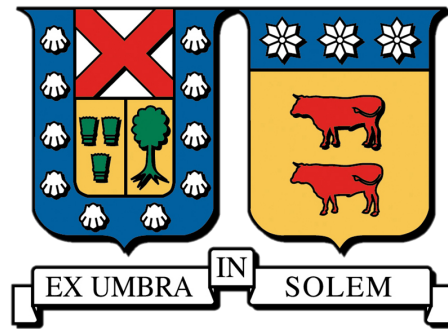


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO-CHILE



Estudio numérico y experimental del comportamiento elástico de un material poroso fabricado mediante manufactura aditiva con enfoque en características morfológicas y topológicas dirigidas.

ROBERTO ESTEBAN QUINTEROS MAYNE

TESÍS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

MECÁNICA

PROFESOR GUÍA: Dr. LUIS PEREZ POZO

PROFESOR CO-REFERENTE: JUAN FRANCISCO VIVANCO PHD.

ABRIL-2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Estudio numérico y experimental del comportamiento elástico de un material poroso fabricado mediante manufactura aditiva con enfoque en características morfológicas y topológicas dirigidas.

Nombre del candidato(a): Roberto Esteban Quinteros Mayne

Carrera / Grado: Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica

Campus: Casa Central Valparaíso Departamento: de Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Luis Pérez Pozo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

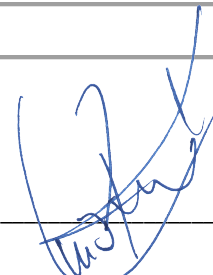
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

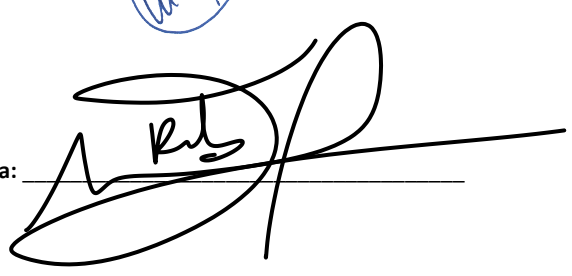
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 2 de julio de 2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02/07/2026

Firma: 

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	4
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. Antecedentes	6
2.1. Antecedentes Generales	6
2.2. PLA	10
2.2.1. Producción, características y propiedades	10
2.3. Materiales porosos	13
2.3.1. Estructura	14
2.3.2. Porosidad	16
2.3.3. Tamaños de poros	16
2.3.4. Espesor de Pared	17
2.3.5. Interconexión	18
2.3.6. Comportamiento Mecánico de los sólidos porosos	19
2.4. Procesos de fabricación	20
2.4.1. Procesamiento en estado líquido de metales celulares	21
2.4.2. Procesamiento en estado sólido en forma de polvo	23
2.4.3. Procesamiento de vapor de metal o compuesto metálico gaseoso	25
2.5. Aplicaciones de materiales porosos	25
2.5.1. Industria Automotriz	26
2.5.2. Industria Aeroespacial	27
2.5.3. Industria de la Construcción	27
2.5.4. Industria Biomédica	28
2.5.5. Aplicación Funcional: Filtros	28
2.5.6. Aplicación Funcional: Intercambiadores de Calor	28

2.6. Manufactura aditiva	29
2.6.1. Modelado por deposición fundida (FDM)	29
3. Marco Teórico	33
3.1. Mecánica del medio continuo	33
3.2. Teoría de la Elasticidad	33
3.3. Método de los elementos finitos	39
3.3.1. Formulación de un elemento finito	40
3.3.2. Elementos de Ansys	42
3.3.3. Formas del elemento	45
3.4. Teoría de Homogeneización	47
3.4.1. Ensayo de compresión uniaxial	48
3.5. Método de los elementos discretos	50
3.5.1. Esquema de integración	51
3.6. Principio de Arquímedes en medición de porosidad	52
3.7. Diseño y Análisis de Experimentos	53
3.7.1. Análisis de Varianza	54
3.7.2. Diseño de los Factoriales	58
4. Metodología	62
4.1. Características de los materiales porosos en estudio	62
4.2. Metodología Computacional	65
4.2.1. Elemento de Volumen Representativo	65
4.2.2. Información centro de poros	65
4.2.3. Modelado y simulación numérica en ANSYS®	67
4.3. Metodología Experimental	74
4.3.1. Generación Modelo mediante Archivo Informático .STL	74
4.3.2. Procedimiento Diseño de Experimentos	75
4.3.3. Impresión 3D	78
4.3.4. Medición de Porosidad	79
4.3.5. Ensayo a compresión uniaxial	81
5. Análisis de Resultados	82
5.1. Resultados Experimentales	82
5.1.1. Geometría y características de porosidad	82
5.1.2. Módulos Elásticos Aparentes Generales	94
5.1.3. Comparación de Módulos de Elasticidad Aparente Computacionales	102

5.1.4. Comparación Módulo Elástico Aparente Experimentales	103
5.1.5. Comparación del Módulo Elástico Aparente Experimental y computacional .	105
5.1.6. Análisis estadístico	114
5.1.7. Análisis de Experimentos, diseño factorial	120
6. Conclusión	131
Referencias	133
6.1. Diseño Factorial 3^2	143
6.2. Superficie regresión múltiple,	144

