



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Ingeniería Mecánica – Diseño Mecánico

“ESTUDIO NUMÉRICO DE MATERIALES METÁLICOS POROSOS SOMETIDOS
A CARGAS DINÁMICAS.”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
Ing. José Luis Ramírez Cruz

TUTOR PRINCIPAL
Dr. Fernando Velázquez Villegas
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, enero, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ruiz Huerta Leopoldo
Secretario: Dr. Caballero Ruiz Alberto
Vocal: Dr. Velázquez Villegas Fernando
1 er. Suplente: Dr. Figueroa Vargas Ignacio Alejandro
2 d o. Suplente: Dr. Lara Rodríguez Gabriel Ángel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Velázquez Villegas Fernando

FIRMA

Agradecimientos

A mis padres, ustedes que siempre han creído en mí y todo su apoyo incondicional que me han brindado.

A Zoilis, tu que has estado a mi lado de forma incondicional, tu apoyo y motivación que me das.

A mis hermanos (Marisa y Luis), nunca olvidaré todo sus cuidados y atenciones que tuvieron hacia mí.

Al Dr. Fernando Velázquez Villegas por ser mi tutor, quien me ha brindado su apoyo y respaldo.

A mis compañeros de laboratorio (Alex, Asahel, Carlos, Daniel, Fernando y Luis Eduardo) por todos sus consejos y apoyo durante este proceso.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA-UNAM) por el apoyo para realizar esta investigación a través del proyecto PAPIIT IN113315 "Mecánica computacional y optimización como línea de investigación en el diseño mecánico"

Dedicada con todo mi cariño a:

Isabel y Anastacio

Zoila

María Isabel y Luis Jaime

Santi y Emi

Contenido

Introducción	1
Capítulo I: Antecedentes	2
I.1 Ventajas.....	3
I.2 Aplicaciones.....	3
I.3 Caracterización de espumas metálicas	7
Capítulo II: Objetivos	13
Capítulo III: Metodología	14
III.1 Validación de software.....	15
III.2 Proceso de caracterización.....	19
III.3 Implementación de metodología.....	23
Capítulo IV: Análisis de resultados.....	28
Capítulo V: Conclusiones.....	29
Anexo A	30
Anexo A.1	31
Anexo A.2	33
Anexo A.3	35
Anexo A.4	37
Anexo A.5	39
Anexo A.6	41
Anexo A.7	43
Anexo A.8	45
Referencias.....	47

Introducción

Los sólidos porosos y sólidos celulares se han convertido en materiales muy atractivos debido a su baja densidad que permite construir componentes ligeros, otros atributos por los que han destacado es por su capacidad para disipar distintos tipos de energía: acústica, cinética y térmica. Permitiendo tener una gran área de oportunidad para su aplicación en algunos productos específicos y algunos sectores industriales como: automotriz, aeronáutico, aeroespacial, naval, ferroviaria, de la construcción y biomédicas.

Los resultados de estas aplicaciones han sido favorables, por lo que ha surgido la necesidad de producir estos componentes con distintos materiales base, los cuales permitan satisfacer necesidades específicas, así como identificar nuevas aplicaciones y desarrollar nuevos productos. En el caso de diseño mecánico las propiedades de interés son: módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para estudiar su comportamiento lineal elástico, por lo que algunos autores han propuesto metodologías para predecir estas propiedades, dejando a un lado las propiedades requeridas para el caso de falla programada, donde se requiere el esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y deformación máxima.

El presente trabajo tiene como objetivo predecir las propiedades mecánicas de los materiales porosos mediante la simulación numérica de un ensayo de compresión.

La metodología aplicada para generar el modelo 3D, considera que los poros están constituidos por huecos esféricos que se encuentran interconectados o aislados entre sí. Para representar la distribución aleatoria de los poros, se emplea un algoritmo encargado de generar las coordenadas del centro de las esferas. Esto es utilizado para generar el modelo 3D en un software CAD y posteriormente ser exportado a un software de análisis por elementos finitos para simular cuasi-estáticamente la compresión de la pieza alcanzar el esfuerzo máximo, considerando a éste como el momento en que se produce la falla del material.

Con base en los resultados de trabajo externo – tiempo, los parámetros del análisis y las dimensiones de la probeta, se realizan los cálculos para obtener el diagrama de esfuerzo deformación y con ello determinar las propiedades mecánicas que describan su comportamiento elástico y plástico.

Esta metodología se aplica para estudiar el comportamiento que tienen las probetas porosas de aluminio 6061-T6 en tres distintos escenarios:

Se considera que el material matriz de las probetas a analizar es aluminio 6061-T6. En este caso se estudia el comportamiento de los materiales porosos para determinar el impacto que tiene la distribución de poros, tamaño de los poros y el porcentaje de porosidad.

Capítulo I: Antecedentes

Los metales porosos se encuentran compuestos por una estructura sólida y cavidades en su interior, mejor conocidas como celdas de poro. De acuerdo con la distribución de poros las espumas pueden ser consideradas como espumas con celda de poro abierto en caso de que exista interacción entre los poros al intersectarse entre sí (Figura 1 a). En caso contrario se considera como celda de poro cerrado y es cuando los poros son aislados por delgadas paredes (Figura 1 b).

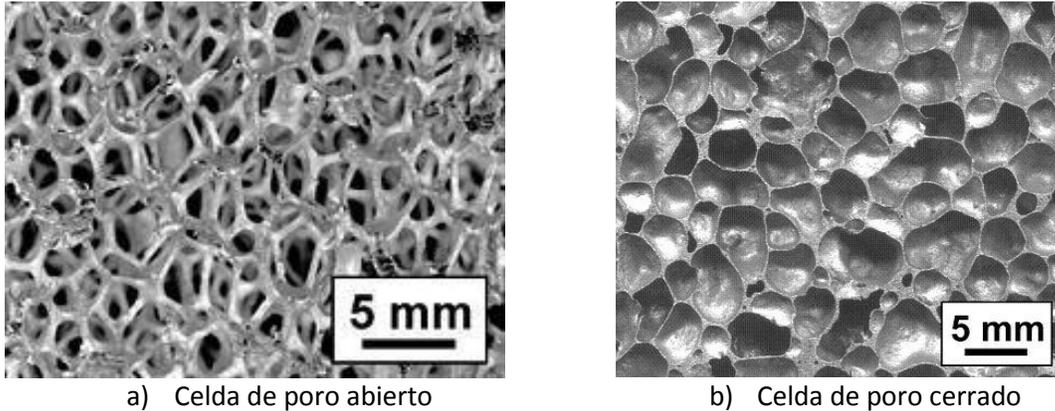


Figura 1: Tipos de celdas en espumas metálicas [1].

La porosidad (ϕ) es una propiedad de los materiales porosos que representa la proporción de volumen del material sustraído por los poros con respecto al volumen total de la probeta y está definida como $\frac{V_{\text{Poros}}}{V_{\text{Total}}}$, donde V_{poros} representa el volumen de los poros y V_{Total} es el volumen que representa la probeta como si fuera completamente sólida [2]

En la práctica es complicado calcular el volumen de poros, en este caso se calcula la densidad relativa ($\bar{\rho}$), la cual representa la proporción del volumen de la estructura sólida respecto al volumen de la probeta y está definida como $\frac{\rho^*}{\rho_s}$, donde ρ^* es la densidad del material celular y ρ_s la del material que forma el sólido. En caso que la $\bar{\rho} < 0.3$ la espuma se considera como sólido celular, en caso contrario se considera como sólido poroso (Figura 2).



Figura 2: Esquema de diferencia entre un sólido celular y un material poroso [2].

I.1 Ventajas

Las ventajas competitivas de los materiales porosos ante los materiales convencionales son [3]:

- Menor densidad
La sustracción de material debido a la presencia de poros permite tener materiales más ligeros, como consecuencia la densidad es menor.
- Disipación de energía
La ausencia de material disminuye la rigidez original de los materiales. Lo cual permite obtener mayores deformaciones con menores cargas.
- Disipación de calor
La presencia de poros permite incrementar la superficie de contacto, como resultados la disipación de calor es mayor.
- Disipación acústica
En el caso de las frecuencias acústicas que viajan en onda, son disipadas al chocar en contra de las superficies de los poros, disminuyendo el ruido o vibraciones.

I.2 Aplicaciones

Los materiales porosos cuentan con una gran área de oportunidad debido a sus propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas. Por lo que es posible ver su aplicación en diversos sectores industriales y casos específicos.

I.2.1 Sector industrial

I.2.1.1 Industria automotriz

Los beneficios de la aplicación de materiales porosos en elementos estructurales del vehículo son:

- Disipar la energía cinética que se transmite al usuario ante una colisión mediante elementos de deformación programada.
- Disminuir el peso de la estructura y del vehículo para reducir el consumo de combustible.
- Reducir las emisiones acústicas generadas por el motor o mal estado del camino.



Figura 3: Parachoques con núcleo de espuma metálica [4].

1.2.1.2 Industrial aeronáutica y aeroespacial

Las láminas de aluminio espumado o paneles sándwich de espuma metálica son una alternativa sustituir a las placas honeycomb, el cual es un material muy recurrido debido a su baja densidad y alta resistencia. La ventaja de su implementación es ser un material compuesto sin unión adhesiva y puede ser fabricado con curvaturas en contraste de las honeycomb que sólo son fabricados con superficies planas [1].



Figura 4: Espuma estructural "ROHACELL® HERO- Evonik" [5].

La aplicación en elementos estructurales permite mitigar las vibraciones producidas durante el despegue y disipar la energía de impacto durante el aterrizaje. En el caso de dispositivos aeroespaciales es posible apreciar escudos de espumas metálicas para disipar el impacto de un meteorito pequeño o de basura espacial [6].



Figura 5: Escudos de espuma contra micrometeoritos [6].

1.2.1.3 Industrial naval

En sector naval se aplican metales porosos principalmente para disminuir la carga a bordo en algunos componentes de los buques, tal como en las plataformas de los ascensores, mamparas estructurales y plataformas de antena. Mientras que en los armarios y lanzadores para disipar calor y vibraciones [3].

1.2.1.4 Industria ferroviaria

El sector ferroviario comparte los tres objetivos fundamentales con la industria automotriz, tales como: disipar la mayor energía posible ante una colisión (principalmente en zonas urbanas donde existe el riesgo de una colisión contra un automóvil), estructuras ligeras y disipar frecuencias de ruido y vibraciones.



Figura 6: Cabina de tren construida con láminas tipo sándwich [7].

I.2.1.5 Industria de la construcción

En este sector se aplican las espumas metálicas para tener estructuras y edificios de menor peso con alta resistencia mecánica. Durante un sismo estas estructuras disiparán las cargas transmitidas durante el movimiento. También es utilizado con un elemento decorativo (Figura 7).



Figura 7: Plafón de aluminio celular [8].

I.2.1.6 Industria biomédica

En la actualidad las espumas de titanio son empleadas para implantes ortopédicos [9] [10] y dentales [11]. Las ventajas que presentan estos materiales ante los convencionales son: menor densidad, propiedades mecánicas similares a las del hueso y ser manipulables tanto para su esterilización como en su colocación.



Figura 8: Aplicación de material poroso para implante de cadera [10].

1.2.2 Aplicaciones específicas

Las aplicaciones específicas hacen referencia a la solución de problemáticas concretas que existen en diversos rubros, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1: Aplicaciones específicas de las espumas metálicas [12].

Aplicación	Descripción
Filtración y separación	Esta aplicación es considerada con base en las espumas metálicas, que debido a su estructura entrelazada se permite el flujo de aire y líquidos, mientras que partículas de mayor tamaño que los poros serán capturados. Casos de aplicación filtros de aire y agua.
Intercambiadores de calor	La mejora que brindan las espumas metálicas en los intercambiadores de calor se atribuye a que, al tener mayor superficie de contacto, se incrementa la transferencia o disipación de calor.
Control del flujo en fluidos	En el control de flujo las espumas metálicas realizan la función de una tobera, debido a que la estructura entrelazada que poseen las espumas de poro abierto permite el tránsito de fluidos, el cual es menor como consecuencia de reducir la sección transversal del conducto.
Purificadores de agua	Las espumas metálicas en purificadores de agua realizan la misma tarea como en los filtros, al permitir el flujo del agua y retener las partículas no deseadas.
Disipador acústico	La disipación acústica se realiza al momento en que las ondas acústicas se propagan en la estructura porosa de las espumas, disminuyendo la reflexión acústica.
Estructuras ligeras	La sustracción de material mediante la existencia de poros, disminuye el peso de las estructuras con alta resistencia mecánica.
Disipadores de energía	La disminución de rigidez al incrementar la porosidad y a la alta deformación de las espumas metálicas se absorbe mayor energía.

I.3 Caracterización de espumas metálicas

La caracterización de los materiales es el proceso que sirve para conocer las propiedades mecánicas de los materiales, siendo el módulo de Young [E], esfuerzo de fluencia [σ_Y], esfuerzo último [σ_U] y deformación máxima [$\epsilon_{\text{máx}}$] las propiedades de interés en el presente trabajo. En la literatura se encuentra reportadas algunas metodologías propuestas por diversos autores para caracterizar las espumas metálicas, las cuales pueden ser clasificadas en 3 grupos:

- Método experimental
- Método analítico
- Método numérico

I.3.1 *Método experimental*

Los ensayos de tracción, compresión y flexión, son pruebas destructivas utilizadas para caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales. Hoy en día existen diversos organismos internacionales para el desarrollo de normas que regulan la geometría de las probetas a analizar, el equipo a utilizar, el proceso de caracterización e informe de los resultados. Para el caso de los materiales porosos, las normas internacionales de caracterización que se han propuesto son: ISO/DIS13314 2010-07-16 [13], DIN 50134 2008-10 [14] y JIS H 7902 2008-0 [15], las cuales debido a la aplicación de los materiales porosos (casos de carga a compresión) describen las peculiaridades del ensayo de compresión

1.3.2 Método analítico

Diversos autores han propuesto modelos matemáticos con el objetivo de estimar el módulo de Young de las espumas metálicas con base en su porosidad y aspectos de poro. Estos modelos se considera que la distribución y tamaño de poro son homogéneos.

Tabla 2: Modelos matemáticos propuestos para calcular el módulo de elasticidad de materiales porosos.

