

2017

DETERMINACIÓN NUMÉRICA DEL EFECTO DEL FACTOR DE ELONGACIÓN DE LOS POROS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESPUMAS DE TITANIO OBTENIDAS MEDIANTE RUTAS PULVIMETALÚRGICAS, PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS

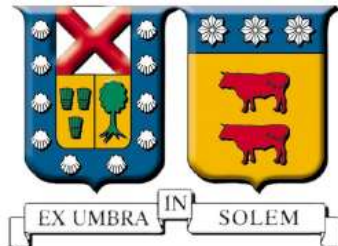
GALLARDO ILIGARAY, ALEJANDRA DE LAS NIEVES

<http://hdl.handle.net/11673/22651>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE**



“Determinación numérica del efecto del factor de elongación de los poros sobre las propiedades mecánicas de espumas de titanio obtenidas mediante rutas pulvimetalúrgicas, para aplicaciones biomédicas”

ALEJANDRA DE LAS NIEVES GALLARDO ILIGARAY

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

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. LUIS PÉREZ P.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ERNESTO CHICARDI A.**

JULIO 2017

Agradecimientos

Para empezar, quiero agradecer a mi familia, a mi madre por su cercanía y su entrega infinita de amor, apoyo y comprensión. A mi padre, que en paz descanse, por ayudarme en todos mis propósitos, enseñarme a disfrutar la vida y aportar en la consolidación de mis principios. También a mi hermano, que a pesar de que tengamos gustos muy distintos, tenemos una relación maravillosa que se muestra más bonita con el tiempo. Y a mis abuelas, por creer en mí, apoyándome de diversas formas, tanto económica como emocionalmente.

Al Prof. Luis Pérez Pozo, quien sugiere y tutela este trabajo de título, me orienta con gran paciencia, y que a pesar de su condición de salud, me entrega dedicadas correcciones y consejos, todo esto sumado a la confianza que me confiere, tanto profesional como personalmente. También, a mi profesor correferente, Dr. Ernesto Chicardi, por sus importantes aportes desde España.

También agradecer a la gerencia de proyectos de Codelco División Andina y a la empresa donde trabajo actualmente, R&Q Ingeniería, por las facilidades que me han dado, en pro de lograr desarrollar este trabajo, además de su apoyo y preocupación.

A mi querido compañero de vida, Ariel Córdova, por aportar de diversas formas a la realización de este trabajo. Dicha ayuda es solo una fracción de todo lo que ha contribuido a mi vida, como ayudar en mi crecimiento personal y reforzar mi amor propio, para no extenderme más, manifiesto que me siento increíblemente afortunada de estar a su lado.

No puedo dejar de mencionar a quienes hacen de mis tiempos libres, momentos recargadores, mis amigos, la mayoría son mecánicos, y algunos civiles. Igualmente a los que son de San Felipe, que aunque los vea con poca frecuencia, la amistad es la

misma. A ellos, y a todos quienes me entregaron su confianza, les agradezco por hacer mis cargas más ligeras, quererme tal cual soy y ayudarme a mejorar como persona.

Resumen

El presente trabajo de título estudia el efecto la morfología y el porcentaje de porosidad sobre las propiedades mecánicas de espumas de titanio. La utilidad de esta investigación se fundamenta en la potencialidad de este material en aplicaciones de reemplazo de estructuras óseas, ya que disminuye el “apantallamiento de tensiones” que presentan los reemplazos actuales, este problema consiste en la reabsorción del hueso, debido a que la prótesis soporta gran parte de las cargas. Además, este estudio permite reducir costos asociados al desarrollo experimental.

Para ello se simulan ensayos de compresión de espumas de titanio por medio de un software comercial de elementos finitos, llamado Ansys Workbench. Se ensayan 63 modelos, los cuales poseen diferentes tamaños, factores de elongación de los poros y porcentajes de porosidad. También, se aplican las mismas condiciones de borde y propiedades del material base que se utilizan en las pruebas experimentales con las cuales se comparan los resultados de las simulaciones.

Con los resultados de la carga en función del desplazamiento se calcula el esfuerzo en función de la deformación, el módulo de Young y el esfuerzo de fluencia de cada simulación. Con estos resultados se concluye que el tamaño del modelo no influye en las propiedades mecánicas resultantes. Por otro lado, el módulo de Young, esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de porosidad. Además, se determina que la morfología de los poros influye levemente en los resultados, de tal manera que, a mayor factor de elongación, mayor pendiente de las correlaciones de módulo de Young y esfuerzo de fluencia vs. porosidad.

Finalmente, se definen las posibles espumas de Ti para el reemplazo de estructuras óseas. Cabe destacar que las simulaciones son efectivas, puesto sus los resultados son similares a los datos experimentales de la prueba de ultrasonido.

Abstract

This report studies the effect of morphology and porosity over the mechanic properties of titanium foam. This research can be of use considering the potential of such material for replacing bone structures, as it can lessen stress-shielding phenomena, caused by current prostheses. This problem consists of the reabsorption of the bone due to the prosthesis holding most of the weight. Further, this study allows for the reduction of costs for further experimentation.

To achieve this, titanium foams are compressed using a commercial software of finite elements called Ansys Workbench. The 63 models tested have different sizes, pore elongation factors, and percentage of porosity. Furthermore, the same boundary conditions and the same material properties used on the experimental tests (the ones which are compared to the simulations results) are applied.

The results of the displacement can be used to calculate the deformation, the Young's module and the yield stress of the simulation. The results show that the size of the model does not have an influence on the mechanic properties. In addition, the Young's module, the yield stress and the maximum effort diminish while the percentage of the porosity increases. Moreover, the morphology of the pores has a slightly influence on the results. Consequently, the more elongation the more Young's module correlation, and yield stress vs. porosity.

Finally, the possible titanium foams for the replacement of the bone structures are defined. It is important to highlight that the simulations are effective, because their results are similar to the experimental data from the ultrasound test.

Glosario

- Apantallamiento de tensiones: Problema que se genera en reemplazos óseos. Consiste en la reabsorción del hueso, a causa de que la mayor parte de la carga es soportada por la prótesis.
- Diámetro equivalente (D_e): Diámetro promedio de los poros de la espuma metálica.
- E: Módulo de Young.
- Factor de elongación (F_e): relación entre el eje mayor y el eje menor de una elipse.
- MEF: Método de elementos finitos.
- Porosidad: Parámetro de las espumas medido en porcentaje, corresponde al volumen de poros con respecto al volumen del sólido.
- PM: técnica de polvos metalúrgicos o rutas pulvimetalúrgicas.
- SHP: *Space Holder Phase*, polvo utilizado para generar poros en la fabricación de una espuma.
- Ti: Titanio
- ε : Deformación.
- σ : Esfuerzo
- σ_p : Límite proporcional
- σ_y : Esfuerzo de fluencia
- σ_u : Esfuerzo último o máximo.

Índice

| | |
|---|----|
| Agradecimientos..... | 1 |
| Resumen..... | 3 |
| Abstract..... | 4 |
| Glosario..... | 5 |
| 1. Introducción..... | 14 |
| 1. Objetivos..... | 1 |
| 2. Antecedentes..... | 2 |
| 2.1 Diagrama Esfuerzo-deformación..... | 2 |
| 3.1.1 Modelos elastoplásticos..... | 4 |
| 2.2 Los huesos..... | 5 |
| 3.2.1 Funciones de los huesos..... | 5 |
| 3.2.2 Estructura del hueso..... | 6 |
| 3.2.3 Propiedades mecánicas del hueso..... | 8 |
| 2.3 Titanio..... | 12 |
| 3.3.1 Propiedades físicas y aplicaciones..... | 12 |
| 3.3.2 Prótesis de titanio..... | 14 |
| 3.4 Espumas metálicas..... | 15 |
| 3.4.1 Espumas de titanio para prótesis..... | 16 |
| 3.4.2 Fabricación de espumas de titanio: Rutas pulvimetalúrgicas..... | 17 |
| 3.5 Método de Elementos Finitos..... | 18 |
| 3.5.1 Introducción..... | 18 |
| 3.5.2 Método de los desplazamientos..... | 19 |
| 3.5.3 Calidad de Mallado..... | 22 |
| 3.6 Ensayos mecánicos experimentales de espumas de titanio..... | 23 |
| 4. Metodología..... | 26 |
| 4.1 Simulación..... | 26 |
| 4.1.1 Geometrías..... | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1.2 | Propiedades del material | 33 |
| 4.1.3 | Mallado | 35 |
| 4.1.4 | Condiciones de contorno | 37 |
| 4.2 | Cálculo de propiedades mecánicas de las espumas de Ti | 42 |
| 5. | Resultados..... | 45 |
| 5.1 | Simulaciones | 45 |
| 5.2 | Cálculo | 45 |
| 6. | Análisis de los resultados | 56 |
| 7. | Conclusiones | 61 |
| 8. | Trabajos futuros | 64 |
| 9. | Bibliografía | 65 |
| 10. | Anexos..... | 70 |
| 10.1 | Mallado..... | 70 |
| 10.2 | Resultados de las simulaciones..... | 79 |
| 10.3 | Resultados de los cálculos | 87 |

Índice de Tablas

| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 1: | Resistencia máxima y módulo de Young del hueso cortical humano para los distintos tipos de ensayos mecánicos..... | 10 |
| Tabla 2: | Cronología de los resultados del módulo de Young del hueso trabecular para distintos ensayos. | 10 |
| Tabla 3: | Propiedades físicas del titanio..... | 13 |
| Tabla 4: | Resistencia a la tensión de distintas aleaciones | 13 |
| Tabla 5: | Características de la porosidad de la espuma y resultados de las propiedades mecánicas de las pruebas experimentales. | 25 |

| | |
|---|----|
| Tabla 6: Características de las geometrías utilizadas..... | 32 |
| Tabla 7: Valores de las propiedades del material. | 34 |
| Tabla 8: Módulos de Young de las espumas de poros esféricos. | 50 |
| Tabla 9: Módulos de Young de las espumas de poros elípticos..... | 51 |
| Tabla 10: Esfuerzo de fluencia de las espumas de poros esféricos. | 53 |
| Tabla 11: Esfuerzo de fluencia de las espumas de poros elípticos. | 54 |
| Tabla 12: Coeficientes de determinación de las correlaciones lineales | 59 |
| Tabla 13: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma a) | 70 |
| Tabla 14: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma b). | 71 |
| Tabla 15: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma c). | 72 |
| Tabla 16: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma d). | 73 |
| Tabla 17: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma e). | 74 |
| Tabla 18: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma f)..... | 75 |
| Tabla 19: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma g). | 76 |

| | |
|---|----|
| Tabla 20: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma h). | 77 |
| Tabla 21: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma i). | 78 |
| Tabla 22: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 100 μ m de lado con poros esféricos. | 79 |
| Tabla 23: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 100 μ m de lado con poros esféricos. | 80 |
| Tabla 24: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 150 μ m de lado con poros esféricos. | 81 |
| Tabla 25: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 150 μ m de lado con poros esféricos. | 82 |
| Tabla 26: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 200 μ m de lado con poros esféricos. | 83 |
| Tabla 27: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas con poros elípticos. | 84 |
| Tabla 28: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas con poros elípticos. | 86 |
| Tabla 29: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 100 μ m de lado con poros esféricos. | 87 |
| Tabla 30: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 100 μ m de lado con poros esféricos. | 88 |
| Tabla 31: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 150 μ m de lado con poros esféricos. | 89 |

| | |
|---|----|
| Tabla 32: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 150 μm de lado con poros esféricos. | 91 |
| Tabla 33: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 200 μm de lado con poros esféricos. | 92 |
| Tabla 34: Esfuerzo y deformación calculados para espumas con poros elípticos. | 93 |
| Tabla 35: Esfuerzo y deformación calculados para espumas con poros elípticos. | 94 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Curva Esfuerzo vs. Deformación (no a escala). | 3 |
| Figura 2 Curvas de tracción idealizadas..... | 5 |
| Figura 3: Estructura del hueso..... | 7 |
| Figura 4: Gráfico Carga vs. Desplazamiento del hueso cortical y el trabecular. | 9 |
| Figura 5: Curva esfuerzo vs. Deformación de un ensayo de compresión llegando a la fractura | 11 |
| Figura 6: Apariencia de el sólido celular y el material poroso..... | 16 |
| Figura 7: (a) Diagrama de cuerpo libre de un problema estático. (b) Cuerpo mallado. | 21 |
| Figura 8: Muestras de espumas de Ti con diferentes cantidades de SHP. | 24 |
| Figura 9: Ventana principal de simulación. | 27 |
| Figura 10: Diagrama del procedimiento de simulación. | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 11: Geometrías de poros esféricos de 200x200 μm | 30 |
| Figura 12: Geometrías de poros elípticos..... | 31 |
| Figura 13: Diagrama de Esfuerzo vs. Deformación del modelo con endurecimiento bilineal isotrópico que se utiliza para las simulaciones. | 35 |
| Figura 14: Malla del modelo de poros esféricos de 200x200 μm , con 58.61% de porosidad. | 36 |
| Figura 15: Aplicación de la restricción de desplazamiento a la cara inferior del cubo. | 38 |
| Figura 16: Detalles del desplazamiento $z = 0$ | 38 |
| Figura 17: Aplicación del desplazamiento remoto. | 39 |
| Figura 18: Detalles del Desplazamiento remoto..... | 39 |
| Figura 19: Detalles del “ <i>Analysis Settings</i> ”..... | 40 |
| Figura 20: Aplicación del “ <i>Displacement</i> ” en la geometría. | 41 |
| Figura 21: Detalles del “ <i>Displacement</i> ”. | 41 |
| Figura 22: Desplazamientos que se realizan en cada paso para los tamaños a) 200 μm , b) 150 μm y c)100 μm | 41 |
| Figura 23: Detalles de la fuerza de reacción. | 42 |
| Figura 24: Curva de tracción de un metal con la metodología para determinar el punto de fluencia. | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 25: Curvas de Esfuerzo vs. Deformación de las espumas de 100 μm de lado con poros esféricos..... | 46 |
| Figura 26: Curvas de Esfuerzo vs. Deformación de las espumas de 150 μm de lado con poros esféricos..... | 47 |
| Figura 27: Curvas de Esfuerzo vs. Deformación de las espumas de 200 μm de lado con poros esféricos..... | 48 |
| Figura 28: Curvas de Esfuerzo vs. Deformación de las espumas de poros elípticos.. | 49 |
| Figura 29: Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de los distintos tamaños de espuma con poros esféricos..... | 52 |
| Figura 30: Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de las distintas morfologías de poros..... | 52 |
| Figura 31: Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de los distintos tamaños de espuma con poros esféricos..... | 55 |
| Figura 32: Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad para espuma con distintas morfologías. | 55 |
| Figura 33: Resistencia a la fluencia vs. Porosidad de Espumas con poros elípticos con MEF y ensayo de compresión. | 60 |
| Figura 34: módulo de Young vs. Porosidad de Espumas con poros elípticos con MEF y ensayo de compresión. | 60 |
| Figura 35: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma a)..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 36: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma b)..... | 71 |
| Figura 37: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma c)..... | 72 |
| Figura 38: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma d)..... | 73 |
| Figura 39: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma e)..... | 74 |
| Figura 40: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma f). | 75 |
| Figura 41: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma g)..... | 76 |
| Figura 42: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma h)..... | 77 |
| Figura 43: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma i). | 78 |

1. Introducción

La ingeniería puede mejorar de gran manera los diseños de máquinas, componentes y elementos a través de la elección de los materiales con que se construyen. En concreto, al analizar las propiedades mecánicas, químicas, electromagnéticas y el factor económico de estos, según sea la aplicación, es posible optimizar cualquier tipo de diseño.

Esta estrategia es primordial en diversas áreas, tales como la medicina, astronomía, minería, mecánica, industria productiva, marina y aérea.

Uno de los materiales más ocupado para aplicaciones biomédicas y componentes marinos es el titanio, esto debido a su alta relación resistencia-peso, bajo coeficiente de expansión térmica y su excelente resistencia a la corrosión en forma pura. Cuando este se mezcla con otros materiales para aumentar su resistencia, la aleación resultante logra tener una amplia aplicación en aviones, proyectiles, autos de carrera, entre otros [1] [2].

Una innovadora forma de utilizar el titanio y que se encuentra en continuo estudio es generar espumas metálicas de este material. Las cuales son cuerpos sólidos que poseen espacios huecos distribuidos a lo largo del material, por ende, presentan una muy baja densidad. Por otro lado, estas pueden ser fabricadas con distintas técnicas, que son clasificables en tres grupos de acuerdo al estado del metal al inicio del proceso: por vía sólida, vía líquida o deposición [3].

Por sus cualidades, las espumas metálicas pueden ser empleadas en muchas aplicaciones que requieran estructuras livianas, amortiguación mecánica, control de vibración, absorción acústica, entre otros. Por otra parte, y más específicamente, logra solucionar ciertas deficiencias de las prótesis de titanio.

Tomando en cuenta lo anterior, se considera útil estudiar las propiedades mecánicas de las espumas de titanio, al modificar distintos parámetros de estas, como el porcentaje de porosidad (fracción de espacios vaciados) y la morfología. Esto enfocado a las aplicaciones biomédicas, en particular, a las prótesis.

1. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo, es estudiar numéricamente el efecto del factor de elongación de los poros sobre las propiedades mecánicas de espumas de titanio, con amplia potencialidad en aplicaciones de reemplazo de estructuras óseas, mediante el Método de Elementos Finitos (MEF).

Con el desarrollo de este trabajo se busca plantear una alternativa para determinar una microestructura que optimice el comportamiento de estas espumas en términos de módulo de Young y resistencia a la fluencia, reduciendo así los costos asociados a su estudio y desarrollo experimental.

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

- Desarrollar un modelo 3D de las espumas de titanio en estudio.
- Caracterizar numéricamente las espumas utilizando un software comercial como herramienta de análisis.
- Analizar los resultados obtenidos para diferentes morfologías y distribuciones de poros.
- Comparar resultados obtenidos con datos experimentales.
- Presentar las conclusiones del trabajo desarrollado.

2. Antecedentes

A continuación se presentan algunos temas que permiten comprender y contextualizar de mejor manera este trabajo de título.

2.1 Diagrama Esfuerzo-deformación

Las propiedades mecánicas que posee un sólido deformable se pueden definir de acuerdo a los resultados que entregan los distintos ensayos mecánicos existentes. En los ensayos de tracción y compresión se suelen entregar los datos resultantes en un diagrama de esfuerzo-deformación.

La figura 1 muestra la curva de esfuerzo vs. deformación que se genera en un ensayo de tracción. Por un fin pedagógico, esta gráfica no se muestra a escala, ya que así es posible diferenciar más fácilmente las distintas zonas y esfuerzos que permiten conocer las propiedades de los materiales, a continuación se definen estos conceptos:

- Zona elástica lineal: Se encuentra en el tramo OA y su característica principal es que la probeta se alarga según la ley de Hooke. Si la carga deja de aplicarse, la probeta vuelve a su longitud inicial.
- Zona de transición: Es el tramo AB, en este la ley de Hooke deja de actuar, pero si la carga deja de aplicarse, la probeta queda con su largo original.
- Zona plástica: Abarca desde B hasta C, en este tramo la probeta se estira sin que el esfuerzo varíe, pero al cesar la carga esta quedará con una deformación remanente (deformación plástica).
- Zona de endurecimiento por deformación: Este tramo, que se encuentra desde C hasta D, sigue comportándose plásticamente, pero la carga debe aumentar para que la probeta siga estirándose.

- Zona de Estricción: Se encuentra desde el punto más alto de la curva hasta el final de ella (tramo DE). Al continuar el alargamiento de la probeta, se empieza a generar una contracción en la zona en donde se espera la rotura de esta.
- Límite de proporcionalidad (σ_p): Indica donde la ley de Hooke deja de hacer efecto.
- Resistencia o esfuerzo de fluencia (σ_y): Marca donde empieza la zona plástica.
- Esfuerzo último (máximo) o resistencia a la tracción (σ_u): Máxima tensión que soporta la probeta durante el ensayo.
- Esfuerzo (resistencia) a la rotura o fractura: Tensión soportada por la probeta al momento de la fractura [4].

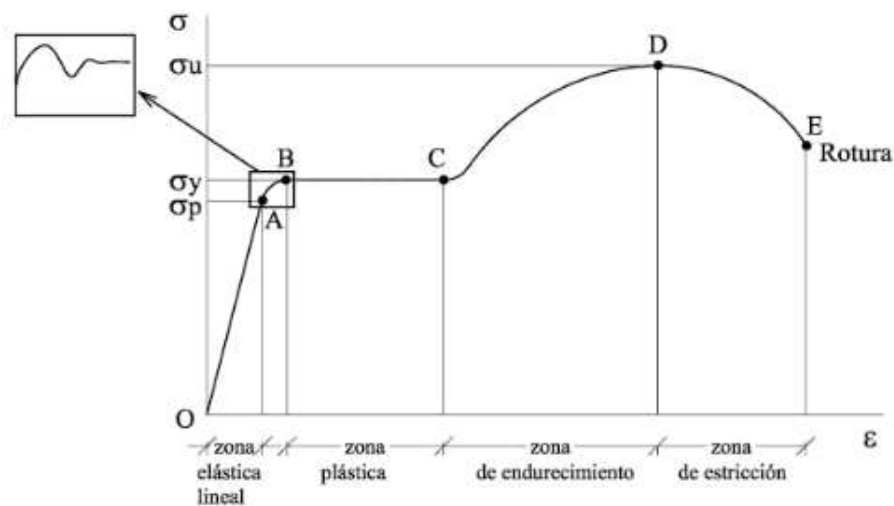


Figura 1: Curva Esfuerzo vs. Deformación (no a escala).

3.1.1 Modelos elastoplásticos

Para efectos prácticos se suele simplificar la curva antes descrita a un comportamiento bilineal, en donde la primera línea (recta) del diagrama representa la zona elástica y la segunda la plástica. La figura 2 muestra un par de ejemplos de estas idealizaciones, pero antes de pasar a su explicación, se debe definir un par de conceptos:

- Sólido elastoplástico: Es aquel que posee un comportamiento plástico y elástico.
- Superficie de fluencia: conjunto de tensiones admisibles de un sólido deformable y elastoplástico [4].

El diagrama a) de la figura 2 muestra el modelo de comportamiento elastoplástico perfecto o comportamiento sin endurecimiento por deformación. En él, la zona plástica posee una superficie de fluencia que no varía con la deformación. Cabe mencionar que en ambos ejemplos la pendiente del tramo OA es el módulo de Young (E).

El diagrama b) es el modelo de comportamiento elastoplástico con endurecimiento por deformación, en donde la zona plástica es representada por una recta inclinada, por lo tanto, después de pasar por el límite de fluencia, la superficie de fluencia varía de manera dependiente del incremento de la deformación. Por lo demás, en este modelo, si la carga cesa en el punto D, al empezar nuevamente el ensayo de tracción, el tramo O1D es la nueva zona elástica, por lo tanto el punto de fluencia aumenta, lo que se traduce en un endurecimiento por deformación [5].

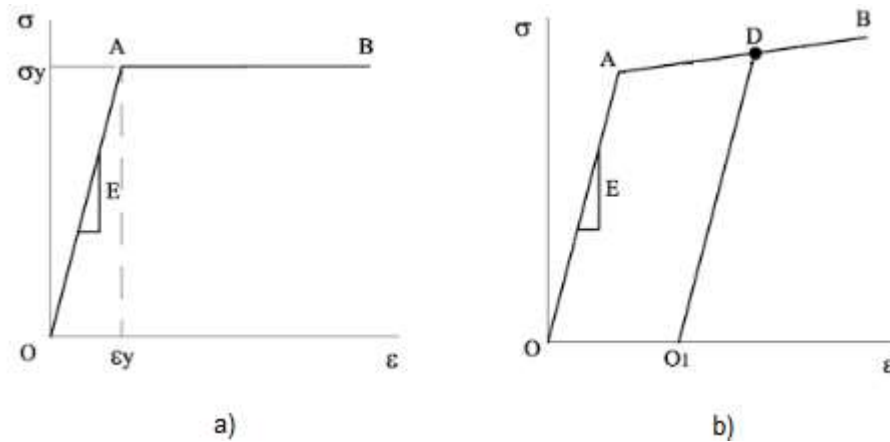


Figura 2 Curvas de tracción idealizadas.

2.2 Los huesos

Los huesos son piezas sólidas y resistentes que juntas forman el esqueleto, una estructura resistente, multifuncional y vital para el ser humano, ya que permite el movimiento, el sustento y entrega protección, entre otras importantes funciones.

El cuerpo humano está formado por 206 huesos, los cuales se clasifican según tamaño y forma, estos son: huesos largos, cortos y planos, ejemplos de estos son la tibia, las vértebras y el cráneo respectivamente [6].

La composición de los huesos es a base de 25% de agua, 25% de proteínas y 50% de sales minerales, también presenta cuatro tipos de células que permiten la formación, degradación y regeneración del hueso [7].

3.2.1 Funciones de los huesos

Los huesos hacen mucho más que sostener el cuerpo humano, en ellos se realizan diversas reacciones químicas y procesos biológicos que son vitales para el

funcionamiento del organismo. Las funciones básicas de los huesos a grandes rasgos son:

- **Sostén:** Juntos forman la estructura que soporta el cuerpo, fijando músculos y tendones.
- **Movimiento:** Gracias a las articulaciones es posible desarrollar la motricidad fina y gruesa.
- **Protección:** De órganos internos como el encéfalo (protegido por el cráneo), el corazón y los pulmones (protegidos por la caja torácica).
- **Homeostasis mineral:** Los huesos reservan diversos minerales, entre los más importantes el calcio y el fósforo, ambos sirven para la contracción muscular y la transmisión de impulsos nerviosos.
- **Hematopoyesis:** Se producen células sanguíneas en la médula ósea roja.
- **Almacenamiento energético:** Ocurre en la médula ósea amarilla, que debe su color a la gran cantidad de triglicéridos que se encuentran en ella, estos son un tipo de grasa de último recurso [7].

3.2.2 Estructura del hueso

A continuación se describe a groso modo la estructura ósea, se considera para ello el hueso largo (fig. 3):

- **Cartílago:** Es un tejido que cubre los extremos del hueso, su función es disminuir el roce y amortiguar las fuerzas que se producen en el movimiento.
- **Periostio:** Membrana que cubre la superficie ósea externa y da soporte a los vasos sanguíneos, linfáticos y nervios que atraviesan el hueso. Además contiene células que ayudan en la nutrición, reparación y crecimiento óseo.

- Cavity medular: Espacio que contiene la médula amarilla.
- Endostio: Membrana que reviste la cavity medular por dentro.
- Hueso compacto: También llamado hueso cortical, es la capa externa del hueso y es resistente a la compresión.
- Hueso esponjoso: También llamado hueso trabecular, en él se encuentra la médula ósea roja y está rodeado por el hueso compacto [7].
- Disco epifisiario: También llamado placa de crecimiento, se encuentra en huesos que se están desarrollando y desaparece aproximadamente a los 25 años [8][9].



Figura 3: Estructura del hueso [10].

3.2.3 Propiedades mecánicas del hueso

Las propiedades mecánicas varían según edad, sexo y genética, específicamente estas dependen de la cantidad, calidad y distribución del material óseo [11]. Al analizarlas se debe estudiar el hueso cortical y el trabecular por separado, esto debido a las diferencias de composición, estructura y morfología que poseen.

En la figura 4 se muestran las curvas de carga vs. desplazamiento de un ensayo de tracción del hueso cortical y el trabecular. Si las dimensiones de las muestras fueron las mismas, entonces este gráfico se puede analizar como si fuera de esfuerzo vs. deformación, ya que el esfuerzo es la carga dividido una constante y la deformación es el desplazamiento dividido en otra constante. De esta manera, se deduce que el módulo de Young del hueso cortical es mayor al del hueso trabecular, lo que se comprueba al comparar los datos de la tabla 1 y 2.

También se infiere que el hueso cortical logra resistir mayor carga antes de deformarse plásticamente que el hueso trabecular, ya que posee un esfuerzo de fluencia mayor. Esto coincide con los resultados de los ensayos mecánicos experimentales, los cuales llegan a que el esfuerzo de fluencia del hueso trabecular es de 50 MPa y el cortical de 150 MPa [12][13].

Por otra parte, cuando el hueso cortical se encuentra en la zona plástica, necesita de un incremento de carga muy leve para llegar a la fractura a diferencia del hueso trabecular, es decir, este último es más dúctil. Sin embargo, el hueso trabecular posee un esfuerzo último mayor al hueso cortical, por lo tanto, logra resistir esfuerzos más altos.

El hueso cortical es más resiliente que el trabecular, ya que el área bajo la curva esfuerzo-deformación antes de llegar al límite elástico es mayor, esto quiere decir que

es absorbe y cede más energía elástica al ser deformado y al dejar de aplicar la carga respectivamente.

Sin embargo, el hueso trabecular es más tenaz que el cortical, puesto que el área bajo la curva hasta la fractura es mayor, esto significa que absorbe más energía antes de la fractura.

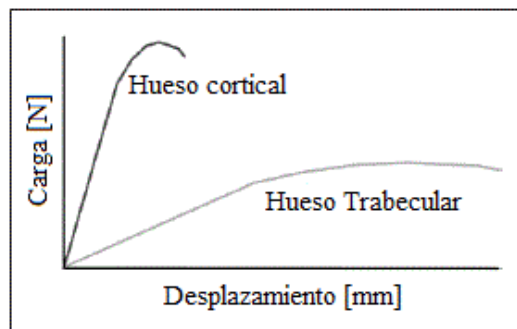


Figura 4: Gráfico Carga vs. Desplazamiento del hueso cortical y el trabecular [14].

Los valores numéricos de las propiedades mecánicas del hueso cortical se presentan en la tabla 1, donde se indica la resistencia máxima y el módulo de Young en distintos ensayos mecánicos. A su vez, la tabla 2 entrega una cronología de los módulos de Young del hueso trabecular obtenidos por distintos autores y métodos, sin embargo, estudios recientes indican que este valor es de aproximadamente 1 [Gpa][12]. Al comparar se confirma indicado previamente, puesto que tanto en ensayos de tracción como de flexión, el módulo de Young es mayor en el hueso cortical.

Tabla 1: Resistencia máxima y módulo de Young del hueso cortical humano para los distintos tipos de ensayos mecánicos [14].

| | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Ensayos de compresión | Resistencia | 167 – 213 MPa |
| | Módulo de Young | 14,7 – 34,3 GPa |
| Ensayos de tracción | Resistencia | 107 – 170 MPa |
| | Módulo de Young | 11,4 – 29,2 GPa |
| Ensayos de flexión | Resistencia | 103 – 238 MPa |
| | Módulo de Young | 9,8 – 15,7 GPa |
| Ensayos de torsión | Resistencia | 65 – 71 MPa |
| | Módulo de Young | 3,1 – 3,7 GPa |

Tabla 2: Cronología de los resultados del módulo de Young del hueso trabecular para distintos ensayos [15].

| Autor | Tipo de hueso | Método utilizado | Módulo de elasticidad de la trabécula |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| Wolff, 1892 | húmedo | Hipótesis | 17-20 Gpa |
| Pugh, 1973 | Fémur distal | Elementos finitos | Menor que el cortical |
| Runkle, 1975 | Fémur distal seco | Deformación | 8,69 Gpa |
| Townsend, 1975 | Tibia, proximal | Deformación no elástica | 11,38 Gpa (fresco) 14,13 Gpa (seco) |
| Williams, | Tibia, proximal | Elem. finitos 2-D | 1,3 Gpa |
| Ku, 1987 | Tibia congelada fresca | Flexión con 3 puntos | 3,17 Gpa |
| Viente, 1987 | Fémur seco, Tibia fresca | Empotramiento a flexión con MEF | 5,3 Gpa |
| Ashman, | Fémur | Ultrasonidos | 12.7 Gpa |
| Choi, 1989 | Tibia | Flexión con 3 puntos | 4,59 Gpa |
| Kuhn,1989 | Cresta ilíaca | Flexión con 3 puntos | 3,81 Gpa |
| Mente, 1989 | Fémur seco Tibia fresca | Empotramiento a flexión con MEF | 7,8 Gpa |
| Jensen, 1990 | Vértebra (L3) | Análisis estructural con modelo 3-D | 3,8 Gpa |
| Choi, 1991 | Tibia | Flexión con 4 puntos | 5,35 Gpa |
| Rho,1993 | Tibia | Ultrasonidos | 14,8 Gpa |
| Rho,1993 | Tibia | Ensayo tracción | 10,4 Gpa |

El esfuerzo al que podría fracturarse el hueso es muy variable, normalmente se produce la rotura antes del esfuerzo máximo, esto debido a la existencia de microfrazas que producen un deslizamiento a nivel microestructural, lo cual facilita la fractura a cargas menores. El esfuerzo necesario para llegar a la rotura del hueso también depende del tiempo de carga, si esta se aplica drásticamente (impacto), el esfuerzo para alcanzar la fractura será mucho menor que al aplicarla lentamente [11]. Según la curva de la figura 5, el esfuerzo de rotura en un ensayo de compresión varía entre 0,8 y 1 MPa.

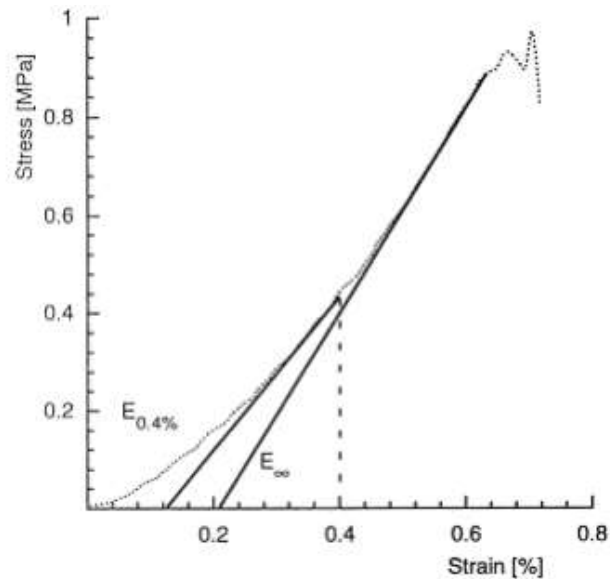


Figura 5: Curva esfuerzo vs. Deformación de un ensayo de compresión llegando a la fractura [16]

2.3 Titanio

En el lamentable caso de necesitar reemplazar alguna estructura ósea, ya sea por una fractura, amputación, etc., el metal que se suele utilizar es el titanio, debido a sus características mecánicas y bioquímicas.

