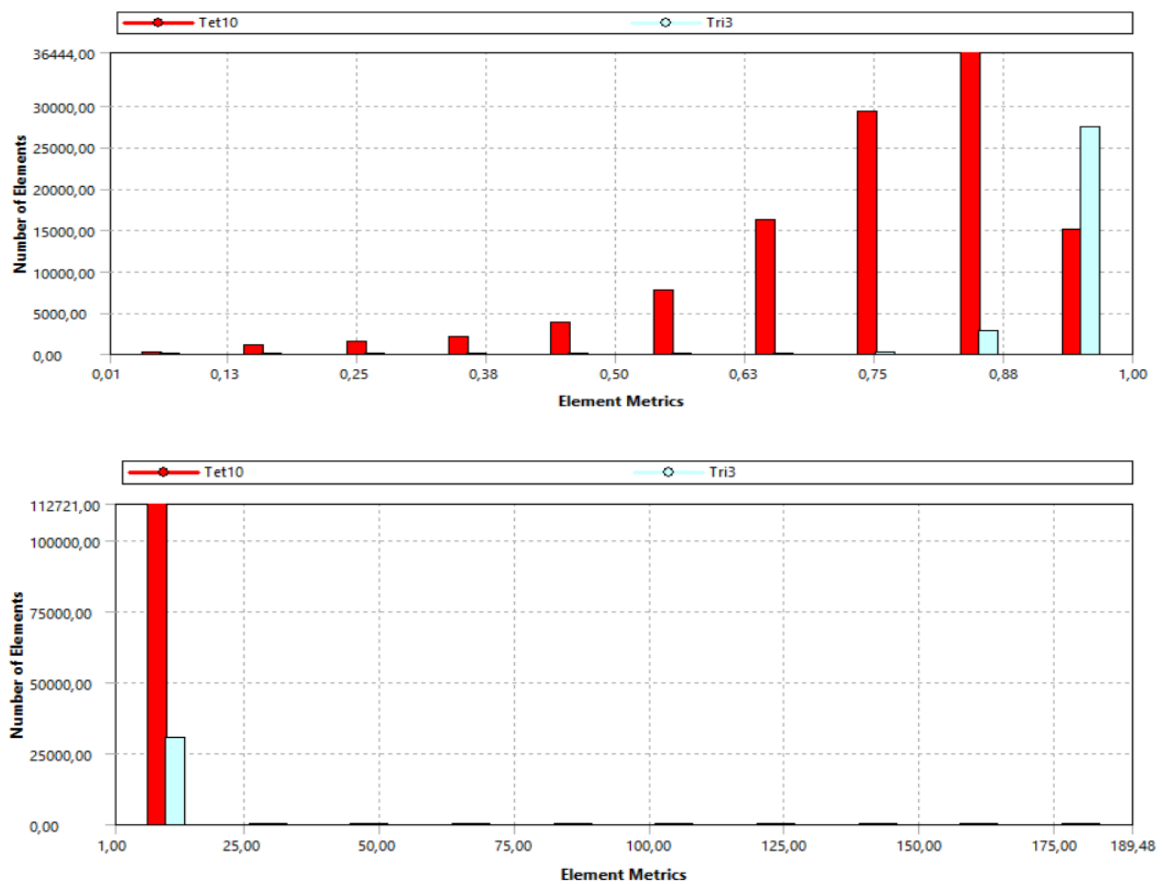


Figura 45: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (e)

- f) Espuma con refuerzos de 1 [mm] y relación de espesor $t/R = 0,48$ y porosidad del 57,88 %

57,88				
	Calidad de elementos	Relación de aspecto	Asimetría	Calidad ortogonal
Minimo	0,0112	1,0000	0,0000	0,0000
Maximo	1,0000	189,4800	1,0000	1,0000
Promedio	0,7977	1,8575	0,2350	0,8532
Desv estanda	0,1637	1,3218	0,1818	0,1247

Tabla 15: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (f)