Autor	Año	Modelo matemático
Warren y Kraynik [16]	1982	$E = \frac{E_0 P^2 (1 + 4P)}{10 + 31P + 4P^2} \quad (Ec. 1)$
Nielsen [17]	1983	$E = E_0 \left[\frac{(1 - \frac{P}{100})^2}{1 + (\frac{1}{f} - 1)x \frac{P}{100}} \right] \quad (Ec. 2)$
Phani y Niyogi [18]	1987	$E = E_0 * (1 - \frac{P}{P_c})^f \quad (Ec. 3)$
Gibson Ashby [19]	1987	$E = \frac{E_0 P^2}{1 + 6P} \quad (Ec. 4)$
Zhu [20]	1997	$E = \frac{1.009 * E_0 P^2}{1 + 1.1514P} \quad (Ec. 5)$
Pabst y Gregorava [21]	2004	$E = E_0 * (1 - \alpha P) (1 - \frac{P}{P_c}) \quad (Ec. 6)$
Knudsen y Springs [22]	2007	$E = E_0 * e^{-bP} \quad (Ec. 7)$
Nomenclatura		
Donde:	<p>E Módulo de Young de la espuma E_0 Módulo de Young del material sólido P Porosidad de la probeta f Factor de forma de poro, el cual se obtiene de una tabla propuesta por el autor P_c Porosidad crítica con la que $E_0 = 0$ b Factor corrección de la porosidad (para $P < 50\%$) α Factor geométrico de poro, si el poro es esférico $\alpha = 1$.</p>	

En un estudio se aplicaron tres de estos métodos para estimar el módulo de elasticidad de probetas de titanio con poros, estos resultados obtenidos de forma analítica son comparados ante los resultados obtenidos de forma experimental y mediante el análisis por elementos finito.

En un estudio reportado en la literatura [23] se aplican tres de estos modelos para calcular el módulo elástico de algunas probetas porosas de titanio con distinta porosidad. Los resultados obtenidos son comparados ante los resultados obtenidos de forma experimental y mediante el análisis por elemento finito.

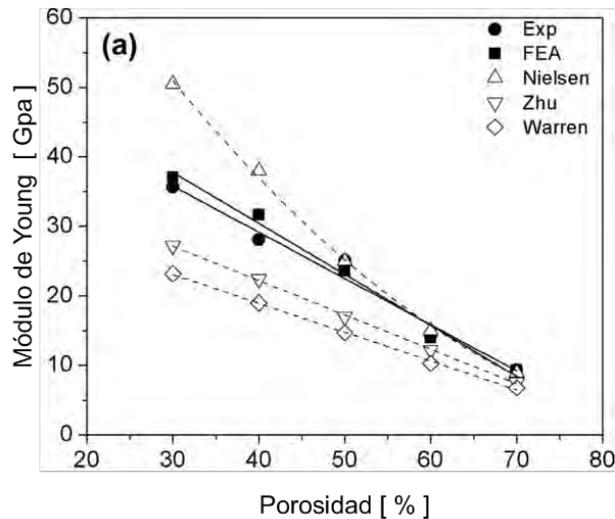


Figura 9: Comparativa de método experimental, numérico y analítico [23].

Con base en los resultados anteriormente mostrados, se observa que los modelos matemáticos utilizados tienen mayor aproximación a los resultados experimentales mientras mayor sea la porosidad. Para este caso de estudio, el modelo de Nielsen presenta mayor aproximación que el resto de los modelos a partir del 50 % de porosidad.

1.3.3 Método numérico

La Mecánica Computacional tiene como objetivo el desarrollo y aplicación de métodos numéricos, empleando recursos computacionales para la solución de problemas en ingeniería y ciencias aplicadas.

La importancia de caracterizar numéricamente las propiedades mecánicas de metales porosos radica básicamente en los siguientes aspectos [24]:

- Ahorro de tiempo y dinero para el diseño experimental.
- Conocer de forma aproximada las propiedades mecánicas finales de la espuma a fabricar.
- Posibilidad de estudiar diferentes aleaciones metálicas al mismo tiempo, conociendo solo las propiedades mecánicas del material matriz.
- Posibilidad de seleccionar el tipo de espaciador a usar en la fabricación de la espuma metálica.

1.3.3.1 Generación de modelo 3D

En la actualidad se cuentan con la tecnología que permite reconstruir el modelo 3D en un software CAD de la muestra de un metal poroso, se tiene equipo invasivo como el micro-CT, mientras que la estereología a partir de corte seriados es un proceso destructivo [24].

Los avances tecnológicos han permitido tener equipo capaz de reconstruir la geometría de un metal poroso en software CAD. Existen procesos destructivos (estereología) y no destructivos (micro-CT), estos procesos tienen la capacidad de replicar una muestra específica con gran precisión.

La implementación de los equipos requiere mayor inversión, por lo que se han propuestos métodos computacionales y numéricos para generar de forma aleatoria la distribución y/o tamaño de poros (teselación de Voronoi y Métodos de Elementos Discretos).

Estereología a partir de cortes seriados

El término cortes seriados hace referencia al proceso de desbaste continuo para generar planos paralelos, con los cuales se capturan secciones 2-D mejor conocidas como curvas de nivel por medio de un microscopio electrónico de barrido. La estereología es una herramienta computacional que tiene como tarea: reconstruir la geometría 3-D a partir de las curvas nivel. La aproximación de la digitalización con respecto a la muestra depende del número de planos capturados

Este método ha sido aplicado para reconstruir la microestructura de la aleación Ti-6Al-4V [25]. Mientras que en el área biomédica ha sido útil para digitalizar la geometría de órganos humanos [26] [27].

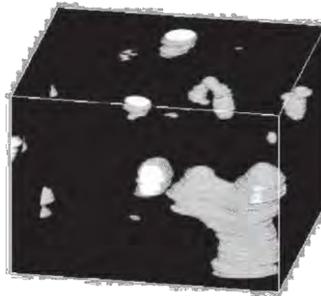


Figura 10: Reconstrucción de estructura mediante estereología a partir de corte seriados [25].

Micro tomografía computarizada Micro-CT

Es un método para reconstruir cuerpos geométricos 3-D mediante imágenes de rayos X, el proceso de exploración es similar a la tomografía computarizada hospitalaria, aunque a menor escala y con mayor resolución. Este método permite reconstruir la estructura interna de un componente de forma no destructiva.

La aplicación de esta metodología ha sido útil para el estudio de materiales [28] [29], mientras que en el ámbito médico ha servido para digitalizar órganos, tejidos y huesos humanos [30].



Figura 11: Aplicación de Micro-CT reconstruir hueso poroso humano [31].

Teselación de Voronoi

Es una herramienta del área de geometría computacional, la cual ha sido aplicada en estudios recientes [32] [33] para generar la geometría de los poros y la estructura de materiales porosos.

Este método consiste fundamentalmente en generar de forma aleatoria las coordenadas de puntos dentro de un dominio y mediante proximidad de puntos construir elementos unidimensionales, los cuales permiten tener una estructura con poros irregulares como se muestra en la Figura 13. Con los elementos lineales se pueden construir planos en los que se alojarán poros esféricos inscritos.

Tabla 3: Poros generados mediante el método de teselación de Voronoi.

Poros irregulares	Poros regulares
<p>Figura 12: Poros irregulares generados mediante teselación de Voronoi [32].</p>	<p>Figura 13: Poros regulares generados mediante teselación de Voronoi [33].</p>

Métodos de Elementos Discretos - DEM

El DEM es un método numérico utilizado para analizar y simular el comportamiento mecánico de un componente formado por un conjunto de partículas que interactúan entre sí a través de superficies de contacto. La distribución de las partículas dentro del componente o su frontera es aleatoria, por lo que se puede formar partículas de diferentes tamaños [34].

El principio de este método para distribuir partículas de forma aleatoria dentro del rango de la probeta (Figura 14), ha sido aplicado para modelar probetas de espumas metálicas [24] [35] [36] [37], donde la geometría de poros (esferas) es homogénea, mientras que su tamaño puede ser constante o variable.

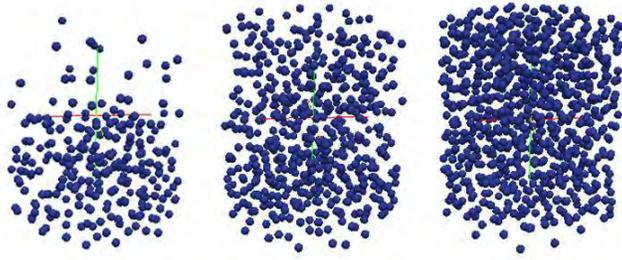


Figura 14: Generación de poros mediante DEM [36].

I.3.3.2 FEM

El análisis por elemento finito (Finite Element Analysis - FEA) es una herramienta de la computacional, donde las estructuras se dividen en zonas o elementos (malla) conectados mediante nodos dentro de ellos sólo se conoce la solución de manera aproximada en función de los desplazamientos nodales (variable primaria), que definen la solución dentro de cada uno de los elementos en que se divide la estructura y, por ende, la solución en toda ella. Para la implementación de esta herramienta, se requiere el modelo 3D de la estructura a analizar.

Distintos autores han hecho uso de esta herramienta para caracterizar las propiedades mecánicas de materiales porosos en sus trabajos de investigación [24] [35]. En estos casos se simula el ensayo a compresión de una probeta de material poroso, realizando un análisis estático lineal. El módulo de Young (módulo de elasticidad) y el coeficiente de Poisson son las principales propiedades mecánicas calculadas con base en los resultados de desplazamiento y la fuerza aplicada para simular el ensayo.

Capítulo II: Objetivos

Objetivo general:

- Caracterizar numéricamente las propiedades mecánicas de sólidos porosos de aluminio, considerando el comportamiento elástico y plástico.

Objetivos específicos:

- Modelar probetas de sólidos porosos, modificando: distribución de poros, tamaño de poros y porcentaje de porosidad.
- Determinar el diagrama de esfuerzo deformación de cada probeta, simulando el ensayo de compresión.

Capítulo III: Metodología

El presente trabajo toma como referencia la metodología propuesta por el Dr. Luis Pérez Pozo para generar el modelo 3D de materiales porosos, debido a que ésta ha tenido mayor aproximación con resultados experimentales, reportando un error máximo de 11.2% [37].

La propuesta de valor de este trabajo es obtener las propiedades mecánicas del comportamiento elástico y plástico hasta producir la fractura de algunas probetas con distinta distribución de poros y porcentaje de porosidad mediante la simulación del ensayo de compresión.

Esta metodología se encuentra dividida en dos fases: validación de software y proceso de caracterización (Figura 15).

- Validación de software
- Proceso de caracterización

Es el proceso que contempla la distribución de poros para generar el modelo tridimensional, cuya geometría será discretizada mediante una malla para posteriormente simular un ensayo de compresión, los resultados obtenidos serán utilizados para calcular las propiedades mecánicas de la probeta.

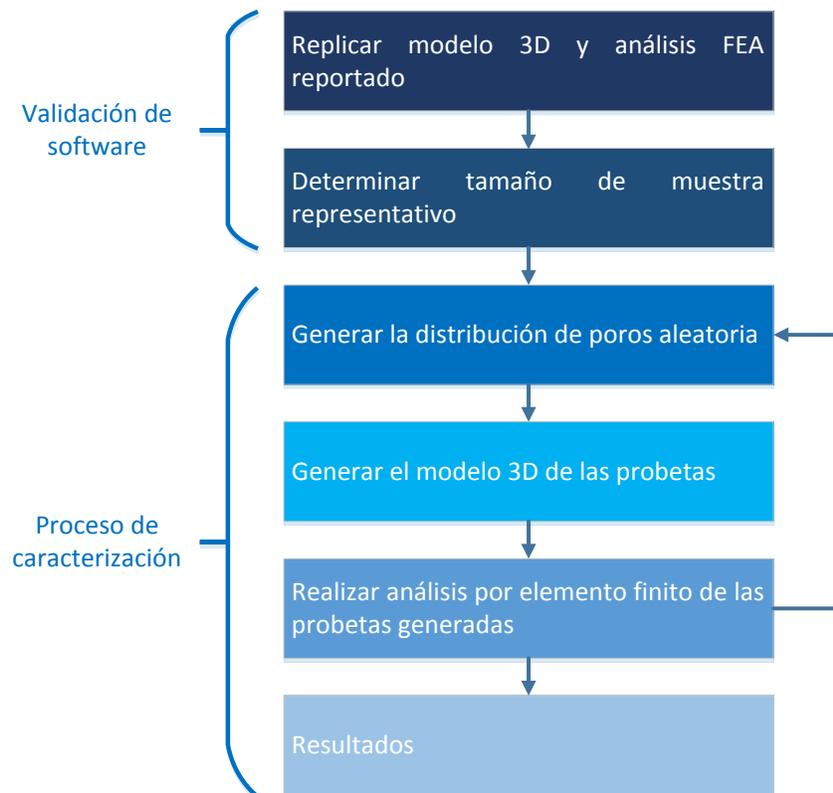


Figura 15: Metodología para la caracterización numérica.

III.1 Validación de software

Los resultados numéricos con mayor aproximación a los resultados experimentales fueron obtenidos al simular un ensayo de compresión con el software FEA “ANSYS”, mientras que en el presente trabajo se utiliza el software “HyperWorks”.

Debido al cambio de software, se replicó el análisis reportado en la literatura [44] para determinar la capacidad del software de obtener resultados aproximados.

III.1.1 Réplica del modelo y análisis por elemento finito

En la literatura consultada se emplea el software ANSYS para realizar análisis por elemento finito, mientras que para este trabajo se utiliza el software HyperWorks. Por tal razón se replica el modelo 3D de una prueba descrita [44], el cual es analizado bajo los mismos casos de carga (compresión) y validar que no existe una variación significativa con el cambio de software.

El caso de estudio es el análisis estático lineal de una probeta cilíndrica de 10 [mm] de diámetro, 20 [mm] de altura y 6 % de porosidad (180 poros divididos en 9 niveles [44]). Para simular un ensayo de compresión se establece como condiciones de frontera son:

- Restringir el desplazamiento vertical de la superficie inferior (Figura 16 – punto A)
- Ejercer una presión normal a la superficie superior de 50 [MPa] que representa una carga distribuida en un plano (Figura 16 – punto B).