El titanio es un metal que se encuentra en estado sólido, este se suele obtener de los minerales rutilo e ilmenita, de ellos se extrae TiO_2 y a través de diferentes procesos químicos se puede conseguir titanio puro.

Por otro lado, el titanio es un material abundante, pues conforma el 1% de la corteza terrestre. Sin embargo, no es posible encontrarlo de forma pura, ya que es altamente reactivo, especialmente con los gases de la atmósfera [1].

3.3.1 Propiedades físicas y aplicaciones

Debido a las ventajas que presentan las propiedades físicas del titanio, este es utilizado en múltiples aplicaciones. Al ser ligero y resistente, es decir, posee una alta razón resistencia a la fluencia/densidad, sumado a que puede soportar altas temperaturas, es utilizado ampliamente por la industria aeronáutica, espacial, militar y automovilística. Ejemplos de estas aplicaciones son componentes de aviones, proyectiles, cohetes espaciales y turbinas. La tabla 3 presenta los valores numéricos de las propiedades físicas del titanio.

Por otro lado, la elaboración de aleaciones de titanio es complicada, puesto que al ser un metal altamente reactivo con el oxígeno, requiere de algunos procesos previos a la fabricación [17]. Aun así, los elementos aleantes pueden llegar a mejorar las propiedades físicas del material según la necesidad de la aplicación. Las aleaciones

más comunes son con aluminio, cobre, estaño, magnesio y vanadio. La tabla 4 muestra la resistencia a la tensión de diversas aleaciones de titanio.

Otra característica del titanio es su alta resistencia a la corrosión, esto combinado con las propiedades previamente mencionadas, lo hace muy atractivo para aplicaciones biomédicas y marinas, ya sean prótesis, instrumentos médicos y componentes de submarinos [1].

Tabla 3: Propiedades físicas del titanio [1][18][19].

| Propiedad física | Valor |
|--|--------------------------------|
| Módulo de Young | 117x10 ³ [MPa] |
| Temperatura de fusión | 1668 [°C] |
| Temperatura de ebullición | 3260 [°C] |
| Densidad | 4,5 [g/cm ³] |
| Gravedad específica | 4,51 [-] |
| Razón resistencia a la fluencia/densidad (Ti recocido) | 250 [MPa/(g/cm ³)] |

Tabla 4: Resistencia a la tensión de distintas aleaciones [1].

| Código | Composición típica [%] | | | | | | Resistencia a la tensión | | |
|---------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|------|--------------------------|-------|----------------|
| | Ti | Al | Cu | Fe | V | Otro | lb/pulg ² | [Mpa] | Elongación [%] |
| R50250 | 99.8 | | | 0.2 | | | 35000 | -240 | 24 |
| R56400 | 89.6 | 6.0 | | 0.3 | 4.0 | | 145 | -1000 | 12 |
| R54810 | 90.0 | 8.0 | | | 1.0 | 1 | 143000 | -985 | 15 |
| R56620 | 84.3 | 6.0 | 0.8 | 0.8 | 6.0 | 2 Sn | 155000 | -1070 | 13 |

3.3.2 Prótesis de titanio

Se suele utilizar el titanio para reemplazar parte de la estructura ósea, esto es posible ya que cumple con las características necesarias para ser un biomaterial. La primera es ser biocompatible, esto quiere decir que logra interactuar con éxito en medios biológicos, sin producir ningún tipo de daño o afectar el sistema inmunológico. La segunda es permitir la formación del hueso (osteogénesis), para esto es necesario ser resistente a la corrosión y a la fatiga, además de asegurar la osteointegración, que significa lograr la unión funcional y estructural entre el hueso y el material.

Las prótesis son dispositivos que se colocan en alguna parte del cuerpo de manera fija o removible. Su función es reemplazar o mejorar completa o parcialmente un órgano o tejido. [18].

El problema de las prótesis actuales de titanio es que su módulo de Young es mucho más alto que el del hueso cortical, esto provoca que la tensión que actúa sobre el hueso colindante sea menor, ya que la prótesis es capaz de resistir la mayor parte de la carga. Esto provoca la reabsorción del hueso y con ello la disminución de la densidad alrededor de la prótesis. Este fenómeno se denomina apantallamiento de tensiones [20].

3.4 Espumas metálicas

Las espumas metálicas corresponden a materiales sólidos que presentan huecos llenos de gases en su interior, estos vaciados o poros pueden tener diferentes formas, tanto bidimensionales (triangular, rectangular, hexagonal, etc.) como tridimensionales (prisma, dodecaedro, esférico, etc.).

Los poros de las espumas pueden ser cerrados o abiertos, ambos casos tienen diferentes beneficios. Los poros abiertos permiten la disipación del calor y sirven de filtros o catalizadores, entre otras aplicaciones, por otro lado, los materiales con poros cerrados presentan gran rigidez y aislamiento acústico [21].

Las espumas se pueden clasificar como sólidos porosos o sólidos celulares, la distinción está en la densidad de la espuma, que está directamente relacionado con el porcentaje de porosidad. Si la densidad relativa es mayor a 0.3, entonces es un sólido poroso, de lo contrario será un sólido celular, la diferencia se visualiza en la figura 6. La densidad relativa es la densidad del sólido con vaciados dividido en la densidad del sólido macizo [22].

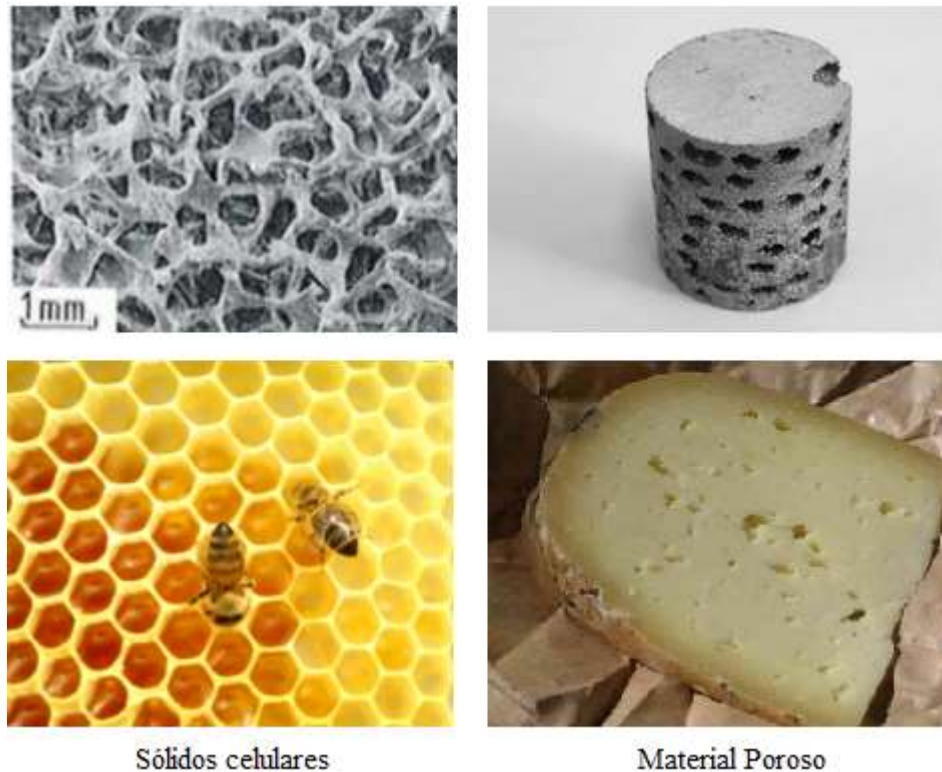


Figura 6: Apariencia de el sólido celular y el material poroso. [23][24]

3.4.1 Espumas de titanio para prótesis.

Al pasar de un sólido macizo a una espuma, muchas de las propiedades del material base no cambian al añadir porosidad, en el caso del titanio, sigue siendo un biomaterial, sin embargo, el módulo de Young cambia.

Si el porcentaje de porosidad aumenta, el módulo de Young disminuye, lo cual es muy beneficioso, ya que si se logra fabricar una prótesis de espuma metálica con un módulo de Young similar al que tiene el hueso, el problema del apantallamiento de tensiones disminuye o se elimina [25]. Cabe destacar que es necesario revisar que este reemplazo no posea un esfuerzo de fluencia menor al tejido óseo a sustituir, pues esto puede afectar su mantenibilidad y eficacia en el tiempo.

Por otra parte, la porosidad disminuye la densidad del sólido, por lo tanto las prótesis de este material son mucho más livianas.

3.4.2 Fabricación de espumas de titanio: Rutas pulvimetalúrgicas

Existen distintos métodos de fabricación de espumas, entre ellos, la fusión por haz de electrones, fundición por congelación acuosa, conformación de red por ingeniería laser y rutas pulvimetalúrgicas [26]. Este último también se denomina técnica de polvos metalúrgicos (PM), que tal como dice el nombre, utiliza polvos metálicos que son fabricados por medio de hidrogenación y deshidrogenación [27].

La técnica de PM es una de las más utilizadas y consiste en añadir SHP (*Space Holder Phase*) a un material base, que en este caso son polvos que pueden ser fabricados de naftalina, sacarosa, bromuro de potasio, bicarbonato de amonio, carbamida, PVA y NaCl. Los espacios que quedan al retirar los SHP del sólido son los poros de la espuma metálica [25][12].

Para generar espumas de titanio a partir de la técnica PM, se parte mezclando los polvos de Ti y SPH en las proporciones necesarias según el porcentaje de porosidad requerido, luego se colocan en moldes, donde son compactados por una presión uniaxial. Posteriormente los SPH pueden ser extraídos al disolverlos en agua o algún otro fluido, esto por un tiempo y temperatura determinados, lo cual logra dejar vaciados los poros de la espuma. Finalmente se realiza el proceso de sinterización, que se basa en calentar en vacío, sin fundir el material, de modo de aumentar su resistencia [25][28].

Todos los parámetros que contempla la fabricación de una espuma (tiempo, temperatura, presión, etc.) influyen en las propiedades mecánicas, además, de la morfología y porcentaje de la porosidad. Por ejemplo, mientras más presión de

compactación, más alargado es el poro, lo cual provoca la eliminación de los microporos y en consecuencia la disminución de la concentración de esfuerzos en la espuma, dando una mayor resistencia mecánica [12][28][27].

3.5 Método de Elementos Finitos

3.5.1 Introducción

Tomando en cuenta las limitaciones de la mente humana, entender los fenómenos físicos, biológicos, químicos, entre otros, que se producen en nuestro mundo, se torna muy complejo si se resuelve de manera global.

Por ejemplo, si se estudia un comportamiento físico, planteando sistemas de ecuaciones que lo describen como un todo, las soluciones serán exactas, pero su resolución es muy complicada a nivel matemático, puesto que es un problema continuo, es decir, las variables pueden tomar una infinita cantidad de valores.

Por el contrario, si para estudiar un modelo se contempla una cantidad finita de componentes o elementos bien definidos que lo conformen, este pasa a ser un problema discreto. La ventaja de este método, es que aunque la cantidad de elementos sea alta (no infinita), las herramientas computacionales pueden resolverlos sin dificultad.

Una de estas estrategias es el Método de Elementos Finitos (MEF) [29], este se puede aplicar a una gran variedad de áreas científicas, como la termodinámica, sólidos rígidos, mecánica de fluidos, entre otros.

El MEF es un procedimiento de aproximación de problemas continuos, que separa el medio continuo en un número determinado de partes (elementos), donde el comportamiento de estos es descrito por un número finito de parámetros [30].

3.5.2 Método de los desplazamientos

A lo largo de la historia, muchos han sido los precursores del MEF, entre ellos Turner, quien implementa un procedimiento sistemático y eficiente para llevarlo a cabo, denominado el “Método de los desplazamientos” [31]. Este procedimiento aplicado a la resolución de distribuciones de tensión y deformación de un medio continuo es el siguiente:

Primero se divide el medio continuo en superficies mediante líneas imaginarias o en volúmenes por medio de superficies, dependiendo del tipo de problema que sea (2D o 3D), estas secciones se denominan “elementos finitos”. Estos últimos quedan unidos entre ellos por medio de puntos, llamados nodos, los cuales suelen ser los vértices de los elementos. El conjunto de elementos finitos se denomina malla.

Posteriormente se determinan las funciones que describen el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos de los nodos de dicho elemento. Con ello se logra conocer el estado de deformación en cada elemento, puesto que los desplazamientos de los nodos de un elemento describen la deformación de este. Esto permite llegar a definir la distribución de tensiones, si es que se tienen las deformaciones iniciales y las propiedades del material.

Se establece un sistema de fuerzas en los nodos que equilibre las tensiones en el contorno (fuerzas entre elementos) y las cargas repartidas (cargas distribuidas

aplicadas al medio), consiguiendo así una relación entre fuerzas y desplazamientos [30].

A continuación, a modo de ejemplo, se aplica el procedimiento al caso de la figura 7(a), el cual es un cuerpo con dos apoyos de giro libre, una carga distribuida p y peso despreciable, este es un problema en 2 dimensiones. A continuación se divide el cuerpo en 4 elementos finitos triangulares, esta es una cantidad muy baja, en el apartado 4.1.3 se explica cómo revisar la calidad de la malla, por ahora se trabaja con un número acotado de elementos para un mejor entendimiento.

Se debe plantear las funciones de las distribuciones de desplazamiento y fuerzas por cada elemento. La función 3.1 muestra de forma matricial las fuerzas que actúan en todos los nodos del elemento 1, donde \mathbf{q}^1 es la fuerza total en el elemento 1 y \mathbf{q}_1^1 la fuerza en el nodo 1, U_1 y V_1 son las componentes de esta última fuerza. De igual manera se plantea la función 3.2, que determina de forma matricial los desplazamientos de los nodos del elemento 1.

La función 3.3 corresponde a la relación entre fuerzas y desplazamientos del elemento 1 que se da en un comportamiento elástico lineal, donde \mathbf{K}^1 es la matriz de rigidez del elemento, \mathbf{f}_p^1 son las fuerzas que equilibran las cargas distribuidas y $\mathbf{f}_{\epsilon_0}^1$ las fuerzas que equilibran la deformación inicial.

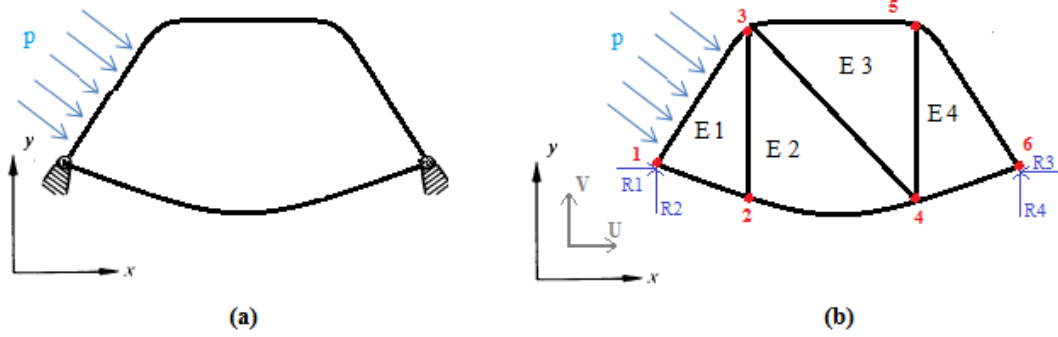


Figura 7: (a) Diagrama de cuerpo libre de un problema estático. (b) Cuerpo mallado.

$$\mathbf{q}^1 = \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ q_3^1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{q}_1^1 = \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{a}^1 = \begin{Bmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ a_3^1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{a}_1^1 = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{q}^1 = \mathbf{K}^1 \mathbf{a}^1 + \mathbf{f}_p^1 + \mathbf{f}_{\varepsilon_0}^1 \quad (3.3)$$

3.5.3 Calidad de Mallado

Las características de la malla a utilizar dependerán del tipo de geometría y las cargas que se apliquen al modelo. La calidad de la malla afecta en los resultados y en el tiempo empleado para llegar a ellos, esta se estima en base a los siguientes parámetros:

- **Calidad de elementos:** Es un factor que ronda entre 0 y 1, mientras más se acerque la forma del elemento a la configurada inicialmente, más se aproxima a 1, lo que indica una calidad de malla satisfactoria.
- **Relación de aspecto:** Es la razón entre el lado más largo y el más corto de un elemento de la malla. El ideal es un valor cercano a 1.
- **Suavidad:** Debe haber mayor cantidad de elementos por área o volumen (dependiendo si el análisis es 2D o 3D) en las zonas en donde existan cambios de cara del cuerpo, con esto se logra una buena calidad de malla.
- **Asimetría:** Toma valores entre 0 y 1, mientras más simétrico sea el elemento, más cercano es a 0, lo que indica una buena calidad de malla.
- **Calidad ortogonal:** El rango de este factor es de 0 a 1, el ideal es que el valor sea cercano a 1. Para el cálculo de este se utilizan 3 vectores por cada cara del elemento, los cuales son: el vector normal a una cara del elemento (A_i), el vector que va desde el centroide del elemento hacia el centroide de otro elemento que este colindante (B_i), y el vector que va desde el centroide del elemento hacia el centro de una cara de este (C_i). El factor se determina usando la expresión (1) para cada cara i [32].

$$\text{Calidad Ortogonal} = \text{Mín} \left\{ \frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{B}_i}{|\mathbf{A}_i| |\mathbf{B}_i|}, \frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{C}_i}{|\mathbf{A}_i| |\mathbf{C}_i|} \right\} \quad (3.4)$$

3.6 Ensayos mecánicos experimentales de espumas de titanio

Para este trabajo se consideran las pruebas experimentales realizadas por Muñoz et al. [12], donde se fabrican espumas de Titanio comercialmente puro con diferentes porosidades y morfologías de poro, estas se someten a pruebas para conocer las propiedades mecánicas con fines biomédicos.

Para la fabricación de las espumas se utiliza la técnica de PM explicada en el punto 3.4.2, donde el SHP utilizado es bicarbonato de amonio. El procedimiento parte con una homogeneización de la mezcla de SHP y Ti durante 40 minutos, esta es colocada una matriz de 8 mm de diámetro, luego la presión de compactación es de 800 Mpa. Para eliminar el SHP inicialmente se deja a 60°C por 10 h. y después a 110°C por 12 h. Finalmente la sinterización ocurre a 1250°C durante 2 horas. Cabe mencionar que las propiedades del Ti se encuentran en la tabla 7 del punto 4.1.2.

Se puede visualizar la disposición, tamaño y forma de los poros en la figura 8, estas muestras son generadas usando un 30, 40, 50, 60 y 70% de volumen de SHP, obteniéndose una porosidad de 28, 37,47, 57 y 66% respectivamente.

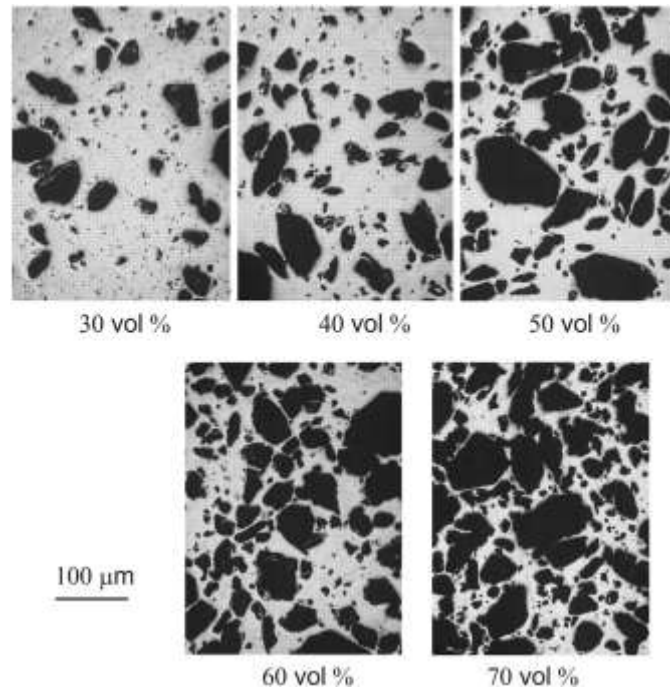


Figura 8: Muestras de espumas de Ti con diferentes cantidades de SHP [12].

Con este procedimiento se obtienen espumas cilíndricas con una razón de Altura/diámetro igual a 0,8 y con poros de forma elipsoidal. Las características de estos últimos son: La porosidad total (θ), el diámetro equivalente (Deq , diámetro de poro promedio) y el Factor de alargamiento del poro (Fe , relación entre el eje mayor y el menor de la elipse). Por otro lado, se utiliza una distribución normal para la morfología de las elipses y una uniforme para la orientación de estas.

Para conocer las propiedades mecánicas de las espumas se realizan dos pruebas experimentales. Para conocer el esfuerzo de fluencia se realiza un ensayo de compresión de hasta el 50% de la deformación de la probeta y para obtener el módulo de Young se utiliza este último más un test de ultrasonido. Los resultados y las características de la porosidad de las espumas se presentan en la tabla 5. [12]

Las mediciones que se realizan con la técnica de ultrasonido son muy coherentes y precisas [27], esta prueba consiste en transferir una onda mecánica por el material, luego se miden las características de la onda para determinar el módulo de Young [33]. En cambio, el ensayo de compresión suele ser menos exacto, esta diferencia se explica por la influencia que tiene, en los resultados del experimento, la rigidez del sistema mecánico que realiza la compresión en la máquina universal. Otra fuente de error es que la espuma es diferente en cada sección transversal, y el colapso de material empieza en la zona con menos densidad [34].

Tabla 5: Características de la porosidad de la espuma y resultados de las propiedades mecánicas de las pruebas experimentales.

| Porosidad [%] | 28 | 37 | 47 | 57 | 66 |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Deq [μm] | 18 | 32 | 38 | 48 | 53 |
| Fe [-] | 0.75 ± 0.17 | 0.65 ± 0.18 | 0.62 ± 0.18 | 0.64 ± 0.18 | 0.61 ± 0.17 |
| E (Compresión) [GPa] | 9.0 ± 0.9 | 8.5 ± 0.9 | 7.0 ± 1.0 | 5.2 ± 1.0 | 2.6 ± 1.2 |
| E (Ultrasonido) [Gpa] | 50.0 ± 1.8 | 30.9 ± 2.0 | 24.1 ± 2.2 | 17.2 ± 2.8 | 12.8 ± 3.5 |
| Esfuerzo Fluencia [Mpa] | 280 ± 14 | 170 ± 13 | 148 ± 13 | 77 ± 11 | 29 ± 12 |

4. Metodología

Para caracterizar numéricamente las propiedades mecánicas, se analizan diferentes espumas que varían en 3 parámetros: porcentaje de porosidad, morfología de poros y tamaño del modelo. Estas propiedades se calculan en base a los resultados que se obtienen de simulaciones de ensayos de compresión en un software comercial de simulación ingenieril que utilice el MEF. Finalmente se comparan las propiedades mecánicas de las espumas simuladas con las pruebas experimentales del punto 3.6. En los puntos siguientes se detalla cada etapa de la metodología de este trabajo.

4.1 Simulación

Existen variadas herramientas computacionales que utilizan el MEF, entre ellas Caelinux [35], Nastran [36], Solidworks [37], Abaqus [38] y Ansys Workbench [32]. Este último es un software comercial de simulación de ingeniería que posee una plataforma dinámica y fácil de entender. Ansys Workbench contempla variadas aplicaciones, entre ellas eléctricas, mecánica de fluidos, vibraciones, transferencia de calor y estática estructural [32].

Para realizar las simulaciones de los modelos se usa el modo estática estructural (*static structural*) de Ansys Workbench, la ventana principal donde se configuran se muestra en la figura 9.

A modo general, el procedimiento se inicia al cargar las geometrías en la parte “*Geometry*” de la ventana (figura 9), allí se puede modificar el tamaño y otras características que sean necesarias. Luego se definen las propiedades del material en “*Engineering Data*”, después se ingresa a “*Model*” para generar la malla, la cual

discretiza físicamente el modelo, de un solo volumen a un número finito de subvolúmenes (elementos).

Para continuar, se sigue en la ventana “*Model*”, en donde se ingresan las condiciones de borde necesarias y los análisis que se quieran obtener. Finalmente, después de que el software procese todos los datos dichos, se puede revisar los resultados entregados por la plataforma.



Figura 9: Ventana principal de simulación.

A continuación se presenta un diagrama que resume el procedimiento para simular en el software Ansys Workbench, usando el modo *Stactic Structural*.

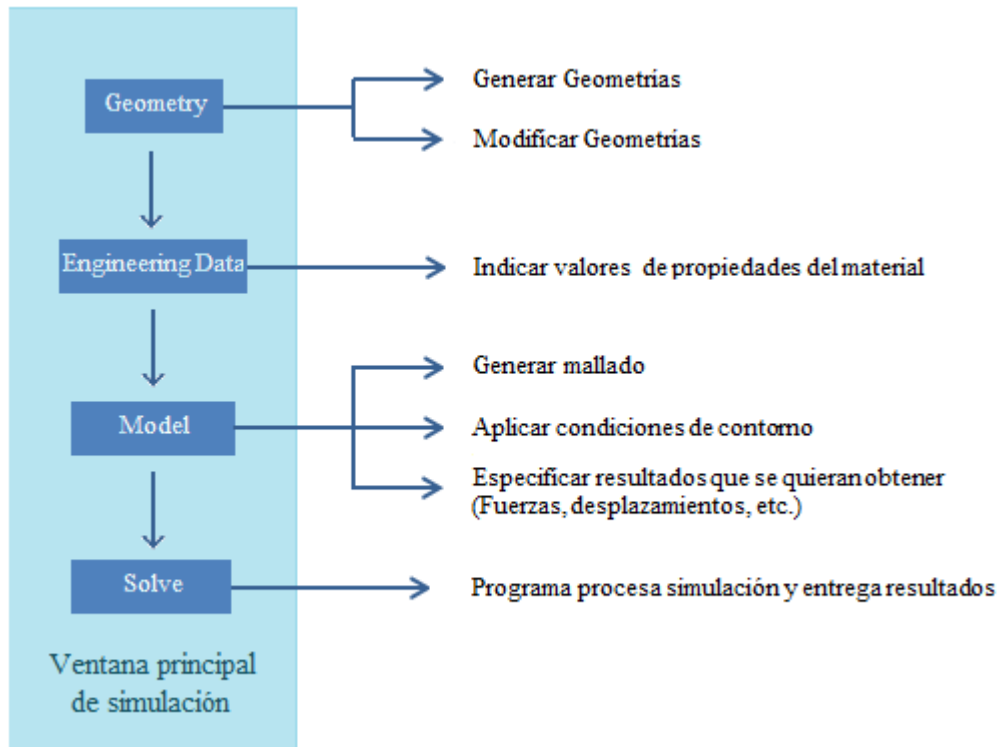


Figura 10: Diagrama del procedimiento de simulación.

4.1.1 Geometrías

Las geometrías a simular son cubos de espuma, los cuales tienen dos morfologías de poros distintas, unos de forma esférica y otros elipsoidal, con 16 y 15 porcentajes de porosidad distintos respectivamente, que van del 27% al 68%. Las figuras 11 y 12 muestran algunas de las geometrías que se utilizan.

Además, otro parámetro que se varía en las geometrías es el tamaño, esto con el fin de saber si influye en los resultados, por lo tanto no es necesario que se realice en todas las simulaciones. En este trabajo se utilizan tres tamaños por cada modelo de poros esféricos, los cuales son de 100, 150 y 200 μm por lado. En un principio, se utilizan modelos de un solo tamaño para espumas de poros elípticos (200 μm por lado), luego, si el tamaño de los modelos con poros esféricos influye en los resultados, entonces se debe variar el tamaño en las espumas de poros elípticos.

Para definir el tamaño de los cubos a simular se procura mantener las relaciones de las dimensiones usadas en el trabajo de Pérez et al. [25], donde las medidas de las probetas experimentales en relación a las simuladas es 40:1, debido a esto, en dicho trabajo se simulan cilindros de 200 μm de diámetro.

En resumen, se trabaja con un total de 63 geometrías, de las cuales 48 son de poros esféricos (16 por cada tamaño de cubo) y 15 elípticos. Las características de estas geometrías se resumen en la tabla 6.

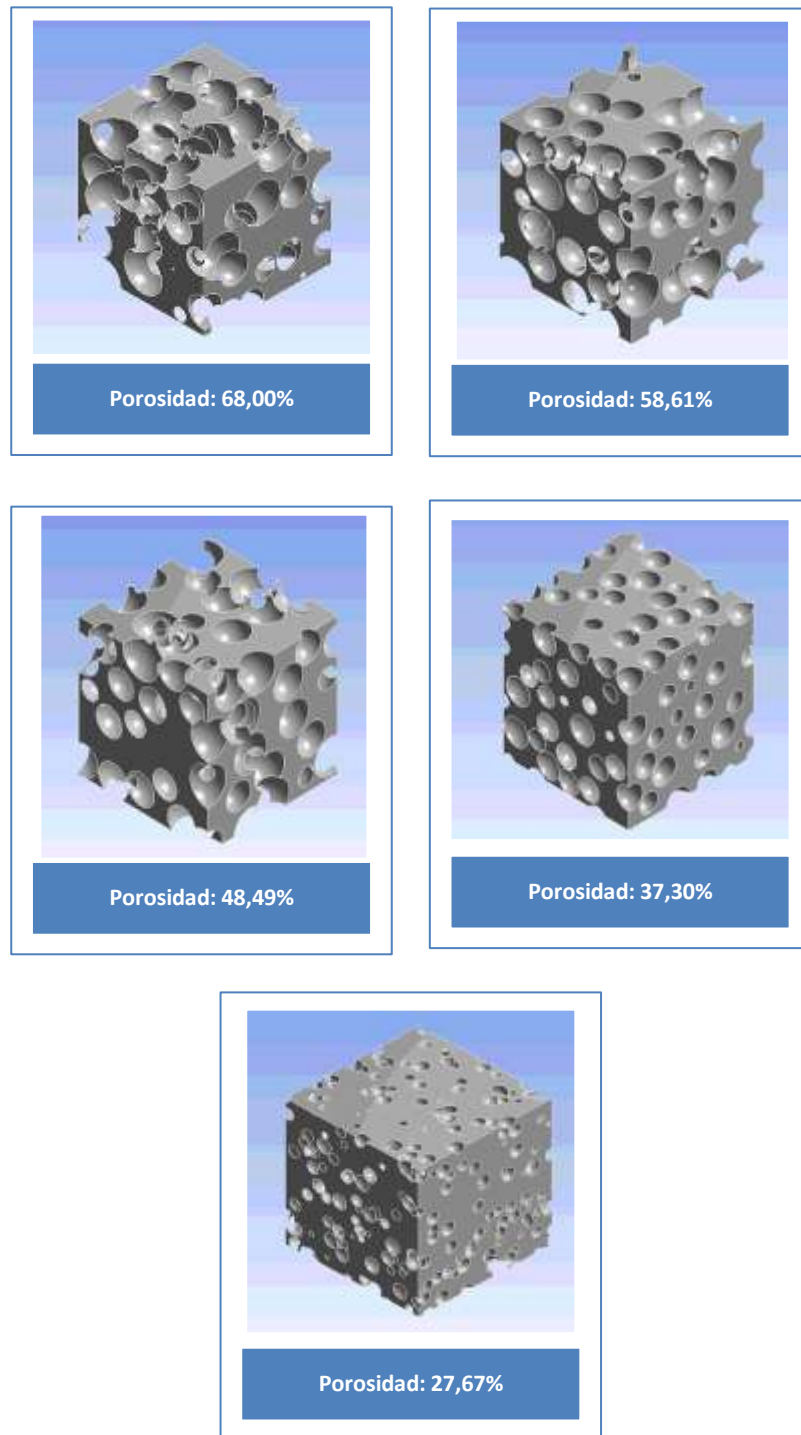


Figura 11: Geometrías de poros esféricos de 200x200 μ m

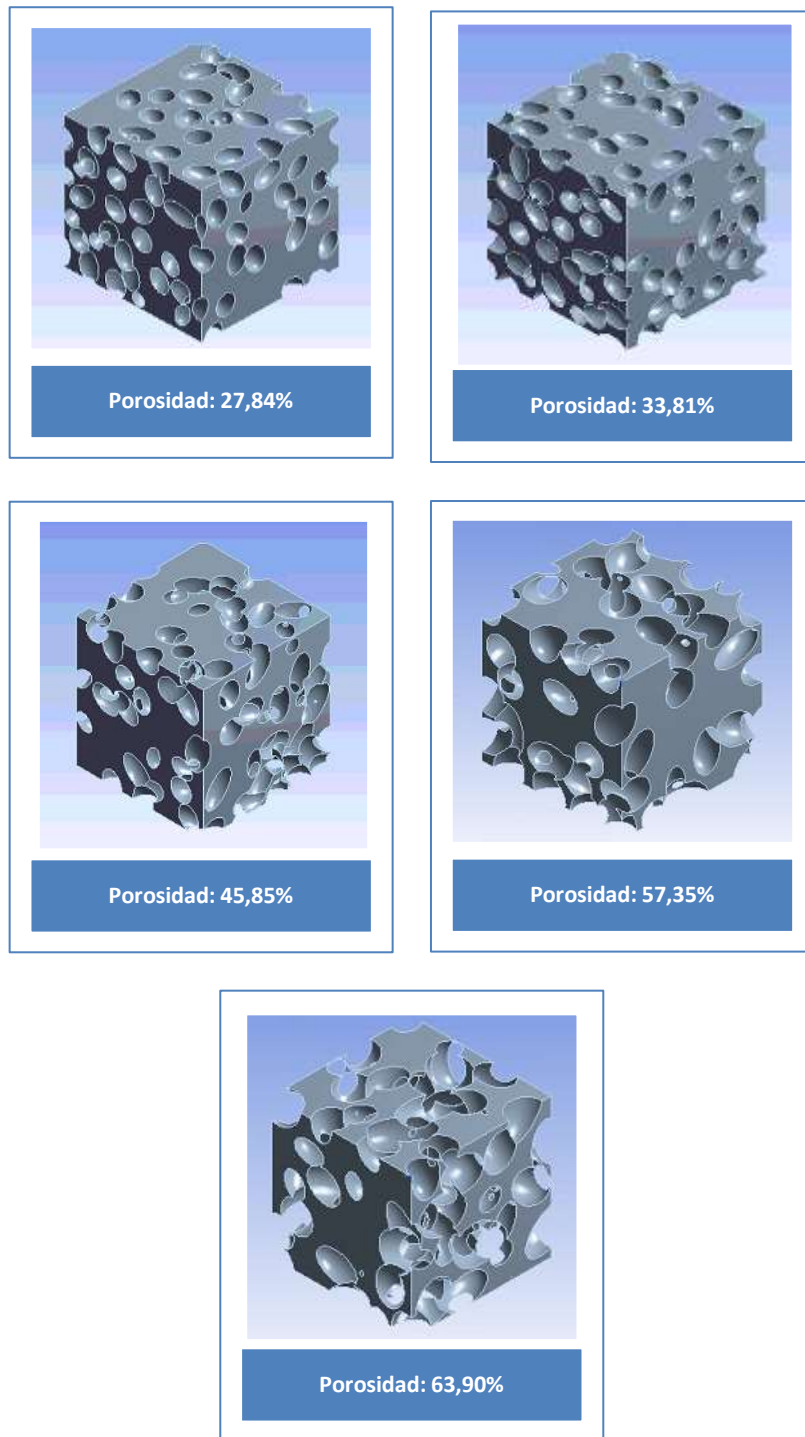


Figura 12: Geometrías de poros elípticos de $200 \times 200 \mu\text{m}$

Tabla 6: Características de las geometrías utilizadas

| Morfología de poro | Porosidad [%] | Tamaño de geometría [μm] |
|--------------------|---------------|---------------------------------------|
| Esférica | 27,63 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 27,67 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 27,93 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 37,30 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 37,30 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 38,62 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 47,18 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| 48,49 | 100 | |
| | 150 | |
| | 200 | |
| 48,76 | 100 | |
| | 150 | |
| | 200 | |
| 56,36 | 100 | |
| | 150 | |
| | 200 | |
| 57,44 | 100 | |
| | 150 | |
| | 200 | |
| 58,61 | 100 | |
| | 150 | |
| | 200 | |
| 64,80 | 100 | |

| | | |
|-------------------|-------|-----|
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 65,76 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 66,43 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| | 68,00 | 100 |
| | | 150 |
| | | 200 |
| Elipsoidal | 27,84 | 200 |
| | 28,27 | |
| | 28,54 | |
| | 33,81 | |
| | 33,88 | |
| | 34,24 | |
| | 44,61 | |
| | 45,85 | |
| | 46,90 | |
| | 57,35 | |
| | 57,99 | |
| | 58,73 | |
| | 59,61 | |
| | 63,31 | |
| | 63,90 | |

4.1.2 Propiedades del material

En la simulación, el material base de los modelos es el titanio. Para caracterizar sus propiedades se realiza una idealización de la curva esfuerzo-deformación, más específicamente, se trabaja con un comportamiento elastoplástico con endurecimiento por deformación. Este es un modelo bilineal, el cual se explica en el punto 31.1.