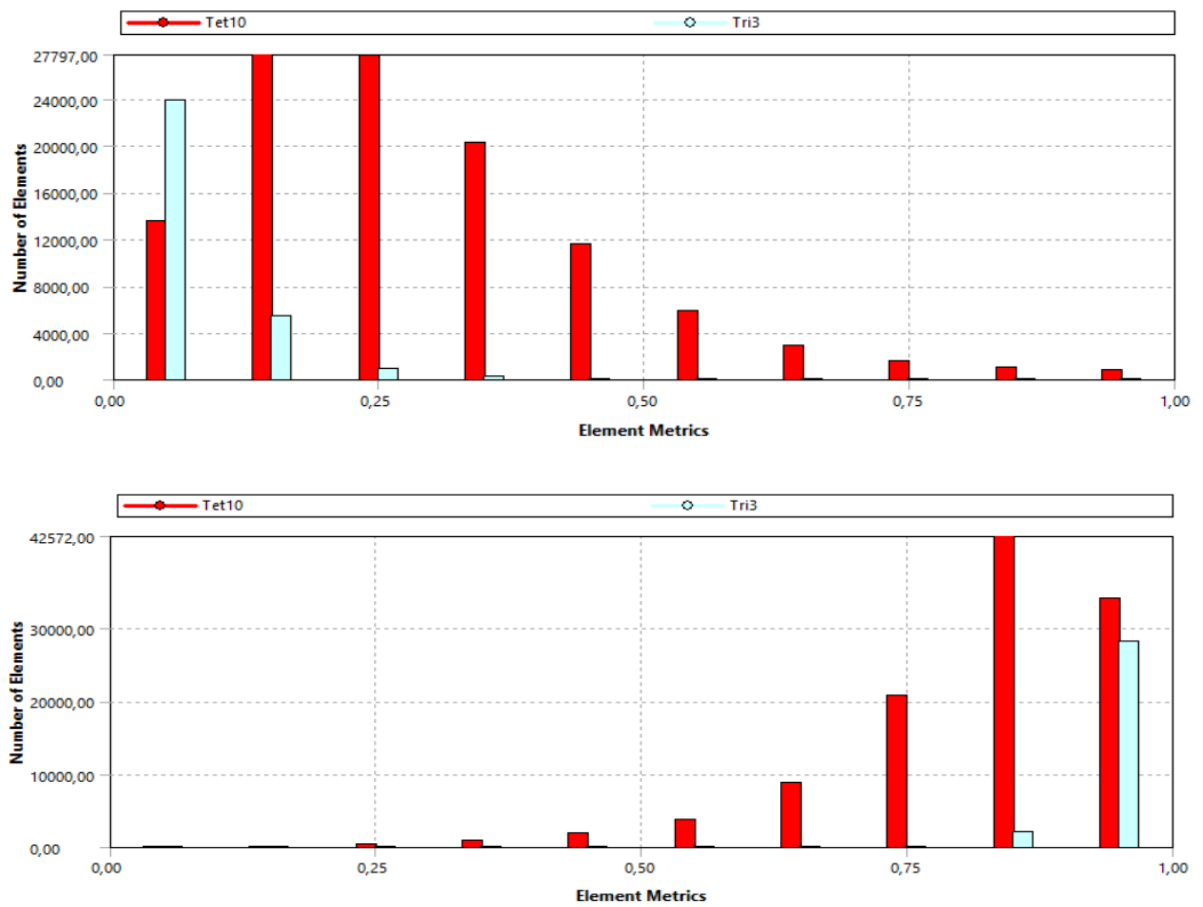


Figura 46: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (f)

g) Espuma con refuerzos de 1,5 [mm] y relación de espesor $t/R = 0,35$ y porosidad del 54,56 %

54,56				
	Calidad de elementos	Relación de aspecto	Asimetría	Calidad ortogonal
Minimo	0,0440	1,0000	0,0000	0,0004
Maximo	1,0000	30,0770	0,9997	1,0000
Promedio	0,7697	1,9377	0,2886	0,7384
Desv estandar	0,1680	0,8717	0,2004	0,2064

Tabla 16: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (g)