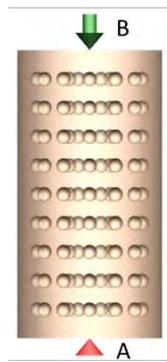


Figura 16: Condiciones de frontera para réplica de análisis.

Con base en los resultados de desplazamiento obtenidos en el análisis y la presión ejercida, se calcula el módulo de Young del material poroso. El resultado obtenido de $E = 98.1$ [GPa], mientras que la literatura [44] reporta $E = 95.9$ [GPa] que representa 2.24 % de variación, el cual es atribuida a la diferencia del tamaño de malla. Por lo que se considera aceptable la variación.

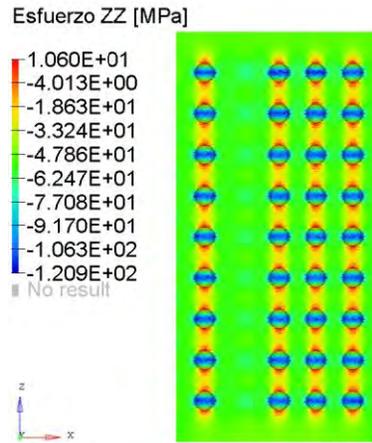


Figura 17: Resultados de esfuerzos ZZ para replica de análisis.

III.1.2 Volumen representativo para la probeta

Con el objetivo de disminuir el consumo de recursos computacionales y el tiempo de cálculo, se procede a identificar la sección más pequeña de probeta que presente las particularidades del material. Por lo que se realizaron análisis simulando el mismo ensayo de compresión con distintas probetas, las cuales son proporcionales entre sí, dicha tarea se realizó en 2 fases:

- Fase 1
 Se modificó la probeta anterior (Figura 16) al eliminar 1 [mm] en cada extremo para tener una probeta inicial de 180 poros divididos en 9 niveles y 18 [mm] de altura. Como consiguiente se generaron dos probetas que representa $\frac{2}{3}$ y $\frac{1}{3}$ de la probeta inicial (Figura 18).
- Fase 2
 La probeta inicial de esta fase es similar al de la fase1, la diferencia radica en la Para esta fase se considera una probeta similar al de la fase 1, sólo que este caso es una probeta con 160 poros divididos en 8 niveles y 16 [mm] de altura. Las muestras a sustraer de esta probeta representan $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{4}$ y $\frac{1}{4}$ de la probeta inicial (Figura 22).

Tabla 4: Modelo 3D y resultados FEA de fase 1.

Seccionamiento de probeta en tercios.

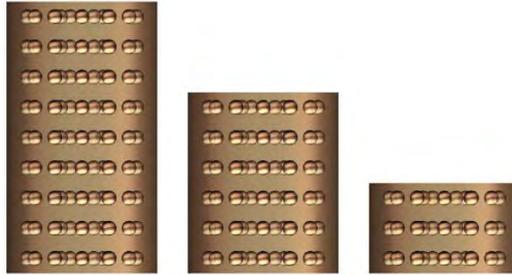


Figura 18: Probetas con 9, 6 y 3 niveles de poros.

Probeta 9 niveles – 1

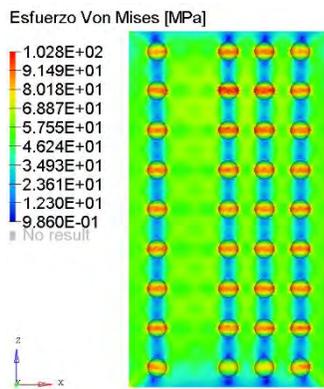


Figura 19: Resultados de esfuerzo - probeta de 180 poros.

E = 96.6622 [GPa]
 Error relativo = N/A
 # de nodos= 1,113,680

Probeta 6 niveles – 2/3

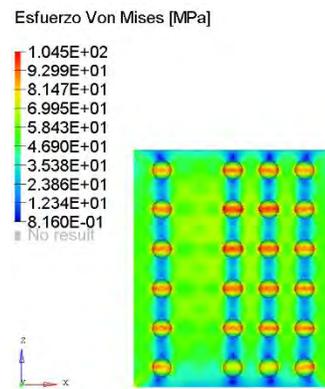


Figura 20: Resultados de esfuerzo - probeta de 120 poros.

E = 96.5566 [GPa]
 Error relativo = 0.11 [%]
 # de nodos= 748,370

Probeta 3 niveles – 1/3

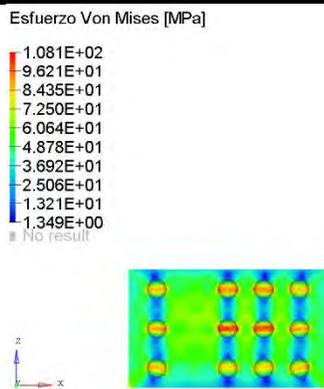


Figura 21: Resultados de desplazamiento para probeta de 60 poros.

E = 96.4256 [GPa]
 Error relativo = 0.24 [%]
 # de nodos= 380,115

Tabla 5: Modelo 3D y resultados FEA de fase 2.

Seccionamiento de probeta en cuartos.

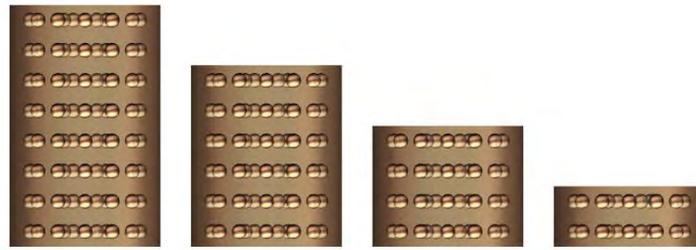


Figura 22: Probetas con 8, 6, 4 y 2 niveles de poros.

Probeta 8 niveles – 1

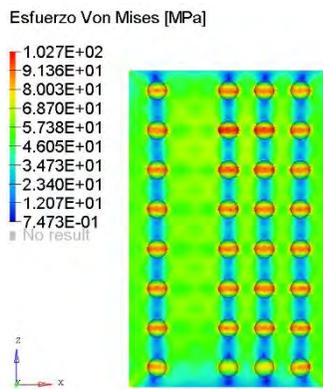


Figura 23: Resultados de esfuerzo - probeta de 160 poros.

E = 96.6169[GPa]
 Error relativo = 0.05 [%]
 # de nodos= 992,958

Probeta 6 niveles – 3/4

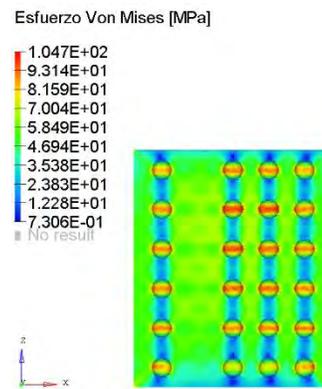


Figura 24: Resultados de esfuerzo - probeta de 120 poros.

E = 96.5441 [GPa]
 Error relativo = 0.12 [%]
 # de nodos= 747,529

Probeta 4 niveles – 2/4

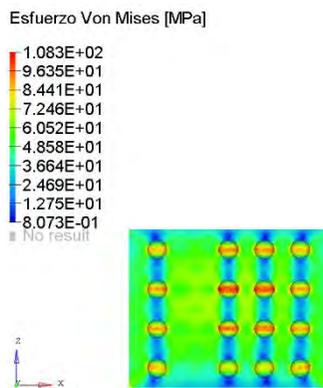


Figura 25: Resultados de esfuerzo - probeta de 80 poros.

E = 95.7767 [GPa]
 Error relativo = 0.34 [%]
 # de nodos= 500,449

Probeta 2 niveles – 1/4

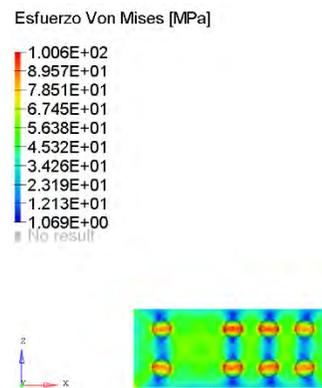


Figura 26: Resultados de esfuerzo - probeta de 40 poros.

E = 95.1824 [GPa]
 Error relativo = 0.50 [%]
 # de nodos= 256,497

Al calcular el módulo de elasticidad a partir de los resultados de desplazamiento del análisis, se observa que la relación de proporcionalidad y el módulo de elasticidad son aproximados, teniendo errores relativos inferiores al 1% con respecto a la probeta inicial de 9 niveles. Para los resultados de distribución de esfuerzos, se muestra que no existe concentración de esfuerzo debido a la cercanía de las condiciones de frontera (principio de Saint-Venant). Por tal razón se considera que el volumen representativo de la probeta deberá ser un cilindro de 10 [mm] de diámetro y 5 [mm] de altura, debido a que el volumen se disminuye 75% el volumen y el error relativo es 0.50 [%] se considera que no es representativo.

III.2 Proceso de caracterización

A continuación, se describe el proceso realizado para generar la geometría de las probetas porosas de aluminio y su caracterización numérica mediante uso de software FEA.

III.2.1 Distribución de poros

Estudios reportados en la literatura han demostrado que la distribución de poros aleatoria, tiene mayor aproximación para simular el comportamiento de los materiales porosos, cuya distribución es heterogénea dentro de una probeta. Mientras que la representación de poros mediante esferas ha tenido una aproximación aceptable con respecto a otros métodos de caracterización, es posible producir este tipo de poros con variaciones mínimas entre sí, debido a los desarrollos en los procesos de producción mediante agentes espaciadores, así como en la innovación tecnológica mediante los procesos de manufactura aditiva.

El método propuesto en el presente trabajo para generar la distribución de poros aleatoria, es mediante un algoritmo programado en el software “Wolfram Mathematica”, que tiene como objetivo generar una tabla con las coordenadas (puntos en el espacio) de forma aleatoria dentro de un rango establecido, las cuales son el centro de pequeñas esferas (Figura 27), que al ser sustraídas generan las cavidades de los poros.

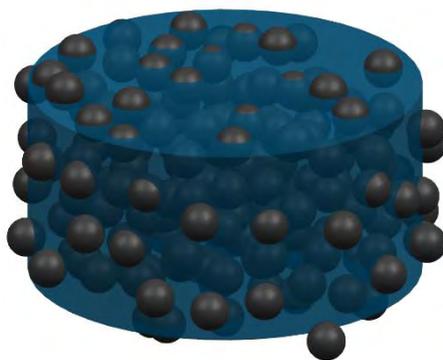


Figura 27: Distribución de poros dentro de un rango.

III.2.2 Modelado 3D – CAD

Para generar los modelos 3D se utiliza un software CAD (nx unigraphics). Como proceso inicial se genera una probeta sin poros (cilindro), con base en los análisis realizados para determinar el volumen representativo de la probeta, se determinó que las dimensiones del cilindro son: 10 [mm] de diámetro y 5 [mm] de altura.

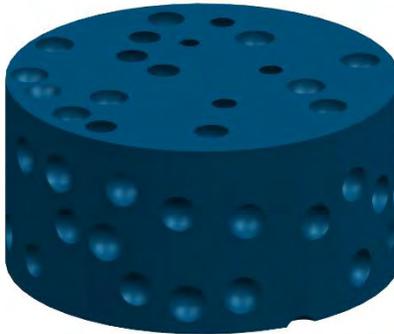


Figura 28: Sustracción de material para generar poros.

Para generar el modelo 3D se emplea un software CAD. En el que se inicia por modelar la probeta libre de poros con las dimensiones determinadas para el volumen representativo de la probeta en el subtema III.1.2 (10 [mm] de diámetro y 5 [mm] de altura). Posteriormente se genera el conjunto de esferas, cuyo volumen es sustraído de la probeta y con ello obtener la geometría con poros.

III.2.3 Análisis por elemento finito (FEA)

El software de análisis por elemento finito utilizado en el presente trabajo es “Hyperworks” y se compuestos por diversos módulos, de los cuales se utiliza:

- Hyper-Mesh – Generar malla.
- HyperCrash – Asignar propiedad de los elementos, material del componente, contacto y condiciones de frontera.
- Radioss – Solver utilizado para realizar los cálculos del análisis.
- HyperView – Visualizar la simulación de los resultados.
- HyperGraph – Visualizar los gráficos de los resultados.

III.2.3.1 Pre-proceso

Consiste en realizar las tareas que se requieren para analizar las probetas.

Discretización de dominio – malla

La geometría generada en el software CAD es exportada a un formato “.IGES”, el cual es importado al software HyperMesh, durante este proceso geometría sufre diversas modificaciones o perdida, por lo que es necesario verificar la calidad de la geometría y de ser necesario corregir superficies.

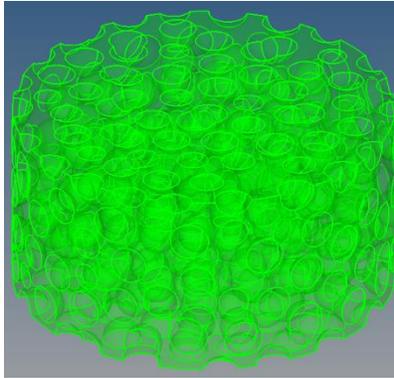


Figura 29: Geometría con superficies corregidas.

Ya que se corrigió la geometría, se procede a discretizar probeta mediante una malla 3D. Debido a la complejidad que presenta la geometría se opta por utilizar elementos tetras. En la Figura 30 se observa la capacidad del software para que los elementos de la malla sean homogéneos.