Para modelar este comportamiento en el software es necesario definir 3 propiedades: módulo de Young, esfuerzo de fluencia y módulo tangente. Éste último es la

pendiente de la zona plástica. La figura 13 muestra el diagrama esfuerzo-deformación con que se trabaja.

Por otro lado, se asume que la espuma tiene un comportamiento isotrópico, es decir que “todos los puntos y direcciones espaciales son equivalentes para describir los fenómenos físicos” [39].

En la sección “Engineering Data”, en la ventana principal de simulación “Static Structural”, se deben indicar las características del material base del modelo, la tabla en 7 resume los valores que se ingresan. Para llegar a estos, se mantienen las propiedades del material utilizado en los ensayos experimentales detallados en el punto 3.6.

Tabla 7: Valores de las propiedades del material.

| Propiedad | Valor | Unidad |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Densidad | 4510 | kg/m ³ |
| Módulo de Young | 1,1x10 ⁵ | MPa |
| Coefficiente de Poisson | 0,33 | - |
| Módulo tangente | 1x10 ³ | MPa |
| Esfuerzo de fluencia a la tracción | 6,5x10 ² | MPa |
| Esfuerzo de fluencia a la Compresión | 6,5x10 ² | MPa |

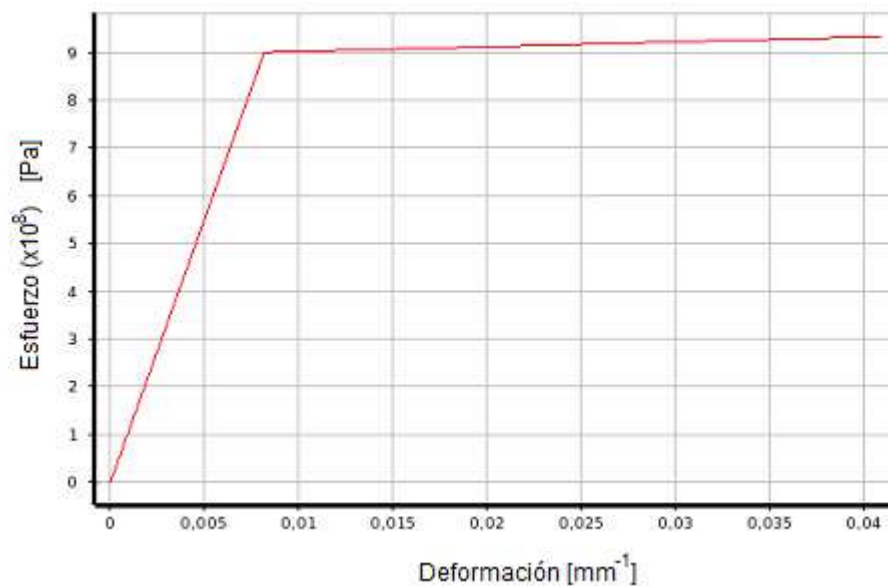


Figura 13: Diagrama de Esfuerzo vs. Deformación del modelo con endurecimiento bilineal isotrópico que se utiliza para las simulaciones.

4.1.3 Mallado

Para generar la malla se utiliza la configuración que viene por defecto, ya que en caso de que esta no sea adecuada, el software entrega mensajes de error, los cuales indican que las características de la malla no cumplen lo necesario para realizar la simulación. No obstante es importante verificar que los parámetros del mallado, los cuales se explican en el punto 3.5.3, tengan valores aceptables, de tal manera que demuestren que la calidad de las mallas es satisfactoria.

En el anexo 10.1, se presentan algunas medidas estadísticas de los parámetros calculados en los elementos de las mallas, los cuales son: calidad de elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal. Además se muestran los histogramas correspondientes a estos parámetros.

Lo expuesto en dicho anexo es realizado sólo a algunas geometrías, de diferentes morfologías, tamaños y porcentajes de porosidad, ya que los resultados, tanto numéricos como gráficos, son similares para todas las mallas.

Al analizar dichos parámetros se llega a la conclusión de que el mallado aplicado a las geometrías es aceptable, puesto que los valores de la calidad de los elementos y de la calidad ortogonal son superiores a 0.5, la relación de aspecto promedio no excede de 10 y la asimetría no supera los 0.5.

Para tener una idea, en la figura 14 se puede visualizar la malla de una geometría de poros esféricos.

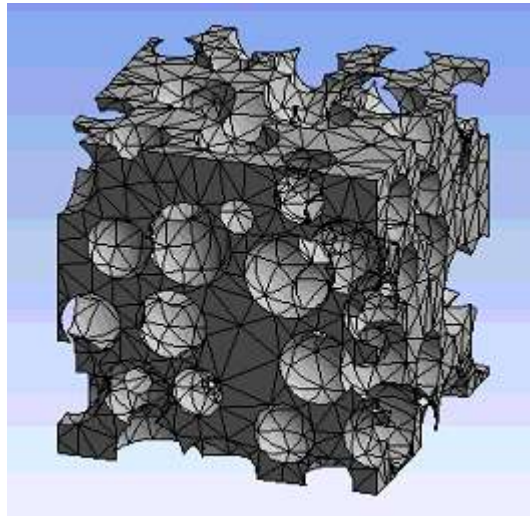


Figura 14: Malla del modelo de poros esféricos de $200 \times 200 \mu\text{m}$, con 58.61% de porosidad.

4.1.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son todas aquellas fuerzas, tipos de desplazamientos y parámetros que se aplican a una geometría y permiten representar las condiciones reales de un ensayo o trabajo experimental.

En este caso se simula un ensayo de compresión. Para ello se deja una cara fija y en la opuesta se aplica un desplazamiento gradual desde 0% hasta 3% del largo del cubo. Se realiza una deformación del 3% para asegurar que la muestra pase por el rango plástico. Luego se agrega una herramienta que entregue las fuerzas de reacción que se generan en la cara fija por tales deformaciones. Estas fuerzas, son iguales a la carga gradual que se aplicaría en un ensayo de compresión para que se llegue a una deformación del 3%.

Para ingresar las condiciones de borde a Workbench, se debe abrir la parte “*Model*” del cuadro correspondiente al modo “Static Structural” (figura 8). Las condiciones son las siguientes:

4.1.4.1 Restricción del desplazamiento de una cara: Se deja inmovilizada la cara inferior en el eje z, para esto se selecciona dicha superficie y se aplica “*Displacement*”, especificando que el desplazamiento sea cero en la componente z. Los detalles y la aplicación de esta condición se muestran en las figuras 15 y 16.

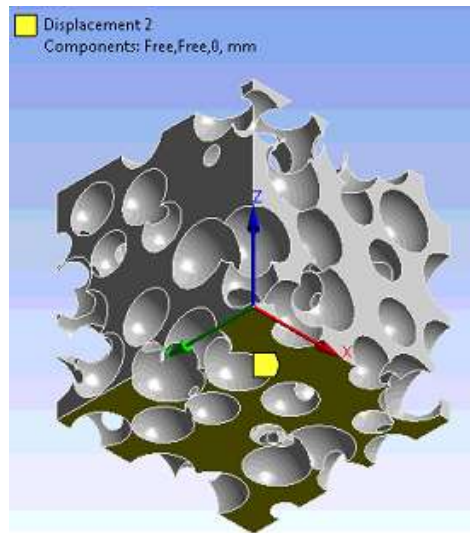


Figura 15: Aplicación de la restricción de desplazamiento a la cara inferior del cubo.

| Details of "Displacement 2" | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| [-] Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Face |
| [-] Definition | |
| Type | Displacement |
| Define By | Components |
| Coordinate System | Global Coordinate System |
| <input type="checkbox"/> X Component | Free |
| <input type="checkbox"/> Y Component | Free |
| <input type="checkbox"/> Z Component | 0, mm (ramped) |
| Suppressed | No |

Figura 16: Detalles del desplazamiento $z = 0$.

4.1.4.2 Restricción de rotación: Para lograr que los nodos de la cara donde se aplica el desplazamiento se deformen de igual manera, se aplica la condición “*Remote Displacement*”, en ella se detalla que la rotación en “x”, “y” y “z” es nula en esta superficie. De esta manera se logra asemejar la simulación a un ensayo de compresión real, puesto que en la práctica, se aplica una fuerza uniforme en toda la cara, sin que esta rote. Los detalles y la aplicación de esta condición se muestran en las figuras 17 y 18.

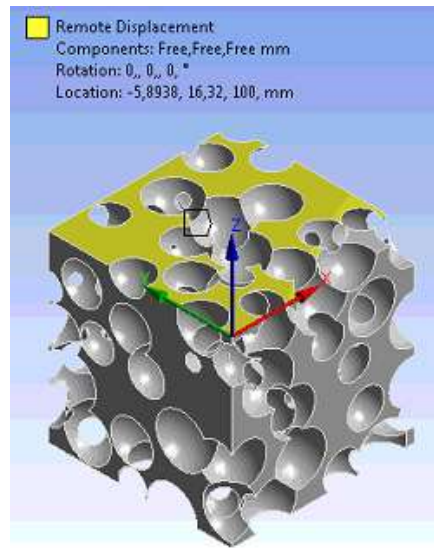


Figura 17: Aplicación del desplazamiento remoto.

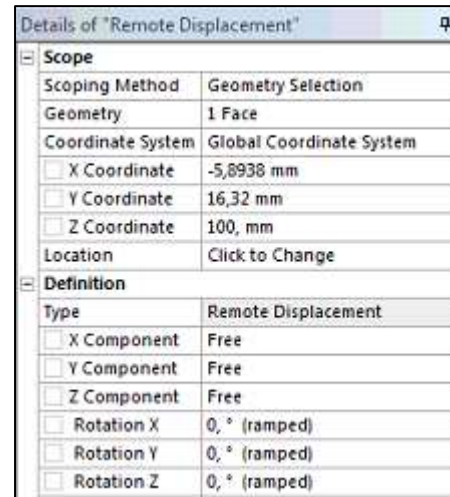
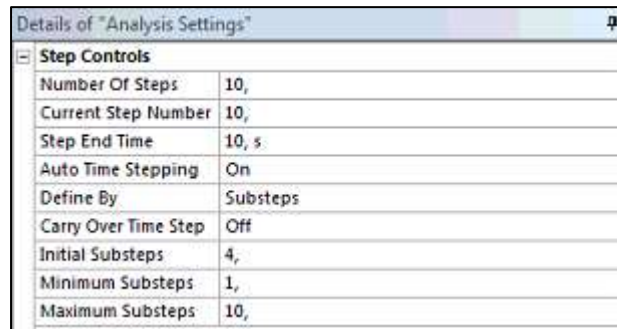


Figura 18: Detalles del Desplazamiento remoto.

4.1.4.3 Aplicación del desplazamiento en forma gradual: Al usar un modelo de comportamiento elastoplástico con endurecimiento por deformación, es importante realizar el desplazamiento que permite la compresión del cuerpo de manera gradual. La justificación de ello se puede deducir del punto 3.1, puesto que al pasar del límite de fluencia, la superficie de fluencia varía según el incremento de la deformación, por lo tanto los esfuerzos dependen del historial de carga. En consecuencia, es necesario realizar el desplazamiento paso a paso.

Para ello, se modifican los detalles de “*Analysis Settings*” como se muestra en la figura 19, donde se especifica que la prueba se realiza en 10 pasos.



| Details of "Analysis Settings" | |
|--------------------------------|----------|
| Step Controls | |
| Number Of Steps | 10, |
| Current Step Number | 10, |
| Step End Time | 10, s |
| Auto Time Stepping | On |
| Define By | Substeps |
| Carry Over Time Step | Off |
| Initial Substeps | 4, |
| Minimum Substeps | 1, |
| Maximum Substeps | 10, |

Figura 19: Detalles del “Analysis Settings”

4.1.4.4 Desplazamiento de la cara superior: Este es el desplazamiento que simulará la compresión en sí. Se aplica “*Displacement*” en la cara superior y en la componente Z se ingresan los desplazamientos que se realizan en cada paso. Las figuras 20 y 21 muestran la aplicación de esta condición en el software.

El desplazamiento total que se aplica a todas las geometrías es igual al 3% del largo del cubo, esta cantidad se reparte gradualmente en los 10 pasos. La figura 22 muestra esta distribución en los distintos tamaños con los que se trabaja. Este desplazamiento asegura que el ensayo sobrepasa el límite de fluencia, trabajando inmediatamente después en la zona plástica.

Para establecer el número de pasos de dicho desplazamiento, se realizan simulaciones variando solamente este parámetro, con el objetivo de obtener el mínimo de pasos suficientes, ya que al aumentar el número de pasos, aumenta también el tiempo de procesamiento de la simulación. Se prueba con 100, 50, 25 y 10 pasos, y se concluye que los resultados no varían con estas cantidades. Por ello, se usan 10 pasos, como se menciona previamente.

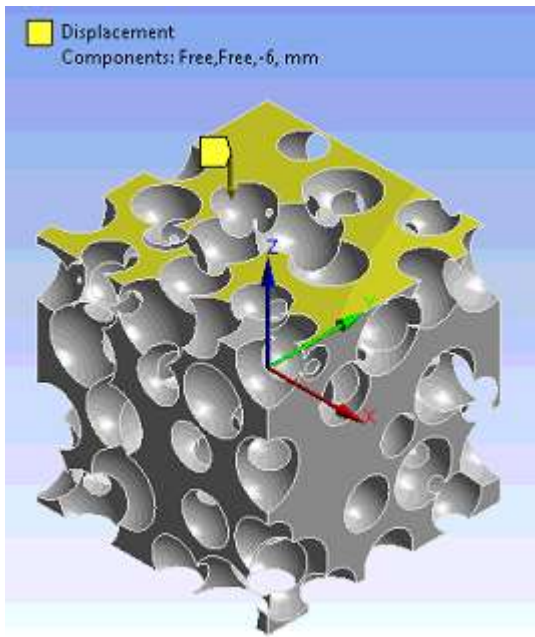


Figura 20: Aplicación del “Displacement” en la geometría.

| Details of "Displacement" | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Face |
| Definition | |
| Type | Displacement |
| Define By | Components |
| Coordinate System | Global Coordinate System |
| <input type="checkbox"/> X Component | Free |
| <input type="checkbox"/> Y Component | Free |
| Z Component | Tabular Data |
| Suppressed | No |
| Tabular Data | |
| Independent Variable | Time |

Figura 21: Detalles del “Displacement”.

| Tabular Data | | | |
|--------------|-------|----------|--------|
| | Steps | Time [s] | Z [mm] |
| 1 | 1 | 0, | 0, |
| 2 | 1 | 1, | -0,6 |
| 3 | 2 | 2, | -1,2 |
| 4 | 3 | 3, | -1,8 |
| 5 | 4 | 4, | -2,4 |
| 6 | 5 | 5, | -3, |
| 7 | 6 | 6, | -3,6 |
| 8 | 7 | 7, | -4,2 |
| 9 | 8 | 8, | -4,8 |
| 10 | 9 | 9, | -5,4 |
| 11 | 10 | 10, | -6, |
| * | | | |

a)

| Tabular Data | | | |
|--------------|-------|----------|--------|
| | Steps | Time [s] | Z [mm] |
| 1 | 1 | 0, | 0, |
| 2 | 1 | 1, | -0,45 |
| 3 | 2 | 2, | -0,9 |
| 4 | 3 | 3, | -1,35 |
| 5 | 4 | 4, | -1,8 |
| 6 | 5 | 5, | -2,25 |
| 7 | 6 | 6, | -2,7 |
| 8 | 7 | 7, | -3,15 |
| 9 | 8 | 8, | -3,6 |
| 10 | 9 | 9, | -4,05 |
| 11 | 10 | 10, | -4,5 |
| * | | | |

b)

| Tabular Data | | | |
|--------------|-------|----------|--------|
| | Steps | Time [s] | Z [mm] |
| 1 | 1 | 0, | 0, |
| 2 | 1 | 1, | -0,3 |
| 3 | 2 | 2, | -0,6 |
| 4 | 3 | 3, | -0,9 |
| 5 | 4 | 4, | -1,2 |
| 6 | 5 | 5, | -1,5 |
| 7 | 6 | 6, | -1,8 |
| 8 | 7 | 7, | -2,1 |
| 9 | 8 | 8, | -2,4 |
| 10 | 9 | 9, | -2,7 |
| 11 | 10 | 10, | -3, |
| * | | | |

c)

Figura 22: Desplazamientos que se realizan en cada paso para los tamaños a) 200 μm , b) 150 μm y c) 100 μm .

4.1.4.5 Cálculo de la fuerza de reacción: Con el software se puede calcular la fuerza de reacción en la cara inferior del cubo debido al desplazamiento gradual aplicado. Como se menciona anteriormente, esta representa la fuerza gradual que se aplicaría en un ensayo de compresión.

Para ello se aplica “Force Reaction” que se encuentra en la sección “Probe” y se ingresan los detalles que se muestran en la figura 23.

| Details of "Force Reaction" | |
|-----------------------------|--------------------------|
| Definition | |
| Type | Force Reaction |
| Location Method | Boundary Condition |
| Boundary Condition | Displacement 2 |
| Orientation | Global Coordinate System |
| Suppressed | No |
| Options | |
| Result Selection | All |
| Display Time | 10, s |

Figura 23: Detalles de la fuerza de reacción.

4.2 Cálculo de propiedades mecánicas de las espumas de Ti

Para calcular el módulo de Young se consideran los estándares ASTM para ensayos mecánicos, donde se desprende la siguiente fórmula para tracción o compresión [40]:

$$E_e = \left(\frac{\Delta_p}{A_0} \right) / \left(\frac{\Delta_c}{L_0} \right) \quad (4.1)$$

El símbolo Δ_p es la fuerza aplicada para deformar el cuerpo, Δ_c corresponde al incremento o disminución del largo de la probeta, A_0 es el área de la sección transversal de esta última y L_0 la longitud original que se comprime o tracciona.

Si esta fórmula es aplicada a la simulación, se obtiene la siguiente igualdad:

$$E_s = \left(\frac{F_r}{A_0}\right) / \left(\frac{\Delta_l}{L_0}\right) \quad (4.2)$$

Donde F_r es la fuerza de reacción en dirección z que se solicita en el punto 4.1.4.5 y Δ_l es el desplazamiento aplicado (3% del largo del cubo). Cabe destacar que en este caso, A_0 es el área de la sección transversal efectiva, es decir, no contempla el área de los poros.

Para las simulaciones, la tensión o esfuerzo (σ) se determina calculando F_r/A_0 , y la deformación como Δ_l/L_0 , luego una forma de llevar a cabo el cálculo la fórmula 4.2 es determinar la pendiente de la zona elástica de las gráficas de esfuerzo vs. deformación resultantes, este valor se estima con el programa Microsoft Excel.

Con el fin de determinar el esfuerzo de fluencia o límite elástico se utiliza un método que requiere de la curva de esfuerzo vs. deformación del ensayo, para aplicarlo se traza encima de esta gráfica una recta con pendiente igual al módulo de Young resultante e intercepto con el eje horizontal igual a 0,002. Luego el Esfuerzo de fluencia será igual al punto de intersección entre la curva y dicha recta. La figura 24 muestra un esquema de lo explicado [41] [42]. Cabe destacar que esta es la misma técnica que se ocupa en las pruebas experimentales del punto 3.6.

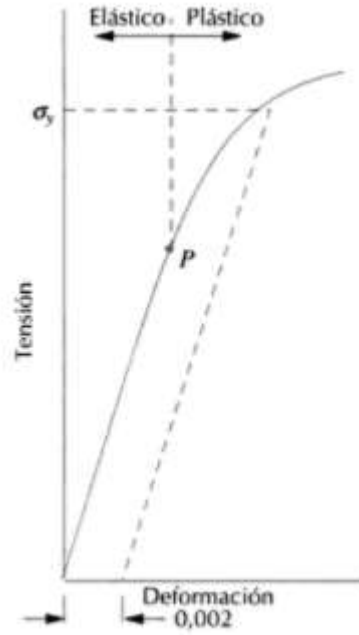


Figura 24: Curva de tracción de un metal con la metodología para determinar el punto de fluencia.

5. Resultados

5.1 Simulaciones

Las simulaciones entregan como resultado las fuerzas de reacción para cada desplazamiento aplicado a las espumas. Como se especifica en el punto 4.1.4.3, el desplazamiento total es del 3% del largo del cubo en dirección z, este se efectúa de forma gradual en 10 pasos y se configura que cada uno de estos tenga 4 interpasos inicialmente, pero si el programa requiere un valor distinto, se establece un rango de 1 a 10 interpasos que pueden realizar. Se entiende por interpaso una fracción de un paso, si un paso tiene “n” interpasos, quiere decir que el paso se efectúa en “n” subpasos.

Por lo tanto, la mayoría de las simulaciones ejecuta un desplazamiento gradual en 40 intervalos (10 pasos con 4 interpasos c/u). En el anexo 10.2 se muestran los resultados de las fuerzas de reacción para las pruebas que se realizan con dicha cantidad.

5.2 Cálculo

Se calculan los esfuerzos y deformaciones con los datos mencionados en el punto anterior (desplazamientos con sus correspondientes fuerzas de reacción). Los resultados numéricos de estos cálculos se muestran en el anexo 10.3, los cuales se clasifican en tablas según tamaño de espuma, morfología de poro y porcentaje de porosidad.

Para facilitar el análisis de estos resultados, a continuación se presentan las curvas de esfuerzo vs. deformación de todas las simulaciones realizadas (Fig. 26-29).

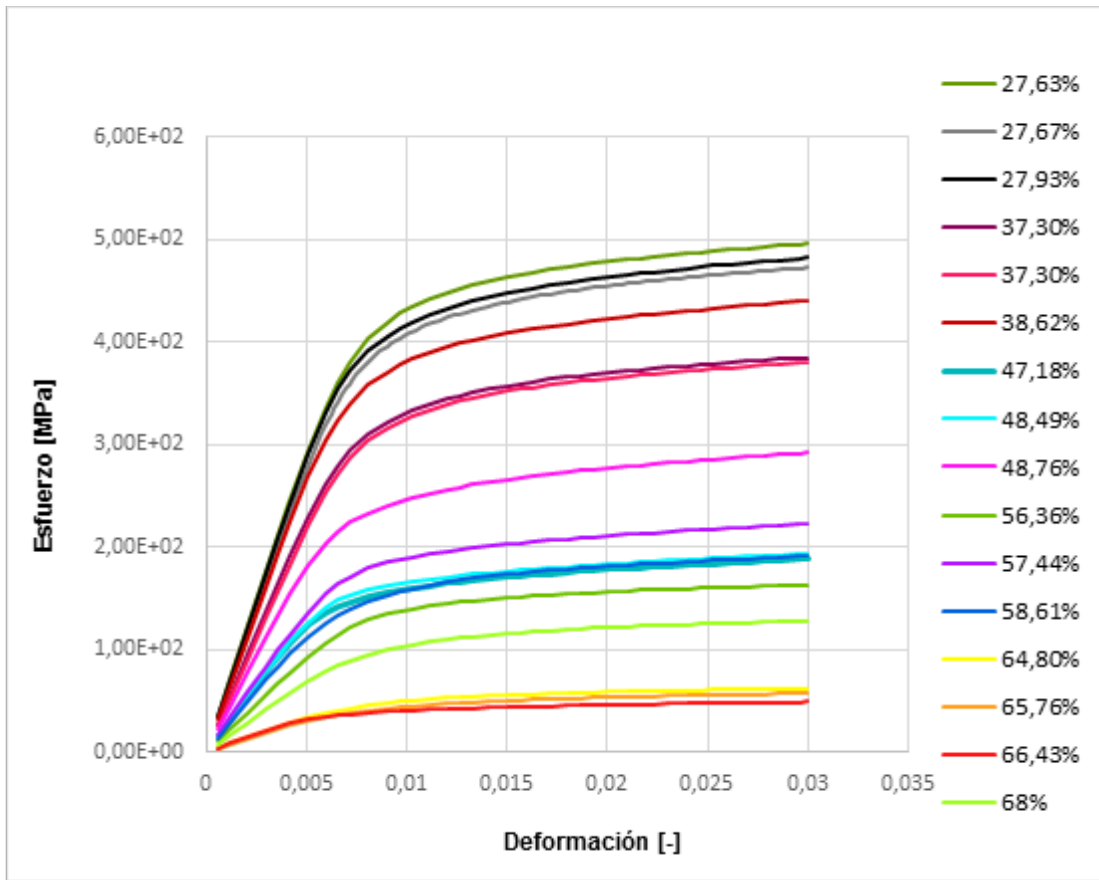


Figura 25: Curvas de Esfuerzo vs. Deformación de las espumas de 100 μm de lado con poros esféricos.

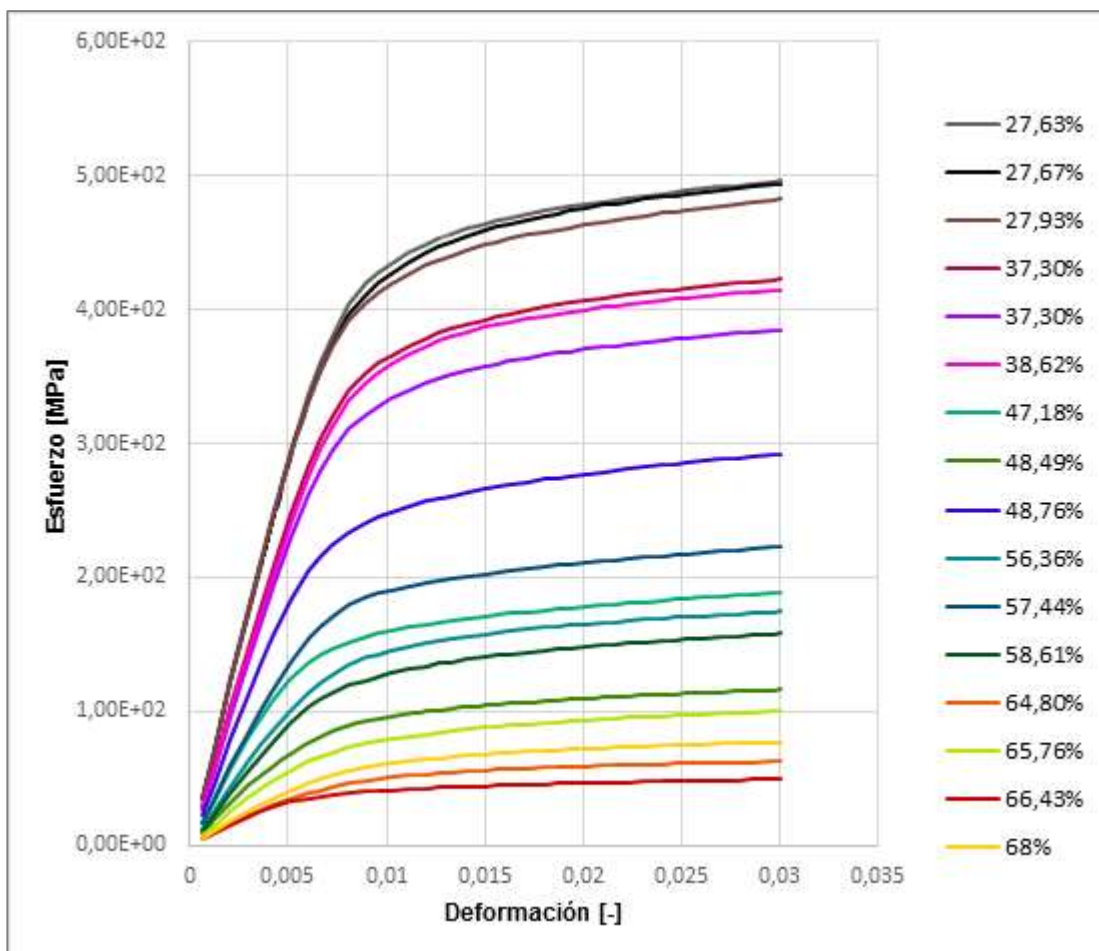


Figura 26: Curvas de Esfuerzo vs. Deformación de las espumas de 150 μm de lado con poros esféricos.

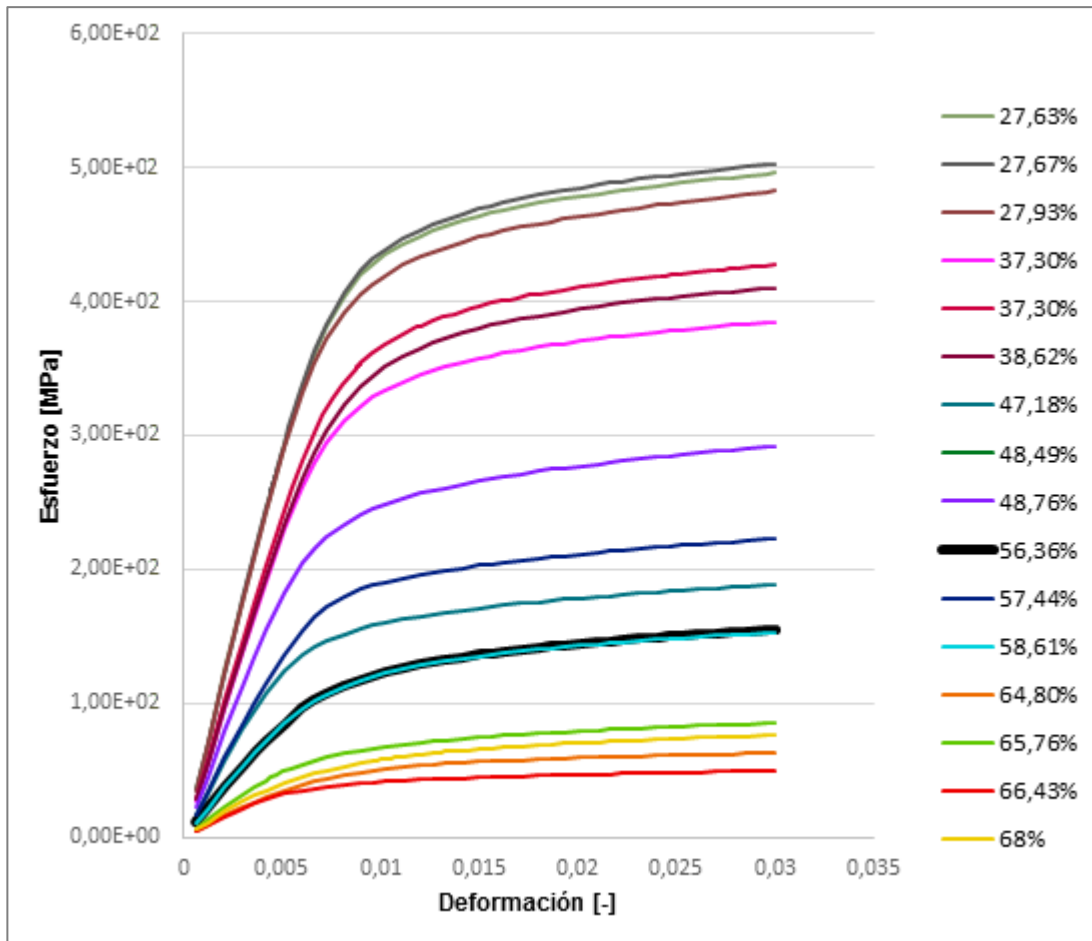


Figura 27: Curvas de Esfuerzo vs. Deformación de las espumas de 200 μm de lado con poros esféricos.