Índice de figuras

2.1. Ciclo del ácido poliláctico	11
2.2. Criterio de clasificación entre sólido celular y sólido poroso	13
2.3. Dispersiones de una fase en una segunda.	14
2.4. Micrografía de espumas metálica, con celda abierta, mixta y abierta.	15
2.5. Escaner interpartícula de porosidad y microporosidad	17
2.6. Distribución estadística del espesor de pared en una espuma (Y. Chen et al., 2015).	18
2.7. Poros interconectados	19
2.8. Curva esquemática de tensión-deformación para una espuma que muestra regímenes elástico lineal, plasticidad y densificación (Y. Chen et al., 2015; Gibson & Ashby, 1997; Taherkhani et al., 2016).	20
2.9. Fabricación de espumas, con metal en estado líquido.	22
2.10. Espumado directo de masas fundidas, con agente espumante	22
2.11. Estructura porosa de aluminio espumado mediante la adición de TiH_2	23
2.12. Material de aluminio celular fabricado mediante el uso de rellenos que mantienen espacios o espaciadores. Densidad $\rho = 1,1 \text{ [g/cm}^3\text{]}$	23
2.13. Bronce sinterizado poroso fabricado a partir de partículas de unos $100[\text{mm}]$ de diá- metro.	24
2.14. Aplicaciones de los metales celulares agrupadas según el grado de apertura necesario y si la aplicación es más funcional o necesario (Banhart, 2001)	26
2.15. Principales campos de aplicación automovilística de los materiales porosos.	27
2.16. Diagrama de flujo de los pasos de fabricación digital que conducen a la impresión del objeto deseado. El diseño CAD puede derivarse de tomografías computarizadas o imágenes radiográficas como de un diseño por el método de los elementos finitos (Chong et al., 2022).	30
2.17. Esquema modelado deposición fundida de fibra continua (Baich & Manogharan, 2015).	30
2.18. Fenomeno de escalera, dado el desplazamiento entre las capas (Chong et al., 2022).	31
3.1. Esquema general, condición de equilibrio interno.	34

3.2. Tetraedro de Cauchy.	35
3.3. Representación del estado tensional de un punto según tres planos ortogales.	36
3.4. Discretización del dominio en sub-regiones.	39
3.5. Problemas elástico de mecánica de sólidos.	40
3.6. Tipos de elementos finitos; (a) Elementos lineales 1D, (b) Elementos superficiales 2D, (c) Elementos volumétricos 3D.	43
3.7. Tipo de elemento SOLID185	43
3.8. Tipo de elemento SOLID285	44
3.9. Tipo de elemento SOLID186	44
3.10. Tipo de elemento SOLID187	45
3.11. Elementos con diferencia de relación de aspectos, lado izquierdo relación 1, lado derecho distorsionado relación 20.	46
3.12. Vectores utilizados para calcular la calidad ortogonal del elemento.	47
3.13. Modelo general de un proceso o sistema	53
4.1. Volumen de control de forma cilíndrica del cual se establecerá para las espumas de PLA y modelos asistidos por computadora (Perez Trigo, 2019).	62
4.2. Representación cantidad de tamaño de poros (Perez Trigo, 2019).	63
4.3. Procedimiento para generar y simular geometrías de espumas de PLA con los respectivos softwares a utilizar.	64
4.4. Ubicación de los centros de las esferas, obtenidos en LIGGGTHS.	66
4.5. Proceso de fabricación material poroso.	67
4.6. Plataforma de trabajo ANSYS ®Worbench, junto con la opción <i>Static Structural</i>	67
4.7. Sólido poroso, obtenido por medio del Script compilado en <i>Design modeler</i>	68
4.8. Asignación de propiedades a los modelos porosos en estudio.	69
4.9. Parámetros para selección de superficies en <i>Worksheet</i> de <i>Named Selection</i>	70
4.10. Selección de superficies en la cara superior ($z = H$)	71
4.11. Selección de superficies en la cara inferior ($z = 0$)	71
4.12. Asignación condición de contorno en la cara inferior ($z = 0$)	72
4.13. Asignación condición de contorno en la cara superior ($z = H$)	72
4.14. Selección fuerza de reacción en la cara inferior del modelo ($z = 0$).	73
4.15. Especificaciones Mbot GridII +	74
4.16. Interfaz MPrint con las especificaciones de impresión	75
4.17. Aleatorización del orden de impresiones, para que el error tenga una distribución normal.	76
4.18. Aleatorización del orden de compresión, para que no exista error y sesgo de impresión, sobre los resultados del módulo elástico aparente.	77

4.19. Impresión de cuatro sólidos porosos de forma simultaneas en la impresora Mbot GridII +	78
4.20. Balanza de masas pequeñas RADWAF AS 220-C2.	79
4.21. Máquina electromecánica Test-Resources.	81
5.1. Sólidos porosos impresos con porosidad teóricamente idéntica (60 %) y distribuciones no estructuradas, mostrando una heterogeneidad creciente con mayores proporciones de tamaño de poro para 1:1, 2:1 y 4:1 en A, B y C, respectivamente.	83
5.2. Relación entre porosidades experimentales y computacionales. Donde las líneas de guion muestran una regresión lineal siguiendo la fórmula insertada con su R^2 respectivamente. La línea de 45° insertada muestra una coincidencia casi perfecta entre la porosidad experimental y computacional.	84
5.3. Relación de tamaño de poros 1:1.	86
5.4. Relación de tamaño de poros 2 a 1.	88
5.5. Relación de tamaño de poros 4a 1	89
5.6. Comparación geométrica entre un modelo CAD y un modelo fabricado con la impresora comercial Mbot Gridd (utilizada en este trabajo), por medio de una estructura porosa con 81 poros de áreas variables.	90
5.7. Cuantificación de todos los tamaños de poro en ambas estructuras en comparación con el modelo CAD.	91
5.8. Comparación de cantidad y relación de tamaños de poros.	92
5.9. Convergencia del espesor de pared promedio respecto al número de cortes.	93
5.10. Respuesta tensión-deformación de muestras porosas impresas mostrando la región elástica lineal inicial seguida de deformación plástica y densificación estructural, para porosidades del 60 %, 65 %, 70 % y 75 %, en todas las proporciones de tamaño de poros.	94
5.11. Comparación del módulo elástico aparente normalizado experimental y computacional para modelos porosos entre porosidades del 60–75 % y relaciones de tamaño de poro de 1:1, 2:1 y 4:1. Las líneas discontinuas indican ajustes de regresión lineal para cada tipo de dato.	95
5.12. Módulo elástico aparente normalizado, según la relación de tamaños de poros. . . .	96
5.13. Gráfico de caja y bigote del módulo elástico aparente normalizado para diferentes niveles de porosidad y proporciones de tamaño de poros, mostrando la mediana así como los valores máximos y mínimos de la respuesta elástica de las muestras impresas. .	97
5.14. Respuesta elástica aparente en relación de tamaños de poros 1:1	99
5.15. Respuesta elástica aparente en relación de tamaños de poros 2:1	100
5.16. Respuesta elástica aparente en relación de tamaños de poros 4:1	101