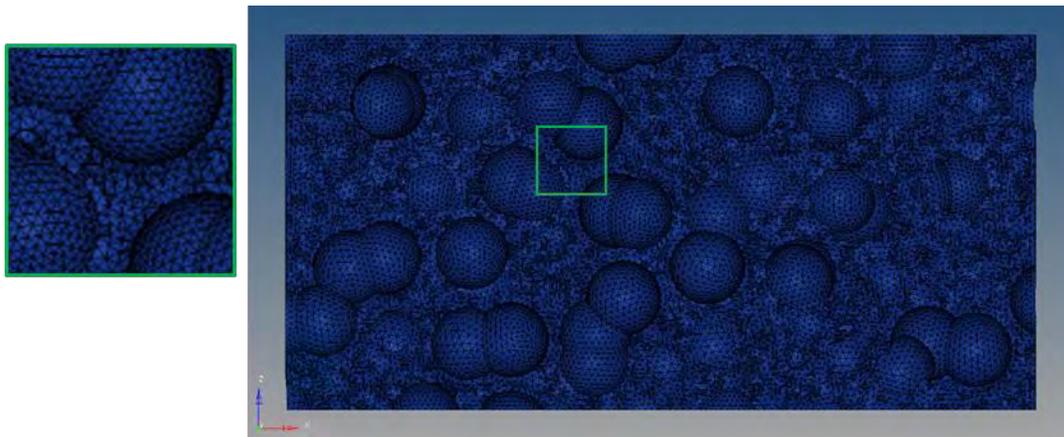


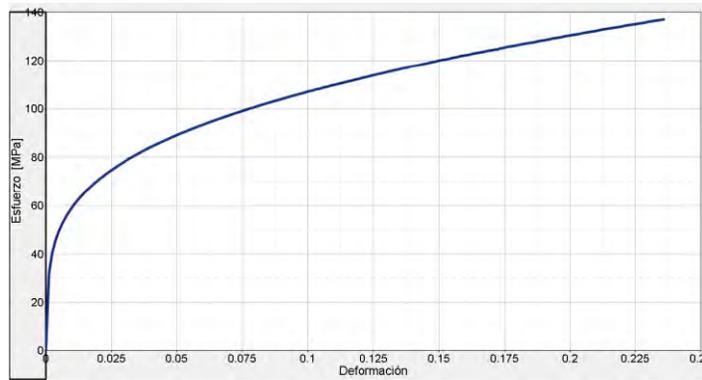
Figura 30: Corte de sección para visualizar malla 3D.

Asignación de material y propiedad

La malla obtenida de la geometría ahora es importada al software HyperCrash para continuar con el proceso de preparación del análisis.

El material asignado para el análisis es el aluminio 6061-T6, las consideraciones que se tomaron para esta selección fueron:

- Las espumas de aluminio generadas en el Instituto de Investigaciones de Materiales (IIM-UNAM).
- Debido a los requerimientos del software para realizar un análisis dinámico en el que se simule la falla del material, es necesario una curva esfuerzo-deformación del comportamiento plástico del material.



Gráfica 1: Diagrama "esfuerzo - deformación" de comportamiento plástico del aluminio 6061-T6.

La geometría a analizar Diagrama "esfuerzo - deformación" de comportamiento plástico del aluminio 6061-T6 es la estructura sólida de la probeta, por lo que se utilizaron elementos tetraedricos, los cuales permiten discretizar la geometría con mayor aproximación, por lo que se requiere asignar la propiedad de sólidos a estos componentes.

Condiciones de frontera

Para caracterizar numéricamente las probetas de material poroso mediante la simulación de un ensayo a compresión se requiere establecer restricciones de desplazamiento en dirección normal de la superficie inferior para representar la base de la máquina de prueba mientras que en la superficie superior se establece una velocidad constante que simule el ensayo a compresión.



Figura 31: Condiciones de carga para simular ensayo a compresión.

III.2.3.2 Solver

Radioss es el solver de Hyperworks que se encarga de realizar la parte numérica del análisis por elemento finito. Este módulo es principalmente aplicado para problemas no lineales bajo cargas dinámicas. Su implementación consiste en seleccionar el análisis realizar y asignar los recursos computacionales que se desean utilizar.

III.2.3.3 Post-proceso

Proceso posterior al análisis que hace referencia a la visualización de los resultados obtenidos, los cuales se presenta través de simulación o gráficas.

III.2.3.4 Simulación

Los resultados que se muestran en la simulación es el estado de esfuerzo, lo cual permite conocer lo que sufre cada elemento debido al desplazamiento generado por la velocidad constante que se estableció.

III.2.3.5 Resultados de trabajo externo y energía interna

El principio de conservación de la energía establece que el trabajo realizado por las fuerzas exteriores que actúan sobre un sistema “W”, coinciden con la energía deformación que almacena dicho sistema (energía interna) “U” [45]. Este principio fue validado al comparar las gráficas de energía interna con las gráficas de trabajo externo para determinar los valores efectivos.

A partir de la gráfica “Trabajo externo [J] – Tiempo [s]” y la velocidad [mm/s] establecida en el análisis, es posible generar la gráfica “Fuerza externa [kN] – Desplazamiento [mm]”. Y finalmente con esta segunda gráfica y el diámetro de la probeta construir el diagrama “Esfuerzo [MPa] – Deformación”.

III.3 Implementación de metodología

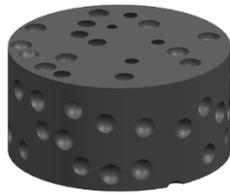
Para validar la metodología propuesta, se realizaron 3 casos de estudio con el objetivo de analizar el comportamiento de los metales porosos ante la modificación de los siguientes factores:

- Distribución de poros
- Tamaño de poro
- Porcentaje de porosidad

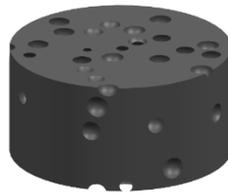
III.3.1 Distribución de poros

Con el objetivo de analizar el impacto que tiene la distribución de poros en las propiedades mecánicas de los materiales, se realiza la comparación 3 probetas con 20% de porosidad y distinta distribución de poros (Anexo A.3, Anexo A.5 y Anexo a.6)

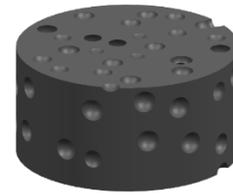
Modelos 3D y resultados – Iteración 1



Porosidad 20% caso 1



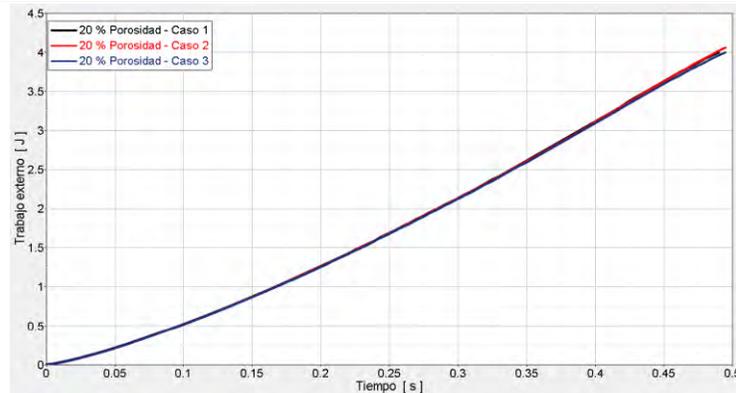
Porosidad 20% caso 2



Porosidad 20% caso 3

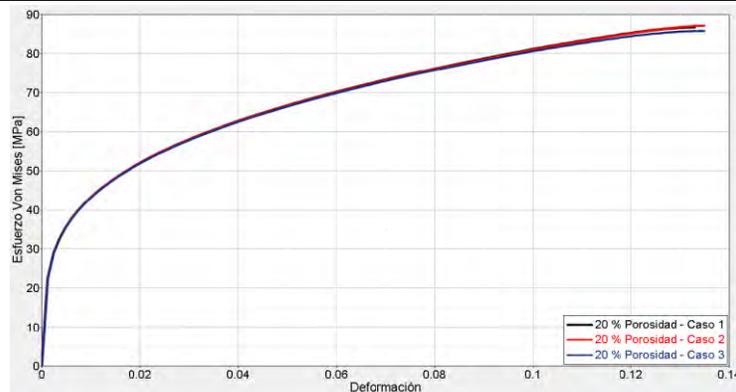
Figura 32: Probetas con distinta distribución de poro.

Gráfica “Trabajo externo - tiempo”



Gráfica 2: “Trabajo externo - tiempo” iteración 1.

Gráfica “Esfuerzo - deformación”



Gráfica 3: “Esfuerzo ZZ - deformación” iteración 1.

Observaciones

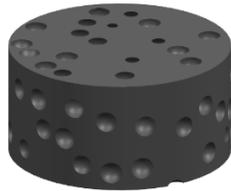
Las distribución de poros no afecta de forma significativa los resultados de absorción de energía, así como el diagrama de esfuerzo deformación.

En los casos 1 y 2 la falla se producen al mismo instante (deformación equivalente), la cual es 1.20% menor con respecto a la probeta 3. La mayor desviación de esfuerzos entre los tres casos es de 1.97%, la cual ocurre entre los casos 1 y 3.

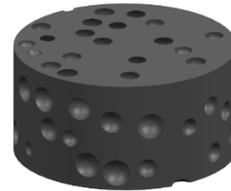
III.3.2 Variación del tamaño de poro

Para determinar el impacto de contar con distintos tamaños de poros en una probeta, se utiliza la distribución de poros empleada en la probeta de 20% de porosidad – caso 1, sólo que en este caso se ingresa una función en el software NX para crear esferas con diámetro aleatorio en un rango de 0.7 – 1.3 [mm], debiendo cumplir con el mismo porcentaje de porosidad (Anexo a.3 y Anexo A.4).

Modelos 3D y resultados – Iteración 1



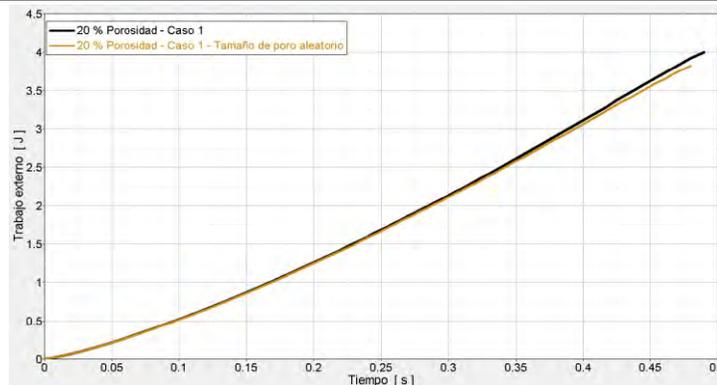
Porosidad 20%



Porosidad 20% - Tamaño de poro aleatorio

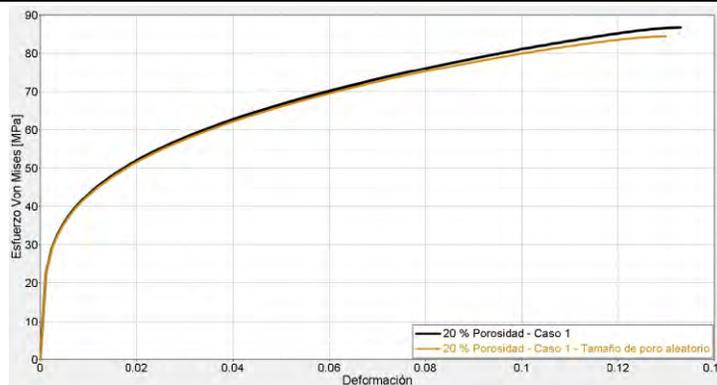
Figura 33: Probetas con distinto tamaño de poro.

Gráfica “Trabajo externo - tiempo”



Gráfica 4: “Esfuerzo - deformación” iteración 1.

Gráfica “Esfuerzo - deformación”



Gráfica 5: “Esfuerzo ZZ - deformación” iteración 2.

Observaciones

Durante el primer 70% del ensayo no existe un impacto significativo al tener distintos tamaños de poro con respecto a la probeta de poros de tamaño constante.

La discrepancia se presenta en la falla anticipada y la menor resistencia de la probeta 2, con reducción de 2.30% en la deformación máxima y 2.13% del esfuerzo último.

III.3.3 Porcentaje de porosidad

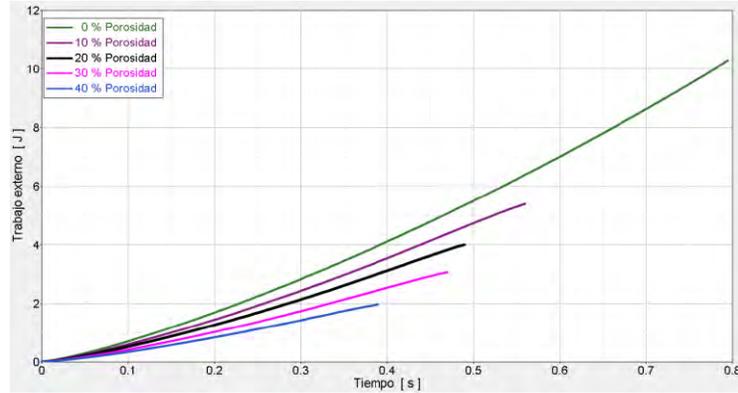
En esta iteración se estudia el comportamiento de las probetas con base a los resultados obtenidos tras la modificación del porcentaje de porosidad, en la cual se inicia con una porosidad de 0% con incrementos de 10% hasta llegar al 40%.

Modelos 3D y resultados – Iteración 1



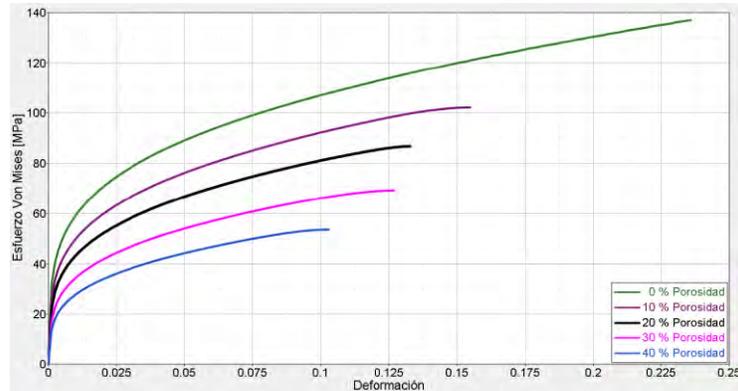
Figura 34: Probetas con distinto porcentaje de porosidad.

Gráfica "Trabajo externo - tiempo"



Gráfica 6: "Trabajo externo - tiempo" iteración 3.

Gráfica "Esfuerzo - deformación"



Gráfica 7: "Esfuerzo ZZ - deformación" iteración 3.