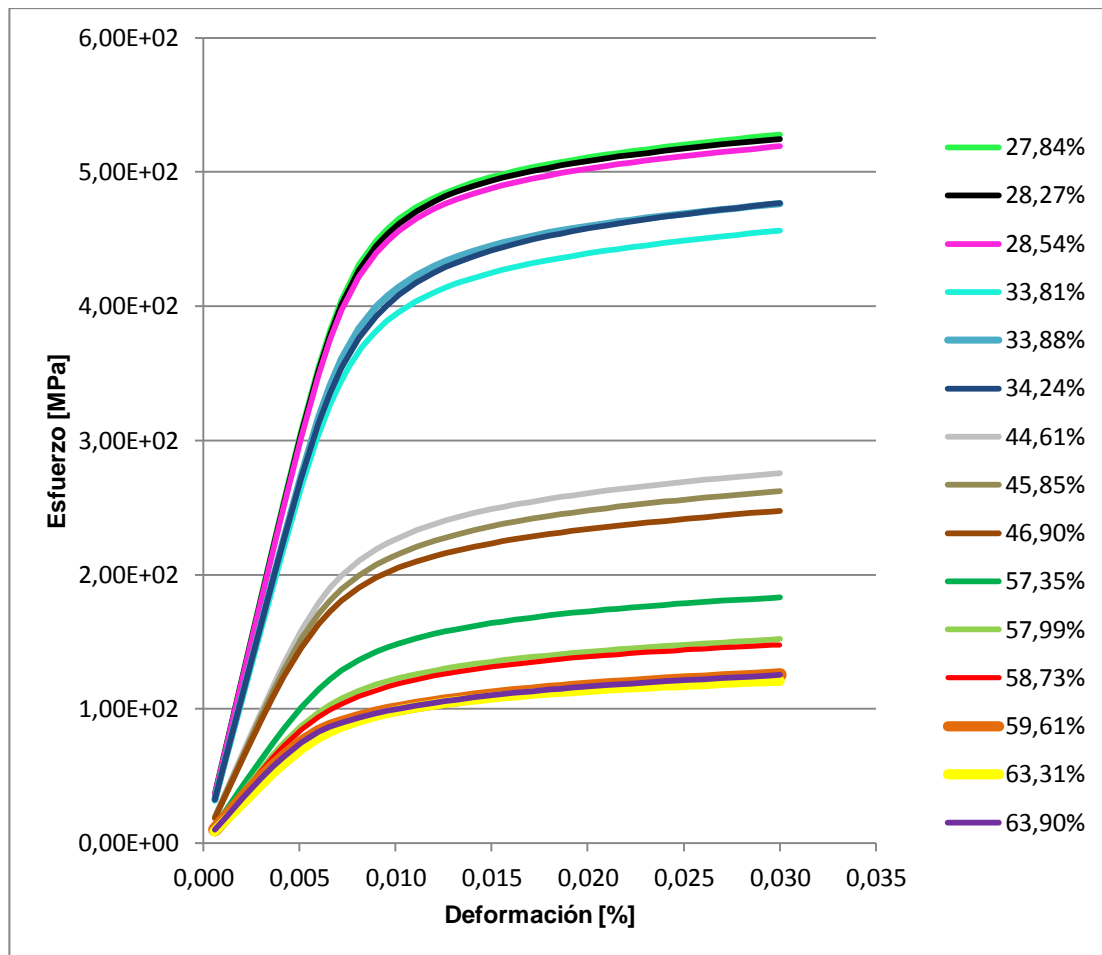


Figura 28: Curvas de Esfuerzo vs. Deformación de las espumas de poros elípticos.

El módulo de Young se estima con el programa Microsoft Excel, usando la función “=PENDIENTE()”. Los resultados numéricos se muestran en las tablas 8 y 9.

Para determinar cómo afecta el tamaño de la geometría en la simulación, en la figura 30 se muestran las distintas relaciones entre porcentaje de porosidad y módulo de Young que resultan de los cubos de 100, 150 y 200 μm . Para un mejor análisis, a estos gráficos se les agrega una correlación lineal de los datos.

De la misma manera se exponen los esfuerzos de fluencia estimados en las tablas 10-11 y en las figuras 32-33.

Por otro lado, para comparar los resultados según el tipo de morfología del poro, se muestra en la figuras 31 y 33 los gráficos de E y Punto de Fluencia vs. porcentaje de porosidad para poros esféricos y elípticos respectivamente. Cabe destacar que en este trabajo se utilizan los resultados de las espumas de 200 μm por lado para comparar este parámetro.

Tabla 8: Módulos de Young de las espumas de poros esféricos.

| | | Módulo de Young [Pa] | | |
|-------------------------------------|---------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| | | 100 μm | 150 μm | 200 μm |
| Tamaño de cubo [μm] | Porosidad [%] | | | |
| | 27,63 | 5,84E+10 | 5,81E+10 | 5,82E+10 |
| | 27,67 | 5,65E+10 | 5,79E+10 | 5,90E+10 |
| | 27,93 | 5,79E+10 | 5,76E+10 | 5,61E+10 |
| | 37,30 | 4,36E+10 | 4,90E+10 | 4,83E+10 |
| | 37,30 | 4,56E+10 | 4,87E+10 | 4,77E+10 |
| | 38,62 | 5,37E+10 | 4,75E+10 | 4,64E+10 |
| | 47,18 | 2,56E+10 | 2,92E+10 | 3,04E+10 |
| | 48,49 | 2,58E+10 | 1,52E+10 | 1,71E+10 |
| | 48,76 | 3,70E+10 | 2,66E+10 | 2,66E+10 |
| | 56,36 | 1,86E+10 | 2,04E+10 | 1,72E+10 |
| | 57,44 | 2,74E+10 | 2,01E+10 | 2,10E+10 |
| | 58,61 | 2,30E+10 | 1,84E+10 | 1,72E+10 |
| | 64,80 | 6,99E+09 | 1,30E+10 | 1,17E+10 |
| | 65,76 | 6,33E+09 | 1,15E+10 | 1,02E+10 |
| | 66,43 | 6,90E+09 | 9,70E+09 | 9,63E+09 |
| | 68,00 | 1,39E+10 | 8,25E+09 | 8,30E+09 |

Tabla 9: Módulos de Young de las espumas de poros elípticos.

| Porosidad [%] | E [Pa] |
|---------------|----------|
| 27,84 | 5,94E+10 |
| 28,27 | 5,89E+10 |
| 28,54 | 5,84E+10 |
| 33,81 | 5,12E+10 |
| 33,88 | 5,31E+10 |
| 34,24 | 5,24E+10 |
| 44,61 | 3,00E+10 |
| 45,85 | 2,87E+10 |
| 46,90 | 2,95E+10 |
| 57,35 | 1,92E+10 |
| 57,99 | 1,63E+10 |
| 58,73 | 1,57E+10 |
| 59,61 | 9,90E+09 |
| 63,31 | 1,32E+10 |
| 63,90 | 1,46E+10 |

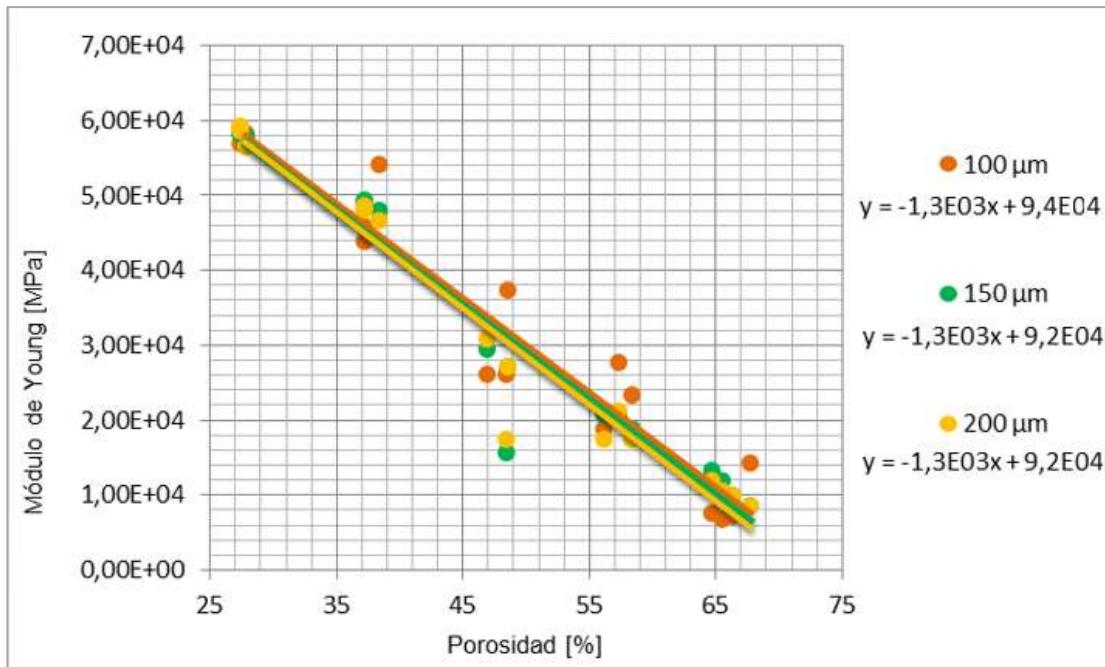


Figura 29: Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de los distintos tamaños de espuma con poros esféricos.

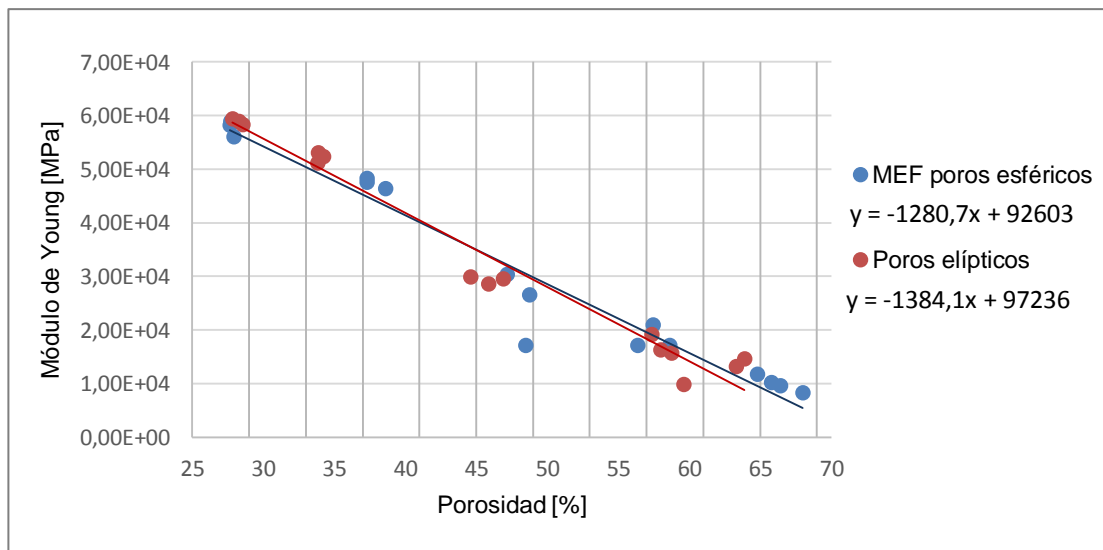


Figura 30: Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de las distintas morfologías de poros.

Tabla 10: Esfuerzo de fluencia de las espumas de poros esféricos.

| | | Esfuerzo de Fluencia [Pa] | | |
|--------------------|---------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| | | 100 μm | 150 μm | 200 μm |
| Tamaño de cubo[mm] | Porosidad [%] | | | |
| | 27,63 | 4,20E+08 | 4,11E+08 | 4,12E+08 |
| | 27,67 | 3,99E+08 | 4,12E+08 | 4,23E+08 |
| | 27,93 | 4,05E+08 | 4,12E+08 | 3,94E+08 |
| | 37,3 | 3,16E+08 | 3,53E+08 | 3,54E+08 |
| | 37,3 | 3,22E+08 | 3,48E+08 | 3,42E+08 |
| | 38,62 | 3,71E+08 | 3,53E+08 | 3,37E+08 |
| | 47,18 | 1,52E+08 | 1,96E+08 | 2,08E+08 |
| | 48,49 | 1,59E+08 | 8,82E+07 | 1,18E+08 |
| | 48,76 | 2,34E+08 | 1,65E+08 | 1,77E+08 |
| | 56,36 | 1,35E+08 | 1,40E+08 | 1,18E+08 |
| | 57,44 | 1,85E+08 | 1,36E+08 | 1,56E+08 |
| | 58,61 | 1,54E+08 | 1,24E+08 | 1,17E+08 |
| | 64,8 | 4,83E+07 | 8,70E+07 | 7,95E+07 |
| | 65,76 | 4,28E+07 | 7,60E+07 | 6,49E+07 |
| | 66,43 | 3,74E+07 | 5,93E+07 | 6,11E+07 |
| | 68 | 1,00E+08 | 5,82E+07 | 5,53E+07 |

Tabla 11: Esfuerzo de fluencia de las espumas de poros elípticos.

| Porosidad [%] | Esfuerzo de Fluencia [MPa] |
|---------------|----------------------------|
| 27,84 | 448,85 |
| 28,27 | 444,75 |
| 28,54 | 439,63 |
| 33,81 | 389,43 |
| 33,88 | 399,40 |
| 34,24 | 401,20 |
| 44,61 | 218,85 |
| 45,85 | 207,28 |
| 46,90 | 145,80 |
| 57,35 | 145,80 |
| 57,99 | 118,09 |
| 58,73 | 114,00 |
| 59,61 | 93,64 |
| 63,31 | 95,16 |
| 63,90 | 93,64 |

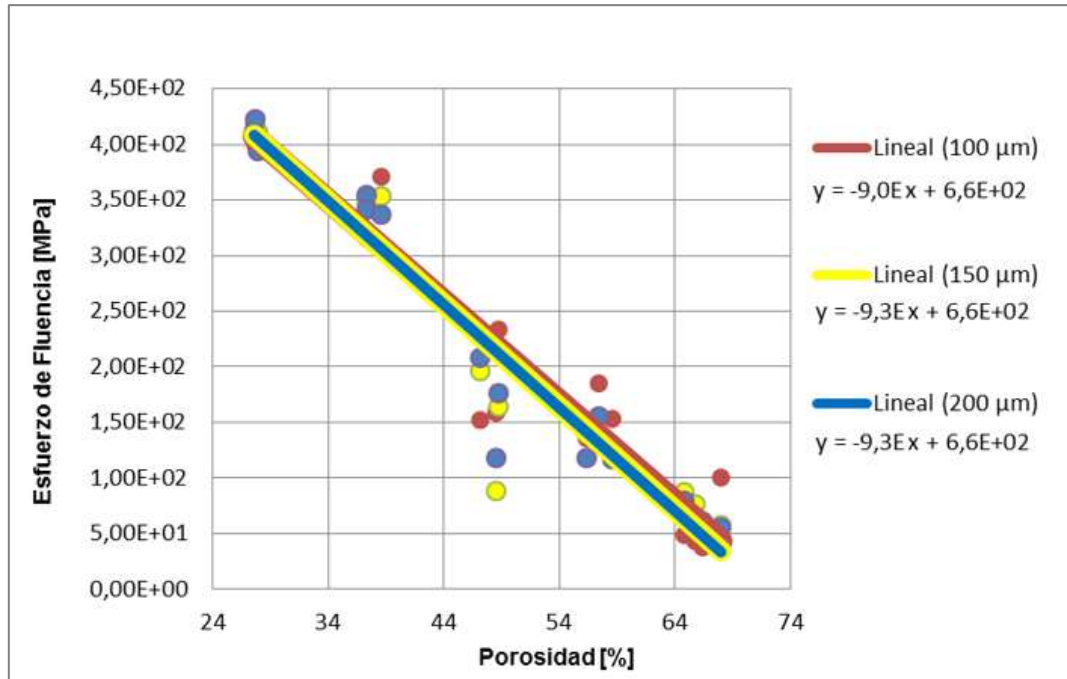


Figura 31: Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad de los distintos tamaños de espuma con poros esféricos.

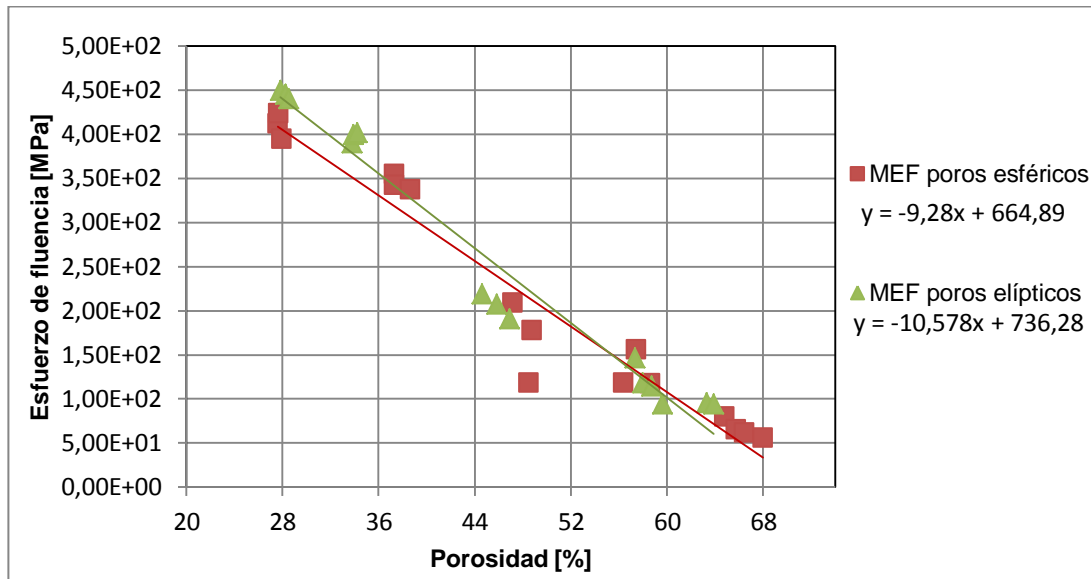


Figura 32: Gráfica del módulo de Young vs. Porcentaje de porosidad para espuma con distintas morfologías.

6. Análisis de los resultados

Los resultados de las simulaciones indican que a medida que aumenta gradualmente el desplazamiento, a su vez también lo hace la fuerza de reacción. Este resultado tiene directa relación con las curvas de esfuerzo vs. deformación de las figuras 26-29, ya que en este caso, el esfuerzo es la fuerza dividido en una constante y la deformación es la división entre el desplazamiento y otra constante. Por esta razón, al igual que la relación entre la fuerza y el desplazamiento, al incrementar el esfuerzo aumenta la deformación, lo cual es coherente con la teoría expuesta en el punto 3.1.

De las curvas esfuerzo vs. deformación se puede observar que al aumentar el porcentaje porosidad disminuye el esfuerzo de fluencia, la resistencia máxima y el módulo de Young. Esto es debido al aumento de concentración de tensiones alrededor de los poros y los defectos estructurales que se generan (superficies muy irregulares), lo cual se incrementa considerablemente cuando los poros se acoplan parcialmente [43] [44]. Por lo tanto mientras más poros tenga la espuma, menores son las propiedades mecánicas mencionadas.

Estos análisis son vistos de manera general, porque si se analizan aquellas curvas que estén muy cerca una de la otra, puede que no se cumplan estas relaciones, por ejemplo, en la figura 26 la espuma de 27.67% tiene menor módulo de Young, esfuerzo de fluencia y resistencia máxima que la de porosidad 27.93%, esto puede deberse a errores que se generan en la simulación, ya que la mayoría de las curvas siguen lo contrario.

La relación entre el módulo de Young y el porcentaje de porosidad se comprueba firmemente con las figuras 30 y 31, pues en ellas se nota claramente una tendencia inversamente proporcional.

Se puede observar que todos los análisis anteriores se cumplen para los tres tamaños de geometría, esto también se corrobora con las figuras 30 y 32. De la primera se puede determinar que el tamaño de la geometría no influye en los resultados del módulo de Young, pues todas las correlaciones lineales coinciden en exactamente la misma pendiente y en interceptos similares, estos últimos son iguales a $9,2E4$ MPa en los cubos de 200 y $150\mu\text{m}$ de lado, y $9,4E4$ MPa en las espumas de $100\mu\text{m}$.

De la figura 32 se puede deducir que el tamaño tampoco afecta a los esfuerzos de fluencia resultantes, pues en el caso de los poros esféricos, al realizar una correlación lineal entre el punto de fluencia y el porcentaje de porosidad, se llega a rectas con igual intercepto y aproximadamente igual pendiente.

En las simulaciones realizadas, la morfología de los poros influye muy levemente en las propiedades mecánicas de las espumas de Ti. La pendiente de la correlación lineal de la relación módulo de Young vs. porosidad de las espumas con poros esféricos difieren en un 7.5% de los poros elípticos, en el intercepto la diferencia es de un 4.8%. Siguiendo el mismo análisis con el esfuerzo de fluencia, las pendientes varían en un 12.3% y el intercepto en un 9.7%. Se deduce que mientras más aplanado sea el poro, es decir, mientras más elevado sea el factor de elongación, mayor es la pendiente de ambos gráficos descritos. Sin embargo, para lograr cambios significativos, es posible que se deba variar más aun el factor de elongación de las espumas o cambiar la distribución de probabilidad de este parámetro.

En cuanto a utilizar las espumas de titanio en prótesis que reemplazan material óseo, esta sigue siendo una opción favorable que puede reducir e incluso eliminar el apantallamiento de tensiones, puesto que los módulo de Young de algunas espumas logran semejarse a los módulos de los huesos.

Más específicamente el valor del módulo de Young del hueso cortical en un ensayo de compresión varía entre 14,7 y 34,3 GPa (Tabla 1), las espumas simuladas de poros esféricos que poseen un módulo de Young dentro de ese rango son las que tienen un porcentaje de porosidad entre 47,18% y 58,61%. Si se realiza una interpolación con las correlaciones dadas se puede llegar a que las porosidades debieran estar aproximadamente entre 44% y 59%. En el caso de las espumas elípticas, si se hace la interpolación, debiera usarse una porosidad entre 45% y 60%.

En cambio, el hueso trabecular posee un módulo de Young igual a 1 Gpa. Las espumas de poros esféricos que presentan un valor similar son aquellas que tienen una porosidad de 72% aproximadamente, y para espumas con poros elípticos, la porosidad es de 70%.

Otra característica que deben cumplir las espumas para esta aplicación es que su esfuerzo de fluencia no debe ser menor al del hueso, ya que si esto ocurre, cuando se aplique un esfuerzo que sobrepase el punto de fluencia de la prótesis, esta puede deformarse antes que el tejido óseo, lo que haría perder su efectividad.

Las espumas que se recomiendan para el hueso trabecular no cumplen con dicho criterio, puesto que poseen un esfuerzo de fluencia menor a 50 Mpa. En el caso del hueso cortical, el esfuerzo de fluencia mínimo requerido es de 150 MPa, las espumas que superan este valor son aquellas que no sobrepasan el 55% de porosidad.

Cabe destacar que estas correlaciones lineales son aproximaciones. Para concretar su fiabilidad se puede analizar el coeficiente de determinación (R^2), este último es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearsen, el cual mide el grado de asociación entre dos variables.

R^2 va entre 0 y 100%, mientras más alto sea el coeficiente, más se ajustan los valores a la correlación lineal [45]. La tabla 23 muestra el R^2 de las correlaciones de las figuras 30-33, dichos valores son muy cercanos al 100%, por lo tanto es posible confiar en estos resultados.

Tabla 12: Coeficientes de determinación de las correlaciones lineales

| R^2 [%] | Módulo de Young | Punto de fluencia |
|-----------------|-----------------|-------------------|
| Poros elípticos | 97,76 | 96,97 |
| Poros esféricos | 95,12 | 94,35 |

Como se menciona anteriormente, las espumas de poros elípticos que son simuladas en Ansys mantienen la morfología de las muestras ensayadas experimentalmente, las cuales se exponen en el apartado 3.6. A través de las figuras 34 y 35 es posible comparar los resultados de dichas pruebas.

Se aprecia que existe una fuerte similitud entre las relaciones de módulo de Young y porosidad obtenidas de las pruebas de ultrasonido y las simulaciones (figura 34), a diferencia de los ensayos de compresión, los cuales presentan módulos de Young más bajos. Lo anterior calza con lo expresado en el punto 3.6 respecto de la certeza que tienen las pruebas de ultrasonido frente a los ensayos de compresión.

De la figura 34 se aprecia que la relación entre porcentaje de porosidad y esfuerzo de fluencia no es similar en las pruebas experimentales y las simulaciones, las diferencias pueden deberse a los errores experimentales de un ensayo de compresión antes mencionados.

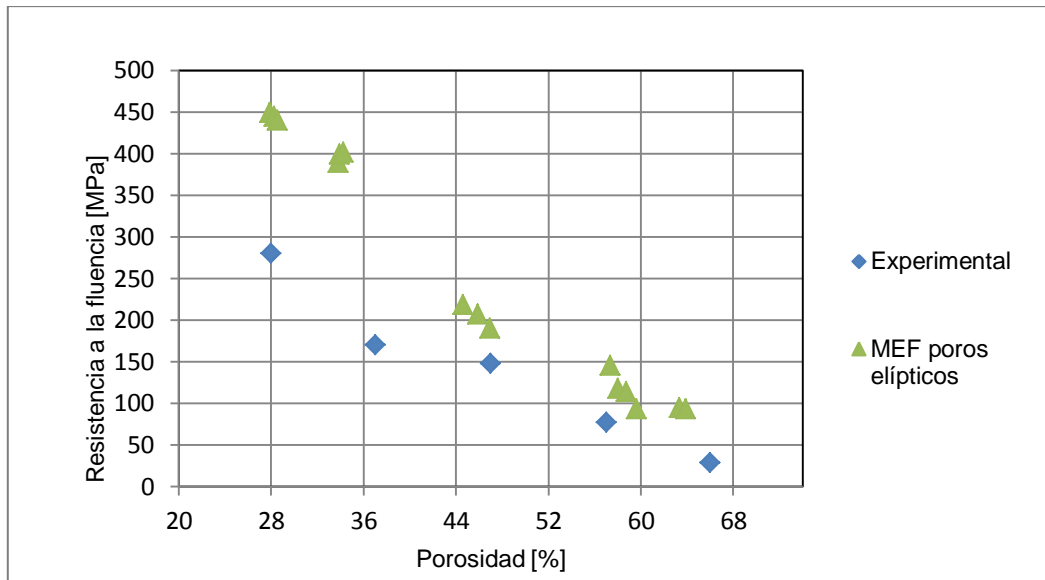


Figura 33: Resistencia a la fluencia vs. Porosidad de Espumas con poros elípticos con MEF y ensayo de compresión.

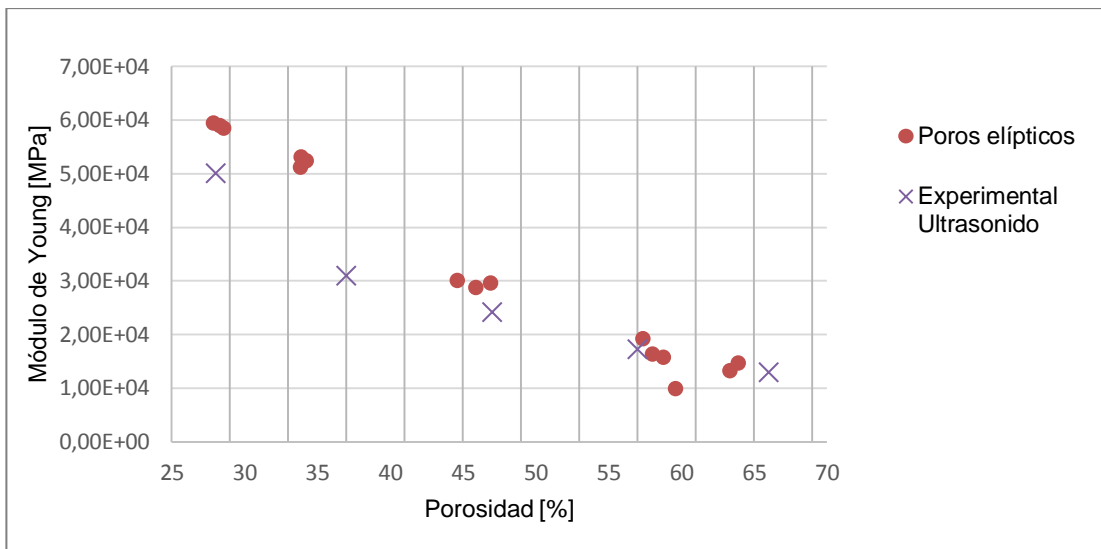


Figura 34: módulo de Young vs. Porosidad de Espumas con poros elípticos con MEF y ensayo de compresión.

7. Conclusiones

Se logra una determinación numérica de las propiedades mecánicas de las espumas de titanio, por medio de simulaciones de ensayos de compresión en el software comercial de Elementos finitos “Ansys Workbench”. Además, lo anterior se realiza variando el tamaño, porcentaje de porosidad y morfología de los poros de las espumas, con el objetivo de ver cómo influyen estos parámetros en los resultados.

Se verifica que las modelaciones en las simulaciones sean eficaces a través del mallado, ya que se comprueba que la calidad de malla es aceptable según los parámetros: calidad de elemento, relación de aspecto, asimetría y calidad ortogonal.

Se llega a que el tamaño de la geometría no afecta significativamente en las simulaciones, pues en los cubos de 100, 150 y 200 mm de lado se obtuvieron correlaciones lineales de módulo de Young vs. porosidad y esfuerzo de fluencia vs. porosidad muy similares.

La morfología de los poros influye levemente en los resultados de las simulaciones. Se deduce que a mayor factor de elongación, mayor pendiente de las correlaciones lineales de Módulo de Young y esfuerzo de fluencia vs. porosidad. Sin embargo, para lograr cambios significativos es posible que se tenga que hacer modificaciones en el factor de elongación o su distribución.

En todas las pruebas se corrobora que al aumentar el porcentaje de porosidad, disminuye el módulo de Young y el esfuerzo de fluencia. Estas relaciones son lineales, y el cómo se ajustan los valores a las correlaciones lineales se puede deducir conociendo el coeficiente de determinación, el cual es cercano al 100% en todos los casos, por lo tanto, dichas correlaciones son confiables.

Las simulaciones resultaron efectivas, esto se pudo corroborar al comparar las correlaciones lineales de los gráficos de módulo de Young vs. porosidad obtenidos de las pruebas de ultrasonido expuestas en el punto 3.6 y las simulaciones con espumas de poros elípticos. En tales pruebas se ocuparon las mismas propiedades del material base, condiciones de contorno y morfología de los poros.

En cambio, la correlación lineal de Esfuerzo de fluencia vs. Porosidad de las simulaciones, sólo tiene el mismo orden de magnitud que la correlación obtenida experimentalmente, pero no se asemejan. Esto puede deberse a los errores experimentales que suelen presentarse en un ensayo de compresión.

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.
- En la simulación se aproximaron las propiedades del material base a partir del modelo bilineal con endurecimiento por deformación, esto puede ser una causa de la falta de exactitud de los resultados.
- 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.

Las espumas que se recomiendan para reemplazar el hueso cortical, en el caso de aquellas con poros esféricos, son las que poseen una porosidad entre 44% y 55%. En cambio, las de poros elípticos deben estar en un rango de 45% a 55% de porosidad. En el caso del hueso trabecular, las espumas simuladas no cumplen con los requerimientos para poder reemplazar este tejido.

Cabe recordar que las propiedades mecánicas del hueso dependen de la persona, estas varían según edad, sexo, genética, etc. Así que para escoger las espumas adecuadas para cada tejido óseo se consideró un promedio de estos valores.

Se infiere que Ansys es una plataforma muy eficiente para trabajar con el MEF, ya que aunque se utilicen geometrías muy complejas, el programa da resultados muy coherentes. Con esta herramienta se logra conseguir un alto ahorro de costos asociados a experimentar con espumas, comprendiendo elaboración y pruebas. Sin embargo, el software necesita de un equipo computacional avanzado.

8. Trabajos futuros

Simular con el MEF ensayos de compresión de prótesis porosas de Ti, usando como geometría la forma de huesos específicos. También realizar ensayos experimentales con las mismas condiciones simuladas para comparar los resultados.

Realizar este mismo estudio pero con distintas distribuciones de probabilidad para la posición de los poros.

9. Bibliografía

- [1] MIKELL, P. Groover. Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. 1a. ed. México, Prentice-Hall, 1997.
- [2] KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven R. Manufactura, ingeniería y tecnología. 4a. ed. México, Pearson Education, 2002.
- [3] FERNANDEZ P., CRUZ L. J. y COLETO J. Procesos de fabricación de metales celulares: Parte II: Vía sólida, deposición de metales, otros procesos. Revista de metalurgia, (45): 124-142, 2009.
- [4] ANGLADA, M. J. y LLANES, L. M. Fractura de materiales. 1a. ed. Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, 2002.
- [5] DALMAU M. y VILARDELL J. Análisis plástico de estructuras. Introducción. 1a. ed. Barcelona, Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.
- [6] RODRÍGUEZ, Mario Pinto. Anatomía fisiología e higiene. 1a. ed. México, Editorial Progreso, S.A. de C.V., 2005.
- [7] MERÍ, Àlex Vived. Fundamentos de fisiología de la actividad física y el deporte. 1a. ed. España, Médica Panamericana, 2005.
- [8] Neil E. Green, Marc F. Swionkowski. Traumatismo esquelético en niños. 2ª. ed. Argentina, Editorial Médica Panamericana, 2000.
- [9] FALLER, Adolf y SCHÜNKE, Michael. Estructura y función del cuerpo humano. 1a. ed. España, Paidotribo, 2006.
- [10] What Happens During a Bone Marrow Transplant? Revista NIH Medline plus, 6(2): 15.