5.17. Comparación gráfica del módulo normalizado en función de la porosidad volumétrica para las diferentes ecuaciones de porosidad (Dudescu & Racz, 2017; Hashin, 1960; Hasselman, 1962; Herakovich & Baxter, 1999; Maitra & Phani, 1994; Rice, 1996; Roberts & Garboczi, 2000).	102
5.18. Módulo de elástico aparente computacional	103
5.19. módulo elástico aparente experimental	104
5.20. módulo elástico aparente relativo en espumas con relación 1:1.	106
5.21. módulo elástico aparente relativo en sólidos porosos con relación 2 a 1.	108
5.22. módulo elástico aparente relativo en sólidos porosos con relación 4 a 1.	110
5.23. Comparación de cantidad y relación de tamaños de poros.	112
5.24. Comparación de cantidad y relación de tamaños de poros.	113
5.25. Análisis de Regresión lineal entre porosidad experimental, y Módulo Elástico Aparente normalizado	115
5.26. Análisis de Regresión exponencial entre porosidad experimental, y Módulo Elástico Aparente normalizado	116
5.27. Superficie de respuesta obtenida a partir de un modelo de regresión lineal múltiple que muestra el efecto combinado de la porosidad y la relación de tamaño de poro (1:1, 2:1 y 4:1) sobre el módulo elástico aparente normalizado.	118
5.28. Análisis de Regresión lineal de respuesta elástica experimental y computacional	119
5.29. Gráfica de probabilidad normal, rango de porosidad 60 %, 65 % y 70 %.	122
5.30. Gráfica de probabilidad norma, rango de porosidad 65 %, 70 % y 75 %.	123
5.31. Diagrama de pareto, rango de porosidad 60 %, 65 % y 75 %.	125
5.32. Gráfica de efecto principales, rango de porosidad 60 %, 65 % y 70 %.	126
5.33. Gráfica de interacciones o efectos combinados, rango de porosidad 60 %, 65 % y 70 %.	127
5.34. Diagrama de pareto, rango de porosidad 65 %, 70 % y 75 %.	128
5.35. Gráfica efectos principales, rango de porosidad 65 %, 70 % y 75 %.	129
5.36. Gráfica de interacciones o efectos combinados, rango de porosidad 65 %, 70 %, y 75 %.	130
6.1. Superficie de respúesta codificada de la regresión múltiple.	145

Índice de cuadros

2.1. Módulos elásticos aparentes normalizados de materiales porosos (Choren et al., 2013)	7
2.2. Propiedades geométricas	12
2.3. Propiedades Físicas, mecánicas y térmicas del filamento de PLA	12
3.1. Datos típicos para un experimento de un solo factor.	55
3.2. Suma de cuadrados factores	59
3.3. Suma de cuadrados de las interacciones	59
3.4. Hipótesis nula y estadístico de contraste	60
3.5. Hipótesis nula y estadístico de contraste	61
4.1. Clasificación geométricas de los modelos en estudio	63
4.2. Orden y enumeración de los sólidos porosos en estudio.	76
4.3. Parámetros técnicos de la balanza RADWAF AS 220-C2	80
5.1. Porosidades teóricas y experimentales.	85
5.2. Módulo elástico aparente relativo promedio	107
5.3. Módulo elástico aparente relativo promedio	109
5.4. Módulo elástico aparente relativo promedio	111
5.5. Análisis de Correlación de Spearman	114
5.6. Análisis de regresión lineal en la relación de tamaños de poros 1:1.	114
5.7. Análisis de regresión lineal en la relación de tamaños de poros 2:1.	115
5.8. Análisis de regresión lineal en la relación de tamaños de poros 4:1.	115
5.9. Análisis de regresión Exponencial, para diferentes tamaños de poros	117
5.10. Análisis de Covarianza	117
5.11. Análisis de Regresión lineal múltiple	118
5.12. Factore diseño factorial 3^k , primera parte.	121
5.13. Factores diseño factorial 3^k , segunda parte.	121
5.14. Residuos estandarizados	123

5.15. Datos típicos para un experimento de un solo factor.	124
5.16. Datos típicos para un experimento de un solo factor.	127
6.1. Datos típicos para un experimento de un solo factor.	144
6.2. Datos típicos para un experimento de un solo factor.	144

Resumen

Cuando la naturaleza requiere construir estructuras sometidas a diferentes solicitaciones mecánicas, con fines estructurales, frecuentemente utiliza sólidos porosos, que indistintamente de sus características morfológicas y topológicas, se componen de una fase sólida equivalente a una matriz densa, y una fase gaseosa correspondiente a una estructura porosa. Donde la unión de ambas fases, abarca la superposición geométrica y la combinación de propiedades, tales como; mecánicas, térmicas, eléctricas, acústicas y químicas, inherentes a la fase sólida, lo que suscita una amplia cantidad de aplicaciones en ingeniería.

Uno de los parámetros de mayor interés en el estudio de los materiales porosos, es el módulo de elasticidad aparente, dado que es de gran importancia en cuerpos estructurales, hasta prótesis de implantes óseos en la biomecánica, siendo este último un gran campo de estudio y crecimiento los últimos años.