Observaciones

Con base en los resultados de las probetas con distinta porosidad, se observa que no existe una relación entre el incremento de la porosidad respecto a la disminución del esfuerzo último y la deformación máxima. La variación de resultados con respecto a las propiedades del material sólido son:

Porosidad	Deformación		Esfuerzo ZZ	
	ϵ [%]	Variación	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	Variación
10%	15.52 %	-34.15%	102.09	-25.46%
20%	13.32 %	-43.48%	86.71	-36.69%
30%	12.71 %	-46.08%	69.16	-49.51%
40%	10.32 %	-56.20%	53.46	-60.97%

Capítulo IV: Análisis de resultados

El método propuesto para simular el ensayo a compresión permite identificar el esfuerzo máximo que resiste la probeta. Esto se debe a que en instante la probeta ha sufrido colapso en su estructura sólida, por lo que la carga requerida para continuar con el desplazamiento es menor. Caso opuesto a los diagramas obtenidos mediante una simulación que ejerce una carga que incrementa de forma lineal, teniendo como inicio el comportamiento lineal elástico, que posteriormente alcanza su esfuerzo máximo y se presenta el colapso de las estructuras, con el menor incremento de carga se producen grandes deformaciones hasta que se genere contacto entre sólidos, ocasionando que la resistencia sea mayor, por lo que se requiere mayor fuerza para lograr pequeños desplazamientos.

Iteración 1

La variación de resultados se considera aceptable, puesto que el tener distinta distribución de poros no afecta significativamente las propiedades mecánicas de los materiales. El impacto que tiene el tener distintas distribuciones de poros (aleatorias) son: la forma dirección y zona de donde se produce la falla. En el caso experimenta existen las mismas incertidumbres, puesto que la distribución de poros también es aleatoria, sólo que en este caso es sumamente complejo identificar donde y como se produce la falla.

Iteración 2

La variación del tamaño de poro es otro fenómeno que se presenta en los materiales porosos. De acuerdo al proceso de producción, las variaciones de tamaño pueden ser mínimas o incrementar drásticamente. Al comparar los resultados de dos probetas con la misma distribución y porosidad, donde una tiene el tamaño de poro constante 1 [mm] y en la otra tiene poros de distintos tamaños en un rango de 0.7 – 1.3 [mm] ($\pm 30\%$). Los resultados obtenidos presentan un comportamiento similar en la primera mitad de la prueba, sólo que al final se tienen disminución del esfuerzo último y deformación máxima inferiores al 3%, lo cual se considera aceptable.

Iteración 3

El factor que verdaderamente tiene un impacto representativo es la porosidad. Esto se observa en la variación significativa de resultados al contar con 10 % de porosidad, los cambios posteriores que existen en las propiedades mecánicas al incrementar la porosidad de

En esta iteración se demuestra que el factor de impacto en los materiales porosos, es el porcentaje de porosidad, como se puede observar en los resultados que una porosidad de 10 %, disminuye significativamente el esfuerzo último y la deformación máxima. Al incrementar la porosidad de la variación de resultados es mayor.

Capítulo V: Conclusiones

La metodología aplicada en el presente trabajo tiene la capacidad de predecir las propiedades mecánicas de los materiales porosos, tales como: módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y deformación máxima.

Al analizar las 3 probeta con 20 % de porosidad pero con distinta distribución de poros, se reportan los siguientes resultados:

	E	$\sigma_{\text{elástico}}$	$\epsilon_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{último}}$
Distribución 1	47.70 [GPa]	29.01 [MPa]	13.32 %	86.71 [MPa]
Distribución 2	48.77 [GPa]	29.54 [MPa]	13.32 %	87.08 [MPa]
Distribución 3	48.32 [GPa]	29.26 [MPa]	13.48 %	85.40 [MPa]
Variación de resultados	2.24 %	1.82 %	1.20 %	1.97 %

El segundo caso en que se estudia el impacto del tamaño de poro, se comparan dos probetas que tienen 20 % de porosidad y misma distribución de poro. La diferencia radica en el tamaño de poros, donde una tiene el tamaño de poro constante y la otra tiene poros de tamaño variable. Los resultados obtenidos son:

	E	$\sigma_{\text{elástico}}$	$\epsilon_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{último}}$
Tamaño constante	47.70 [GPa]	29.01 [MPa]	13.32 %	86.71 [MPa]
Tamaño variable	47.59 [GPa]	28.83 [MPa]	13.02 %	84.90 [MPa]
Variación de resultados	0.23 %	0.62 %	2.25 %	2.08 %

Con base en los resultados obtenidos se demuestra que la distribución y tamaños de poros no tienen un impacto significativo en las propiedades mecánicas de los materiales porosos, puesto como se muestra en los resultados se tienen variaciones inferiores al 2.3%.

La implementación de este método para caracterizar numéricamente las propiedades mecánicas de los materiales, permite tener una aproximación de las propiedades antes de producir los materiales. Dando pauta a la selección oportuna de materiales. Otra ventaja que presenta esta herramienta es la disminución de tiempo y recursos, al evitar el proceso para producir los materiales porosos y realizar de forma experimental el ensayo. El único requerimiento es asignar las propiedades mecánicas de una probeta sólida, producida mediante el proceso a utilizar.

El tiempo de cálculo para cada análisis fue aproximadamente de 150 horas, generando un archivo con tamaño promedio de 17 [GB]. Esto fue posible debido a la disminución del tamaño de la probeta, disminuyendo significativamente la cantidad de nodos a analizar (menor número de ecuaciones a resolver).

Anexo A

El presente anexo contiene las fichas técnicas de las probetas con distintas porosidades, distribución y/o tamaño de poros, las cuales se encuentran clasificadas de acuerdo a su porosidad.

Cada ficha contiene:

- El modelo 3D de la probeta (material poroso) y del material sustraído (poros).
- Resultados obtenidos del análisis por elementos finitos.
- Curva esfuerzo- deformación.
- Propiedades mecánicas.

Anexo A.1

Porosidad 0%

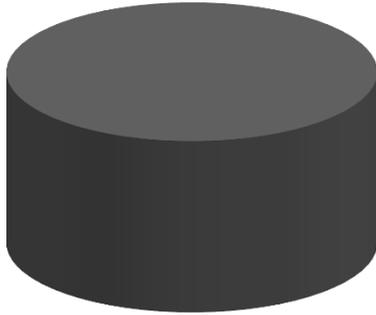
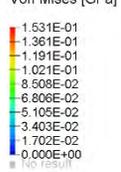


Figura 35: Probeta con 0% de porosidad.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

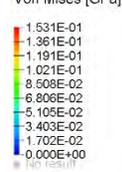


1.531E-01
1.361E-01
1.191E-01
1.021E-01
8.508E-02
6.806E-02
5.105E-02
3.403E-02
1.702E-02
0.000E+00



Figura 36: Comportamiento lineal.

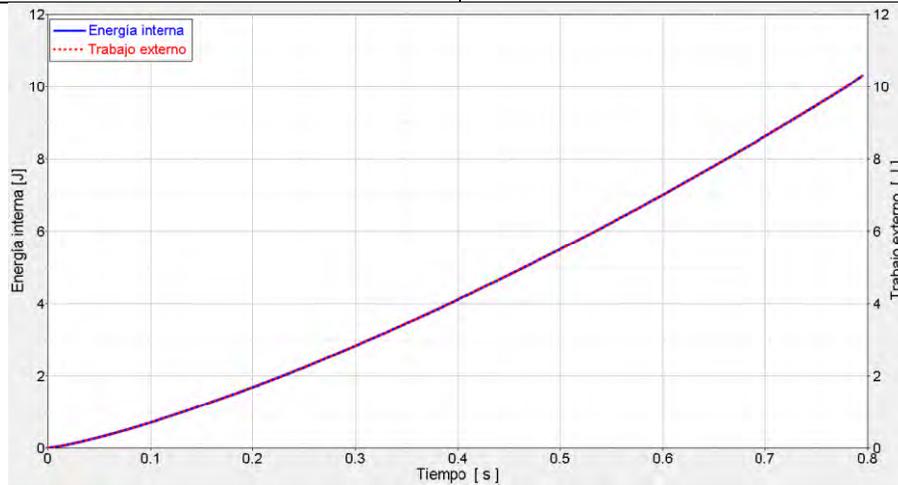
Esfuerzo
Von Mises [GPa]



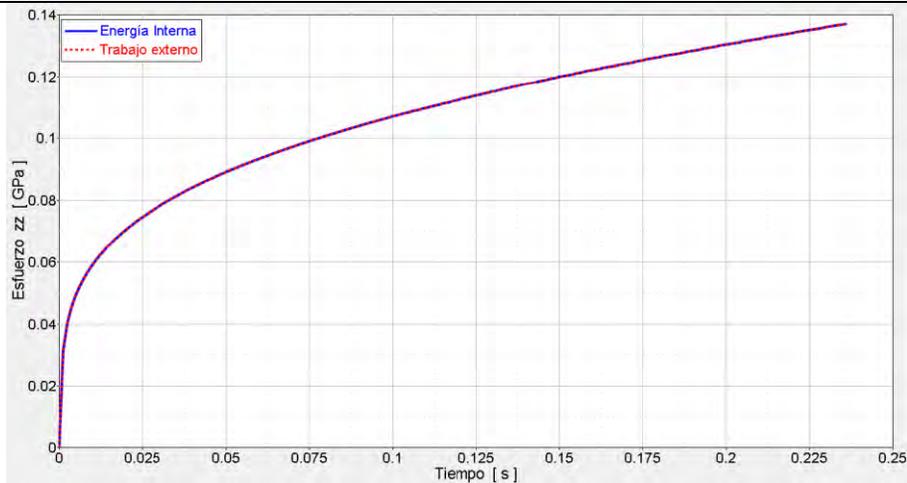
1.531E-01
1.361E-01
1.191E-01
1.021E-01
8.508E-02
6.806E-02
5.105E-02
3.403E-02
1.702E-02
0.000E+00



Figura 37: Momentos de falla del material.



Gráfica 8: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 0%.



Gráfica 9: Diagrama "Esfuerzo - Deformación" porosidad 0%.

Propiedades Mecánicas

$$E = 68.96 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{elástico}} = 40.24 \text{ [MPa]}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\epsilon_{\text{máx}} = 23.57 \text{ [%]}$$

$$\sigma_{\text{último}} = 136.94 \text{ [MPa]}$$

Anexo A.2

Porosidad 10%

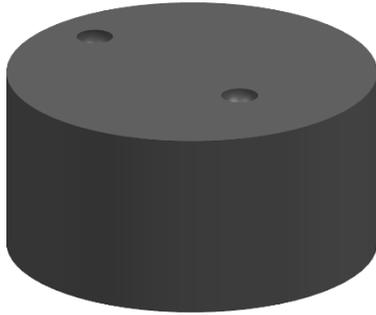


Figura 38: Probeta con 10% de porosidad.

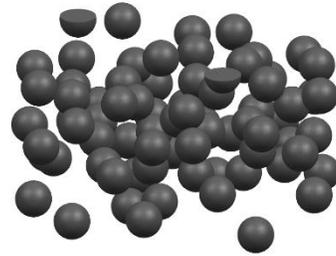


Figura 39: Material sustraído para generar los poros.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

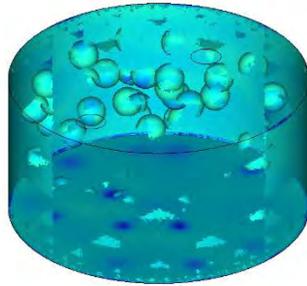
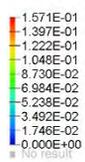


Figura 40: Comportamiento lineal.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

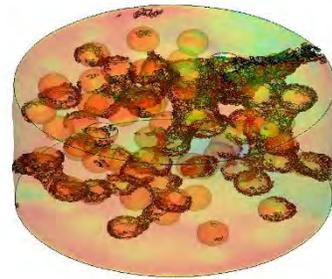
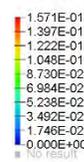
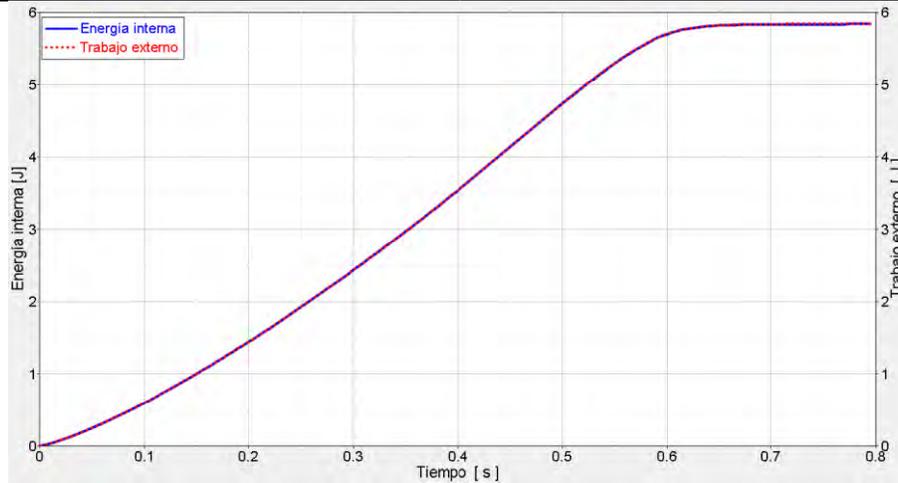
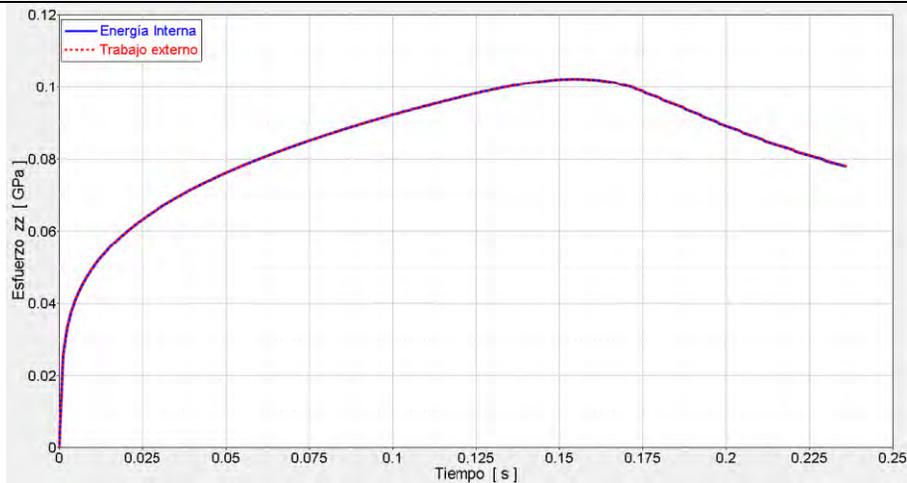


Figura 41: Momentos de falla del material.