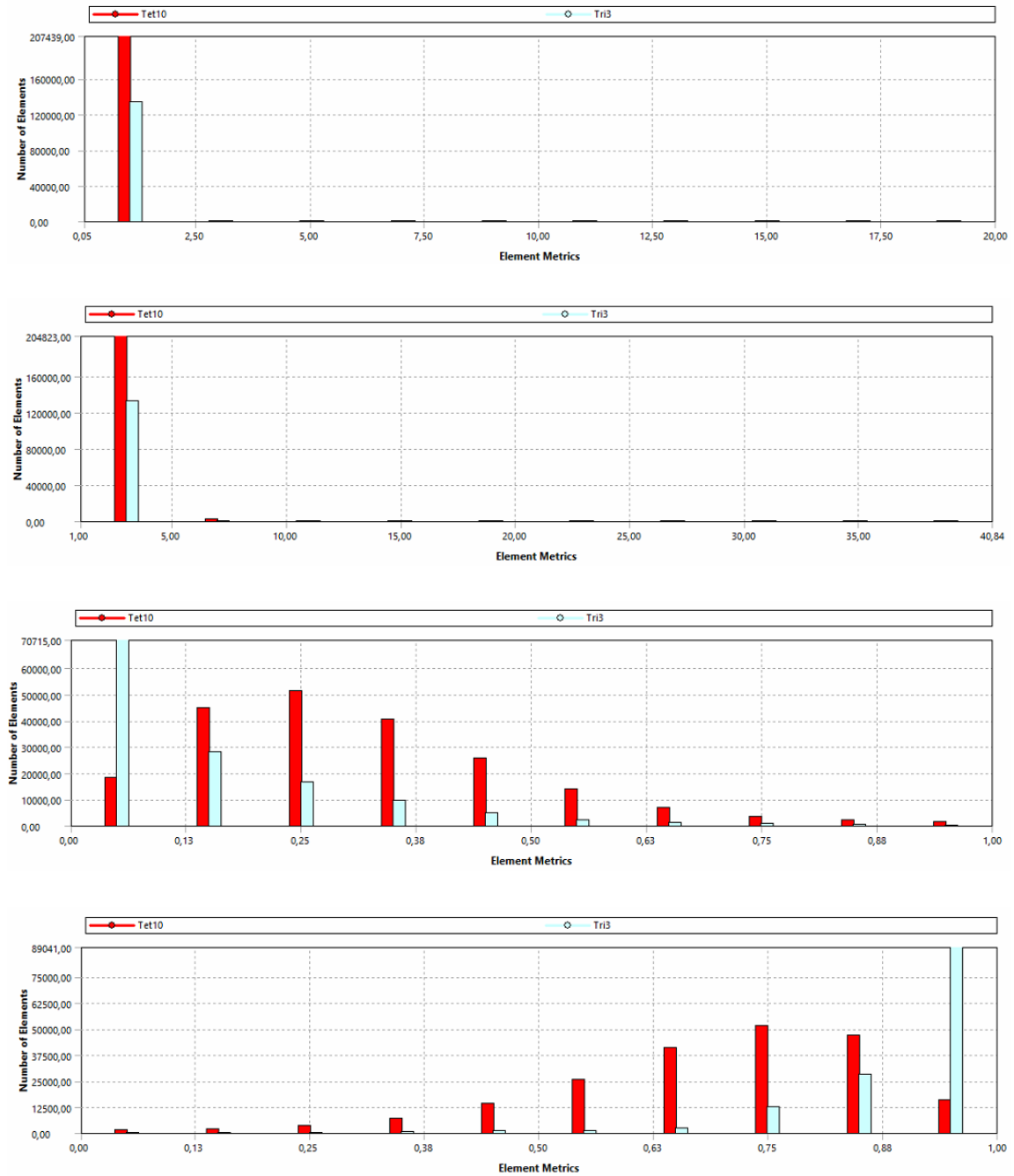
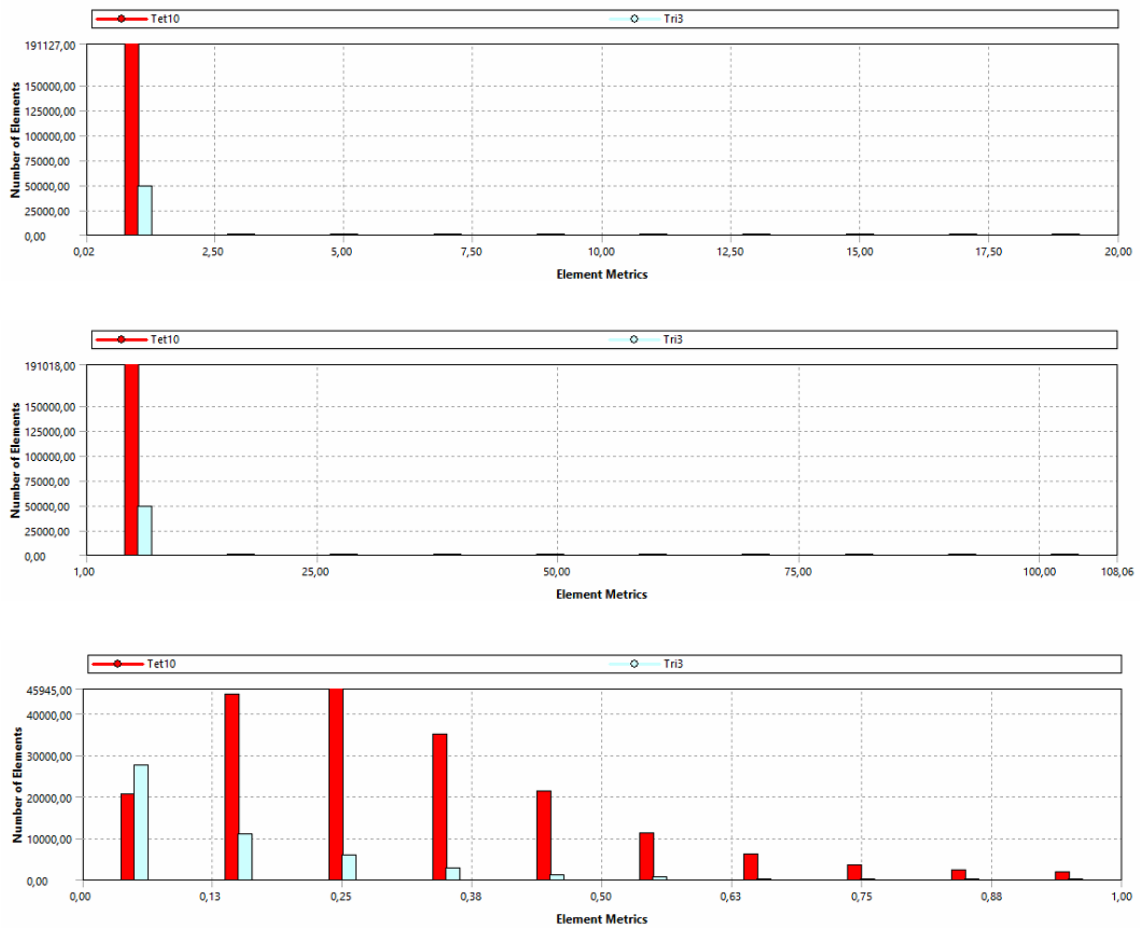