Se han desarrollado numerosas investigaciones, para conocer y estimar las propiedades elásticas aparentes en los materiales porosos, y producto de ello, se han propuesto diferentes ecuaciones empíricas asociadas a distintos parámetros materiales y datos experimentales de interés, los cuales tienen como resultado una capacidad predictiva limitada, demostrándose que la efectividad de la estimación de las propiedades elásticas, se logra cuando los modelos empíricos poseen una conexión morfológica directa con la microestructura. Lo anterior ha generado muchos estudios acerca de diferentes aspectos morfológicos y topológicos de los sólidos porosos, tales como espesor de pared, tamaño y forma del poro, interconexión de poros, distribución de los poros, relación en el tamaño de poros, entre otros, con el fin de mejorar dicha conexión entre los modelos empíricos y la microestructura. Sin embargo, los resultados de estas investigaciones, han revelado que cada uno de estos aspectos morfológicos, y topológicos se caracterizan por ser desordenados, no uniformes y aperiódicos, es decir, son aspectos de gran incertidumbre, y a su vez, dependen de la técnica de fabricación empleada.

Esta incertidumbre morfológica en los materiales porosos ha provocado la implementación de diversas técnicas para la investigación de las propiedades elásticas aparentes. Una de ellas, es la técnica de imagen llamada microtomografía computarizada, la cual ha revelado que existe un patrón subyacente de poros o una autosimilitud entre los macros y micro poros. En este sentido, la

evolución de tales tecnologías ha impulsado nuevas metodologías, despuntando la implementación de técnicas numéricas, tales como el método de los elementos finitos, que permite observar modelos computacionales de dominio geométrico complejo, y, por ende, analizar modelo de sólidos porosos con características topológicas similares a los experimentales, y así reducir dicha incertidumbre geométrica.

Si bien, estos modelos computacionales entregan mejores estimaciones en comparación con las ecuaciones empíricas, el verdadero desafío consiste en diseñar un modelo idéntico experimental, para mejorar la efectividad de las estimaciones de las propiedades físicas de interés. Dicho desafío se puede solucionar con nuevas técnicas de fabricación, como es el caso de la manufactura aditiva, dado que permite fabricar formas y estructuras de gran complejidad, lo más ajustada al modelo computacional, y de esta manera, contrastar con mayor precisión, la influencia de aspectos morfológicos en las propiedades elásticas aparentes del material en estudio.

En este trabajo se investiga el comportamiento elástico en compresión de sólidos porosos de ácido poliláctico (PLA) fabricados mediante manufactura aditiva (MA), a través de la contrastación y análisis de los resultados experimentales y numéricos, utilizando modelos con topologías y morfologías controladas, centrándose en la caracterización de factores estereológicos, con la idea de determinar la verdadera significancia estadística de aspectos como la porosidad, la relación de tamaño y la distribución no estructurada de los poros, así como las interacciones entre estos, en este comportamiento.

El procedimiento consiste en dos etapas de desarrollo, una computacional y otra experimental. En la primera se estudian modelos computacionales porosos con distribución no estructurada de poros, utilizando una metodología numérica basada en la simulación por elementos discretos (DEM) y el análisis por el método de los elementos finitos (FEM) de la microestructura resultante, a fin de diseñar un modelo poroso con propiedades mecánicas y características morfológicas equivalentes, que usualmente se obtienen en los sólidos porosos fabricados por pulvimetalurgia.

Por otro lado, la etapa experimental consta de tres procesos: el primero consiste en fabricar los modelos computacionales por medio de MA usando una impresora comercial Mbot Grid II+, el segundo proceso en medir las porosidades de las muestras impresas utilizando el principio de Arquímedes, por medio, de una balanza analítica de masa pequeñas Radwag AS 220-C2, y el tercero en realizar la caracterización de las propiedades elásticas de las muestras direccionada por la norma de compresión ASTM D695-15 en plásticos rígidos. Esta caracterización de las propiedades, se obtiene al realizar los ensayos a compresión en la máquina electromecánica universal de doble columna serie 300 Test-Resources, con una precisión de carga de 0.0001[N].

Se utilizan tres tipos de modelos computacionales en función de la relación de tamaño de poros; relación 1:1 (poros de 4 mm de diámetros), relación 2:1 (por cada 2 poros de 2 mm de diámetro, hay un poro de 4mm) y relación 4:1 (por cada 4 poros de 2 mm de diámetro, hay 1 poros de 4 mm).

Cada una de estas relaciones, obedecen a la característica morfológica de autosimilitud entre los macro y micro poros, que permite introducir una mayor cantidad de poros, para obtener la misma porosidad, dando como resultado espumas de mayor heterogeneidad y complejidad en su dominio geométrico. En cada relación de tamaño de poros se analizan cuatro rangos de porosidad (60 %, 65 %, 70 % y 75 %), y se considerarán tres modelos de espumas porosas en cada rango. Se fabrican cinco réplicas de cada modelo, lo que resulta en un tamaño muestral de 180 especímenes impresos. En cuanto al análisis desarrollado, se obtiene que la porosidad influye en el módulo elástico aparente de las muestras impresas, donde los órdenes de magnitud normalizados de esta propiedad disminuyen a medida que el rango de porosidad aumenta; 0.2780[-], 0.2032[-], 0.1430[-], y 0.0655[-], para 60 %, 65 %, 70 % y 75 % respectivamente. Por su parte, la relación de tamaños de poros influye en el módulo elástico aparente, no obstante, dicha influencia es en menor cantidad, y solo se evidencia en la tendencia general de la respuesta elástica, cuando se estudian el conjunto de rangos de porosidad. En tanto, para la relación no estructurada de poros, no se percibe una contribución sobre esta propiedad, dado que su variabilidad entre muestras de una misma relación de tamaño y porcentaje de porosidad, es prácticamente la misma.