Gráfica 10: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 10%.



Gráfica 11: Diagrama "Esfuerzo - Deformación" porosidad 10%.

Propiedades Mecánicas

$$E = 56.03 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{elástico}} = 33.94 \text{ [MPa]}$$

$$\nu = 0.31$$

$$\epsilon_{\text{máx}} = 15.52 \text{ [%]}$$

$$\sigma_{\text{último}} = 102.09 \text{ [MPa]}$$

Anexo A.3

Porosidad 20% Caso 1

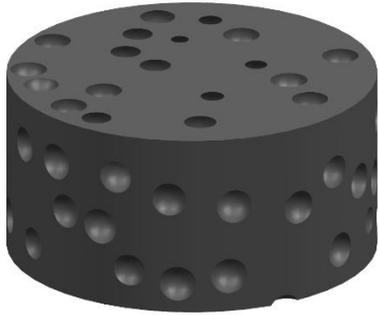


Figura 42: Probeta con 20% de porosidad distribución 1.

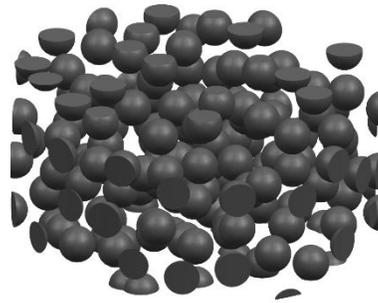


Figura 43: Material sustraído para generar los poros.

Esfuerzo Von Mises [GPa]

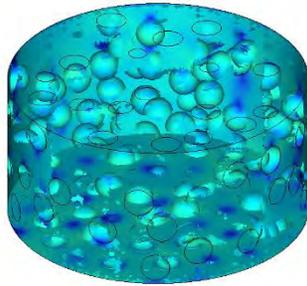
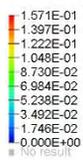


Figura 44: Comportamiento lineal.

Esfuerzo Von Mises [GPa]

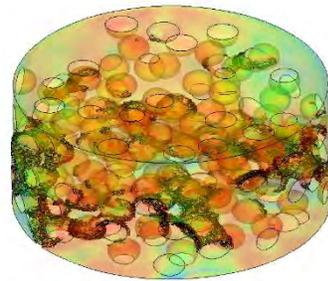
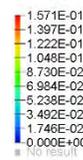
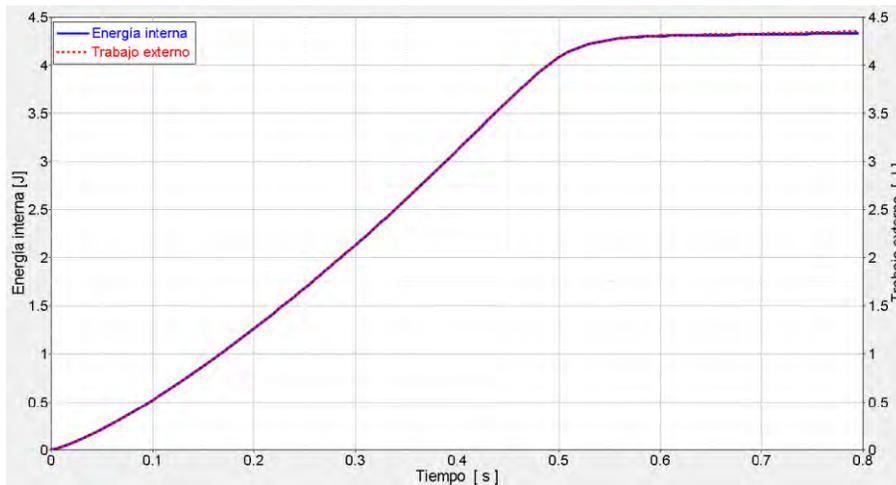
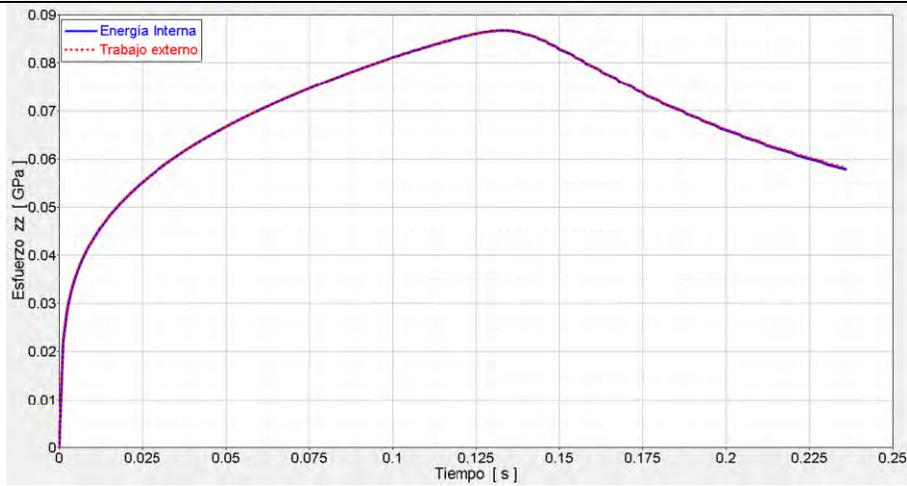


Figura 45: Momentos de falla del material.



Gráfica 12: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 20% - Caso 1.



Gráfica 13: Diagrama "Esfuerzo - Deformación" porosidad 20% - caso 1.

Propiedades Mecánicas

$$E = 47.90 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{elástico}} = 29.01 \text{ [MPa]}$$

$$\nu = 0.33$$

$$\epsilon_{\text{máx}} = 13.32 \text{ [%]}$$

$$\sigma_{\text{último}} = 86.71 \text{ [MPa]}$$

Anexo A.4

Porosidad 20% Caso 1 – Tamaño de poro aleatorio

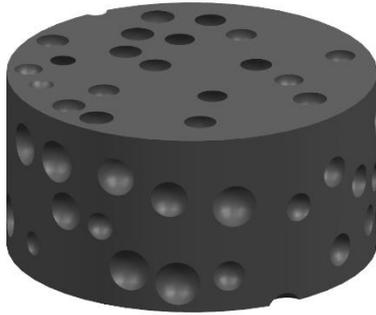


Figura 46: Probeta 20% de porosidad tamaño de poro aleatorio.

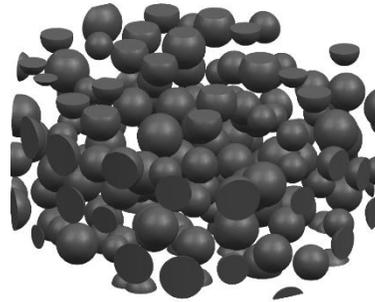


Figura 47: Material sustraído para generar los poros.

Esfuerzo Von Mises [GPa]

- 1.571E-01
- 1.397E-01
- 1.222E-01
- 1.048E-01
- 8.730E-02
- 6.984E-02
- 5.238E-02
- 3.492E-02
- 1.746E-02
- 0.000E+00
- No result

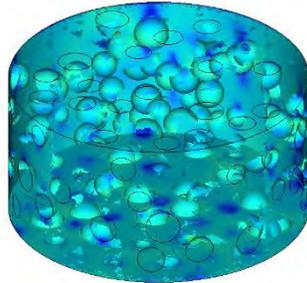


Figura 48: Comportamiento lineal.

Esfuerzo Von Mises [GPa]

- 1.571E-01
- 1.397E-01
- 1.222E-01
- 1.048E-01
- 8.730E-02
- 6.984E-02
- 5.238E-02
- 3.492E-02
- 1.746E-02
- 0.000E+00
- No result

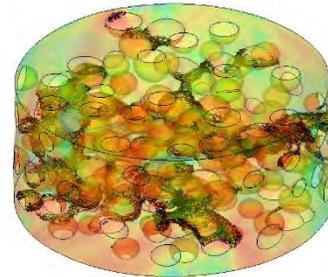
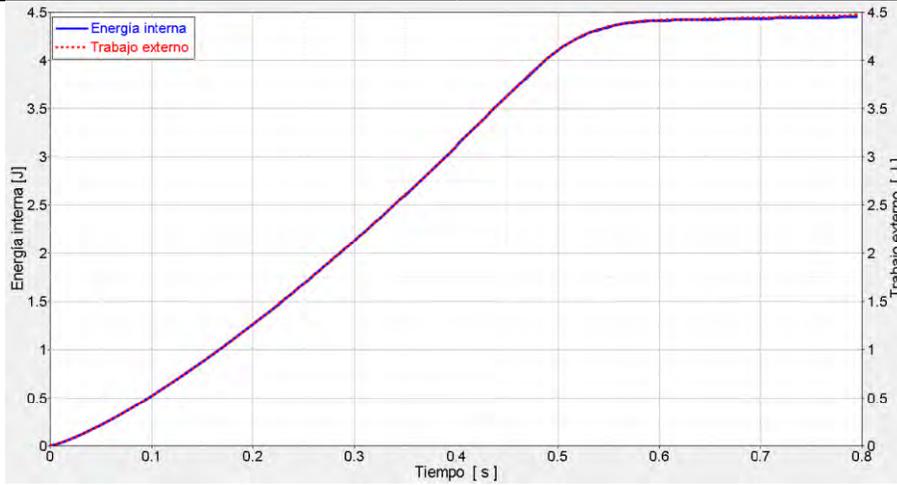
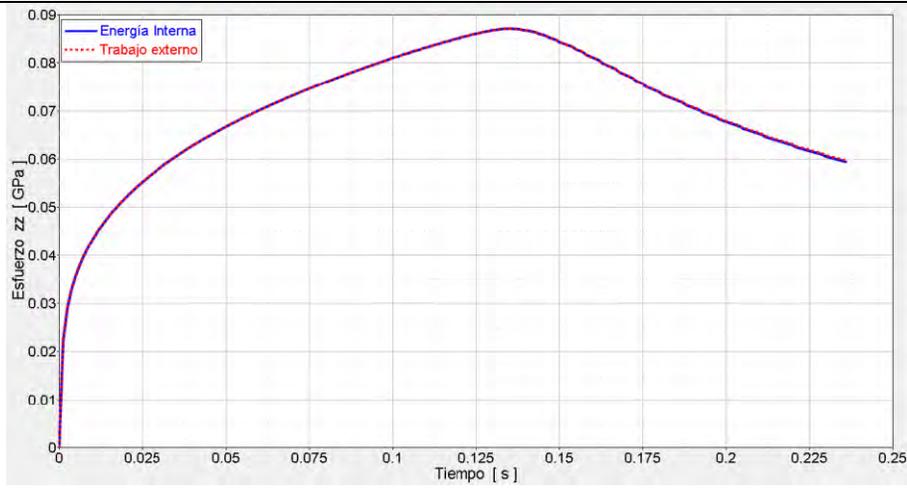


Figura 49: Momentos de falla del material.



Gráfica 14: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 20% - Caso 1 – Tamaño de poro aleatorio.



Gráfica 15: Diagrama "Esfuerzo - Deformación" porosidad 20% - caso 1 - tamaño de poro aleatorio.

Propiedades Mecánicas

$E = 47.59$ [GPa]
 $\sigma_{\text{elástico}} = 28.83$ [MPa]

$\nu = 0.33$
 $\epsilon_{\text{máx}} = 13.02$ [%]
 $\sigma_{\text{último}} = 84.90$ [MPa]

Anexo A.5

Porosidad 20% Caso 2

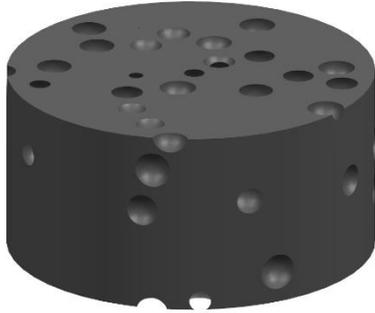


Figura 50: Probeta con 0% de porosidad distribución 2.