- [11] José R y Jorge R. Osteoporosis: Fisiopatología, diagnóstico, prevención y tratamiento. 1ª. ed. Argentina, Editorial Médica Panamericana S.A, 2001.
- [12] ON the influence of space holder in the development of porous titanium implants: Mechanical, computational and biological evaluation por Muñoz S. [et al]. *Materials Characterization*, 108: 68–78, 2015.
- [13] BLACK J. y HASTINGS G. *Handbook of Biomaterials Properties*. 2a. ed. E.E.U.U, Springer, 2012.
- [14] CAEIRO J. R. GONZÁLEZ P y GUEDE D. Biomecánica y hueso (y II): Ensayos en los distintos niveles jerárquicos del hueso y técnicas alternativas para la determinación de la resistencia ósea. *Revista Osteoporosis y Metabolismo Mineral*, 5(2): 99-108, 2013.
- [15] CARACTERIZACIÓN mecánica del material óseo por Rincón, E. Rincón [et al]. *Revista Tecnología y desarrollo*, 2, 2014.
- [16] ANISOTROPY of the elastic modulus of trabecular bone specimens from different anatomical locations por P. Augat [et al]. *Revista Medical Engineering & Physics*, 20 (2): 124-131, 1998.
- [17] SANTIS, Augusto Javie. *Análisis de fallos en sistemas aeronáuticos*. 1ª. ed. España, Paraninfo, 2015.
- [18] GONZÁLEZ, Leonardo. Trabajo de investigación bibliográfica estructura y propiedades de fatiga del titanio y sus aleaciones usadas como biomateriales. *Revista Universidad, Ciencia y Tecnología*, 17 (67): 92-108, 2013.
- [19] HANS, Rudolf Christen. *Fundamentos de la química general e inorgánica*, Volumen I. 1ª. ed. España, Reverté, 1977.

- [20] FOLGUERAS, José Méndez. V Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2011 May 16-21, 2011, Habana, Cuba. Cuba, Sustainable Technologies for the Health of All, 2012.
- [21] GUTIÉRREZ, J. A. y VÁZQUEZ, J. Oñoro. Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. *Revista de Metalurgia*, 44(5), 2008.
- [22] IRAUSQUÍN I. Caracterización Mecánica de Espumas Metálicas y su Aplicación en Sistemas de Absorción de Energía. Tesis (Doctoral). Madrid. Universidad Carlos III, Departamento de mecánica de medios continuos, 2012.
- [23] JARILLO, Julián. Modelización del comportamiento mecánico de una espuma metálica. Tesis (Ing. Industrial). España. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de mecánica de medios continuos, 2009.
- [24] DEM–FEA estimation of pores arrangement effect on the compressive Young's modulus for Mg foams por L. Pérez [et al]. *Computational Materials Science*, 110: 281-286, 2015.
- [25] SIMPLIFIED fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy *Materials & Design* por L. Pérez [et al]. Elsevier, 83: 276-283, 2015.
- [26] DESIGNING, processing and characterisation of titanium cylinders with graded porosity: An alternative to stress-shielding solutions por Y. Torres [et al]. *Materials and Design*, 63: 316–324, 2014.
- [27] TORRES, Y., RODRÍGUEZ, J.A. y ARIAS, S. Processing, characterization and biological testing of porous titanium obtained by space-holder technique. *J Mater Sci*, 47(18): 6565-6576, 2012.

- [28] THE effect of pore structure on the mechanical properties of titanium scaffolds por Khodaeia Mohammad. *Materials Letters*, 171: 308–311, 2016.
- [29] CERROLAZA, Miguel. *El método de elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas*. 1a. ed. Venezuela, Universidad central de Venezuela, 2007.
- [30] ZIENKIEWICZ, O. C. y TAYLOR, R. L. *El Método de los Elementos Finito*. 4a. ed. España, McGraw-Hill y CIMNE, 2007.
- [31] MASSA J., GIRÓ J. y GIUDICI A. *Compendio de Cálculo Estructural II*. 1a. ed. Argentina, FCEFyN y UNC, 2015.
- [32] ANSYS, Inc (2012). *Ansys Meshing User's Guide Rel. 14.5*. Ansys, Inc.
- [33] ACOUSTICAL and Poromechanical Characterisation of Titanium Scaffolds for Biomedical Applications por H. W. Müllner [et al]. *Strain*, 44 (2): 131–211, 2008.
- [34] TORRES Y., PAVÓN J.J. y RODRÍGUEZ J.A. Processing and characterization of porous titanium for implants by using NaCl as space holder. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(5): 1061–1069, 2012.
- [35] KUMARA, P. Kirana. Demonstrating the Usefulness of Caelinux for Computer Aided Engineering using an Example of the Three Dimensional Reconstruction of a Pig Liver. *International Journal of Advancements in Technology*, 3(4), 301-309, 2012.
- [36] RODDEN, W. P., y JOHNSON, E. H. *MSC/NASTRAN aeroelastic analysis: user's guide; Version 68*. MacNeal-Schwendler Corporation, 1994.
- [37] SOLIDWORKS, I. Solidworks Corporation. Concord, MA, 2002.

- [38] HIBBETT, KARLSSON y SORENSEN. ABAQUS/standard: User's Manual (Vol. 1). Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 1998.
- [39] TEJEIRO, J. M. Sobre la teoría especial de la Relatividad. 1a. ed. Colombia, Univ. Nacional de Colombia, 2005.
- [40] ASTM international. Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminium Alloy Products. ASTM international, E.E.U.U, 2014.
- [41] CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, Volume I. 1a. ed. España, Reverté, 2007.
- [42] ASHBY, Michael F. y JONES, David R. Materiales para ingeniería 1. 1a. ed. España, Reverté, 2008.
- [43] GUTIÉRREZ, J.A., VÁZQUEZ y OÑORO J. Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. Revista de metalurgia Universidad Politécnica de Madrid, 44(4), 2008.
- [44] CASTILLO, Sandra. Diferentes modelos para la simulación del comportamiento mecánico del Titanio poroso. Tesis (Ingeniería de las tecnologías industriales). Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, departamento de ingeniería y ciencia de los materiales y del transporte, 2015.
- [44] CALDERON, Jully y GODOS, Luis. Estadística Para la Tesis de Postgrado. 1a. ed. Lima, LULU Internacional, 2011.

10. Anexos

10.1 Mallado

a) Espuma de 200 μm , poros esféricos y 58,61% de porosidad.

Tabla 13: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de los elementos del mallado de la espuma a)

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 5,95E-4 | 1,21 | 9,93E-3 | 2,03E-3 |
| Valor Máximo | 0,99 | 1175 | 1,00 | 0,99 |
| Promedio | 0,53 | 3,2 | 0,47 | 0,70 |
| Desviación estándar | 0,21 | 12,8 | 0,25 | 0,18 |

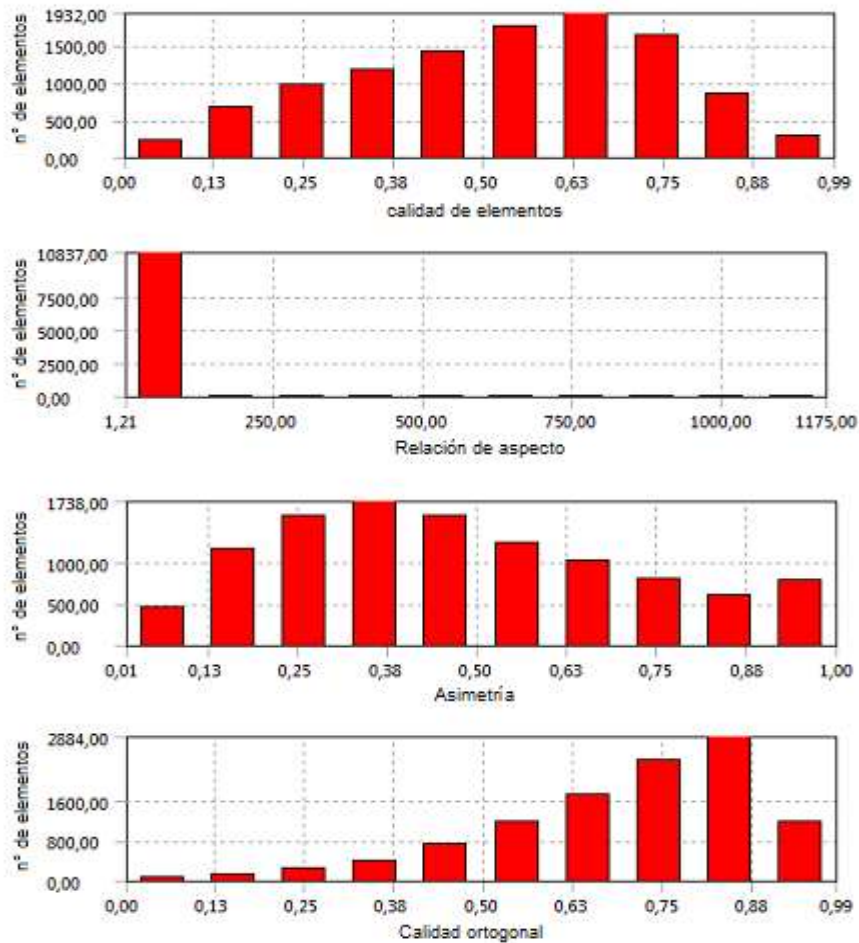


Figura 35: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma a)

b) Espuma de 200 μm , poros esféricos y 48,49% de porosidad.

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

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 2,71E-3 | 1,21 | 8,67E-3 | 1,78E-2 |
| Valor Máximo | 0,98 | 375,04 | 1 | 0,99 |
| Promedio | 0,53 | 3,01 | 0,47 | 0,70 |
| Desviación estándar | 0,2 | 5,89 | 0,23 | 0,17 |

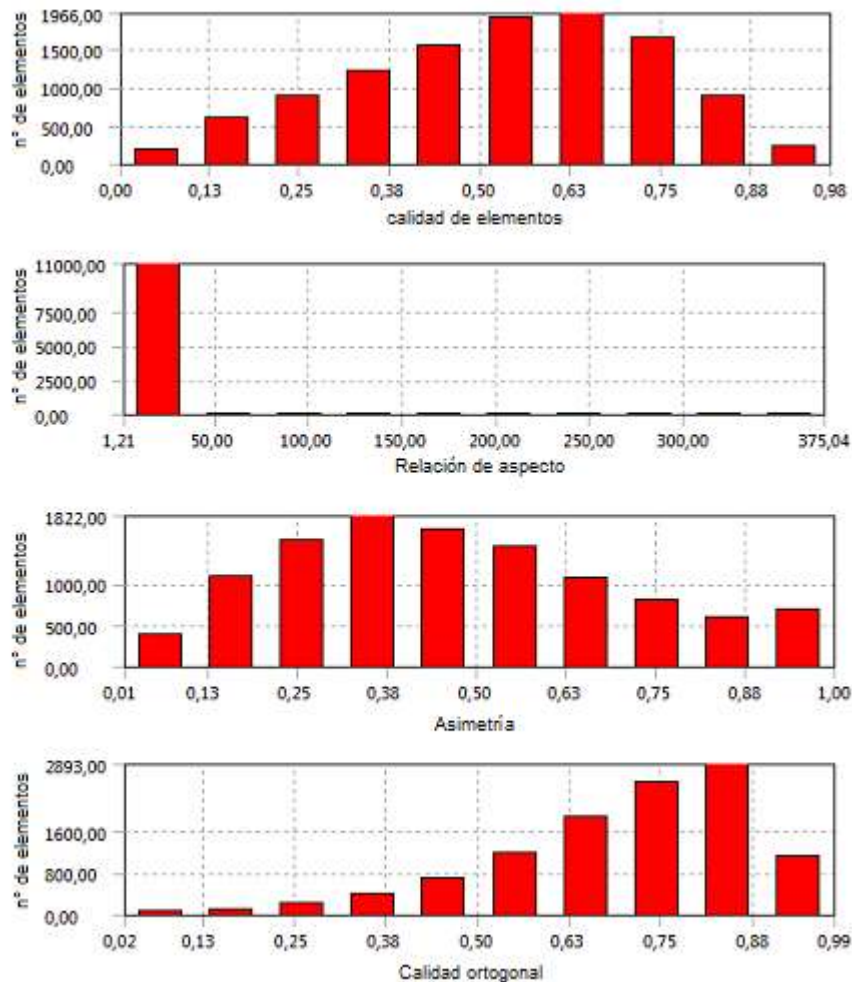


Figura 36: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma b).

c) Espuma de 150 μm , poros esféricos y 65,76% de porosidad.

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

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 1,62E-2 | 1,21 | 8,84E-3 | 1,61E-2 |
| Valor Máximo | 0,98 | 133,18 | 1 | 0,98 |
| Promedio | 0,56 | 3,11 | 0,47 | 0,71 |
| Desviación estándar | 0,21 | 4 | 0,25 | 0,19 |

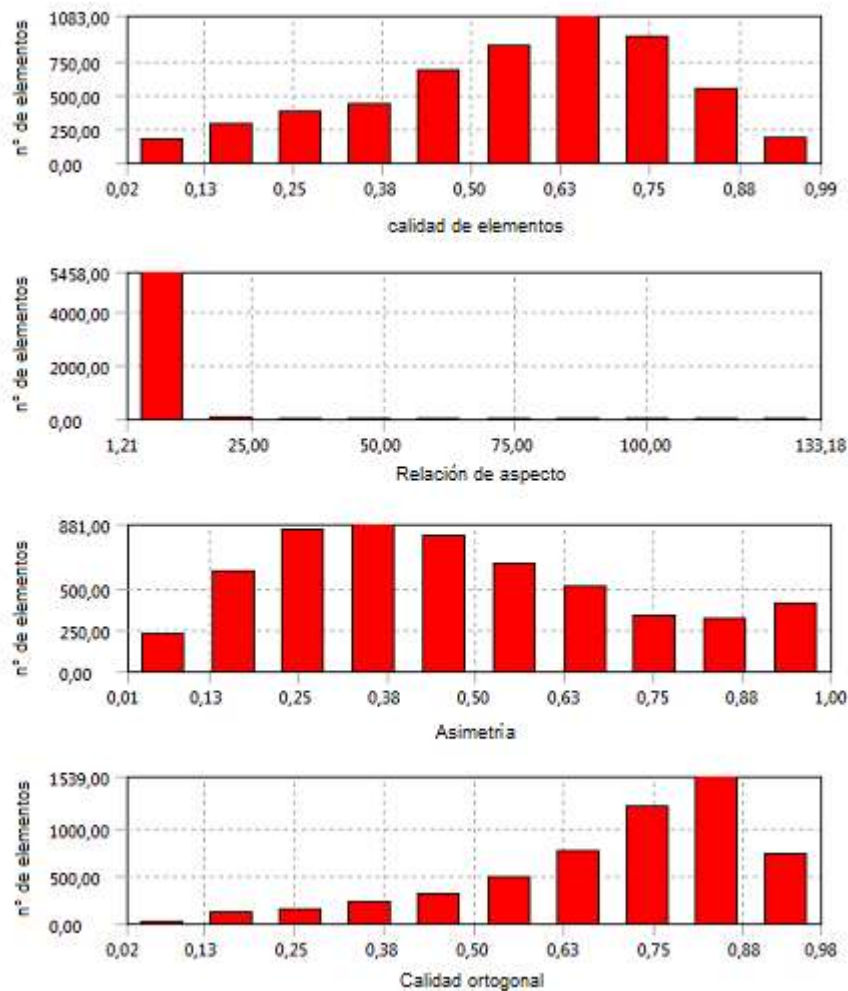


Figura 37: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma c).

d) Espuma de 150 μm , poros esféricos y 38,62% de porosidad.

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

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 1,96E-2 | 1,19 | 3,04E-3 | 3,35E-2 |
| Valor Máximo | 1 | 78,3 | 1 | 0,98 |
| Promedio | 0,58 | 2,8 | 0,45 | 0,71 |
| Desviación estándar | 0,20 | 2,48 | 0,24 | 0,17 |

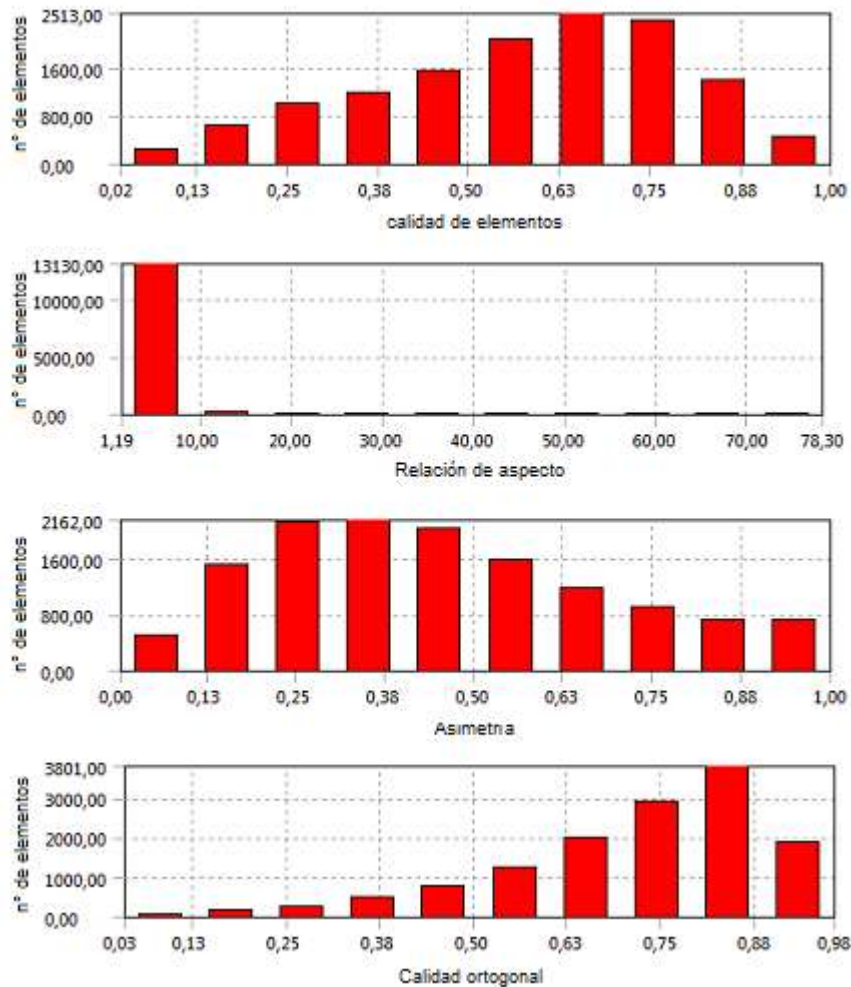


Figura 38: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma d).

e) Espuma de 100 μm , poros esféricos y 37,3% de porosidad.

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

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 2,09 | 1,21 | 9,98E-3 | 6,44E-3 |
| Valor Máximo | 0,99 | 414,03 | 1 | 0,98 |
| Promedio | 0,63 | 2,96 | 0,42 | 0,74 |
| Desviación estándar | 0,20 | 8,31 | 0,23 | 0,17 |

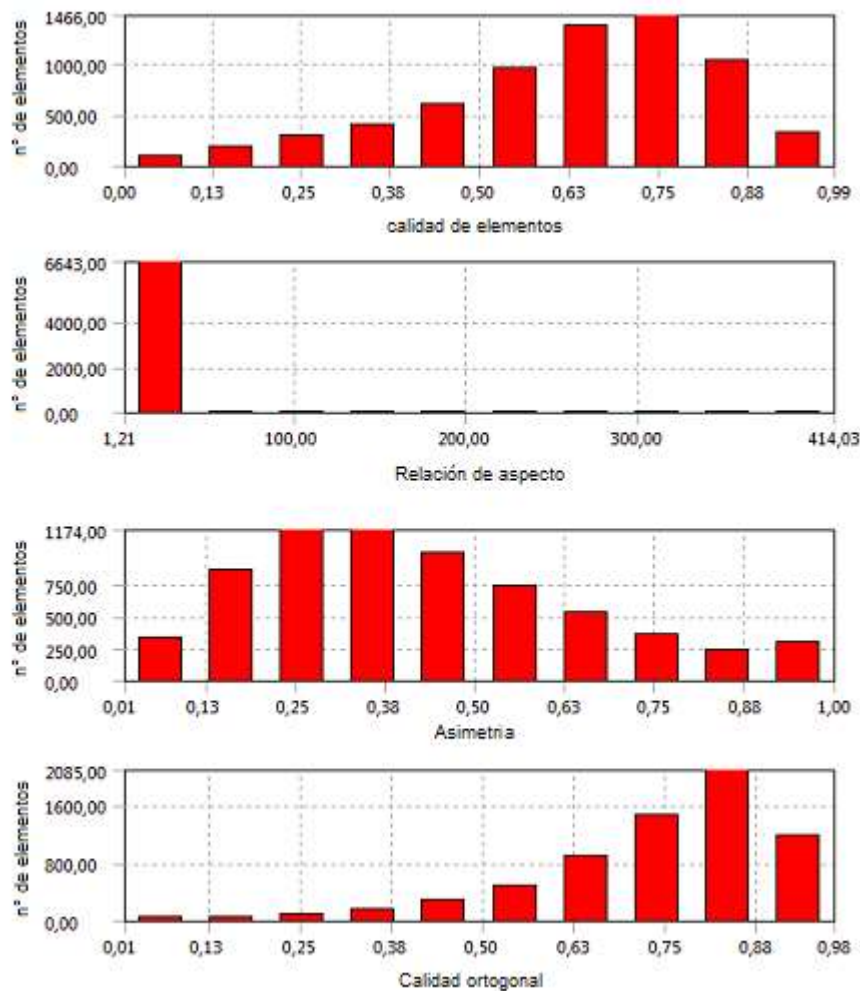


Figura 39: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma e).

f) Espuma de 100 μm , poros esféricos y 27,67% de porosidad.

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

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 4,41E-4 | 1,20 | 5,43E-3 | 7,98E-4 |
| Valor Máximo | 0,99 | 36775 | 1 | 0,99 |
| Promedio | 0,61 | 8,17 | 0,43 | 0,73 |
| Desviación estándar | 0,21 | 308,39 | 9,23 | 0,18 |

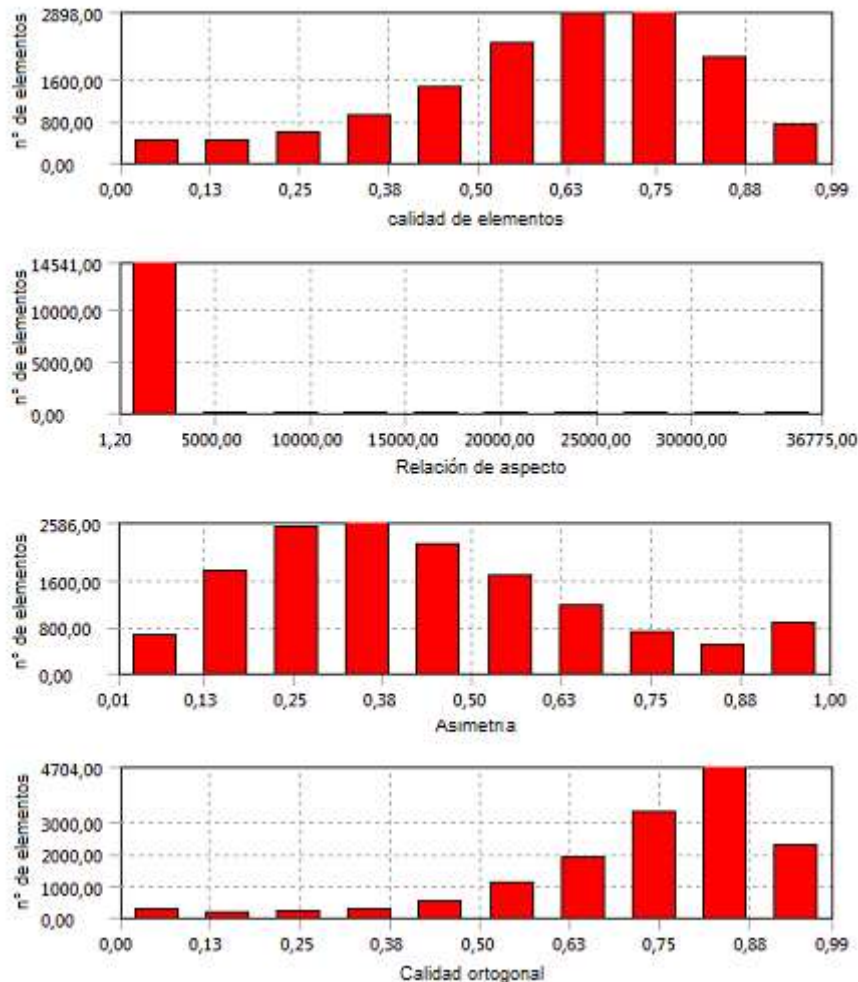


Figura 40: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma f).

g) Espumas de poros elípticos con 27,84% de porosidad.

Tabla 19: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma g).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 3,13E-2 | 1,19 | 7,26E-3 | 9,83E-2 |
| Valor Máximo | 0,99 | 29,26 | 0,93 | 0,98 |
| Promedio | 0,67 | 2,27 | 0,35 | 0,77 |
| Desviación estándar | 0,19 | 0,94 | 0,21 | 0,14 |

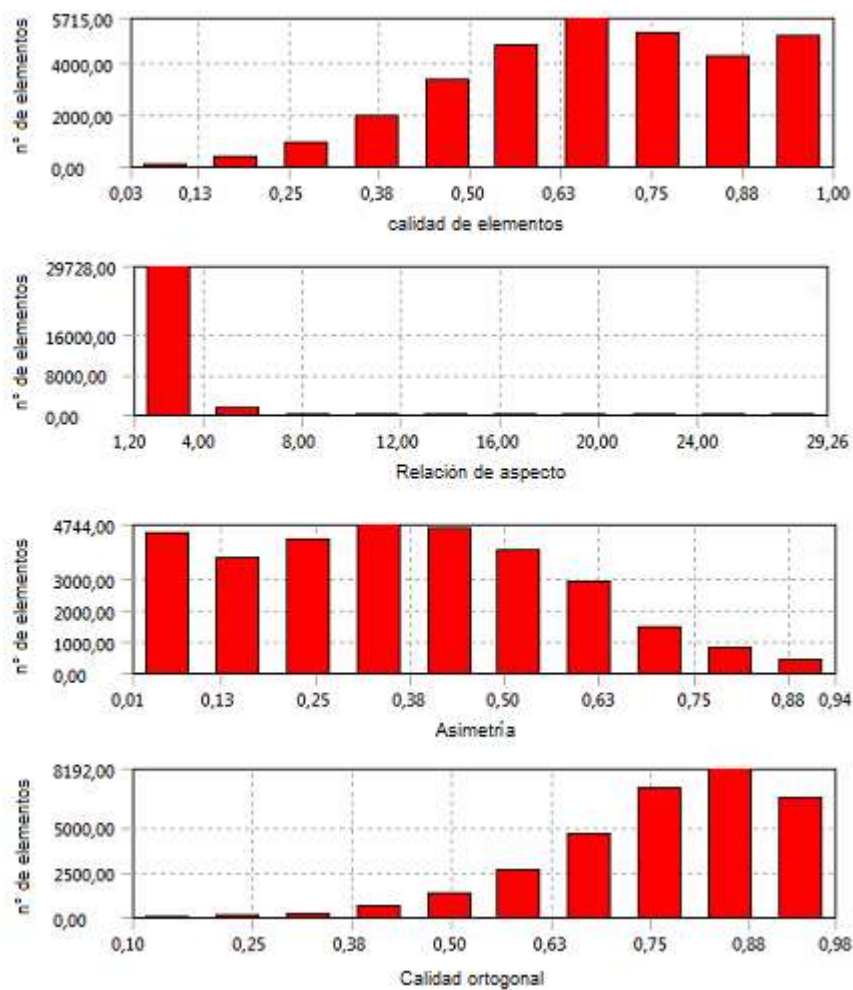


Figura 41: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma g).

h) Espumas de poros elípticos con 33,88% de porosidad.

Tabla 20: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma h).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 3,01E-2 | 1,23 | 9,51E-3 | 0,11 |
| Valor Máximo | 0,99 | 25,89 | 0,95 | 0,97 |
| Promedio | 0,54 | 2,81 | 0,49 | 0,69 |
| Desviación estándar | 0,18 | 1,40 | 0,21 | 0,15 |

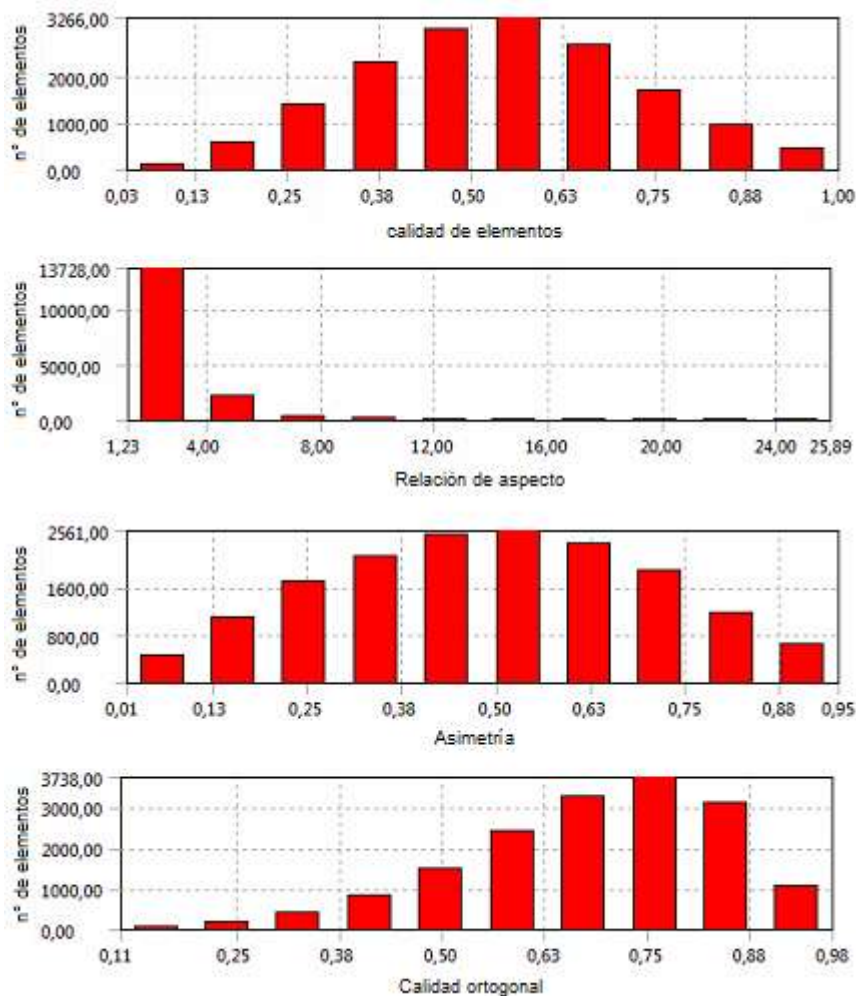


Figura 42: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma h).

i) Espumas de poros elípticos con 45,85% de porosidad.

Tabla 21: Valores estadísticos de los parámetros de calidad de elementos del mallado de la espuma i).

| | Calidad de elementos | Relación de aspecto | Asimetría | Calidad ortogonal |
|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------------|
| Valor Mínimo | 6,65E-3 | 1,20 | 8,17E-3 | 2,44E-3 |
| Valor Máximo | 0,99 | 1116,40 | 1 | 0,98 |
| Promedio | 0,54 | 3,06 | 0,48 | 0,69 |
| Desviación estándar | 0,20 | 8,46 | 0,23 | 0,17 |

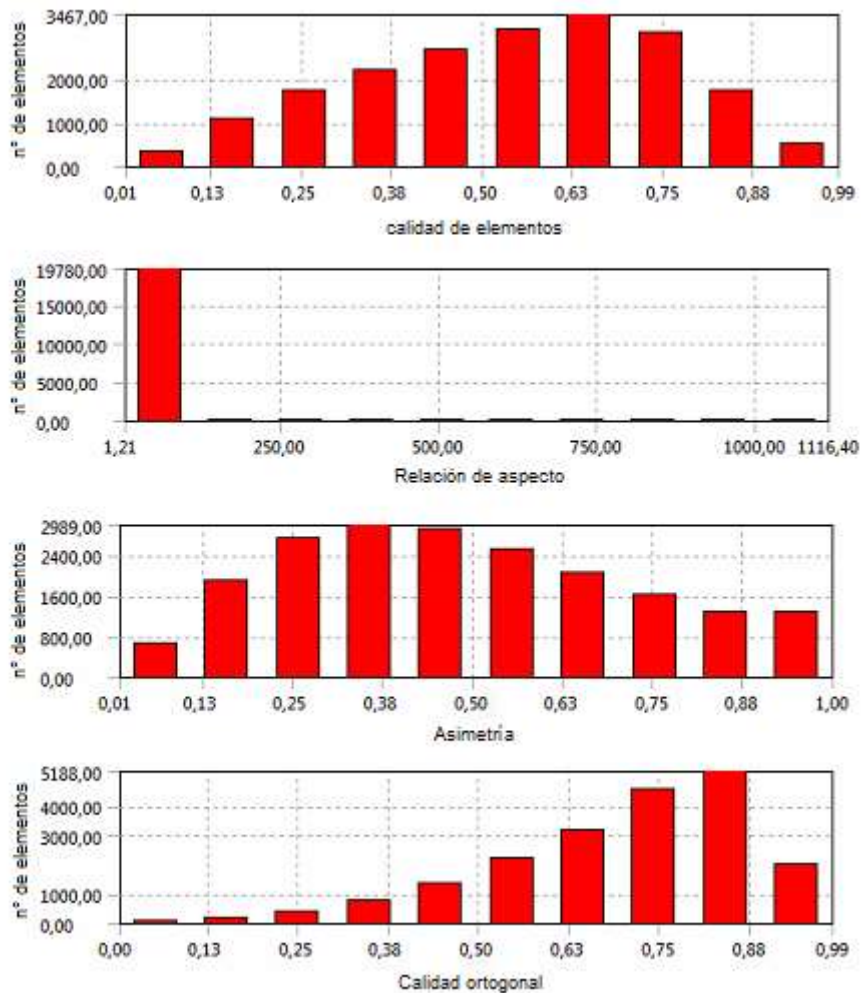


Figura 43: Histogramas de los parámetros de calidad de los elementos de la malla de la espuma i).