Figura 47: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (g)

h) Espuma con refuerzos de 1,5 [mm] y relación de espesor $t/R = 0,35$ y porosidad del 55,16

55,16				
	Calidad de elementos	Relación de aspecto	Asimetría	Calidad ortogonal
Minimo	0,0515	1,0000	0,0000	0,0002
Maximo	1,0000	40,8350	0,9998	1,0000
Promedio	0,8035	1,8283	0,2421	0,7774
Desv estandar	0,1561	0,7960	0,1817	0,1825

Tabla 17: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (h)



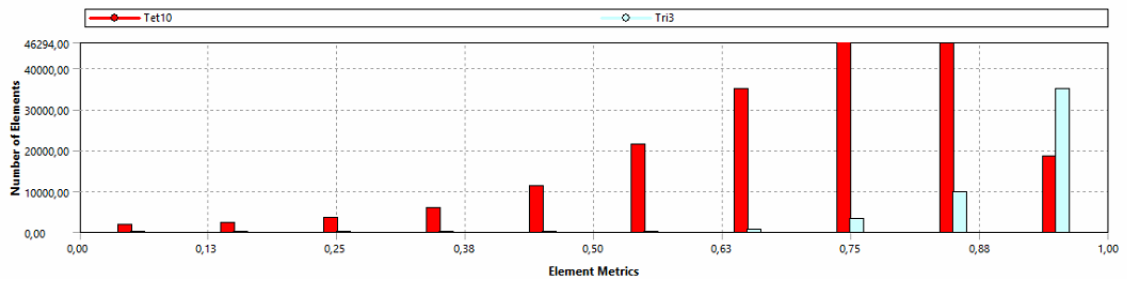


Figura 48: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (h)

- i) Espuma con refuerzos de 1,5 [mm] y relación de espesor $t/R = 0,35$ y porosidad del 55,86 %

55,86				
	Calidad de elementos	Relación de aspecto	Asimetría	Calidad ortogonal
Minimo	0,0368	1,0000	0,0000	0,0000
Maximo	1,0000	255,4100	1,0000	1,0000
Promedio	0,8974	1,4360	0,1416	0,9017
Desv estandar	0,1287	0,6802	0,1524	0,1337

Tabla 18: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos para (i)