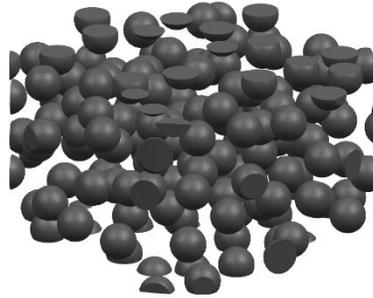


Figura 51: Material sustraído para generar los poros.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

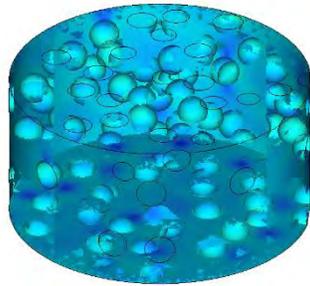
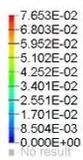


Figura 52: Comportamiento lineal.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

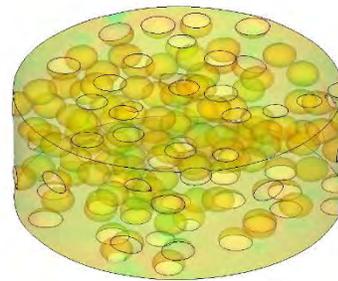
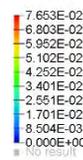
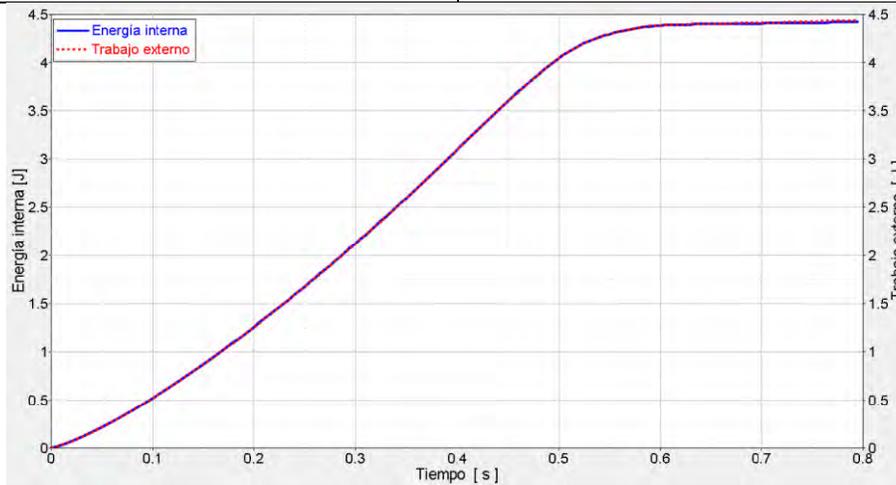
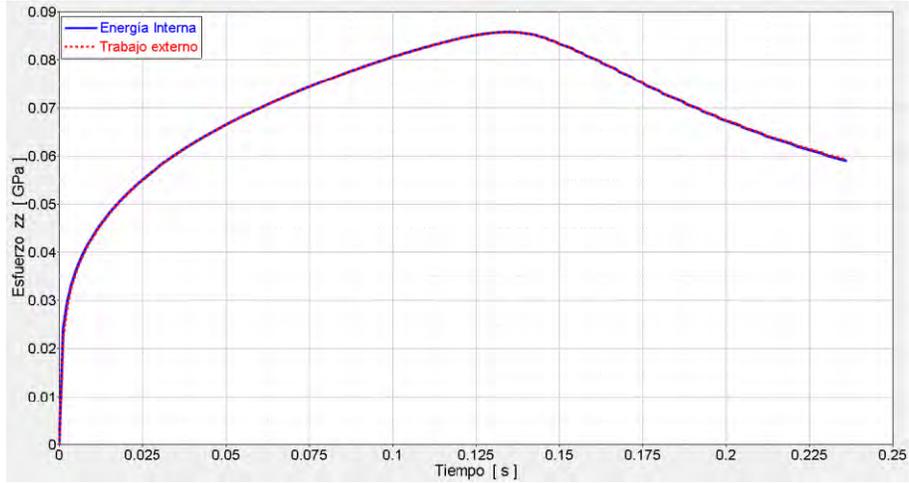


Figura 53: Momentos de falla del material.



Gráfica 16: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 20% - caso 2.



Gráfica 17: Diagrama "Esfuerzo - Deformación" porosidad 20% - caso2.

Propiedades Mecánicas

$E = 48.77$ [GPa]
 $\sigma_{\text{elástico}} = 29.54$ [MPa]

$\nu = 0.33$

$\epsilon_{\text{máx}} = 13.32$ [%]
 $\sigma_{\text{último}} = 87.08$ [MPa]

Anexo A.6

Porosidad 20% Caso 3

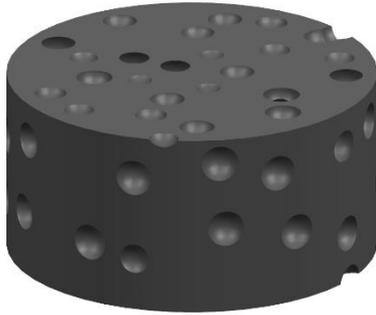


Figura 54: Probeta con 20% de porosidad distribución 3.

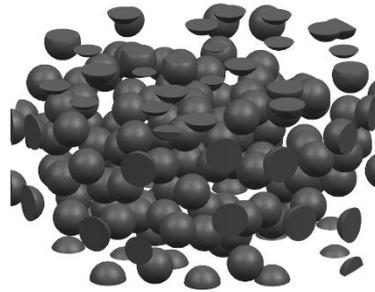


Figura 55: Material sustraído para generar los poros.

Esfuerzo Von Mises [GPa]

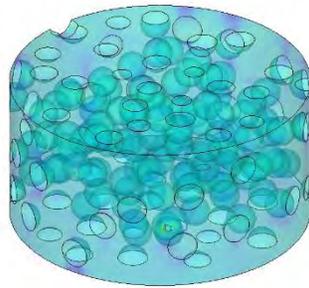
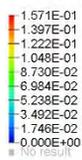
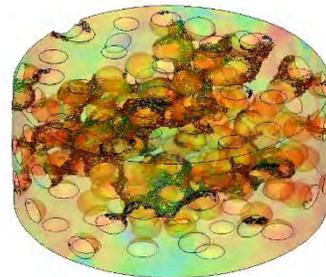
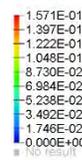


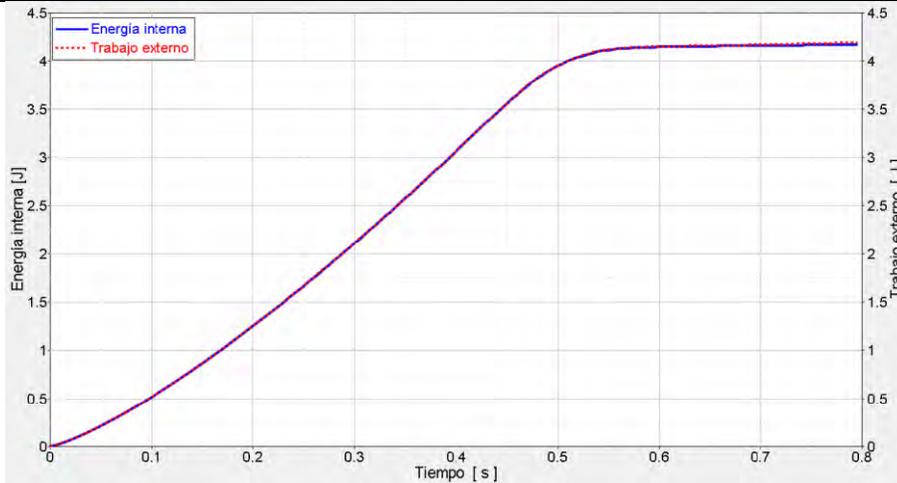
Figura 56: Comportamiento lineal.

Esfuerzo Von Mises [GPa]

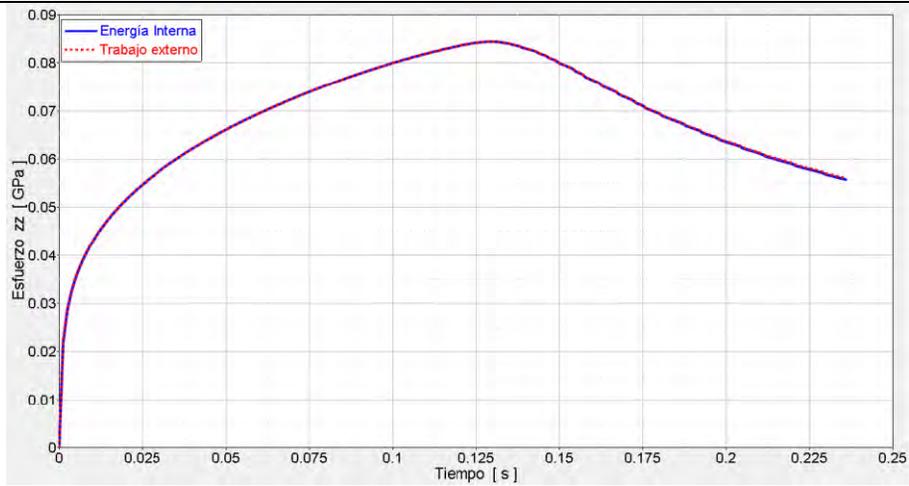


Gráfica 18: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 20% - Caso 3.

Figura 57: Momentos de falla del material.



Gráfica 19: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 20% - caso 3.



Gráfica 20: Diagrama "Esfuerzo - Deformación" porosidad 20% - caso 3.

Propiedades Mecánicas

$$E = 48.32 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{elástico}} = 29.26 \text{ [MPa]}$$

$$\nu = 0.33$$

$$\epsilon_{\text{máx}} = 13.48 \text{ [%]}$$

$$\sigma_{\text{último}} = 85.40 \text{ [MPa]}$$

Anexo A.7

Porosidad 30%

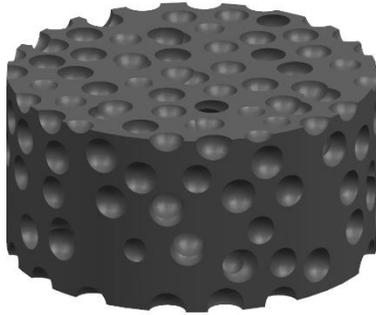


Figura 58: Probeta con 30% de porosidad.

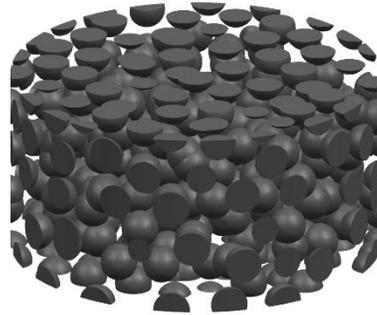


Figura 59: Material sustraído para generar los poros.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

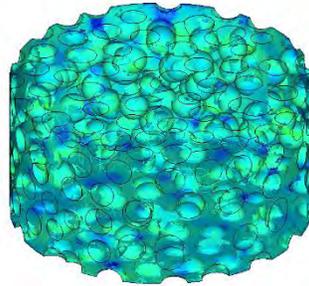
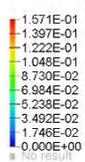


Figura 60: Comportamiento lineal.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

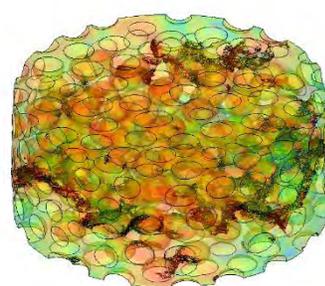
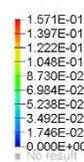
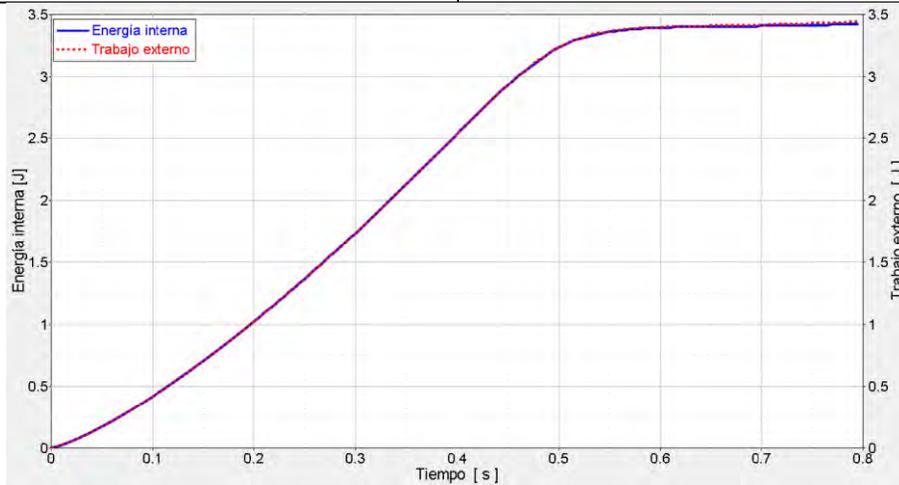
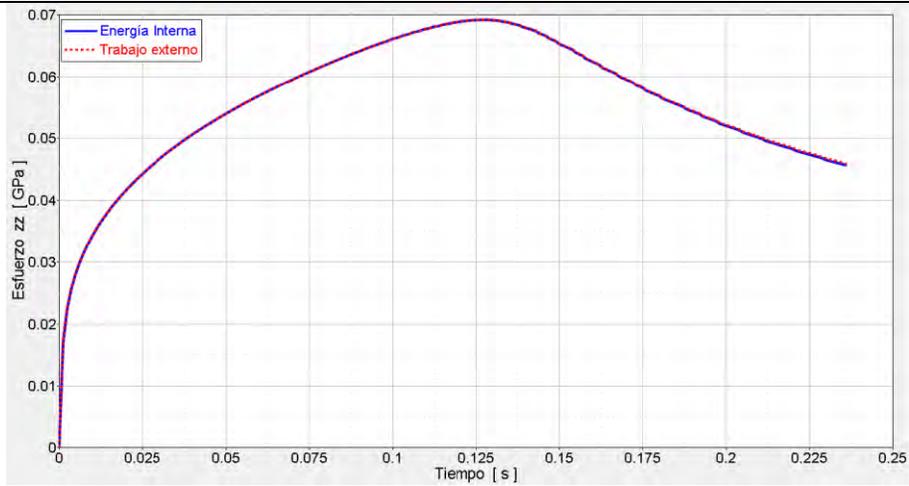


Figura 61: Momentos de falla del material.



Gráfica 21: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 30%.



Gráfica 22: Diagrama "Esfuerzo - Deformación" porosidad 30%.

Propiedades Mecánicas

$$E = 37.13 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{elástico}} = 22.49 \text{ [MPa]}$$

$$\nu = 0.35$$

$$\epsilon_{\text{máx}} = 12.71 \text{ [%]}$$

$$\sigma_{\text{último}} = 69.16 \text{ [MPa]}$$

Anexo A.8

Porosidad 40%

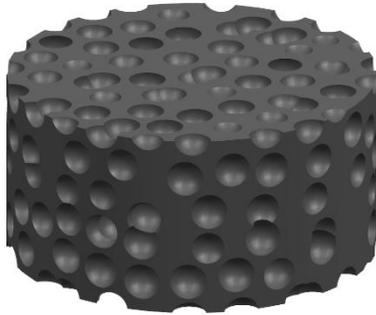


Figura 62: Probeta con 40% de porosidad.