Se constata una adecuada capacidad de la fabricación mediante MA en las muestras porosas, sujeta a los parámetros de impresión considerados, para proporcionar impresiones precisas de materiales porosos con una morfología y topología cercana a los modelos computacionales, puesto que, la comparación entre las cantidades de porosidad experimental con la computacional no exhibe una disimilitud entre sus tendencias, cuya dispersión y variabilidad en cada rango de porosidad, se encuentran en las vecindades esperadas.

Referente a la contrastación, entre las cantidades de interés se demuestra, que los resultados experimentales poseen tendencias similares con los computacionales, y a medida que aumenta el rango de porosidad, existe una mayor proximidad o cercanía en la respuesta elástica indistintamente de la relación de tamaño de poros, dado que, en mayores rangos de porosidad teórica, la porosidad computacional y experimental son convergentes, y por ende, el módulo de Young aparente es próximo, de esta forma, el comportamiento computacional se valida mediante el experimental.

A su vez, en el análisis se consigue evidencia estadística de que la propiedad elástica aparente, depende significativamente del factor principal de porosidad con un estadístico de 7.5[-], como también del factor principal de la relación de tamaño de poros cuyo estadístico es de 3.1[-]. Por su parte, la interacción entre estos factores, es decir, la porosidad y la relación de tamaño de poros, también es significativa con la respuesta elásticas de las muestras impresas, que proveen un estadístico 5.3[-]. Sin embargo, no existe evidencia estadística, que la variabilidad de porosidad en cada vecindad macro de porosidad, tenga influencia con la respuesta elástica, es decir, la distribución no estructurada de poros, bajo condiciones fijas de porosidad y relación de tamaño de poros, no es significativa en el módulo elástico.

En conclusión, se corrobora que la fabricación mediante manufactura aditiva, proporciona de materiales porosos, con buena precisión, cuya morfología y topología es estadísticamente análoga a la computacional, dado que la porosidad calculada por el principio de Arquímedes, y la respuesta elástica obtenida mediante ensayos experimentales a compresión, presentan valores cercanos a los computacionales, y sus respectivas tendencias son pariguales, en todos los rangos de porosidad teóricos. Es decir, la porosidad, relación de tamaño de poros, junto con la interacción entre estos aspectos morfológicos, influyen en la respuesta elástica aparente. Sin embargo, la distribución no estructurada de poros, bajo aspectos de porosidad y relación de tamaño de poros fijos, no influyen en dicha respuesta.

Abstract

When nature requires the construction of structures subjected to different mechanical stresses for structural purposes, it frequently utilizes porous solids which, regardless of their morphological and topological characteristics, are composed of a solid phase equivalent to a dense matrix and a gaseous phase corresponding to a porous structure. The union of both phases encompasses the geometric superposition and the combination of properties, such as mechanical, thermal, electrical, acoustic, and chemical, inherent to the solid phase, which triggers a wide range of engineering applications.

One of the parameters of greatest interest in the study of porous materials is the apparent modulus of elasticity, given its great importance in structural bodies and bone implant prostheses in biomechanics, the latter being a major field of study and growth in recent years. Numerous investigations have been developed to understand and estimate the apparent elastic properties in porous materials, and as a result, different empirical equations associated with various material parameters and experimental data of interest have been proposed, which result in a limited predictive capacity, demonstrating that the effectiveness of the estimation of elastic properties is achieved when empirical models possess a direct morphological connection with the microstructure. The above has generated many studies regarding different morphological and topological aspects of porous solids, such as wall thickness, pore size and shape, pore interconnection, pore distribution, and pore size ratio, among others, in order to improve said connection between empirical models and the microstructure. However, the results of these investigations have revealed that each of these morphological and topological aspects is characterized by being disordered, non-uniform, and aperiodic; that is, they are aspects of great uncertainty and, in turn, depend on the manufacturing technique employed.

This morphological uncertainty in porous materials has led to the implementation of various techniques for the investigation of apparent elastic properties. One of them is the imaging technique called micro-computed tomography, which has revealed that there is an underlying pattern of pores or self-similarity between macro and micro pores. In this sense, the evolution of such technologies has driven new methodologies, highlighting the implementation of numerical techniques, such as the finite element method, which allows for the observation of computational models of complex

geometric domains and, therefore, the analysis of porous solid models with topological characteristics similar to experimental ones, thus reducing said geometric uncertainty.

While these computational models provide better estimations compared to empirical equations, the true challenge consists of designing an identical experimental model to improve the effectiveness of the estimations of the physical properties of interest. This challenge can be solved with new manufacturing techniques, such as additive manufacturing, as it allows for the fabrication of highly complex shapes and structures that are closely adjusted to the computational model, thus contrasting with greater precision the influence of morphological aspects on the apparent elastic properties of the material under study.

In this work, the compressive elastic behavior of polylactic acid (PLA) porous solids manufactured by additive manufacturing (AM) is investigated through the contrast and analysis of experimental and numerical results, using models with controlled topologies and morphologies, focusing on the characterization of stereological factors with the idea of determining the true statistical significance of aspects such as porosity, size ratio, and unstructured pore distribution, as well as the interactions between these, in this behavior. The procedure consists of two stages of development, one computational and another experimental. In the first, porous computational models with unstructured pore distribution are studied using a numerical methodology based on discrete element simulation (DEM) and finite element analysis (FEM) of the resulting microstructure, in order to design a porous model with equivalent mechanical properties and morphological characteristics that are usually obtained in porous solids manufactured by powder metallurgy.

On the other hand, the experimental stage consists of three processes; the first consists of manufacturing the computational models through AM using a commercial Mbot Grid II+ printer, the second process involves measuring the porosities of the printed samples using Archimedes' principle by means of a Radwag AS 220-C2 small mass analytical balance, and the third involves performing the characterization of the elastic properties of the samples directed by the ASTM D695-15 compression standard for rigid plastics. This characterization of properties is obtained by performing compression tests in a Test-Resources series 300 double-column electromechanical testing frame with a load precision of 0.0001[N].