10.2 Resultados de las simulaciones

Tabla 22: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 100 μ m de lado con poros esféricos.

| Porosidad $\Delta L[\mu m]$ | Fuerza [N] | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 68,00% | 66,43% | 65,76% | 64,80% | 58,61% | 57,44% | 56,36% | 48,76% |
| 0,06 | 8,52E+04 | 4,39E+04 | 4,10E+04 | 4,56E+10 | 1,44E+05 | 1,70E+11 | 1,12E+05 | 2,26E+11 |
| 0,12 | 1,70E+05 | 8,77E+04 | 8,18E+04 | 9,12E+10 | 2,88E+05 | 3,41E+11 | 2,24E+05 | 4,52E+11 |
| 0,21 | 2,97E+05 | 1,52E+05 | 1,42E+05 | 1,58E+11 | 5,03E+05 | 5,95E+11 | 3,92E+05 | 7,89E+11 |
| 0,3 | 4,23E+05 | 2,15E+05 | 2,00E+05 | 2,21E+11 | 7,12E+05 | 8,43E+11 | 5,59E+05 | 1,12E+12 |
| 0,36 | 5,06E+05 | 2,56E+05 | 2,35E+05 | 2,60E+11 | 8,43E+05 | 1,00E+12 | 6,71E+05 | 1,34E+12 |
| 0,42 | 5,86E+05 | 2,90E+05 | 2,67E+05 | 2,96E+11 | 9,65E+05 | 1,15E+12 | 7,79E+05 | 1,55E+12 |
| 0,51 | 6,99E+05 | 3,27E+05 | 3,10E+05 | 3,46E+11 | 1,13E+06 | 1,36E+12 | 9,34E+05 | 1,83E+12 |
| 0,6 | 7,97E+05 | 3,50E+05 | 3,46E+05 | 3,88E+11 | 1,27E+06 | 1,54E+12 | 1,07E+06 | 2,04E+12 |
| 0,66 | 8,52E+05 | 3,63E+05 | 3,67E+05 | 4,12E+11 | 1,34E+06 | 1,64E+12 | 1,15E+06 | 2,16E+12 |
| 0,72 | 9,00E+05 | 3,74E+05 | 3,85E+05 | 4,34E+11 | 1,40E+06 | 1,71E+12 | 1,22E+06 | 2,24E+12 |
| 0,81 | 9,58E+05 | 3,89E+05 | 4,08E+05 | 4,61E+11 | 1,48E+06 | 1,80E+12 | 1,30E+06 | 2,34E+12 |
| 0,9 | 1,00E+06 | 4,00E+05 | 4,28E+05 | 4,83E+11 | 1,54E+06 | 1,85E+12 | 1,35E+06 | 2,41E+12 |
| 0,96 | 1,03E+06 | 4,07E+05 | 4,40E+05 | 4,96E+11 | 1,57E+06 | 1,88E+12 | 1,38E+06 | 2,45E+12 |
| 1,02 | 1,05E+06 | 4,13E+05 | 4,50E+05 | 5,08E+11 | 1,60E+06 | 1,91E+12 | 1,40E+06 | 2,48E+12 |
| 1,11 | 1,08E+06 | 4,21E+05 | 4,64E+05 | 5,22E+11 | 1,63E+06 | 1,94E+12 | 1,43E+06 | 2,53E+12 |
| 1,2 | 1,10E+06 | 4,27E+05 | 4,76E+05 | 5,34E+11 | 1,67E+06 | 1,96E+12 | 1,46E+06 | 2,57E+12 |
| 1,26 | 1,12E+06 | 4,31E+05 | 4,83E+05 | 5,41E+11 | 1,68E+06 | 1,98E+12 | 1,47E+06 | 2,59E+12 |
| 1,32 | 1,13E+06 | 4,35E+05 | 4,90E+05 | 5,47E+11 | 1,70E+06 | 1,99E+12 | 1,48E+06 | 2,61E+12 |
| 1,41 | 1,15E+06 | 4,40E+05 | 4,99E+05 | 5,55E+11 | 1,72E+06 | 2,01E+12 | 1,50E+06 | 2,64E+12 |
| 1,5 | 1,16E+06 | 4,45E+05 | 5,07E+05 | 5,62E+11 | 1,74E+06 | 2,03E+12 | 1,51E+06 | 2,66E+12 |
| 1,56 | 1,17E+06 | 4,48E+05 | 5,12E+05 | 5,67E+11 | 1,75E+06 | 2,04E+12 | 1,52E+06 | 2,68E+12 |
| 1,62 | 1,18E+06 | 4,50E+05 | 5,17E+05 | 5,71E+11 | 1,76E+06 | 2,05E+12 | 1,53E+06 | 2,69E+12 |
| 1,71 | 1,19E+06 | 4,54E+05 | 5,23E+05 | 5,76E+11 | 1,78E+06 | 2,07E+12 | 1,54E+06 | 2,71E+12 |
| 1,8 | 1,20E+06 | 4,58E+05 | 5,29E+05 | 5,81E+11 | 1,79E+06 | 2,08E+12 | 1,55E+06 | 2,73E+12 |
| 1,86 | 1,21E+06 | 4,60E+05 | 5,33E+05 | 5,84E+11 | 1,80E+06 | 2,09E+12 | 1,55E+06 | 2,74E+12 |
| 1,92 | 1,21E+06 | 4,63E+05 | 5,36E+05 | 5,87E+11 | 1,81E+06 | 2,10E+12 | 1,56E+06 | 2,76E+12 |
| 2,01 | 1,22E+06 | 4,66E+05 | 5,41E+05 | 5,92E+11 | 1,82E+06 | 2,11E+12 | 1,57E+06 | 2,77E+12 |
| 2,1 | 1,23E+06 | 4,69E+05 | 5,46E+05 | 5,96E+11 | 1,83E+06 | 2,12E+12 | 1,58E+06 | 2,79E+12 |
| 2,16 | 1,23E+06 | 4,71E+05 | 5,48E+05 | 5,98E+11 | 1,84E+06 | 2,13E+12 | 1,58E+06 | 2,80E+12 |
| 2,22 | 1,24E+06 | 4,73E+05 | 5,51E+05 | 6,01E+11 | 1,84E+06 | 2,14E+12 | 1,59E+06 | 2,81E+12 |
| 2,31 | 1,24E+06 | 4,76E+05 | 5,55E+05 | 6,04E+11 | 1,85E+06 | 2,15E+12 | 1,59E+06 | 2,82E+12 |
| 2,4 | 1,25E+06 | 4,79E+05 | 5,58E+05 | 6,07E+11 | 1,86E+06 | 2,16E+12 | 1,60E+06 | 2,84E+12 |
| 2,46 | 1,25E+06 | 4,80E+05 | 5,61E+05 | 6,09E+11 | 1,87E+06 | 2,17E+12 | 1,60E+06 | 2,85E+12 |

| | | | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2,52 | 1,26E+06 | 4,82E+05 | 5,63E+05 | 6,11E+11 | 1,87E+06 | 2,18E+12 | 1,61E+06 | 2,86E+12 |
| 2,61 | 1,26E+06 | 4,85E+05 | 5,66E+05 | 6,14E+11 | 1,88E+06 | 2,19E+12 | 1,61E+06 | 2,87E+12 |
| 2,7 | 1,27E+06 | 4,87E+05 | 5,69E+05 | 6,17E+11 | 1,89E+06 | 2,20E+12 | 1,62E+06 | 2,88E+12 |
| 2,775 | 1,27E+06 | 4,89E+05 | 5,71E+05 | 6,19E+11 | 1,90E+06 | 2,20E+12 | 1,62E+06 | 2,89E+12 |
| 2,85 | 1,28E+06 | 4,91E+05 | 5,74E+05 | 6,22E+11 | 1,90E+06 | 2,21E+12 | 1,63E+06 | 2,90E+12 |
| 2,9625 | 1,28E+06 | 4,94E+05 | 5,77E+05 | 6,25E+11 | 1,91E+06 | 2,22E+12 | 1,63E+06 | 2,92E+12 |
| 3 | 1,28E+06 | 4,95E+05 | 5,78E+05 | 6,26E+11 | 1,91E+06 | 2,23E+12 | 1,64E+06 | 2,92E+12 |

Tabla 23: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 100 μm de lado con poros esféricos.

| Porosidad $\Delta L [\mu\text{m}]$ | Fuerza [N] | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 48,49% | 47,18% | 38,62% | 37,30% | 37,30% | 27,93% | 27,63% |
| 0,06 | 1,58E+05 | 1,64E+11 | 3,24E+05 | 2,75E+11 | 2,63E+05 | 3,51E+11 | 3,54E+11 |
| 0,12 | 3,16E+05 | 3,29E+11 | 6,48E+05 | 5,50E+11 | 5,26E+05 | 7,01E+11 | 7,08E+11 |
| 0,21 | 5,53E+05 | 5,74E+11 | 1,13E+06 | 9,62E+11 | 9,20E+05 | 1,23E+12 | 1,24E+12 |
| 0,3 | 7,88E+05 | 8,05E+11 | 1,62E+06 | 1,37E+12 | 1,31E+06 | 1,75E+12 | 1,77E+12 |
| 0,36 | 9,40E+05 | 9,49E+11 | 1,94E+06 | 1,65E+12 | 1,57E+06 | 2,09E+12 | 2,11E+12 |
| 0,42 | 1,08E+06 | 1,08E+12 | 2,25E+06 | 1,91E+12 | 1,83E+06 | 2,43E+12 | 2,45E+12 |
| 0,51 | 1,27E+06 | 1,24E+12 | 2,69E+06 | 2,30E+12 | 2,20E+06 | 2,91E+12 | 2,94E+12 |
| 0,6 | 1,41E+06 | 1,36E+12 | 3,05E+06 | 2,62E+12 | 2,53E+06 | 3,32E+12 | 3,36E+12 |
| 0,66 | 1,48E+06 | 1,42E+12 | 3,24E+06 | 2,80E+12 | 2,72E+06 | 3,54E+12 | 3,61E+12 |
| 0,72 | 1,54E+06 | 1,47E+12 | 3,40E+06 | 2,94E+12 | 2,87E+06 | 3,72E+12 | 3,81E+12 |
| 0,81 | 1,59E+06 | 1,52E+12 | 3,58E+06 | 3,10E+12 | 3,04E+06 | 3,91E+12 | 4,03E+12 |
| 0,9 | 1,63E+06 | 1,56E+12 | 3,71E+06 | 3,22E+12 | 3,16E+06 | 4,05E+12 | 4,20E+12 |
| 0,96 | 1,65E+06 | 1,58E+12 | 3,78E+06 | 3,28E+12 | 3,22E+06 | 4,13E+12 | 4,28E+12 |
| 1,02 | 1,67E+06 | 1,60E+12 | 3,84E+06 | 3,33E+12 | 3,28E+06 | 4,19E+12 | 4,34E+12 |
| 1,11 | 1,69E+06 | 1,63E+12 | 3,90E+06 | 3,40E+12 | 3,34E+06 | 4,27E+12 | 4,42E+12 |
| 1,2 | 1,71E+06 | 1,65E+12 | 3,96E+06 | 3,45E+12 | 3,40E+06 | 4,33E+12 | 4,49E+12 |
| 1,26 | 1,72E+06 | 1,66E+12 | 3,99E+06 | 3,48E+12 | 3,43E+06 | 4,37E+12 | 4,53E+12 |
| 1,32 | 1,74E+06 | 1,68E+12 | 4,02E+06 | 3,51E+12 | 3,45E+06 | 4,40E+12 | 4,56E+12 |
| 1,41 | 1,75E+06 | 1,69E+12 | 4,06E+06 | 3,54E+12 | 3,49E+06 | 4,44E+12 | 4,60E+12 |
| 1,5 | 1,77E+06 | 1,71E+12 | 4,09E+06 | 3,58E+12 | 3,52E+06 | 4,48E+12 | 4,64E+12 |
| 1,56 | 1,78E+06 | 1,72E+12 | 4,11E+06 | 3,59E+12 | 3,54E+06 | 4,50E+12 | 4,66E+12 |
| 1,62 | 1,79E+06 | 1,73E+12 | 4,13E+06 | 3,61E+12 | 3,56E+06 | 4,52E+12 | 4,68E+12 |
| 1,71 | 1,80E+06 | 1,74E+12 | 4,15E+06 | 3,64E+12 | 3,58E+06 | 4,55E+12 | 4,71E+12 |
| 1,8 | 1,81E+06 | 1,76E+12 | 4,18E+06 | 3,66E+12 | 3,61E+06 | 4,58E+12 | 4,73E+12 |
| 1,86 | 1,82E+06 | 1,77E+12 | 4,19E+06 | 3,67E+12 | 3,62E+06 | 4,60E+12 | 4,75E+12 |
| 1,92 | 1,83E+06 | 1,77E+12 | 4,21E+06 | 3,69E+12 | 3,63E+06 | 4,61E+12 | 4,76E+12 |
| 2,01 | 1,84E+06 | 1,78E+12 | 4,23E+06 | 3,70E+12 | 3,65E+06 | 4,64E+12 | 4,79E+12 |

| | | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2,1 | 1,85E+06 | 1,80E+12 | 4,25E+06 | 3,72E+12 | 3,67E+06 | 4,66E+12 | 4,80E+12 |
| 2,16 | 1,86E+06 | 1,80E+12 | 4,26E+06 | 3,73E+12 | 3,68E+06 | 4,67E+12 | 4,82E+12 |
| 2,22 | 1,86E+06 | 1,81E+12 | 4,27E+06 | 3,74E+12 | 3,69E+06 | 4,68E+12 | 4,83E+12 |
| 2,31 | 1,87E+06 | 1,82E+12 | 4,29E+06 | 3,76E+12 | 3,70E+06 | 4,70E+12 | 4,85E+12 |
| 2,4 | 1,88E+06 | 1,83E+12 | 4,30E+06 | 3,77E+12 | 3,72E+06 | 4,72E+12 | 4,86E+12 |
| 2,46 | 1,89E+06 | 1,84E+12 | 4,31E+06 | 3,78E+12 | 3,73E+06 | 4,73E+12 | 4,87E+12 |
| 2,52 | 1,90E+06 | 1,84E+12 | 4,32E+06 | 3,79E+12 | 3,74E+06 | 4,74E+12 | 4,88E+12 |
| 2,61 | 1,90E+06 | 1,85E+12 | 4,34E+06 | 3,80E+12 | 3,75E+06 | 4,76E+12 | 4,90E+12 |
| 2,7 | 1,91E+06 | 1,86E+12 | 4,35E+06 | 3,81E+12 | 3,76E+06 | 4,77E+12 | 4,91E+12 |
| 2,775 | 1,92E+06 | 1,87E+12 | 4,37E+06 | 3,82E+12 | 3,77E+06 | 4,79E+12 | 4,92E+12 |
| 2,85 | 1,93E+06 | 1,87E+12 | 4,38E+06 | 3,83E+12 | 3,78E+06 | 4,80E+12 | 4,94E+12 |
| 2,9625 | 1,94E+06 | 1,88E+12 | 4,39E+06 | 3,85E+12 | 3,80E+06 | 4,82E+12 | 4,95E+12 |
| 3 | 1,94E+06 | 1,89E+12 | 4,40E+06 | 3,85E+12 | 3,80E+06 | 4,82E+12 | 4,96E+12 |

Tabla 24: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 150 μm de lado con poros esféricos.

| Porosidad $\Delta L[\mu\text{m}]$ | Fuerza [N] | | | | | |
|--------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 68,00% | 65,76% | 58,61% | 56,36% | 38,62% | 37,30% |
| 0,09 | 1,18E+05 | 1,62E+05 | 2,52E+05 | 2,86E+05 | 6,44E+05 | 6,64E+05 |
| 0,18 | 2,35E+05 | 3,25E+05 | 5,04E+05 | 5,72E+05 | 1,29E+06 | 1,33E+06 |
| 0,315 | 4,07E+05 | 5,67E+05 | 8,81E+05 | 9,99E+05 | 2,26E+06 | 2,32E+06 |
| 0,45 | 5,74E+05 | 8,02E+05 | 1,26E+06 | 1,42E+06 | 3,22E+06 | 3,32E+06 |
| 0,54 | 6,82E+05 | 9,49E+05 | 1,50E+06 | 1,68E+06 | 3,86E+06 | 3,98E+06 |
| 0,63 | 7,85E+05 | 1,08E+06 | 1,74E+06 | 1,93E+06 | 4,49E+06 | 4,63E+06 |
| 0,765 | 9,27E+05 | 1,26E+06 | 2,06E+06 | 2,28E+06 | 5,39E+06 | 5,56E+06 |
| 0,9 | 1,05E+06 | 1,41E+06 | 2,32E+06 | 2,57E+06 | 6,20E+06 | 6,38E+06 |
| 0,99 | 1,12E+06 | 1,49E+06 | 2,46E+06 | 2,74E+06 | 6,65E+06 | 6,83E+06 |
| 1,08 | 1,18E+06 | 1,56E+06 | 2,56E+06 | 2,87E+06 | 7,03E+06 | 7,21E+06 |
| 1,215 | 1,25E+06 | 1,64E+06 | 2,68E+06 | 3,04E+06 | 7,46E+06 | 7,63E+06 |
| 1,35 | 1,31E+06 | 1,71E+06 | 2,78E+06 | 3,15E+06 | 7,78E+06 | 7,94E+06 |
| 1,44 | 1,34E+06 | 1,75E+06 | 2,84E+06 | 3,22E+06 | 7,95E+06 | 8,09E+06 |
| 1,53 | 1,37E+06 | 1,78E+06 | 2,89E+06 | 3,27E+06 | 8,09E+06 | 8,23E+06 |
| 1,665 | 1,41E+06 | 1,83E+06 | 2,96E+06 | 3,34E+06 | 8,26E+06 | 8,39E+06 |
| 1,8 | 1,45E+06 | 1,87E+06 | 3,02E+06 | 3,40E+06 | 8,40E+06 | 8,52E+06 |
| 1,89 | 1,47E+06 | 1,90E+06 | 3,05E+06 | 3,44E+06 | 8,47E+06 | 8,60E+06 |
| 1,98 | 1,48E+06 | 1,92E+06 | 3,08E+06 | 3,47E+06 | 8,54E+06 | 8,67E+06 |
| 2,115 | 1,51E+06 | 1,95E+06 | 3,13E+06 | 3,51E+06 | 8,63E+06 | 8,76E+06 |
| 2,25 | 1,53E+06 | 1,98E+06 | 3,17E+06 | 3,55E+06 | 8,70E+06 | 8,83E+06 |
| 2,34 | 1,54E+06 | 2,00E+06 | 3,19E+06 | 3,58E+06 | 8,75E+06 | 8,88E+06 |
| 2,43 | 1,56E+06 | 2,01E+06 | 3,22E+06 | 3,60E+06 | 8,79E+06 | 8,92E+06 |

| | | | | | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2,565 | 1,57E+06 | 2,04E+06 | 3,25E+06 | 3,63E+06 | 8,84E+06 | 8,98E+06 |
| 2,7 | 1,59E+06 | 2,06E+06 | 3,28E+06 | 3,66E+06 | 8,90E+06 | 9,04E+06 |
| 2,79 | 1,60E+06 | 2,07E+06 | 3,30E+06 | 3,68E+06 | 8,93E+06 | 9,07E+06 |
| 2,88 | 1,61E+06 | 2,09E+06 | 3,32E+06 | 3,69E+06 | 8,96E+06 | 9,10E+06 |
| 3,015 | 1,62E+06 | 2,11E+06 | 3,34E+06 | 3,72E+06 | 9,00E+06 | 9,15E+06 |
| 3,15 | 1,64E+06 | 2,12E+06 | 3,37E+06 | 3,74E+06 | 9,04E+06 | 9,19E+06 |
| 3,24 | 1,64E+06 | 2,13E+06 | 3,38E+06 | 3,76E+06 | 9,06E+06 | 9,21E+06 |
| 3,33 | 1,65E+06 | 2,15E+06 | 3,40E+06 | 3,77E+06 | 9,09E+06 | 9,24E+06 |
| 3,465 | 1,66E+06 | 2,16E+06 | 3,42E+06 | 3,79E+06 | 9,12E+06 | 9,28E+06 |
| 3,6 | 1,67E+06 | 2,18E+06 | 3,44E+06 | 3,81E+06 | 9,15E+06 | 9,31E+06 |
| 3,69 | 1,68E+06 | 2,18E+06 | 3,45E+06 | 3,83E+06 | 9,17E+06 | 9,33E+06 |
| 3,78 | 1,69E+06 | 2,19E+06 | 3,46E+06 | 3,84E+06 | 9,19E+06 | 9,35E+06 |
| 3,915 | 1,70E+06 | 2,21E+06 | 3,48E+06 | 3,86E+06 | 9,22E+06 | 9,39E+06 |
| 4,05 | 1,71E+06 | 2,22E+06 | 3,50E+06 | 3,87E+06 | 9,25E+06 | 9,42E+06 |
| 4,1625 | 1,72E+06 | 2,23E+06 | 3,52E+06 | 3,89E+06 | 9,27E+06 | 9,44E+06 |
| 4,275 | 1,72E+06 | 2,24E+06 | 3,53E+06 | 3,90E+06 | 9,29E+06 | 9,46E+06 |
| 4,44375 | 1,73E+06 | 2,25E+06 | 3,55E+06 | 3,92E+06 | 9,33E+06 | 9,50E+06 |
| 4,5 | 1,74E+06 | 2,26E+06 | 3,56E+06 | 3,93E+06 | 9,34E+06 | 9,51E+06 |

Tabla 25: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 150 μm de lado con poros esféricos.

| Porosidad $\Delta L [\mu\text{m}]$ | Fuerza [N] | | | | | |
|---------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 66,43% | 64,80% | 57,44% | 48,76% | 47,18% | 37,30% |
| 0,09 | 1,37E+05 | 1,79E+11 | 2,86E+11 | 3,77E+11 | 4,08E+11 | 6,60E+11 |
| 0,18 | 2,74E+05 | 3,59E+11 | 5,72E+11 | 7,54E+11 | 8,17E+11 | 1,32E+12 |
| 0,315 | 4,78E+05 | 6,27E+11 | 1,00E+12 | 1,31E+12 | 1,43E+12 | 2,31E+12 |
| 0,45 | 6,75E+05 | 8,91E+11 | 1,41E+12 | 1,86E+12 | 2,03E+12 | 3,30E+12 |
| 0,54 | 8,00E+05 | 1,06E+12 | 1,67E+12 | 2,20E+12 | 2,40E+12 | 3,95E+12 |
| 0,63 | 9,20E+05 | 1,23E+12 | 1,91E+12 | 2,52E+12 | 2,76E+12 | 4,60E+12 |
| 0,765 | 1,08E+06 | 1,45E+12 | 2,23E+12 | 2,92E+12 | 3,23E+12 | 5,53E+12 |
| 0,9 | 1,19E+06 | 1,62E+12 | 2,49E+12 | 3,23E+12 | 3,62E+12 | 6,33E+12 |
| 0,99 | 1,24E+06 | 1,71E+12 | 2,64E+12 | 3,40E+12 | 3,84E+12 | 6,77E+12 |
| 1,08 | 1,28E+06 | 1,79E+12 | 2,76E+12 | 3,53E+12 | 4,03E+12 | 7,13E+12 |
| 1,215 | 1,34E+06 | 1,88E+12 | 2,92E+12 | 3,70E+12 | 4,25E+12 | 7,54E+12 |
| 1,35 | 1,38E+06 | 1,96E+12 | 3,05E+12 | 3,84E+12 | 4,42E+12 | 7,83E+12 |
| 1,44 | 1,40E+06 | 2,00E+12 | 3,12E+12 | 3,92E+12 | 4,51E+12 | 7,98E+12 |
| 1,53 | 1,43E+06 | 2,04E+12 | 3,19E+12 | 3,99E+12 | 4,60E+12 | 8,11E+12 |
| 1,665 | 1,46E+06 | 2,09E+12 | 3,27E+12 | 4,09E+12 | 4,71E+12 | 8,27E+12 |
| 1,8 | 1,48E+06 | 2,14E+12 | 3,34E+12 | 4,16E+12 | 4,80E+12 | 8,40E+12 |
| 1,89 | 1,49E+06 | 2,16E+12 | 3,39E+12 | 4,21E+12 | 4,85E+12 | 8,48E+12 |

| | | | | | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,98 | 1,51E+06 | 2,19E+12 | 3,43E+12 | 4,25E+12 | 4,90E+12 | 8,54E+12 |
| 2,115 | 1,52E+06 | 2,22E+12 | 3,48E+12 | 4,31E+12 | 4,97E+12 | 8,63E+12 |
| 2,25 | 1,54E+06 | 2,25E+12 | 3,53E+12 | 4,36E+12 | 5,03E+12 | 8,71E+12 |
| 2,34 | 1,55E+06 | 2,27E+12 | 3,56E+12 | 4,39E+12 | 5,06E+12 | 8,76E+12 |
| 2,43 | 1,56E+06 | 2,29E+12 | 3,59E+12 | 4,42E+12 | 5,10E+12 | 8,80E+12 |
| 2,565 | 1,58E+06 | 2,31E+12 | 3,62E+12 | 4,46E+12 | 5,14E+12 | 8,86E+12 |
| 2,7 | 1,59E+06 | 2,33E+12 | 3,66E+12 | 4,50E+12 | 5,19E+12 | 8,91E+12 |
| 2,79 | 1,60E+06 | 2,34E+12 | 3,68E+12 | 4,52E+12 | 5,21E+12 | 8,95E+12 |
| 2,88 | 1,61E+06 | 2,36E+12 | 3,70E+12 | 4,55E+12 | 5,24E+12 | 8,98E+12 |
| 3,015 | 1,62E+06 | 2,37E+12 | 3,73E+12 | 4,58E+12 | 5,27E+12 | 9,02E+12 |
| 3,15 | 1,63E+06 | 2,39E+12 | 3,76E+12 | 4,61E+12 | 5,30E+12 | 9,07E+12 |
| 3,24 | 1,64E+06 | 2,40E+12 | 3,78E+12 | 4,63E+12 | 5,32E+12 | 9,09E+12 |
| 3,33 | 1,65E+06 | 2,41E+12 | 3,79E+12 | 4,65E+12 | 5,34E+12 | 9,12E+12 |
| 3,465 | 1,66E+06 | 2,42E+12 | 3,82E+12 | 4,68E+12 | 5,37E+12 | 9,16E+12 |
| 3,6 | 1,67E+06 | 2,44E+12 | 3,84E+12 | 4,70E+12 | 5,40E+12 | 9,19E+12 |
| 3,69 | 1,67E+06 | 2,45E+12 | 3,86E+12 | 4,72E+12 | 5,42E+12 | 9,21E+12 |
| 3,78 | 1,68E+06 | 2,45E+12 | 3,87E+12 | 4,74E+12 | 5,44E+12 | 9,24E+12 |
| 3,915 | 1,69E+06 | 2,47E+12 | 3,89E+12 | 4,76E+12 | 5,46E+12 | 9,27E+12 |
| 4,05 | 1,70E+06 | 2,48E+12 | 3,91E+12 | 4,79E+12 | 5,48E+12 | 9,30E+12 |
| 4,1625 | 1,71E+06 | 2,49E+12 | 3,93E+12 | 4,80E+12 | 5,50E+12 | 9,32E+12 |
| 4,275 | 1,72E+06 | 2,50E+12 | 3,94E+12 | 4,82E+12 | 5,52E+12 | 9,35E+12 |
| 4,44375 | 1,73E+06 | 2,51E+12 | 3,97E+12 | 4,85E+12 | 5,55E+12 | 9,38E+12 |
| 4,5 | 1,73E+06 | 2,51E+12 | 3,98E+12 | 4,86E+12 | 5,56E+12 | 9,39E+12 |

Tabla 26: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas de 200 μm de lado con poros esféricos.

| Porosidad $\Delta L [\mu\text{m}]$ | Fuerza [N] | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 66,43% | 64,8% | 58,61% | 57,44% | 56,36% | 48,49% | 47,18% | 38,62% | 27,93% |
| 0,12 | 2,44E+05 | 2,93E+11 | 4,28E+05 | 5,21E+11 | 4,43E+05 | 5,54E+05 | 7,48E+11 | 1,12E+06 | 7,67E+11 |
| 0,24 | 4,88E+05 | 5,85E+11 | 8,57E+05 | 1,04E+12 | 8,86E+05 | 1,11E+06 | 1,50E+12 | 2,24E+06 | 1,53E+12 |
| 0,42 | 8,46E+05 | 1,02E+12 | 1,50E+06 | 1,82E+12 | 1,54E+06 | 1,91E+06 | 2,62E+12 | 3,91E+06 | 2,68E+12 |
| 0,6 | 1,19E+06 | 1,45E+12 | 2,12E+06 | 2,58E+12 | 2,16E+06 | 2,16E+06 | 3,72E+12 | 5,59E+06 | 3,83E+12 |
| 0,72 | 1,41E+06 | 1,72E+12 | 2,51E+06 | 3,07E+12 | 2,54E+06 | 2,54E+06 | 4,43E+12 | 6,70E+06 | 4,58E+12 |
| 0,84 | 1,63E+06 | 1,97E+12 | 2,89E+06 | 3,53E+12 | 2,90E+06 | 2,90E+06 | 5,10E+12 | 7,79E+06 | 5,30E+12 |
| 1,02 | 1,91E+06 | 2,31E+12 | 3,39E+06 | 4,16E+12 | 3,40E+06 | 3,40E+06 | 5,99E+12 | 9,35E+06 | 6,32E+12 |
| 1,2 | 2,14E+06 | 2,58E+12 | 3,82E+06 | 4,70E+12 | 3,83E+06 | 3,83E+06 | 6,76E+12 | 1,07E+07 | 7,20E+12 |
| 1,32 | 2,25E+06 | 2,72E+12 | 4,05E+06 | 5,01E+12 | 4,07E+06 | 4,07E+06 | 7,18E+12 | 1,15E+07 | 7,68E+12 |
| 1,44 | 2,34E+06 | 2,83E+12 | 4,25E+06 | 5,27E+12 | 4,28E+06 | 4,28E+06 | 7,55E+12 | 1,21E+07 | 8,08E+12 |
| 1,62 | 2,44E+06 | 2,96E+12 | 4,49E+06 | 5,59E+12 | 4,52E+06 | 4,52E+06 | 7,99E+12 | 1,29E+07 | 8,53E+12 |

| | | | | | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,8 | 2,52E+06 | 3,07E+12 | 4,69E+06 | 5,83E+12 | 4,71E+06 | 4,71E+06 | 8,33E+12 | 1,35E+07 | 8,86E+12 |
| 1,92 | 2,57E+06 | 3,13E+12 | 4,80E+06 | 5,97E+12 | 4,82E+06 | 4,82E+06 | 8,52E+12 | 1,38E+07 | 9,03E+12 |
| 2,04 | 2,61E+06 | 3,18E+12 | 4,89E+06 | 6,08E+12 | 4,92E+06 | 4,92E+06 | 8,68E+12 | 1,40E+07 | 9,18E+12 |
| 2,22 | 2,66E+06 | 3,25E+12 | 5,02E+06 | 6,23E+12 | 5,05E+06 | 5,05E+06 | 8,89E+12 | 1,43E+07 | 9,36E+12 |
| 2,4 | 2,70E+06 | 3,31E+12 | 5,13E+06 | 6,35E+12 | 5,16E+06 | 5,16E+06 | 9,06E+12 | 1,46E+07 | 9,51E+12 |
| 2,52 | 2,73E+06 | 3,35E+12 | 5,19E+06 | 6,42E+12 | 5,22E+06 | 5,22E+06 | 9,16E+12 | 1,48E+07 | 9,59E+12 |
| 2,64 | 2,75E+06 | 3,38E+12 | 5,25E+06 | 6,48E+12 | 5,29E+06 | 5,29E+06 | 9,25E+12 | 1,49E+07 | 9,67E+12 |
| 2,82 | 2,79E+06 | 3,43E+12 | 5,33E+06 | 6,57E+12 | 5,37E+06 | 5,37E+06 | 9,37E+12 | 1,51E+07 | 9,77E+12 |
| 3 | 2,82E+06 | 3,47E+12 | 5,40E+06 | 6,65E+12 | 5,45E+06 | 5,45E+06 | 9,47E+12 | 1,52E+07 | 9,85E+12 |
| 3,12 | 2,84E+06 | 3,49E+12 | 5,45E+06 | 6,70E+12 | 5,50E+06 | 5,50E+06 | 9,53E+12 | 1,53E+07 | 9,90E+12 |
| 3,24 | 2,86E+06 | 3,52E+12 | 5,49E+06 | 6,74E+12 | 5,54E+06 | 5,54E+06 | 9,59E+12 | 1,54E+07 | 9,95E+12 |
| 3,42 | 2,88E+06 | 3,55E+12 | 5,55E+06 | 6,80E+12 | 5,60E+06 | 5,60E+06 | 9,67E+12 | 1,55E+07 | 1,00E+13 |
| 3,6 | 2,91E+06 | 3,58E+12 | 5,60E+06 | 6,86E+12 | 5,66E+06 | 5,66E+06 | 9,75E+12 | 1,56E+07 | 1,01E+13 |
| 3,72 | 2,93E+06 | 3,60E+12 | 5,64E+06 | 6,90E+12 | 5,70E+06 | 5,70E+06 | 9,79E+12 | 1,56E+07 | 1,01E+13 |
| 3,84 | 2,94E+06 | 3,62E+12 | 5,67E+06 | 6,93E+12 | 5,74E+06 | 5,74E+06 | 9,84E+12 | 1,57E+07 | 1,01E+13 |
| 4,02 | 2,96E+06 | 3,64E+12 | 5,72E+06 | 6,98E+12 | 5,79E+06 | 5,79E+06 | 9,90E+12 | 1,58E+07 | 1,02E+13 |
| 4,2 | 2,99E+06 | 3,67E+12 | 5,77E+06 | 7,02E+12 | 5,83E+06 | 5,83E+06 | 9,97E+12 | 1,58E+07 | 1,02E+13 |
| 4,32 | 3,00E+06 | 3,69E+12 | 5,79E+06 | 7,05E+12 | 5,86E+06 | 5,86E+06 | 1,00E+13 | 1,59E+07 | 1,03E+13 |
| 4,44 | 3,01E+06 | 3,70E+12 | 5,82E+06 | 7,08E+12 | 5,89E+06 | 5,89E+06 | 1,00E+13 | 1,59E+07 | 1,03E+13 |
| 4,62 | 3,03E+06 | 3,73E+12 | 5,86E+06 | 7,12E+12 | 5,93E+06 | 5,93E+06 | 1,01E+13 | 1,60E+07 | 1,03E+13 |
| 4,8 | 3,05E+06 | 3,75E+12 | 5,90E+06 | 7,16E+12 | 5,97E+06 | 5,97E+06 | 1,01E+13 | 1,61E+07 | 1,04E+13 |
| 4,92 | 3,07E+06 | 3,76E+12 | 5,93E+06 | 7,18E+12 | 6,00E+06 | 6,00E+06 | 1,02E+13 | 1,61E+07 | 1,04E+13 |
| 5,04 | 3,08E+06 | 3,78E+12 | 5,95E+06 | 7,21E+12 | 6,02E+06 | 6,02E+06 | 1,02E+13 | 1,61E+07 | 1,04E+13 |
| 5,22 | 3,10E+06 | 3,80E+12 | 5,98E+06 | 7,24E+12 | 6,06E+06 | 6,06E+06 | 1,03E+13 | 1,62E+07 | 1,05E+13 |
| 5,4 | 3,11E+06 | 3,82E+12 | 6,02E+06 | 7,27E+12 | 6,09E+06 | 6,09E+06 | 1,03E+13 | 1,63E+07 | 1,05E+13 |
| 5,55 | 3,13E+06 | 3,83E+12 | 6,05E+06 | 7,30E+12 | 6,12E+06 | 6,12E+06 | 1,03E+13 | 1,63E+07 | 1,05E+13 |
| 5,7 | 3,14E+06 | 3,85E+12 | 6,07E+06 | 7,33E+12 | 6,15E+06 | 6,15E+06 | 1,04E+13 | 1,63E+07 | 1,05E+13 |
| 5,925 | 3,16E+06 | 3,87E+12 | 6,11E+06 | 7,36E+12 | 6,19E+06 | 6,19E+06 | 1,04E+13 | 1,64E+07 | 1,06E+13 |
| 6 | 3,17E+06 | 3,88E+12 | 6,12E+06 | 7,37E+12 | 6,20E+06 | 6,20E+06 | 1,04E+13 | 1,64E+07 | 1,06E+13 |