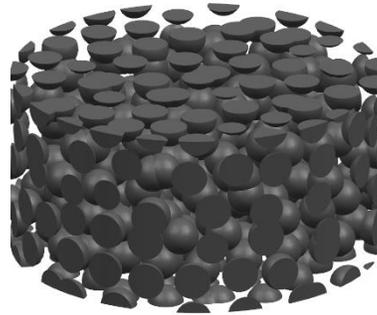


Figura 63: Material sustraído para generar los poros.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

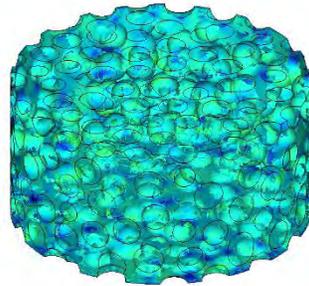
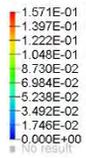


Figura 64: Comportamiento lineal.

Esfuerzo
Von Mises [GPa]

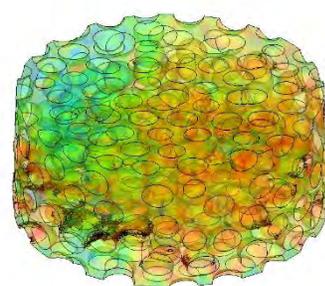
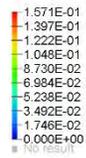
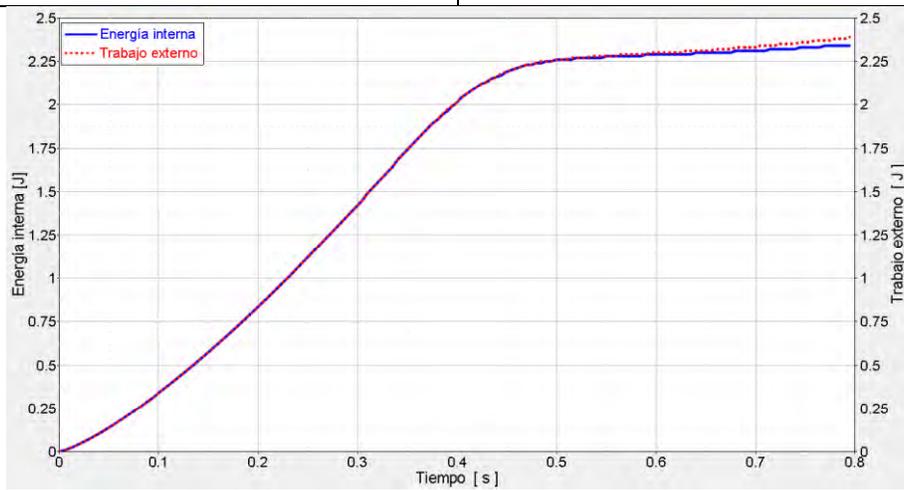
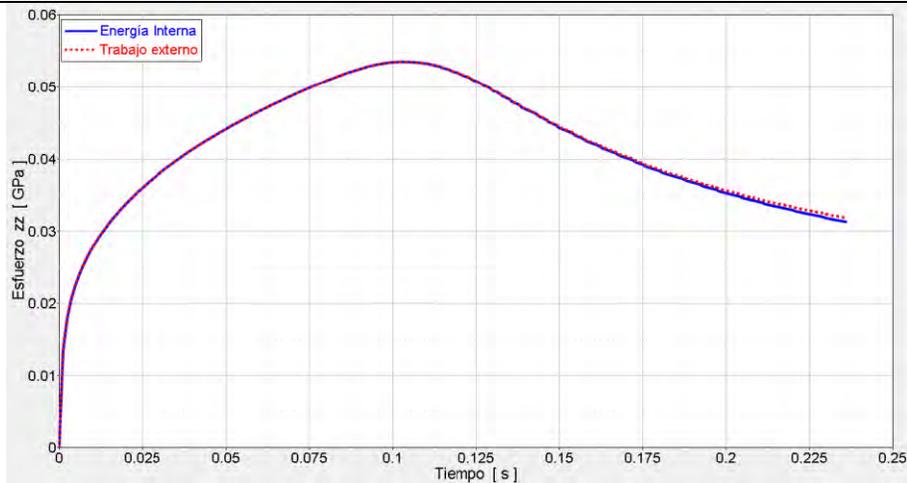


Figura 65: Momentos de falla del material.



Gráfica 23: "Energía interna y trabajo externo - Tiempo" porosidad 40%.



Gráfica 24: Diagrama "Esfuerzo - Deformación" porosidad 40%

Propiedades Mecánicas

$$E = 29.37 \text{ [GPa]}$$

$$\sigma_{\text{elástico}} = 17.79 \text{ [MPa]}$$

$$\nu = 0.35$$

$$\epsilon_{\text{máx}} = 10.32 \text{ [%]}$$

$$\sigma_{\text{último}} = 53.46 \text{ [MPa]}$$

Referencias

- [1] Foard Panel, «Open Vs. Closed Cell Foams,» Foard Panel, Julio 2003. [En línea]. Available: <http://www.foardpanel.com/open-vs-closed-cell-foams/>. [Último acceso: 2 Abril 2016].
- [2] M. A. T. E. N. F. J. H. H. W. L. J. Gibson, *Metal Foams: A Design Guide*, Elsevier, 2000.
- [3] J. Banhart, «Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams.,» *Progress in materials science*, vol. 46, nº 6, pp. 559-632, 2001.
- [4] K. McCann, «Metals and Plastics Look to Nature for Structure and Content,» [En línea]. Available: <http://www.atzonline.com/Artikel/3/6254/Metals-and-Plastics-Look-to-Nature-for-Structure-and-Content.html>. [Último acceso: 4 Abril 2016].
- [5] evonik, «Skip over functional column New ROHACELL® structural foam conquers the skies,» evonik, [En línea]. Available: <http://corporate.evonik.com/en/content/product-news/pages/rohacell-structural-foam.aspx>. [Último acceso: 30 Agosto 2016].
- [6] ergaerospace, «Micro meteorite shield,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.ergaerospace.com/products/Micro-meteorite-shield.htm>. [Último acceso: 10 Abril 2016].
- [7] A. K. K. K. KORNEI, «New Aluminum ‘Foam’ Makes Trains Stronger, Lighter, and Safer,» wired, 12 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.wired.com/2014/12/aluminum-foam-trains/>. [Último acceso: 20 Agosto 2016].
- [8] J. BELLOSTES, «cielo raso de aluminio celular – espuma de aluminio estabilizada,» 1 Diciembre 2007. [En línea]. Available: <http://blog.bellostes.com/?tag=cafeterias&paged=3>. [Último acceso: 26 Septiembre 2016].
- [9] «Metal Foam - a material for new bones,» 28 Febrero 2013. [En línea]. Available: <http://www.dw.com/en/metal-foam-a-material-for-new-bones/av-16633125>. [Último acceso: 1 Octubre 2016].
- [10] The Telegraph, «Hip implant firm cut spot checks,» 25 Enero 2016. [En línea]. Available: <http://www.telegraph.co.uk/news/investigations/hip-implant-firm-cut-spot-checks/>. [Último acceso: 1 Octubre 2016].
- [11] Harley Street Dental Implant Centre, «Zimmer Trabecular Metal Implants,» 2010. [En línea]. Available: <http://harleystreetdentalimplantcentre.co.uk/featured/zimmer-trabecular-metal-implants>. [Último acceso: 1 Octubre 2016].

- [12] APA, «Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams,» *Progress in materials science*, vol. 46, nº 6, pp. 559-632, 2001.
- [13] ISO, «Mechanical testing of metals — Ductility testing — Compression test for porous and cellular metals,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13314:ed-1:v1:en:fig:1>. [Último acceso: 4 Octubre 2016].
- [14] SAI GLOBAL, «Testing Of Metallic Materials - Compression Test Of Metallic Cellular Materials,» 1 Octubre 2008. [En línea]. Available: <http://infostore.saiglobal.com/store/details.aspx?ProductID=1090887>. [Último acceso: 7 Octubre 2016].
- [15] JSA Web Store, «JIS H 7902: 2016,» 22 Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.webstore.jsa.or.jp/webstore/Com/FlowControl.jsp?bunsyold=JIS+H+7902%A2016&dantaiCd=JIS&status=1&pageNo=0&lang=jp>. [Último acceso: 29 Septiembre 2016].
- [16] Y. X. C. C. & S. Y. P. Gan, «Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 42, nº 26, pp. 6628-6642, 2005.
- [17] L. I. Y. C. S. T. Abderrahim Boudenne, Systems, Handbook of Multiphase Polymer, Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [18] J. Kováčik, «Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials,» *Journal of Materials Science Letters*, pp. 1007-1010, 1999.
- [19] C. C. ., Y. S. Y.X. Gan, «Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams,» *International Journal of Solids and Structures*, nº 42, p. 6628–6642, 2005.
- [20] J. R. H. A. H. W. H. X. Zhu, «Effects of cell irregularity on the elastic properties of open-cell foams,» *Acta Materialia*, nº 48, p. 4893–4900, 2000.
- [21] C. L. Z. Z. C. S. L. Ke Zhu, «Measurement of the dynamic Young's modulus of porous titanium and Ti6Al4V,» *Science+Business Media*, nº 42, p. 7348–7353, 2007.
- [22] R. F. S. F. J. M. J. D. S. Maria A. Lopes, «Microstructural dependence of Young's and shear moduli of P2O5 glass reinforced hydroxyapatite for biomedical applications,» *ELSEVIER-Biomaterials*, vol. 21, p. 749}754, 2000.
- [23] S. L. C. A. D. D. I. A. L. Pérez, «Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy,» *Materials & Design*, vol. 83, p. 276–283, 2015.

- [24] L. Pérez Pozo, «Avances en la caracterización numérica de propiedades mecánicas de espumas metálicas.» de *Escuela en Ciencia de Materiales y Nanotecnología*, Morelia, Michoacán, 2015.
- [25] M. R. R. P. R. H. L. R. O. & S. H. R. Z. Baldissera, «Three-dimensional characterization of pores in Ti-6Al-4V alloy,» *Z. (2011). Three-dimensional characterization of pores in Ti-6Al-4V alloy. Materials research*, vol. 14, nº 1, pp. 102-106, 2011.
- [26] J. C. L. & H. H. SUÁREZRAIRÁN, «A Simple and Cheap 3D Reconstruction System of Embryonic Structures from Serial Sections.» *Acta Biológica Colombiana*, vol. 12, nº 1, pp. 33-42, 2007.
- [27] H. N. NUMBER, «Does nephron number matter in the development of kidney disease?,» *Ethnicity & disease*, vol. 16, pp. 41 -45, 2006.
- [28] S. R. E. B. F. V.-B. C. G. D. & V. P. Tagliabue, «Micro-CT based finite element models for elastic properties of glass–ceramic scaffolds,» *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 65, pp. 248-255, 2016.
- [29] S. H. S. A. T. J. & P. S. H. Han, «Non-destructive evaluation of an internal adaptation of resin composite restoration with swept-source optical coherence tomography and micro-CT,» *Dental Materials*, vol. 32, nº 1, pp. e1-e7, 2015.
- [30] A. X. G. H. S. M. S. H. F. M. C. Y. G. Q. .. & H. Y. Liu, «3D printing surgical implants at the clinic: a experimental study on anterior cruciate ligament reconstruction,» *Scientific reports*, vol. 6, 2016.
- [31] SDU, «In vivo micro-CT imaging and microarchitectural analysis,» 16 Agosto 2016. [En línea]. Available: http://www.sdu.dk/en/om_sdu/institutter_centre/klinisk_institut/forskning/forskningsenheder/ortopaedkirurgi/forskningsomraader/eksperimentel+forskning/microct. [Último acceso: 29 Septiembre 2016].
- [32] X. Y. Feng Xiao, «Geometry models of porous media based on Voronoi tessellations and their porosity–permeability relations,» *Computers & Mathematics with Applications*, pp. 328-348., 2016.
- [33] T. S. J. S. J. & K. K. J. Wejrzanowski, «Structure of foams modeled by Laguerre–Voronoi tessellations,» *Computational Materials Science*, vol. 67, nº 216-221, 2013.
- [34] J. Mellado Cruz, *Aplicación del método de los elementos discretos a problemas de desgaste.*, Barcelona, 2005.
- [35] M. Höfling, *A DEM - FEA methodology for mechanical characterisation of titanium foams obtained by powder metallurgy for biomedical applications.*, Valparaíso, Chile, 2015.

- [36] U. Messner, *A new DEM - FEA approach to determine mechanical properties of Mg foams obtained by powder metallurgy*, Valparaíso, Chile, 2015.
- [37] L. L. S. A. C. D. D. & A. I. Pérez, «Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy,» *Materials & Design*, vol. 83, pp. 276-283, 2015.
- [38] H. & B. L. C. Shen, «Finite element modeling of porous titanium,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, nº 1, pp. 320-335, 2007.
- [39] R. R. E. R. D. O. R. C. A. O. P. V. F. & I. Carlos, «Caracterización mecánica de espuma de titanio (ti-6al-4v) mediante paquetería de elemento finito,» de *MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, Pachuca, Hidalgo, 2013.
- [40] L. M. Larraín Neumann, *Caracterización numérica de propiedades mecánicas de espumas de cobre reforzadas con partículas de segunda fase*, Valparaíso, 2015.
- [41] J. H. A. I. R. J. H. R.-I. V. F. I. A. & A. C. Cadena, «Improvement of FEA estimations for compression behavior of Mg foams based on experimental observations,» *Computational Materials Science*, vol. 91, pp. 359-363, 2014.
- [42] P. Sánchez Pérez y I. A. Irausquín Castro, *Simulación numérica de la respuesta dinámica a compresión de tubos de aluminio rellenos de espuma metálica*, Madrid, 2011.
- [43] M. C. P. & K. S. Styles, «Finite element modelling of core thickness effects in aluminium foam/composite sandwich structures under flexural loading,» *Composite Structures*, vol. 86, nº 1, pp. 227-232, 2008.
- [44] D. N. D. Mandiola, *Análisis de esfuerzos de probetas porosas de aluminio mediante el método de elementos finitos*, Santiago, 2014.
- [45] C. Navarro, «Conceptos básicos del cálculo estructural,» Open Course Ware, [En línea]. Available: http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/transparencias/Capitulo_2.-Conceptos_basicos.pdf. [Último acceso: 7 Noviembre 2016].
- [46] Allergy Buyers Club, «Furnace Filters and Air Conditioner Filters,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.allergybuyersclub.com/boair-electrostatic-ac-and-furnace-filters.html>. [Último acceso: 2 Abril 2016].