Three types of computational models are used as a function of the pore size ratio; 1:1 ratio (4 mm diameter pores), 2:1 ratio (for every 2 pores of 2 mm diameter, there is one 4 mm pore), and 4:1 ratio (for every 4 pores of 2 mm diameter, there is 1 pore of 4 mm). Each of these ratios obeys the morphological characteristic of self-similarity between macro and micro pores, which allows for the introduction of a larger number of pores to obtain the same porosity, resulting in foams of greater heterogeneity and complexity in their geometric domain. In each pore size ratio, four porosity ranges are analyzed (60 %, 65 %, 70 %, and 75 %), and three porous foam models are considered in each range. Five replicates of each model are manufactured, resulting in a sample size of 180

printed specimens.

Regarding the analysis developed, it is obtained that porosity influences the apparent elastic modulus of the printed samples, where the normalized orders of magnitude of this property decrease as the porosity range increases; 0.2780[-], 0.2032[-], 0.1430[-], and 0.0655[-] for 60 %, 65 %, 70 %, and 75 % respectively. For its part, the pore size ratio influences the apparent elastic modulus; however, this influence is in a smaller amount and is only evident in the general trend of the elastic response when the set of porosity ranges is studied. Meanwhile, for the unstructured pore ratio, no contribution to this property is perceived, given that its variability between samples of the same size ratio and porosity percentage is practically the same.

An adequate capability of AM manufacturing in porous samples is confirmed, subject to the printing parameters considered, to provide precise prints of porous materials with a morphology and topology close to the computational models, since the comparison between the experimental and computational porosity quantities does not exhibit a dissimilarity between their trends, whose dispersion and variability in each porosity range are within the expected vicinity. Regarding the contrast between the quantities of interest, it is demonstrated that the experimental results possess similar trends to the computational ones, and as the porosity range increases, there is greater proximity or closeness in the elastic response regardless of the pore size ratio, given that in higher theoretical porosity ranges, the computational and experimental porosity are convergent, and therefore the apparent Young's modulus is close; in this way, the computational behavior is validated through the experimental one.

At the same time, the analysis achieves statistical evidence that the apparent elastic property depends significantly on the main factor of porosity with a statistic of 7.5[-], as well as on the main factor of the pore size ratio whose statistic is 3.1[-]. For its part, the interaction between these factors, that is, porosity and pore size ratio, is also significant with the elastic response of the printed samples, providing a statistic of 5.3[-]. However, there is no statistical evidence that the variability of porosity in each macro vicinity of porosity has an influence on the elastic response; that is, the unstructured distribution of pores, under fixed conditions of porosity and pore size ratio, is not significant in the elastic modulus.

In conclusion, it is corroborated that additive manufacturing provides porous materials with good precision, whose morphology and topology are statistically analogous to the computational ones, given that the porosity calculated by Archimedes' principle and the elastic response obtained through experimental compression tests present values close to the computational ones and their respective trends are equal across all theoretical porosity ranges. That is, the porosity and pore size ratio, along with the interaction between these morphological aspects, influence the apparent elastic response; however, the unstructured distribution of pores, under fixed porosity and pore size ratio aspects, does not influence said response.

Agradecimientos

A Jesús, mi Señor, quién me ha dado una hermosa familia, quién por su amor y misericordia, me ha permitido vivir en plenitud, quién llena mi corazón y le da sentido a mi vida, Te amo Jesús. A mi amada esposa, Araceli, por ser mi apoyo incondicional, mi refugio y la fuerza que me impulsó en los momentos de mayor cansancio. Gracias por tu paciencia y por creer en este sueño tanto como yo. A mis hermosos tres hijos: Nathan, Elías y Hannah, quienes son mi mayor motivación. Gracias por sus sonrisas y por recordarme siempre lo que verdaderamente importa; esta meta también es de ustedes.

A mis padres y hermanos, por ser el cimiento de mi vida. Gracias por los valores que me inculcaron, por su respaldo constante a lo largo de los años y por celebrar cada uno de mis logros como si fueran propios.

A la Iglesia la Viña de Puerto Montt, especialmente a su Equipo Pastoral. Gracias por su cobertura espiritual, por sus oraciones y por ser esa comunidad de fe que me sostuvo y acompañó durante este proceso académico.

Capítulo 1

Introducción

Cuando el hombre moderno necesita construir grandes estructuras de carga, utiliza sólidos densos, como el acero, hormigón, vidrio, etc. En cambio, cuando la naturaleza tiene la misma necesidad, generalmente emplea sólidos celulares, tales como: hueso, esponja, coral, entre otros. Esta elección inteligente de la naturaleza ha sido causante de numerosos estudios, los cuales han podido demostrar que dicha elección constructiva, radica en las variadas propiedades que poseen los materiales celulares (Ashby & Medalist, 1983), dado que, sus diferentes aspectos topológicos y morfológicos, suscitan la optimización simultánea de la rigidez, la resistencia y el peso total (Perez Trigo, 2019).

Desde un punto de vista metalurgico, bajo el prisma de la ciencia de las superficies, estos materiales celulares, se caracterizan por ser constituidos por una fase sólida y vacíos indistintamente de su distribución microestructural, y sus aspectos topológicos como morfológicos. Donde la fase sólida equivale a una matriz densa o sólida, y los vacíos a una estructura porosa (Gibson, 2003; Gibson & Ashby, 1999; Perez Trigo, 2019; Upadhyay & Ramakrishnan, 2012), de ahí que, a estos materiales se les denota con el nombre de espumas porosas, y a su vez, se clasifican dentro de los materiales híbridos, que se definen inherentemente como la mezcla de dos o más materiales existentes en una arquitectura elegida para superponer sus propiedades (Bolzoni et al., 2021).