Tabla 27: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas con poros elípticos.

| Porosidad ΔL[μm] | Fuerza[N] | | | | | | |
|---------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 27,84% | 28,27% | 28,54% | 33,88% | 34,24% | 44,61% | 45,85% |
| 0,12 | 1,47E+06 | 1,45E+06 | 1,44E+06 | 1,30E+06 | 1,30E+06 | 7,84E+05 | 7,59E+05 |
| 0,24 | 2,93E+06 | 2,91E+06 | 2,89E+06 | 2,61E+06 | 2,61E+06 | 1,57E+06 | 1,52E+06 |
| 0,42 | 5,13E+06 | 5,09E+06 | 5,05E+06 | 4,57E+06 | 4,56E+06 | 2,74E+06 | 2,65E+06 |

| | | | | | | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,60 | 7,33E+06 | 7,27E+06 | 7,21E+06 | 6,52E+06 | 6,52E+06 | 3,90E+06 | 3,77E+06 |
| 0,72 | 8,78E+06 | 8,71E+06 | 8,64E+06 | 7,81E+06 | 7,80E+06 | 4,64E+06 | 4,49E+06 |
| 0,84 | 1,02E+07 | 1,01E+07 | 1,01E+07 | 9,10E+06 | 9,07E+06 | 5,36E+06 | 5,18E+06 |
| 1,02 | 1,23E+07 | 1,22E+07 | 1,21E+07 | 1,10E+07 | 1,09E+07 | 6,34E+06 | 6,09E+06 |
| 1,20 | 1,42E+07 | 1,41E+07 | 1,39E+07 | 1,27E+07 | 1,25E+07 | 7,16E+06 | 6,84E+06 |
| 1,32 | 1,53E+07 | 1,52E+07 | 1,50E+07 | 1,36E+07 | 1,34E+07 | 7,60E+06 | 7,23E+06 |
| 1,44 | 1,62E+07 | 1,61E+07 | 1,59E+07 | 1,44E+07 | 1,42E+07 | 7,97E+06 | 7,57E+06 |
| 1,62 | 1,72E+07 | 1,71E+07 | 1,69E+07 | 1,53E+07 | 1,51E+07 | 8,41E+06 | 7,97E+06 |
| 1,80 | 1,80E+07 | 1,78E+07 | 1,76E+07 | 1,60E+07 | 1,57E+07 | 8,75E+06 | 8,29E+06 |
| 1,92 | 1,83E+07 | 1,82E+07 | 1,79E+07 | 1,63E+07 | 1,60E+07 | 8,94E+06 | 8,47E+06 |
| 2,04 | 1,86E+07 | 1,85E+07 | 1,82E+07 | 1,66E+07 | 1,63E+07 | 9,11E+06 | 8,63E+06 |
| 2,22 | 1,90E+07 | 1,88E+07 | 1,86E+07 | 1,69E+07 | 1,67E+07 | 9,32E+06 | 8,83E+06 |
| 2,40 | 1,92E+07 | 1,91E+07 | 1,89E+07 | 1,72E+07 | 1,70E+07 | 9,50E+06 | 9,01E+06 |
| 2,52 | 1,94E+07 | 1,93E+07 | 1,91E+07 | 1,73E+07 | 1,72E+07 | 9,61E+06 | 9,11E+06 |
| 2,64 | 1,95E+07 | 1,94E+07 | 1,92E+07 | 1,75E+07 | 1,73E+07 | 9,71E+06 | 9,20E+06 |
| 2,82 | 1,97E+07 | 1,96E+07 | 1,94E+07 | 1,76E+07 | 1,75E+07 | 9,83E+06 | 9,33E+06 |
| 3,00 | 1,98E+07 | 1,97E+07 | 1,95E+07 | 1,78E+07 | 1,77E+07 | 9,95E+06 | 9,44E+06 |
| 3,12 | 1,99E+07 | 1,98E+07 | 1,96E+07 | 1,79E+07 | 1,78E+07 | 1,00E+07 | 9,51E+06 |
| 3,24 | 2,00E+07 | 1,99E+07 | 1,97E+07 | 1,80E+07 | 1,79E+07 | 1,01E+07 | 9,57E+06 |
| 3,42 | 2,01E+07 | 2,00E+07 | 1,98E+07 | 1,81E+07 | 1,80E+07 | 1,02E+07 | 9,66E+06 |
| 3,60 | 2,02E+07 | 2,01E+07 | 1,99E+07 | 1,82E+07 | 1,81E+07 | 1,03E+07 | 9,75E+06 |
| 3,72 | 2,03E+07 | 2,02E+07 | 2,00E+07 | 1,83E+07 | 1,82E+07 | 1,03E+07 | 9,80E+06 |
| 3,84 | 2,04E+07 | 2,03E+07 | 2,00E+07 | 1,83E+07 | 1,82E+07 | 1,04E+07 | 9,85E+06 |
| 4,02 | 2,04E+07 | 2,03E+07 | 2,01E+07 | 1,84E+07 | 1,83E+07 | 1,04E+07 | 9,92E+06 |
| 4,20 | 2,05E+07 | 2,04E+07 | 2,02E+07 | 1,85E+07 | 1,84E+07 | 1,05E+07 | 9,98E+06 |
| 4,32 | 2,06E+07 | 2,05E+07 | 2,02E+07 | 1,85E+07 | 1,85E+07 | 1,05E+07 | 1,00E+07 |
| 4,44 | 2,06E+07 | 2,05E+07 | 2,03E+07 | 1,86E+07 | 1,85E+07 | 1,06E+07 | 1,01E+07 |
| 4,62 | 2,07E+07 | 2,06E+07 | 2,03E+07 | 1,86E+07 | 1,86E+07 | 1,06E+07 | 1,01E+07 |
| 4,80 | 2,08E+07 | 2,06E+07 | 2,04E+07 | 1,87E+07 | 1,87E+07 | 1,07E+07 | 1,02E+07 |
| 4,92 | 2,08E+07 | 2,07E+07 | 2,04E+07 | 1,87E+07 | 1,87E+07 | 1,07E+07 | 1,02E+07 |
| 5,04 | 2,08E+07 | 2,07E+07 | 2,05E+07 | 1,88E+07 | 1,88E+07 | 1,08E+07 | 1,02E+07 |
| 5,22 | 2,09E+07 | 2,08E+07 | 2,05E+07 | 1,88E+07 | 1,88E+07 | 1,08E+07 | 1,03E+07 |
| 5,40 | 2,09E+07 | 2,08E+07 | 2,06E+07 | 1,89E+07 | 1,89E+07 | 1,09E+07 | 1,03E+07 |
| 5,55 | 2,10E+07 | 2,09E+07 | 2,06E+07 | 1,89E+07 | 1,89E+07 | 1,09E+07 | 1,04E+07 |
| 5,70 | 2,10E+07 | 2,09E+07 | 2,07E+07 | 1,90E+07 | 1,90E+07 | 1,10E+07 | 1,04E+07 |
| 5,93 | 2,11E+07 | 2,10E+07 | 2,07E+07 | 1,90E+07 | 1,90E+07 | 1,10E+07 | 1,05E+07 |
| 6,00 | 2,11E+07 | 2,10E+07 | 2,08E+07 | 1,91E+07 | 1,91E+07 | 1,10E+07 | 1,05E+07 |

Tabla 28: Fuerza de reacción y desplazamiento de las espumas con poros elípticos.

| Porosidad $\Delta L[\mu m]$ | Fuerza[N] | | | | | | |
|--------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 46,90% | 57,35% | 57,99% | 58,73% | 59,61% | 63,31% | 63,90% |
| 0,12 | 7,39E+05 | 5,00E+05 | 4,43E+05 | 4,36E+05 | 3,94E+05 | 3,54E+05 | 3,94E+05 |
| 0,24 | 1,48E+06 | 9,99E+05 | 8,85E+05 | 8,72E+05 | 7,87E+05 | 7,07E+05 | 7,87E+05 |
| 0,42 | 2,57E+06 | 1,75E+06 | 1,55E+06 | 1,52E+06 | 1,37E+06 | 1,23E+06 | 1,37E+06 |
| 0,60 | 3,64E+06 | 2,49E+06 | 2,20E+06 | 2,15E+06 | 1,92E+06 | 1,76E+06 | 1,92E+06 |
| 0,72 | 4,33E+06 | 2,97E+06 | 2,61E+06 | 2,55E+06 | 2,26E+06 | 2,09E+06 | 2,26E+06 |
| 0,84 | 4,97E+06 | 3,43E+06 | 2,99E+06 | 2,92E+06 | 2,58E+06 | 2,40E+06 | 2,58E+06 |
| 1,02 | 5,83E+06 | 4,05E+06 | 3,49E+06 | 3,39E+06 | 2,99E+06 | 2,82E+06 | 2,99E+06 |
| 1,20 | 6,52E+06 | 4,59E+06 | 3,90E+06 | 3,77E+06 | 3,31E+06 | 3,15E+06 | 3,31E+06 |
| 1,32 | 6,91E+06 | 4,89E+06 | 4,12E+06 | 3,97E+06 | 3,47E+06 | 3,33E+06 | 3,47E+06 |
| 1,44 | 7,23E+06 | 5,14E+06 | 4,31E+06 | 4,15E+06 | 3,59E+06 | 3,48E+06 | 3,59E+06 |
| 1,62 | 7,61E+06 | 5,46E+06 | 4,54E+06 | 4,38E+06 | 3,75E+06 | 3,66E+06 | 3,75E+06 |
| 1,80 | 7,91E+06 | 5,70E+06 | 4,72E+06 | 4,56E+06 | 3,87E+06 | 3,81E+06 | 3,87E+06 |
| 1,92 | 8,07E+06 | 5,83E+06 | 4,83E+06 | 4,66E+06 | 3,94E+06 | 3,89E+06 | 3,94E+06 |
| 2,04 | 8,22E+06 | 5,95E+06 | 4,92E+06 | 4,76E+06 | 4,01E+06 | 3,96E+06 | 4,01E+06 |
| 2,22 | 8,40E+06 | 6,10E+06 | 5,04E+06 | 4,88E+06 | 4,10E+06 | 4,06E+06 | 4,10E+06 |
| 2,40 | 8,55E+06 | 6,23E+06 | 5,14E+06 | 4,98E+06 | 4,18E+06 | 4,14E+06 | 4,18E+06 |
| 2,52 | 8,64E+06 | 6,31E+06 | 5,20E+06 | 5,05E+06 | 4,23E+06 | 4,18E+06 | 4,23E+06 |
| 2,64 | 8,72E+06 | 6,38E+06 | 5,26E+06 | 5,11E+06 | 4,28E+06 | 4,23E+06 | 4,28E+06 |
| 2,82 | 8,83E+06 | 6,47E+06 | 5,34E+06 | 5,18E+06 | 4,34E+06 | 4,29E+06 | 4,34E+06 |
| 3,00 | 8,93E+06 | 6,56E+06 | 5,41E+06 | 5,26E+06 | 4,40E+06 | 4,34E+06 | 4,40E+06 |
| 3,12 | 9,00E+06 | 6,61E+06 | 5,45E+06 | 5,30E+06 | 4,44E+06 | 4,37E+06 | 4,44E+06 |
| 3,24 | 9,05E+06 | 6,66E+06 | 5,49E+06 | 5,34E+06 | 4,48E+06 | 4,40E+06 | 4,48E+06 |
| 3,42 | 9,13E+06 | 6,72E+06 | 5,55E+06 | 5,40E+06 | 4,53E+06 | 4,45E+06 | 4,53E+06 |
| 3,60 | 9,21E+06 | 6,79E+06 | 5,60E+06 | 5,45E+06 | 4,57E+06 | 4,49E+06 | 4,57E+06 |
| 3,72 | 9,26E+06 | 6,82E+06 | 5,63E+06 | 5,48E+06 | 4,60E+06 | 4,51E+06 | 4,60E+06 |
| 3,84 | 9,30E+06 | 6,86E+06 | 5,66E+06 | 5,51E+06 | 4,63E+06 | 4,54E+06 | 4,63E+06 |
| 4,02 | 9,36E+06 | 6,91E+06 | 5,71E+06 | 5,56E+06 | 4,67E+06 | 4,57E+06 | 4,67E+06 |
| 4,20 | 9,42E+06 | 6,96E+06 | 5,75E+06 | 5,60E+06 | 4,71E+06 | 4,60E+06 | 4,71E+06 |
| 4,32 | 9,46E+06 | 6,99E+06 | 5,78E+06 | 5,63E+06 | 4,73E+06 | 4,62E+06 | 4,73E+06 |

| | | | | | | | |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4,44 | 9,50E+06 | 7,02E+06 | 5,80E+06 | 5,65E+06 | 4,76E+06 | 4,64E+06 | 4,76E+06 |
| 4,62 | 9,55E+06 | 7,06E+06 | 5,84E+06 | 5,69E+06 | 4,79E+06 | 4,67E+06 | 4,79E+06 |
| 4,80 | 9,60E+06 | 7,10E+06 | 5,87E+06 | 5,72E+06 | 4,82E+06 | 4,69E+06 | 4,82E+06 |
| 4,92 | 9,64E+06 | 7,13E+06 | 5,90E+06 | 5,74E+06 | 4,84E+06 | 4,71E+06 | 4,84E+06 |
| 5,04 | 9,67E+06 | 7,15E+06 | 5,92E+06 | 5,76E+06 | 4,86E+06 | 4,73E+06 | 4,86E+06 |
| 5,22 | 9,72E+06 | 7,19E+06 | 5,95E+06 | 5,79E+06 | 4,89E+06 | 4,75E+06 | 4,89E+06 |
| 5,40 | 9,76E+06 | 7,22E+06 | 5,98E+06 | 5,82E+06 | 4,92E+06 | 4,77E+06 | 4,92E+06 |
| 5,55 | 9,80E+06 | 7,25E+06 | 6,01E+06 | 5,85E+06 | 4,95E+06 | 4,79E+06 | 4,95E+06 |
| 5,70 | 9,84E+06 | 7,28E+06 | 6,03E+06 | 5,87E+06 | 4,97E+06 | 4,81E+06 | 4,97E+06 |
| 5,93 | 9,89E+06 | 7,32E+06 | 6,07E+06 | 5,90E+06 | 5,00E+06 | 4,84E+06 | 5,00E+06 |
| 6,00 | 9,91E+06 | 7,33E+06 | 6,08E+06 | 5,91E+06 | 5,01E+06 | 4,84E+06 | 5,01E+06 |

10.3 Resultados de los cálculos

Tabla 29: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 100 µm de lado con poros esféricos.

| Porosidad ε [-] | Esfuerzo [Pa] | | | | | | | |
|--------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 68,00% | 66,43% | 65,76% | 64,80% | 58,61% | 57,44% | 56,36% | 48,76% |
| 0,0006 | 8,52E+06 | 2,44E+07 | 4,10E+06 | 2,93E+07 | 1,44E+07 | 5,21E+07 | 1,12E+07 | 6,65E+07 |
| 0,0012 | 1,70E+07 | 4,88E+07 | 8,18E+06 | 5,85E+07 | 2,88E+07 | 1,04E+08 | 2,24E+07 | 1,33E+08 |
| 0,0021 | 2,97E+07 | 8,46E+07 | 1,42E+07 | 1,02E+08 | 5,03E+07 | 1,82E+08 | 3,92E+07 | 2,32E+08 |
| 0,0030 | 4,23E+07 | 1,19E+08 | 2,00E+07 | 1,45E+08 | 7,12E+07 | 2,58E+08 | 5,59E+07 | 3,29E+08 |
| 0,0036 | 5,06E+07 | 1,41E+08 | 2,35E+07 | 1,72E+08 | 8,43E+07 | 3,07E+08 | 6,71E+07 | 3,90E+08 |
| 0,0042 | 5,86E+07 | 1,63E+08 | 2,67E+07 | 1,97E+08 | 9,65E+07 | 3,53E+08 | 7,79E+07 | 4,48E+08 |
| 0,0051 | 6,99E+07 | 1,91E+08 | 3,10E+07 | 2,31E+08 | 1,13E+08 | 4,16E+08 | 9,34E+07 | 5,24E+08 |
| 0,0060 | 7,97E+07 | 2,14E+08 | 3,46E+07 | 2,58E+08 | 1,27E+08 | 4,70E+08 | 1,07E+08 | 5,84E+08 |
| 0,0066 | 8,52E+07 | 2,25E+08 | 3,67E+07 | 2,72E+08 | 1,34E+08 | 5,01E+08 | 1,15E+08 | 6,18E+08 |
| 0,0072 | 9,00E+07 | 2,34E+08 | 3,85E+07 | 2,83E+08 | 1,40E+08 | 5,27E+08 | 1,22E+08 | 6,46E+08 |
| 0,0081 | 9,58E+07 | 2,44E+08 | 4,08E+07 | 2,96E+08 | 1,48E+08 | 5,59E+08 | 1,30E+08 | 6,81E+08 |
| 0,0090 | 1,00E+08 | 2,52E+08 | 4,28E+07 | 3,07E+08 | 1,54E+08 | 5,83E+08 | 1,35E+08 | 7,07E+08 |
| 0,0096 | 1,03E+08 | 2,57E+08 | 4,40E+07 | 3,13E+08 | 1,57E+08 | 5,97E+08 | 1,38E+08 | 7,22E+08 |
| 0,0102 | 1,05E+08 | 2,61E+08 | 4,50E+07 | 3,18E+08 | 1,60E+08 | 6,08E+08 | 1,40E+08 | 7,35E+08 |
| 0,0111 | 1,08E+08 | 2,66E+08 | 4,64E+07 | 3,25E+08 | 1,63E+08 | 6,23E+08 | 1,43E+08 | 7,52E+08 |
| 0,0120 | 1,10E+08 | 2,70E+08 | 4,76E+07 | 3,31E+08 | 1,67E+08 | 6,35E+08 | 1,46E+08 | 7,65E+08 |
| 0,0126 | 1,12E+08 | 2,73E+08 | 4,83E+07 | 3,35E+08 | 1,68E+08 | 6,42E+08 | 1,47E+08 | 7,74E+08 |

| | | | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,0132 | 1,13E+08 | 2,75E+08 | 4,90E+07 | 3,38E+08 | 1,70E+08 | 6,48E+08 | 1,48E+08 | 7,81E+08 |
| 0,0141 | 1,15E+08 | 2,79E+08 | 4,99E+07 | 3,43E+08 | 1,72E+08 | 6,57E+08 | 1,50E+08 | 7,91E+08 |
| 0,0150 | 1,16E+08 | 2,82E+08 | 5,07E+07 | 3,47E+08 | 1,74E+08 | 6,65E+08 | 1,51E+08 | 8,01E+08 |
| 0,0156 | 1,17E+08 | 2,84E+08 | 5,12E+07 | 3,49E+08 | 1,75E+08 | 6,70E+08 | 1,52E+08 | 8,06E+08 |
| 0,0162 | 1,18E+08 | 2,86E+08 | 5,17E+07 | 3,52E+08 | 1,76E+08 | 6,74E+08 | 1,53E+08 | 8,12E+08 |
| 0,0171 | 1,19E+08 | 2,88E+08 | 5,23E+07 | 3,55E+08 | 1,78E+08 | 6,80E+08 | 1,54E+08 | 8,12E+08 |
| 0,0180 | 1,20E+08 | 2,91E+08 | 5,29E+07 | 3,58E+08 | 1,79E+08 | 6,86E+08 | 1,55E+08 | 8,12E+08 |
| 0,0186 | 1,21E+08 | 2,93E+08 | 5,33E+07 | 3,60E+08 | 1,80E+08 | 6,90E+08 | 1,55E+08 | 8,12E+08 |
| 0,0192 | 1,21E+08 | 2,94E+08 | 5,36E+07 | 3,62E+08 | 1,81E+08 | 6,93E+08 | 1,56E+08 | 8,12E+08 |
| 0,0201 | 1,22E+08 | 2,96E+08 | 5,41E+07 | 3,64E+08 | 1,82E+08 | 6,98E+08 | 1,57E+08 | 8,13E+08 |
| 0,0210 | 1,23E+08 | 2,99E+08 | 5,46E+07 | 3,67E+08 | 1,83E+08 | 7,02E+08 | 1,58E+08 | 8,13E+08 |
| 0,0216 | 1,23E+08 | 3,00E+08 | 5,48E+07 | 3,69E+08 | 1,84E+08 | 7,05E+08 | 1,58E+08 | 8,13E+08 |
| 0,0222 | 1,24E+08 | 3,01E+08 | 5,51E+07 | 3,70E+08 | 1,84E+08 | 7,08E+08 | 1,59E+08 | 8,14E+08 |
| 0,0231 | 1,24E+08 | 3,03E+08 | 5,55E+07 | 3,73E+08 | 1,85E+08 | 7,12E+08 | 1,59E+08 | 8,15E+08 |
| 0,0240 | 1,25E+08 | 3,05E+08 | 5,58E+07 | 3,75E+08 | 1,86E+08 | 7,16E+08 | 1,60E+08 | 8,17E+08 |
| 0,0246 | 1,25E+08 | 3,07E+08 | 5,61E+07 | 3,76E+08 | 1,87E+08 | 7,18E+08 | 1,60E+08 | 8,19E+08 |
| 0,0252 | 1,26E+08 | 3,08E+08 | 5,63E+07 | 3,78E+08 | 1,87E+08 | 7,21E+08 | 1,61E+08 | 8,23E+08 |
| 0,0261 | 1,26E+08 | 3,10E+08 | 5,66E+07 | 3,80E+08 | 1,88E+08 | 7,24E+08 | 1,61E+08 | 8,26E+08 |
| 0,0270 | 1,27E+08 | 3,11E+08 | 5,69E+07 | 3,82E+08 | 1,89E+08 | 7,27E+08 | 1,62E+08 | 8,31E+08 |
| 0,0278 | 1,27E+08 | 3,13E+08 | 5,71E+07 | 3,83E+08 | 1,90E+08 | 7,30E+08 | 1,62E+08 | 8,32E+08 |
| 0,0285 | 1,28E+08 | 3,14E+08 | 5,74E+07 | 3,85E+08 | 1,90E+08 | 7,33E+08 | 1,63E+08 | 8,32E+08 |
| 0,0296 | 1,28E+08 | 3,16E+08 | 5,77E+07 | 3,87E+08 | 1,91E+08 | 7,36E+08 | 1,63E+08 | 8,33E+08 |
| 0,0300 | 1,28E+08 | 3,17E+08 | 5,78E+07 | 3,88E+08 | 1,91E+08 | 7,37E+08 | 1,64E+08 | 8,33E+08 |

Tabla 30: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 100 μm de lado con poros esféricos.

| Porosidad ϵ [-] | Esfuerzo [Pa] | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 48,49% | 47,18% | 38,62% | 37,30% | 37,30% | 27,93% | 27,63% |
| 0,0006 | 1,58E+07 | 7,48E+07 | 3,24E+07 | 2,63E+07 | 1,15E+08 | 7,67E+07 | 3,53E+07 |
| 0,0012 | 3,16E+07 | 1,50E+08 | 6,48E+07 | 5,26E+07 | 2,29E+08 | 1,53E+08 | 7,06E+07 |
| 0,0021 | 5,53E+07 | 2,62E+08 | 1,13E+08 | 9,20E+07 | 4,01E+08 | 2,68E+08 | 1,24E+08 |
| 0,0030 | 7,88E+07 | 3,72E+08 | 1,62E+08 | 1,31E+08 | 5,73E+08 | 3,83E+08 | 1,76E+08 |
| 0,0036 | 9,40E+07 | 4,43E+08 | 1,94E+08 | 1,57E+08 | 6,87E+08 | 4,58E+08 | 2,11E+08 |
| 0,0042 | 1,08E+08 | 5,10E+08 | 2,25E+08 | 1,83E+08 | 8,00E+08 | 5,30E+08 | 2,45E+08 |
| 0,0051 | 1,27E+08 | 5,99E+08 | 2,69E+08 | 2,20E+08 | 9,64E+08 | 6,32E+08 | 2,77E+08 |
| 0,0060 | 1,41E+08 | 6,76E+08 | 3,05E+08 | 2,53E+08 | 1,04E+09 | 7,20E+08 | 3,04E+08 |
| 0,0066 | 1,48E+08 | 7,18E+08 | 3,24E+08 | 2,72E+08 | 1,10E+09 | 7,68E+08 | 3,21E+08 |
| 0,0072 | 1,54E+08 | 7,55E+08 | 3,40E+08 | 2,87E+08 | 1,11E+09 | 8,08E+08 | 3,36E+08 |
| 0,0081 | 1,59E+08 | 7,99E+08 | 3,58E+08 | 3,04E+08 | 1,16E+09 | 8,53E+08 | 3,60E+08 |

| | | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,0090 | 1,63E+08 | 8,33E+08 | 3,71E+08 | 3,16E+08 | 1,20E+09 | 8,86E+08 | 3,80E+08 |
| 0,0096 | 1,65E+08 | 8,52E+08 | 3,78E+08 | 3,22E+08 | 1,23E+09 | 9,03E+08 | 4,03E+08 |
| 0,0102 | 1,67E+08 | 8,68E+08 | 3,84E+08 | 3,28E+08 | 1,26E+09 | 9,18E+08 | 4,05E+08 |
| 0,0111 | 1,69E+08 | 8,89E+08 | 3,90E+08 | 3,34E+08 | 1,29E+09 | 9,36E+08 | 4,06E+08 |
| 0,0120 | 1,71E+08 | 9,06E+08 | 3,96E+08 | 3,40E+08 | 1,31E+09 | 9,51E+08 | 4,09E+08 |
| 0,0126 | 1,72E+08 | 9,16E+08 | 3,99E+08 | 3,43E+08 | 1,33E+09 | 9,59E+08 | 4,12E+08 |
| 0,0132 | 1,74E+08 | 9,25E+08 | 4,02E+08 | 3,45E+08 | 1,35E+09 | 9,67E+08 | 4,16E+08 |
| 0,0141 | 1,75E+08 | 9,37E+08 | 4,06E+08 | 3,49E+08 | 1,37E+09 | 9,77E+08 | 4,20E+08 |
| 0,0150 | 1,77E+08 | 9,47E+08 | 4,09E+08 | 3,52E+08 | 1,38E+09 | 9,85E+08 | 4,28E+08 |
| 0,0156 | 1,78E+08 | 9,53E+08 | 4,11E+08 | 3,54E+08 | 1,40E+09 | 9,90E+08 | 4,35E+08 |
| 0,0162 | 1,79E+08 | 9,59E+08 | 4,13E+08 | 3,56E+08 | 1,41E+09 | 9,95E+08 | 4,44E+08 |
| 0,0171 | 1,80E+08 | 9,67E+08 | 4,15E+08 | 3,58E+08 | 1,42E+09 | 1,00E+09 | 4,51E+08 |
| 0,0180 | 1,81E+08 | 9,75E+08 | 4,18E+08 | 3,61E+08 | 1,43E+09 | 1,01E+09 | 4,54E+08 |
| 0,0186 | 1,82E+08 | 9,79E+08 | 4,19E+08 | 3,62E+08 | 1,43E+09 | 1,01E+09 | 4,58E+08 |
| 0,0192 | 1,83E+08 | 9,84E+08 | 4,21E+08 | 3,63E+08 | 1,44E+09 | 1,01E+09 | 4,63E+08 |
| 0,0201 | 1,84E+08 | 9,90E+08 | 4,23E+08 | 3,65E+08 | 1,45E+09 | 1,02E+09 | 4,67E+08 |
| 0,0210 | 1,85E+08 | 9,97E+08 | 4,25E+08 | 3,67E+08 | 1,46E+09 | 1,02E+09 | 4,69E+08 |
| 0,0216 | 1,86E+08 | 1,00E+09 | 4,26E+08 | 3,68E+08 | 1,47E+09 | 1,03E+09 | 4,71E+08 |
| 0,0222 | 1,86E+08 | 1,00E+09 | 4,27E+08 | 3,69E+08 | 1,47E+09 | 1,03E+09 | 4,74E+08 |
| 0,0231 | 1,87E+08 | 1,01E+09 | 4,29E+08 | 3,70E+08 | 1,47E+09 | 1,03E+09 | 4,77E+08 |
| 0,0240 | 1,88E+08 | 1,01E+09 | 4,30E+08 | 3,72E+08 | 1,47E+09 | 1,04E+09 | 4,78E+08 |
| 0,0246 | 1,89E+08 | 1,02E+09 | 4,31E+08 | 3,73E+08 | 1,47E+09 | 1,04E+09 | 4,80E+08 |
| 0,0252 | 1,90E+08 | 1,02E+09 | 4,32E+08 | 3,74E+08 | 1,47E+09 | 1,04E+09 | 4,82E+08 |
| 0,0261 | 1,90E+08 | 1,03E+09 | 4,34E+08 | 3,75E+08 | 1,48E+09 | 1,05E+09 | 4,84E+08 |
| 0,0270 | 1,91E+08 | 1,03E+09 | 4,35E+08 | 3,76E+08 | 1,48E+09 | 1,05E+09 | 4,86E+08 |
| 0,0278 | 1,92E+08 | 1,03E+09 | 4,37E+08 | 3,77E+08 | 1,48E+09 | 1,05E+09 | 4,87E+08 |
| 0,0285 | 1,93E+08 | 1,04E+09 | 4,38E+08 | 3,78E+08 | 1,49E+09 | 1,05E+09 | 4,88E+08 |
| 0,0296 | 1,94E+08 | 1,04E+09 | 4,39E+08 | 3,80E+08 | 1,49E+09 | 1,06E+09 | 4,90E+08 |
| 0,0300 | 1,94E+08 | 1,04E+09 | 4,40E+08 | 3,80E+08 | 1,50E+09 | 1,06E+09 | 4,91E+08 |

Tabla 31: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 150 μm de lado con poros esféricos.