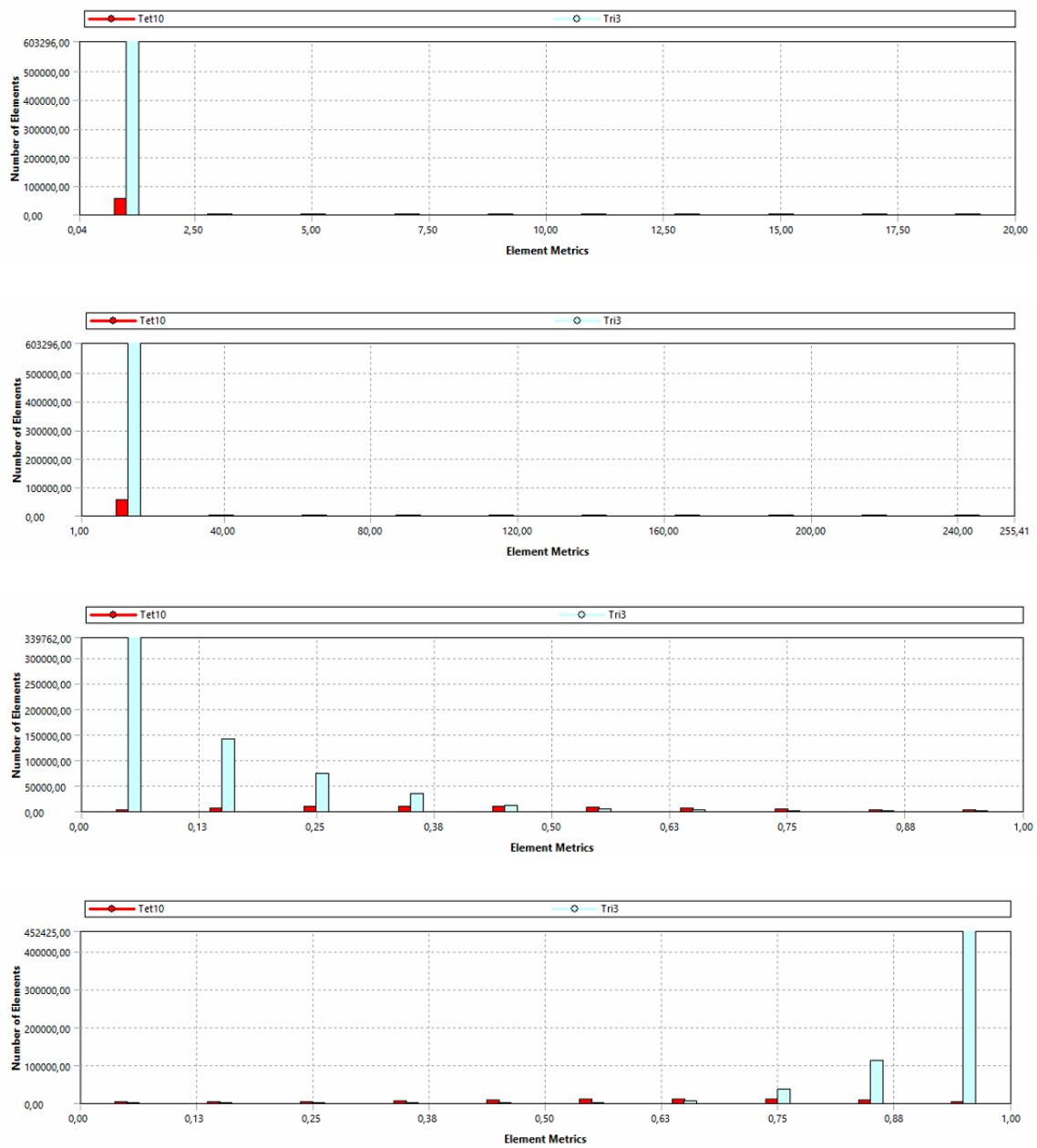


Figura 49: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos para (i)

8.2 Tablas de resultados

Tamaño esfera [mm]	t/R [-]	Espesor [mm]	Porosidad	Area [mm ²]	Fuerza 1 [N]	Fuerza 2 [N]
2,5	0,12	0,15	54,09	113,1	54370	53916
2,5	0,12	0,15	54,62	113,1	53368	47158
2,5	0,12	0,15	55,06	113,1	54866	47893
1	0,48	0,24	0,52	19,6	18760	18728
1	0,48	0,24	0,49	19,6	19652	19852
1	0,48	0,24	0,49	19,6	19978	20020
1,5	0,35	0,26	54,56	113,1	94568	95658
1,5	0,35	0,26	55,16	113,1	102190	101110
1,5	0,35	0,26	55,86	113,1	104650	104200

Tabla 19: Fuerzas resultantes para cada geometría.

t/R [-]	Young calculado [GPa]
1	113,6
0,9	113,5
0,8	113,0
0,7	111,5
0,6	108,5
0,5	103,6
0,48	102,3
0,4	95,9
0,35	90,8
0,3	84,8
0,2	69,0
0,12	52,1
0,1	47,1
0,05	33,1

Tabla 20: Modulo de Young calculado mediante modelo analítico