Esta familia de materiales híbridos se consideran como materiales de ingeniería avanzados, ya que su principal particularidad es dar lugar a una combinación única de propiedades en función del peso de su estructura (Barthelat, 2015; Davies & Zhen, 1983; Degischer & Kriszt, 2002; Gibson, 2000), que proporciona una amplia gama en aplicaciones de ingeniería, destacada por sus excepcionales propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, acústicas y químicas (Ashby & Gibson, 1997; Banhart et al., 1999; Davies & Zhen, 1983). Entre las propiedades mecánicas más importantes a determinar en la investigación de los materiales porosos, se encuentra el módulo de elasticidad

(Antunes et al., 2011; Cadena, Alfonso, Ramírez, Rodríguez-Iglesias et al., 2014), visto que, es de gran importancia en cuerpos estructurales de aplicación constructiva, como también en aplicaciones de la biomecánica, específicamente en los implantes óseos (Nomura et al., 2010; Y. Torres et al., 2014), siendo este último de gran estudio y crecimiento los últimos años.

Si bien diversos estudios han planteado que uno de los aspectos de mayor preponderancia para conocer las propiedades elásticas aparentes de los sólidos porosos, indistintamente de la aplicación a estudiar, es la porosidad, se ha vislumbrado en menor escala, que ciertos aspectos morfológicos como forma de poros, espesor de pared, interconexión de poros, tamaño de poros, distribución no estructurada de los poros etc. junto con la topología, que generalmente se destaca por ser aperiódica, no uniforme y desordenada, también influyen de manera significativa en el comportamiento y propiedades mecánicas (Pérez, Lascano, Aguilar, Domancic & Alfonso, 2015; Pérez, Lascano, Aguilar, Estay et al., 2015; Perez Trigo, 2019; Warren & Kraynik, 1988)

Razón por la cual, las ecuaciones empíricas desarrolladas para estimar propiedades elásticas efectivas, solo proporcionan descripciones precisas de los datos experimentales particulares de estudio y poseen una capacidad predictiva limitada, a causa de que no consideran aspectos morfológicos y topológicos existentes de las espumas reales, en cambio, aquellos modelos teóricos que tienen una conexión rigurosa con la microestructura, suelen ser más predictivos e interpretativos, puesto que, la validez de las predicciones depende principalmente de la proximidad del modelo a la topología de la espuma real (Choren et al., 2013). De esta forma, aunque el desarrollo de ecuaciones para predecir propiedades mecánicas, se ha estudiado durante las últimas décadas, sigue habiendo una falta de correlación definitiva entre la microestructura de un cuerpo poroso y los módulos resultantes, es decir se requiere una relación más sólida entre la microestructura, las características de porosidad y el comportamiento mecánico asociado.

Esta incertidumbre morfológica en los materiales porosos ha suscitado la implementación de diferentes técnicas estereológicas, a fin de transformar aquellos aspectos microestructurales desconocidos y no controlados, en parámetros estadísticamente controlados y caracterizados en los modelos teóricos, y de esta manera, reducir el error en las estimaciones de las propiedades mecánicas.

De esta forma, el uso de estas técnicas estereológicas, ha permitido conocer en mayor precisión la microestructura interna, como es el caso de la técnica de imagen llamada microtomografía computarizada, la cual ha revelado que existe un patrón subyacente de poros o una autosimilitud entre macro y micro poros, que desencadenan en un aumento de porosidad, junto con un mayor grado de heterogeneidad en las espumas. Este patrón subyacente o relación de tamaños de poros, es de gran relevancia al momento de caracterizar el módulo elástico aparente en los materiales porosos. Hoy en día el diseño asistido por computador (CAD), permite emplear técnicas numéricas tales

como el método de los elementos finitos (FEM), método de los elementos discretos (DEM), entre otros, para modelar diferentes geometrías y analizar el efecto de estas sobre las propiedades mecánicas, mediante simulaciones numéricas (Pérez, Lascano, Aguilar, Domancic & Alfonso, 2015). A su vez, la manufactura aditiva (Choren et al., 2013), plantea un cambio de procedimiento en la fabricación de prototipos y piezas finales en materiales porosos, ya que, esta técnica de adición de material permite fabricar formas y estructuras de gran complejidad, lo más ajustada al modelo computacional, con una porosidad predecible y definida en términos de la morfología; tamaño, forma, orientación y disposición de poros.

En este trabajo se busca relacionar, la porosidad, morfología de la distribución, relación de tamaños de poros, espesor de pared promedio con el módulo de elasticidad aparente, mediante un análisis de regresión lineal múltiple simple, a través de una contrastación numérico-experimental de materiales porosos, generadas inicialmente en CAD, por medio de un acople numérico computacional DEM-FEM, y que a posteriori se fabrican con la técnica de la manufactura aditiva.

De esta manera, la presente tesis busca analizar los datos obtenidos por las simulaciones numéricas de compresión, desarrolladas en el software comercial de elementos finitos ANSYS, correlacionadas estadísticamente con los resultados de los ensayos experimentales en las probetas impresas, realizados en la máquina electromecánica universal de doble columna serie 300 Test-Resources, con una precisión de carga de 0.0001[N].

A medida que se avance en este documento se presentan antecedentes generales, tales como contexto científico, estudios de la literatura, aproximaciones actuales, necesarios para la comprensión general de la necesidad de esta investigación, junto a las diversas formulaciones matemáticas, referentes al problema físico, metodología de trabajo para la obtención de resultados, junto con los respectivos análisis de resultados, conclusiones y líneas de investigación futuras.

1.1. Hipótesis

Aspectos morfológicos como la porosidad, distribución no estructurada de poros, y relación de tamaño de los mismos, influyen en las propiedades elásticas aparentes de los materiales porosos. Además la implementación y caracterización de estos aspectos en modelos computacionales, a través de técnicas numéricas, permiten crear una estructura interna representativa ajustada lo más proxima a la de un material poroso real, propiciando un estudio controlado de alta sensibilidad sobre el módulo de elasticidad aparente del material en estudio.