| Porosidad ϵ [-] | Esfuerzo [Pa] | | | | | |
|-----------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 68,00% | 65,76% | 58,61% | 56,36% | 38,62% | 37,30% |
| 0,0006 | 5,23E+06 | 7,22E+06 | 1,12E+07 | 1,27E+07 | 2,86E+07 | 2,95E+07 |
| 0,0012 | 1,04E+07 | 1,44E+07 | 2,24E+07 | 2,54E+07 | 5,73E+07 | 5,90E+07 |
| 0,0021 | 1,81E+07 | 2,52E+07 | 3,92E+07 | 4,44E+07 | 1,00E+08 | 1,03E+08 |
| 0,0030 | 2,55E+07 | 3,56E+07 | 5,58E+07 | 6,29E+07 | 1,43E+08 | 1,48E+08 |
| 0,0036 | 3,03E+07 | 4,22E+07 | 6,67E+07 | 7,47E+07 | 1,71E+08 | 1,77E+08 |

| | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,0042 | 3,49E+07 | 4,82E+07 | 7,71E+07 | 8,59E+07 | 1,99E+08 | 2,06E+08 |
| 0,0051 | 4,12E+07 | 5,62E+07 | 9,14E+07 | 1,01E+08 | 2,40E+08 | 2,47E+08 |
| 0,0060 | 4,67E+07 | 6,27E+07 | 1,03E+08 | 1,14E+08 | 2,75E+08 | 2,83E+08 |
| 0,0066 | 4,97E+07 | 6,63E+07 | 1,09E+08 | 1,22E+08 | 2,96E+08 | 3,04E+08 |
| 0,0072 | 5,23E+07 | 6,93E+07 | 1,14E+08 | 1,28E+08 | 3,12E+08 | 3,20E+08 |
| 0,0081 | 5,55E+07 | 7,30E+07 | 1,19E+08 | 1,35E+08 | 3,32E+08 | 3,39E+08 |
| 0,0090 | 5,82E+07 | 7,60E+07 | 1,24E+08 | 1,40E+08 | 3,46E+08 | 3,53E+08 |
| 0,0096 | 5,97E+07 | 7,77E+07 | 1,26E+08 | 1,43E+08 | 3,53E+08 | 3,60E+08 |
| 0,0102 | 6,10E+07 | 7,93E+07 | 1,28E+08 | 1,46E+08 | 3,60E+08 | 3,66E+08 |
| 0,0111 | 6,28E+07 | 8,14E+07 | 1,31E+08 | 1,49E+08 | 3,67E+08 | 3,73E+08 |
| 0,0120 | 6,43E+07 | 8,32E+07 | 1,34E+08 | 1,51E+08 | 3,73E+08 | 3,79E+08 |
| 0,0126 | 6,52E+07 | 8,43E+07 | 1,36E+08 | 1,53E+08 | 3,76E+08 | 3,82E+08 |
| 0,0132 | 6,60E+07 | 8,53E+07 | 1,37E+08 | 1,54E+08 | 3,79E+08 | 3,85E+08 |
| 0,0141 | 6,71E+07 | 8,67E+07 | 1,39E+08 | 1,56E+08 | 3,83E+08 | 3,89E+08 |
| 0,0150 | 6,80E+07 | 8,80E+07 | 1,41E+08 | 1,58E+08 | 3,87E+08 | 3,93E+08 |
| 0,0156 | 6,86E+07 | 8,88E+07 | 1,42E+08 | 1,59E+08 | 3,89E+08 | 3,95E+08 |
| 0,0162 | 6,92E+07 | 8,95E+07 | 1,43E+08 | 1,60E+08 | 3,91E+08 | 3,97E+08 |
| 0,0171 | 7,00E+07 | 9,06E+07 | 1,44E+08 | 1,61E+08 | 3,93E+08 | 3,99E+08 |
| 0,0180 | 7,07E+07 | 9,15E+07 | 1,46E+08 | 1,63E+08 | 3,95E+08 | 4,02E+08 |
| 0,0186 | 7,11E+07 | 9,22E+07 | 1,47E+08 | 1,63E+08 | 3,97E+08 | 4,03E+08 |
| 0,0192 | 7,16E+07 | 9,27E+07 | 1,47E+08 | 1,64E+08 | 3,98E+08 | 4,05E+08 |
| 0,0201 | 7,22E+07 | 9,36E+07 | 1,49E+08 | 1,65E+08 | 4,00E+08 | 4,07E+08 |
| 0,0210 | 7,27E+07 | 9,44E+07 | 1,50E+08 | 1,66E+08 | 4,02E+08 | 4,08E+08 |
| 0,0216 | 7,31E+07 | 9,49E+07 | 1,50E+08 | 1,67E+08 | 4,03E+08 | 4,10E+08 |
| 0,0222 | 7,34E+07 | 9,53E+07 | 1,51E+08 | 1,68E+08 | 4,04E+08 | 4,11E+08 |
| 0,0231 | 7,39E+07 | 9,60E+07 | 1,52E+08 | 1,69E+08 | 4,05E+08 | 4,12E+08 |
| 0,0240 | 7,44E+07 | 9,67E+07 | 1,53E+08 | 1,69E+08 | 4,07E+08 | 4,14E+08 |
| 0,0246 | 7,47E+07 | 9,71E+07 | 1,53E+08 | 1,70E+08 | 4,08E+08 | 4,15E+08 |
| 0,0252 | 7,50E+07 | 9,75E+07 | 1,54E+08 | 1,71E+08 | 4,09E+08 | 4,16E+08 |
| 0,0261 | 7,55E+07 | 9,81E+07 | 1,55E+08 | 1,71E+08 | 4,10E+08 | 4,17E+08 |
| 0,0270 | 7,59E+07 | 9,86E+07 | 1,56E+08 | 1,72E+08 | 4,11E+08 | 4,18E+08 |
| 0,0278 | 7,62E+07 | 9,91E+07 | 1,56E+08 | 1,73E+08 | 4,12E+08 | 4,20E+08 |
| 0,0285 | 7,65E+07 | 9,95E+07 | 1,57E+08 | 1,73E+08 | 4,13E+08 | 4,21E+08 |
| 0,0296 | 7,70E+07 | 1,00E+08 | 1,58E+08 | 1,74E+08 | 4,14E+08 | 4,22E+08 |
| 0,0300 | 7,72E+07 | 1,00E+08 | 1,58E+08 | 1,75E+08 | 4,15E+08 | 4,23E+08 |

Tabla 32: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 150 μm de lado con poros esféricos.

| Porosidad ϵ [-] | Esfuerzo [Pa] | | | | | |
|-----------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 66,43% | 64,80% | 57,44% | 48,76% | 47,18% | 37,30% |
| 0,0006 | 6,09E+06 | 7,97E+06 | 1,27E+07 | 1,67E+07 | 1,82E+07 | 2,93E+07 |
| 0,0012 | 1,22E+07 | 1,59E+07 | 2,54E+07 | 3,35E+07 | 3,63E+07 | 5,87E+07 |
| 0,0021 | 2,12E+07 | 2,79E+07 | 4,44E+07 | 5,84E+07 | 6,35E+07 | 1,03E+08 |
| 0,0030 | 3,00E+07 | 3,96E+07 | 6,27E+07 | 8,25E+07 | 9,01E+07 | 1,47E+08 |
| 0,0036 | 3,56E+07 | 4,72E+07 | 7,41E+07 | 9,78E+07 | 1,07E+08 | 1,76E+08 |
| 0,0042 | 4,09E+07 | 5,45E+07 | 8,47E+07 | 1,12E+08 | 1,22E+08 | 2,05E+08 |
| 0,0051 | 4,79E+07 | 6,43E+07 | 9,90E+07 | 1,30E+08 | 1,43E+08 | 2,46E+08 |
| 0,0060 | 5,28E+07 | 7,21E+07 | 1,11E+08 | 1,44E+08 | 1,61E+08 | 2,81E+08 |
| 0,0066 | 5,51E+07 | 7,62E+07 | 1,17E+08 | 1,51E+08 | 1,71E+08 | 3,01E+08 |
| 0,0072 | 5,69E+07 | 7,96E+07 | 1,23E+08 | 1,57E+08 | 1,79E+08 | 3,17E+08 |
| 0,0081 | 5,93E+07 | 8,37E+07 | 1,30E+08 | 1,65E+08 | 1,89E+08 | 3,35E+08 |
| 0,0090 | 6,13E+07 | 8,70E+07 | 1,36E+08 | 1,71E+08 | 1,96E+08 | 3,48E+08 |
| 0,0096 | 6,24E+07 | 8,89E+07 | 1,39E+08 | 1,74E+08 | 2,01E+08 | 3,55E+08 |
| 0,0102 | 6,34E+07 | 9,07E+07 | 1,42E+08 | 1,77E+08 | 2,04E+08 | 3,60E+08 |
| 0,0111 | 6,47E+07 | 9,30E+07 | 1,45E+08 | 1,82E+08 | 2,09E+08 | 3,68E+08 |
| 0,0120 | 6,57E+07 | 9,50E+07 | 1,49E+08 | 1,85E+08 | 2,13E+08 | 3,73E+08 |
| 0,0126 | 6,64E+07 | 9,62E+07 | 1,51E+08 | 1,87E+08 | 2,16E+08 | 3,77E+08 |
| 0,0132 | 6,70E+07 | 9,73E+07 | 1,52E+08 | 1,89E+08 | 2,18E+08 | 3,80E+08 |
| 0,0141 | 6,78E+07 | 9,87E+07 | 1,55E+08 | 1,91E+08 | 2,21E+08 | 3,84E+08 |
| 0,0150 | 6,85E+07 | 1,00E+08 | 1,57E+08 | 1,94E+08 | 2,24E+08 | 3,87E+08 |
| 0,0156 | 6,89E+07 | 1,01E+08 | 1,58E+08 | 1,95E+08 | 2,25E+08 | 3,89E+08 |
| 0,0162 | 6,94E+07 | 1,02E+08 | 1,59E+08 | 1,96E+08 | 2,27E+08 | 3,91E+08 |
| 0,0171 | 7,00E+07 | 1,03E+08 | 1,61E+08 | 1,98E+08 | 2,29E+08 | 3,94E+08 |
| 0,0180 | 7,06E+07 | 1,04E+08 | 1,63E+08 | 2,00E+08 | 2,30E+08 | 3,96E+08 |
| 0,0186 | 7,10E+07 | 1,04E+08 | 1,64E+08 | 2,01E+08 | 2,32E+08 | 3,98E+08 |
| 0,0192 | 7,14E+07 | 1,05E+08 | 1,65E+08 | 2,02E+08 | 2,33E+08 | 3,99E+08 |
| 0,0201 | 7,19E+07 | 1,06E+08 | 1,66E+08 | 2,04E+08 | 2,34E+08 | 4,01E+08 |
| 0,0210 | 7,25E+07 | 1,06E+08 | 1,67E+08 | 2,05E+08 | 2,36E+08 | 4,03E+08 |
| 0,0216 | 7,28E+07 | 1,07E+08 | 1,68E+08 | 2,06E+08 | 2,37E+08 | 4,04E+08 |
| 0,0222 | 7,31E+07 | 1,07E+08 | 1,69E+08 | 2,07E+08 | 2,38E+08 | 4,05E+08 |
| 0,0231 | 7,36E+07 | 1,08E+08 | 1,70E+08 | 2,08E+08 | 2,39E+08 | 4,07E+08 |
| 0,0240 | 7,41E+07 | 1,08E+08 | 1,71E+08 | 2,09E+08 | 2,40E+08 | 4,09E+08 |
| 0,0246 | 7,44E+07 | 1,09E+08 | 1,71E+08 | 2,10E+08 | 2,41E+08 | 4,09E+08 |
| 0,0252 | 7,47E+07 | 1,09E+08 | 1,72E+08 | 2,11E+08 | 2,42E+08 | 4,10E+08 |
| 0,0261 | 7,51E+07 | 1,10E+08 | 1,73E+08 | 2,12E+08 | 2,43E+08 | 4,12E+08 |
| 0,0270 | 7,56E+07 | 1,10E+08 | 1,74E+08 | 2,13E+08 | 2,44E+08 | 4,13E+08 |

| | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,0278 | 7,59E+07 | 1,11E+08 | 1,75E+08 | 2,14E+08 | 2,45E+08 | 4,14E+08 |
| 0,0285 | 7,63E+07 | 1,11E+08 | 1,75E+08 | 2,14E+08 | 2,45E+08 | 4,15E+08 |
| 0,0296 | 7,68E+07 | 1,11E+08 | 1,76E+08 | 2,16E+08 | 2,47E+08 | 4,17E+08 |
| 0,0300 | 7,69E+07 | 1,12E+08 | 1,77E+08 | 2,16E+08 | 2,47E+08 | 4,17E+08 |

Tabla 33: Esfuerzo y deformación calculados para espumas de 200 μm de lado con poros esféricos.

| Porosidad ε [-] | Esfuerzo [Pa] | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 66,43% | 64,8% | 58,61% | 57,44% | 56,36% | 48,49% | 47,18% | 38,62% | 27,93% |
| 0,0006 | 6,11E+06 | 7,33E+06 | 1,07E+07 | 1,30E+07 | 1,11E+07 | 1,38E+07 | 1,87E+07 | 2,80E+07 | 3,41E+07 |
| 0,0012 | 1,22E+07 | 1,46E+07 | 2,14E+07 | 2,60E+07 | 2,21E+07 | 2,77E+07 | 3,74E+07 | 5,59E+07 | 6,82E+07 |
| 0,0021 | 2,11E+07 | 2,55E+07 | 3,74E+07 | 4,55E+07 | 3,85E+07 | 4,77E+07 | 6,54E+07 | 9,79E+07 | 1,19E+08 |
| 0,0030 | 2,98E+07 | 3,61E+07 | 5,29E+07 | 6,44E+07 | 5,39E+07 | 5,39E+07 | 9,31E+07 | 1,40E+08 | 1,70E+08 |
| 0,0036 | 3,54E+07 | 4,29E+07 | 6,29E+07 | 7,67E+07 | 6,35E+07 | 6,35E+07 | 1,11E+08 | 1,67E+08 | 2,03E+08 |
| 0,0042 | 4,07E+07 | 4,94E+07 | 7,22E+07 | 8,82E+07 | 7,26E+07 | 7,26E+07 | 1,27E+08 | 1,95E+08 | 2,36E+08 |
| 0,0051 | 4,78E+07 | 5,79E+07 | 8,48E+07 | 1,04E+08 | 8,51E+07 | 8,51E+07 | 1,50E+08 | 2,34E+08 | 2,81E+08 |
| 0,0060 | 5,34E+07 | 6,45E+07 | 9,56E+07 | 1,18E+08 | 9,58E+07 | 9,58E+07 | 1,69E+08 | 2,68E+08 | 3,20E+08 |
| 0,0066 | 5,63E+07 | 6,79E+07 | 1,01E+08 | 1,25E+08 | 1,02E+08 | 1,02E+08 | 1,80E+08 | 2,87E+08 | 3,41E+08 |
| 0,0072 | 5,85E+07 | 7,07E+07 | 1,06E+08 | 1,32E+08 | 1,07E+08 | 1,07E+08 | 1,89E+08 | 3,04E+08 | 3,59E+08 |
| 0,0081 | 6,11E+07 | 7,40E+07 | 1,12E+08 | 1,40E+08 | 1,13E+08 | 1,13E+08 | 2,00E+08 | 3,23E+08 | 3,79E+08 |
| 0,0090 | 6,31E+07 | 7,66E+07 | 1,17E+08 | 1,46E+08 | 1,18E+08 | 1,18E+08 | 2,08E+08 | 3,37E+08 | 3,94E+08 |
| 0,0096 | 6,42E+07 | 7,81E+07 | 1,20E+08 | 1,49E+08 | 1,21E+08 | 1,21E+08 | 2,13E+08 | 3,44E+08 | 4,02E+08 |
| 0,0102 | 6,51E+07 | 7,95E+07 | 1,22E+08 | 1,52E+08 | 1,23E+08 | 1,23E+08 | 2,17E+08 | 3,51E+08 | 4,08E+08 |
| 0,0111 | 6,64E+07 | 8,12E+07 | 1,25E+08 | 1,56E+08 | 1,26E+08 | 1,26E+08 | 2,22E+08 | 3,59E+08 | 4,16E+08 |
| 0,0120 | 6,75E+07 | 8,27E+07 | 1,28E+08 | 1,59E+08 | 1,29E+08 | 1,29E+08 | 2,27E+08 | 3,65E+08 | 4,23E+08 |
| 0,0126 | 6,82E+07 | 8,37E+07 | 1,30E+08 | 1,60E+08 | 1,31E+08 | 1,31E+08 | 2,29E+08 | 3,69E+08 | 4,26E+08 |
| 0,0132 | 6,88E+07 | 8,45E+07 | 1,31E+08 | 1,62E+08 | 1,32E+08 | 1,32E+08 | 2,31E+08 | 3,72E+08 | 4,30E+08 |
| 0,0141 | 6,97E+07 | 8,56E+07 | 1,33E+08 | 1,64E+08 | 1,34E+08 | 1,34E+08 | 2,34E+08 | 3,76E+08 | 4,34E+08 |
| 0,0150 | 7,05E+07 | 8,67E+07 | 1,35E+08 | 1,66E+08 | 1,36E+08 | 1,36E+08 | 2,37E+08 | 3,80E+08 | 4,38E+08 |
| 0,0156 | 7,09E+07 | 8,73E+07 | 1,36E+08 | 1,67E+08 | 1,37E+08 | 1,37E+08 | 2,38E+08 | 3,82E+08 | 4,40E+08 |
| 0,0162 | 7,14E+07 | 8,79E+07 | 1,37E+08 | 1,69E+08 | 1,39E+08 | 1,39E+08 | 2,40E+08 | 3,84E+08 | 4,42E+08 |
| 0,0171 | 7,21E+07 | 8,87E+07 | 1,39E+08 | 1,70E+08 | 1,40E+08 | 1,40E+08 | 2,42E+08 | 3,87E+08 | 4,45E+08 |
| 0,0180 | 7,27E+07 | 8,95E+07 | 1,40E+08 | 1,72E+08 | 1,42E+08 | 1,42E+08 | 2,44E+08 | 3,89E+08 | 4,48E+08 |
| 0,0186 | 7,31E+07 | 9,00E+07 | 1,41E+08 | 1,72E+08 | 1,42E+08 | 1,42E+08 | 2,45E+08 | 3,91E+08 | 4,49E+08 |
| 0,0192 | 7,35E+07 | 9,04E+07 | 1,42E+08 | 1,73E+08 | 1,43E+08 | 1,43E+08 | 2,46E+08 | 3,92E+08 | 4,51E+08 |
| 0,0201 | 7,41E+07 | 9,11E+07 | 1,43E+08 | 1,74E+08 | 1,45E+08 | 1,45E+08 | 2,48E+08 | 3,94E+08 | 4,53E+08 |
| 0,0210 | 7,46E+07 | 9,17E+07 | 1,44E+08 | 1,76E+08 | 1,46E+08 | 1,46E+08 | 2,49E+08 | 3,96E+08 | 4,55E+08 |
| 0,0216 | 7,50E+07 | 9,22E+07 | 1,45E+08 | 1,76E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 2,50E+08 | 3,97E+08 | 4,56E+08 |
| 0,0222 | 7,53E+07 | 9,26E+07 | 1,46E+08 | 1,77E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 2,51E+08 | 3,99E+08 | 4,57E+08 |

| | | | | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,0231 | 7,58E+07 | 9,31E+07 | 1,47E+08 | 1,78E+08 | 1,48E+08 | 1,48E+08 | 2,52E+08 | 4,00E+08 | 4,59E+08 |
| 0,0240 | 7,63E+07 | 9,37E+07 | 1,48E+08 | 1,79E+08 | 1,49E+08 | 1,49E+08 | 2,54E+08 | 4,02E+08 | 4,61E+08 |
| 0,0246 | 7,66E+07 | 9,40E+07 | 1,48E+08 | 1,80E+08 | 1,50E+08 | 1,50E+08 | 2,55E+08 | 4,03E+08 | 4,62E+08 |
| 0,0252 | 7,69E+07 | 9,44E+07 | 1,49E+08 | 1,80E+08 | 1,51E+08 | 1,51E+08 | 2,55E+08 | 4,04E+08 | 4,63E+08 |
| 0,0261 | 7,74E+07 | 9,49E+07 | 1,50E+08 | 1,81E+08 | 1,51E+08 | 1,51E+08 | 2,57E+08 | 4,05E+08 | 4,65E+08 |
| 0,0270 | 7,78E+07 | 9,54E+07 | 1,50E+08 | 1,82E+08 | 1,52E+08 | 1,52E+08 | 2,58E+08 | 4,06E+08 | 4,66E+08 |
| 0,0278 | 7,82E+07 | 9,58E+07 | 1,51E+08 | 1,82E+08 | 1,53E+08 | 1,53E+08 | 2,59E+08 | 4,07E+08 | 4,67E+08 |
| 0,0285 | 7,86E+07 | 9,62E+07 | 1,52E+08 | 1,83E+08 | 1,54E+08 | 1,54E+08 | 2,59E+08 | 4,08E+08 | 4,68E+08 |
| 0,0296 | 7,91E+07 | 9,68E+07 | 1,53E+08 | 1,84E+08 | 1,55E+08 | 1,55E+08 | 2,61E+08 | 4,09E+08 | 4,70E+08 |
| 0,0300 | 7,92E+07 | 9,70E+07 | 1,53E+08 | 1,84E+08 | 1,55E+08 | 1,55E+08 | 2,61E+08 | 4,10E+08 | 4,71E+08 |

Tabla 34: Esfuerzo y deformación calculados para espumas con poros elípticos.

| Porosidad ϵ [-] | Esfuerzo [Pa] | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 27,84% | 28,27% | 28,54% | 33,88% | 34,24% | 44,61% | 45,85% |
| 0,001 | 3,67E+07 | 3,64E+07 | 3,61E+07 | 3,26E+07 | 3,26E+07 | 1,96E+07 | 1,90E+07 |
| 0,001 | 7,33E+07 | 7,27E+07 | 7,22E+07 | 6,52E+07 | 6,52E+07 | 3,92E+07 | 3,80E+07 |
| 0,002 | 1,28E+08 | 1,27E+08 | 1,26E+08 | 1,14E+08 | 1,14E+08 | 6,85E+07 | 6,63E+07 |
| 0,003 | 1,83E+08 | 1,82E+08 | 1,80E+08 | 1,63E+08 | 1,63E+08 | 9,74E+07 | 9,42E+07 |
| 0,004 | 2,20E+08 | 2,18E+08 | 2,16E+08 | 1,95E+08 | 1,95E+08 | 1,16E+08 | 1,12E+08 |
| 0,004 | 2,56E+08 | 2,53E+08 | 2,51E+08 | 2,28E+08 | 2,27E+08 | 1,34E+08 | 1,29E+08 |
| 0,005 | 3,08E+08 | 3,05E+08 | 3,03E+08 | 2,74E+08 | 2,72E+08 | 1,58E+08 | 1,52E+08 |
| 0,006 | 3,55E+08 | 3,52E+08 | 3,49E+08 | 3,17E+08 | 3,13E+08 | 1,79E+08 | 1,71E+08 |
| 0,007 | 3,82E+08 | 3,79E+08 | 3,75E+08 | 3,41E+08 | 3,35E+08 | 1,90E+08 | 1,81E+08 |
| 0,007 | 4,05E+08 | 4,01E+08 | 3,97E+08 | 3,61E+08 | 3,54E+08 | 1,99E+08 | 1,89E+08 |
| 0,008 | 4,31E+08 | 4,27E+08 | 4,22E+08 | 3,84E+08 | 3,76E+08 | 2,10E+08 | 1,99E+08 |
| 0,009 | 4,49E+08 | 4,45E+08 | 4,40E+08 | 3,99E+08 | 3,93E+08 | 2,19E+08 | 2,07E+08 |
| 0,010 | 4,58E+08 | 4,54E+08 | 4,49E+08 | 4,08E+08 | 4,01E+08 | 2,24E+08 | 2,12E+08 |
| 0,010 | 4,65E+08 | 4,61E+08 | 4,56E+08 | 4,14E+08 | 4,09E+08 | 2,28E+08 | 2,16E+08 |
| 0,011 | 4,74E+08 | 4,71E+08 | 4,65E+08 | 4,23E+08 | 4,18E+08 | 2,33E+08 | 2,21E+08 |
| 0,012 | 4,81E+08 | 4,78E+08 | 4,72E+08 | 4,30E+08 | 4,25E+08 | 2,38E+08 | 2,25E+08 |
| 0,013 | 4,85E+08 | 4,82E+08 | 4,76E+08 | 4,33E+08 | 4,29E+08 | 2,40E+08 | 2,28E+08 |
| 0,013 | 4,88E+08 | 4,85E+08 | 4,80E+08 | 4,37E+08 | 4,33E+08 | 2,43E+08 | 2,30E+08 |
| 0,014 | 4,92E+08 | 4,90E+08 | 4,84E+08 | 4,41E+08 | 4,37E+08 | 2,46E+08 | 2,33E+08 |
| 0,015 | 4,96E+08 | 4,94E+08 | 4,88E+08 | 4,45E+08 | 4,42E+08 | 2,49E+08 | 2,36E+08 |
| 0,016 | 4,98E+08 | 4,96E+08 | 4,90E+08 | 4,47E+08 | 4,44E+08 | 2,51E+08 | 2,38E+08 |
| 0,016 | 5,01E+08 | 4,98E+08 | 4,92E+08 | 4,49E+08 | 4,46E+08 | 2,52E+08 | 2,39E+08 |
| 0,017 | 5,03E+08 | 5,01E+08 | 4,95E+08 | 4,52E+08 | 4,50E+08 | 2,54E+08 | 2,42E+08 |
| 0,018 | 5,06E+08 | 5,03E+08 | 4,98E+08 | 4,55E+08 | 4,52E+08 | 2,57E+08 | 2,44E+08 |
| 0,019 | 5,08E+08 | 5,05E+08 | 4,99E+08 | 4,56E+08 | 4,54E+08 | 2,58E+08 | 2,45E+08 |
| 0,019 | 5,09E+08 | 5,06E+08 | 5,01E+08 | 4,58E+08 | 4,56E+08 | 2,59E+08 | 2,46E+08 |

| | | | | | | | |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,020 | 5,11E+08 | 5,08E+08 | 5,03E+08 | 4,60E+08 | 4,58E+08 | 2,61E+08 | 2,48E+08 |
| 0,021 | 5,13E+08 | 5,10E+08 | 5,05E+08 | 4,62E+08 | 4,60E+08 | 2,63E+08 | 2,50E+08 |
| 0,022 | 5,14E+08 | 5,11E+08 | 5,06E+08 | 4,63E+08 | 4,62E+08 | 2,64E+08 | 2,51E+08 |
| 0,022 | 5,15E+08 | 5,13E+08 | 5,07E+08 | 4,64E+08 | 4,63E+08 | 2,65E+08 | 2,52E+08 |
| 0,023 | 5,17E+08 | 5,14E+08 | 5,09E+08 | 4,66E+08 | 4,65E+08 | 2,66E+08 | 2,53E+08 |
| 0,024 | 5,19E+08 | 5,16E+08 | 5,10E+08 | 4,67E+08 | 4,67E+08 | 2,68E+08 | 2,55E+08 |
| 0,025 | 5,20E+08 | 5,17E+08 | 5,11E+08 | 4,68E+08 | 4,68E+08 | 2,69E+08 | 2,55E+08 |
| 0,025 | 5,21E+08 | 5,18E+08 | 5,12E+08 | 4,69E+08 | 4,69E+08 | 2,69E+08 | 2,56E+08 |
| 0,026 | 5,22E+08 | 5,19E+08 | 5,14E+08 | 4,71E+08 | 4,71E+08 | 2,71E+08 | 2,57E+08 |
| 0,027 | 5,24E+08 | 5,21E+08 | 5,15E+08 | 4,72E+08 | 4,72E+08 | 2,72E+08 | 2,59E+08 |
| 0,028 | 5,25E+08 | 5,22E+08 | 5,16E+08 | 4,73E+08 | 4,73E+08 | 2,73E+08 | 2,60E+08 |
| 0,029 | 5,26E+08 | 5,23E+08 | 5,17E+08 | 4,74E+08 | 4,74E+08 | 2,74E+08 | 2,61E+08 |
| 0,030 | 5,27E+08 | 5,24E+08 | 5,19E+08 | 4,76E+08 | 4,76E+08 | 2,75E+08 | 2,62E+08 |
| 0,030 | 5,28E+08 | 5,25E+08 | 5,19E+08 | 4,76E+08 | 4,77E+08 | 2,76E+08 | 2,62E+08 |

Tabla 35: Esfuerzo y deformación calculados para espumas con poros elípticos.

| | | Esfuerzo [Pa] | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Porosidad ϵ [-] | | 27,84% | 28,27% | 28,54% | 33,88% | 34,24% | 44,61% | 45,85% |
| | 0,001 | | 1,85E+07 | 1,25E+07 | 1,11E+07 | 1,09E+07 | 9,84E+06 | 8,84E+06 |
| 0,001 | | 3,69E+07 | 2,50E+07 | 2,21E+07 | 2,18E+07 | 1,97E+07 | 1,77E+07 | 1,97E+07 |
| 0,002 | | 6,43E+07 | 4,37E+07 | 3,87E+07 | 3,80E+07 | 3,42E+07 | 3,09E+07 | 3,42E+07 |
| 0,003 | | 9,11E+07 | 6,22E+07 | 5,49E+07 | 5,38E+07 | 4,80E+07 | 4,39E+07 | 4,80E+07 |
| 0,004 | | 1,08E+08 | 7,41E+07 | 6,53E+07 | 6,37E+07 | 5,66E+07 | 5,22E+07 | 5,66E+07 |
| 0,004 | | 1,24E+08 | 8,56E+07 | 7,47E+07 | 7,29E+07 | 6,45E+07 | 6,01E+07 | 6,45E+07 |
| 0,005 | | 1,46E+08 | 1,01E+08 | 8,73E+07 | 8,47E+07 | 7,48E+07 | 7,05E+07 | 7,48E+07 |
| 0,006 | | 1,63E+08 | 1,15E+08 | 9,75E+07 | 9,41E+07 | 8,28E+07 | 7,88E+07 | 8,28E+07 |
| 0,007 | | 1,73E+08 | 1,22E+08 | 1,03E+08 | 9,94E+07 | 8,67E+07 | 8,32E+07 | 8,67E+07 |
| 0,007 | | 1,81E+08 | 1,29E+08 | 1,08E+08 | 1,04E+08 | 8,98E+07 | 8,69E+07 | 8,98E+07 |
| 0,008 | | 1,90E+08 | 1,36E+08 | 1,14E+08 | 1,09E+08 | 9,36E+07 | 9,15E+07 | 9,36E+07 |
| 0,009 | | 1,98E+08 | 1,42E+08 | 1,18E+08 | 1,14E+08 | 9,68E+07 | 9,52E+07 | 9,68E+07 |
| 0,010 | | 2,02E+08 | 1,46E+08 | 1,21E+08 | 1,17E+08 | 9,86E+07 | 9,72E+07 | 9,86E+07 |
| 0,010 | | 2,05E+08 | 1,49E+08 | 1,23E+08 | 1,19E+08 | 1,00E+08 | 9,90E+07 | 1,00E+08 |
| 0,011 | | 2,10E+08 | 1,53E+08 | 1,26E+08 | 1,22E+08 | 1,03E+08 | 1,01E+08 | 1,03E+08 |
| 0,012 | | 2,14E+08 | 1,56E+08 | 1,28E+08 | 1,25E+08 | 1,05E+08 | 1,03E+08 | 1,05E+08 |
| 0,013 | | 2,16E+08 | 1,58E+08 | 1,30E+08 | 1,26E+08 | 1,06E+08 | 1,05E+08 | 1,06E+08 |
| 0,013 | | 2,18E+08 | 1,59E+08 | 1,31E+08 | 1,28E+08 | 1,07E+08 | 1,06E+08 | 1,07E+08 |
| 0,014 | | 2,21E+08 | 1,62E+08 | 1,33E+08 | 1,30E+08 | 1,09E+08 | 1,07E+08 | 1,09E+08 |
| 0,015 | | 2,23E+08 | 1,64E+08 | 1,35E+08 | 1,31E+08 | 1,10E+08 | 1,08E+08 | 1,10E+08 |
| 0,016 | | 2,25E+08 | 1,65E+08 | 1,36E+08 | 1,32E+08 | 1,11E+08 | 1,09E+08 | 1,11E+08 |

| | | | | | | | |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,016 | 2,26E+08 | 1,66E+08 | 1,37E+08 | 1,34E+08 | 1,12E+08 | 1,10E+08 | 1,12E+08 |
| 0,017 | 2,28E+08 | 1,68E+08 | 1,39E+08 | 1,35E+08 | 1,13E+08 | 1,11E+08 | 1,13E+08 |
| 0,018 | 2,30E+08 | 1,70E+08 | 1,40E+08 | 1,36E+08 | 1,14E+08 | 1,12E+08 | 1,14E+08 |
| 0,019 | 2,31E+08 | 1,71E+08 | 1,41E+08 | 1,37E+08 | 1,15E+08 | 1,13E+08 | 1,15E+08 |
| 0,019 | 2,32E+08 | 1,71E+08 | 1,42E+08 | 1,38E+08 | 1,16E+08 | 1,13E+08 | 1,16E+08 |
| 0,020 | 2,34E+08 | 1,73E+08 | 1,43E+08 | 1,39E+08 | 1,17E+08 | 1,14E+08 | 1,17E+08 |
| 0,021 | 2,36E+08 | 1,74E+08 | 1,44E+08 | 1,40E+08 | 1,18E+08 | 1,15E+08 | 1,18E+08 |
| 0,022 | 2,37E+08 | 1,75E+08 | 1,44E+08 | 1,41E+08 | 1,18E+08 | 1,16E+08 | 1,18E+08 |
| 0,022 | 2,37E+08 | 1,75E+08 | 1,45E+08 | 1,41E+08 | 1,19E+08 | 1,16E+08 | 1,19E+08 |
| 0,023 | 2,39E+08 | 1,77E+08 | 1,46E+08 | 1,42E+08 | 1,20E+08 | 1,17E+08 | 1,20E+08 |
| 0,024 | 2,40E+08 | 1,78E+08 | 1,47E+08 | 1,43E+08 | 1,21E+08 | 1,17E+08 | 1,21E+08 |
| 0,025 | 2,41E+08 | 1,78E+08 | 1,47E+08 | 1,44E+08 | 1,21E+08 | 1,18E+08 | 1,21E+08 |
| 0,025 | 2,42E+08 | 1,79E+08 | 1,48E+08 | 1,44E+08 | 1,22E+08 | 1,18E+08 | 1,22E+08 |
| 0,026 | 2,43E+08 | 1,80E+08 | 1,49E+08 | 1,45E+08 | 1,22E+08 | 1,19E+08 | 1,22E+08 |
| 0,027 | 2,44E+08 | 1,81E+08 | 1,50E+08 | 1,46E+08 | 1,23E+08 | 1,19E+08 | 1,23E+08 |
| 0,028 | 2,45E+08 | 1,81E+08 | 1,50E+08 | 1,46E+08 | 1,24E+08 | 1,20E+08 | 1,24E+08 |
| 0,029 | 2,46E+08 | 1,82E+08 | 1,51E+08 | 1,47E+08 | 1,24E+08 | 1,20E+08 | 1,24E+08 |
| 0,030 | 2,47E+08 | 1,83E+08 | 1,52E+08 | 1,48E+08 | 1,25E+08 | 1,21E+08 | 1,25E+08 |
| 0,030 | 2,48E+08 | 1,83E+08 | 1,52E+08 | 1,48E+08 | 1,25E+08 | 1,21E+08 | 1,25E+08 |