Estos materiales diseñados computacionalmente pueden hacerse reales mediante la manufactura aditiva, con una morfología y topología cercana, totalmente conocida y ajustada a la computacional, permitiendo así, una contrastación numérica-experimental fidedigna y precisa, sin el ruido de parámetros geométricos desconocidos, como ocurre con métodos convencionales de fabricación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar el comportamiento mecánico de las espumas de ácido poliláctico, a través de la comparación y contrastación de los resultados experimentales, y los obtenidos por simulaciones numéricas, en modelos con topologías y morfologías controladas, mediante la caracterización de ciertos factores estereológicos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar diferentes tipos de sólidos porosos y sus métodos de obtención.
- Generar modelos de sólidos porosos computacionales, mediante las técnicas numéricas de elementos discretos y elementos finitos.
- Fabricar los modelos de sólidos porosos, mediante manufactura aditiva.
- Medir porosidad de los modelos porosos experimentales, mediante el principio de arquímedes.
- Caracterizar una muestra densa de ácido poliláctico, para realizar simulaciones numéricas de compresión.
- Realizar ensayos de compresión a las muestras del material fabricado, de acuerdo la norma ASTM D695-15 para plásticos rígidos.

- Contrastar y calibrar el modelo numérico con ensayos mecánicos realizados a las muestras impresas por manufactura aditiva.
- Cuantificar la significancia estadísticas de los parámetros morfológicos en estudio, y sus interacciones, sobre las propiedades elásticas aparentes, de los sólidos porosos fabricados con manufactura aditiva.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Antecedentes Generales

Los materiales porosos han sido altamente estudiados en los últimos años, dado que disponen de una combinación singular de propiedades, proporcionada por una superposición geométrica entre sus cantidades o constituyentes, inherente a la fase sólida. Lo cual, ha desencadenado una amplia cantidad de aplicaciones en ingeniería, destacando sus propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, acústicas y químicas.

Una de las propiedades de mayor interés y utilidad en la investigación y aplicación de los materiales porosos, es el módulo de elasticidad aparente, el cual es un parámetro relevante en las aplicaciones constructivas, como también en implantes óseos en el área de la biomecánica.

En relación al estudio de esta propiedad mecánica, Herakovic y Baxter (Herakovich & Baxter, 1999), establecen que existen dos enfoques que indagan la conexión entre módulo elástico aparente y la porosidad volumétrica. El primer enfoque nace de la comunidad de mecánica, y se centra en desarrollar soluciones analíticas, en función de la fracción del volumen suponiendo una forma específica de poro, que puede ser esférica, cúbica, cilíndrica, entre otras. Generalmente en este tipo de estudios, se emplean ecuaciones teóricas según un volumen representativo, cuyas relaciones matemáticas, se extienden al dominio total del sólido poroso. Por otra parte, el segundo enfoque surge de la comunidad de materiales, y se centra en el estudio de los materiales porosos, mediante la obtención de las propiedades mecánicas a través de ensayos experimentales en función de la porosidad volumétrica, y de esta manera, determinar una curva de mejor ajuste, que relacione las cantidades de interés con la geometría de los poros o el método de fabricación.

En tanto, Choren (Choren et al., 2013) hace una clasificación en cuanto a la investigación de las propiedades elásticas de los materiales porosos. Donde clasifica la relación de las cantidades físicas de interés en función de su forma matemática; relación lineal, relación de potencia, ecuaciones exponenciales, y por último relación propiedad-porosidad.

Cuadro 2.1: Módulos elásticos aparentes normalizados de materiales porosos (Choren et al., 2013)

Forma general de ecuación	Inverstigadores	Año	%P
Ecuacion Lineal			
$E_p/E_0 = 1 - aP$	Dewey	1947	
	Gatto	1950	
	Fryxell and Chandler	1964	2-17
	Hasselman and Fulrath	1964	<2.5
	Rossi	1968	≤ 10
Ecuaciones de Potencia			
$E_p/E_0 = (1 - jP)^i$	Bal'Shin	1949	
	McAdam	1951	0-40
	Phani et al.	1986-1988	5-40
	Wagh et al.	1993	0-60
	Maitra and Phani	1994	0-65
$E_p/E_0 = 1 - uP^{2/3}$	Eudier	1962	0-50
	Ishai and Cohen	1967	0-30
	Martin and Haynes	1971	0-50
	Herakovic and Baxter	1999	0-50
$E_p/E_0 = \left[1 - \left(\frac{P}{Q}\right)\right]^{KQ}$	Bert	1985	0-20
$E_p/E_0 = \left(1 - P^{2/3}\right)^{1,21S}$	Boccaccini	1997	0-40
$E_p/E_0 = \left(1 - P^{2/3}\right) / \left(1 - P^{2/3} + P\right)$	Paul	1960	-
$E_p/E_0 = (1 - dP + gP^2)$	Mackenzie	1950	-
	Spinner et al.	1963	0-40
$E_p/E_0 = [1 - (P/t)]^S$	Robert and Gabroczi	2000	0-50
Equaciones Exponenciales			
$E_p/E_0 = \exp(-mP)$	Duckworth/Ryshkewitch	1953	0-50
	Knudsen	1959	5-31
	Spriggs	1961	0-37
	Knudsen	1962	0-40
	Rice	1977	0-40
$E_p/E_0 = 1 - \exp(-r1 - P)$	Rice	1976	>50
$E_p/E_0 = \exp[-(nP + qP^2)]$	Wang, J.C.	1984	0-32
	Panakkal et al.	1990	0-22

Donde, P es porosidad, E_o módulo elástico de una muestra densa, E_p módulo elástico aparente del sólido poroso.

Es importante mencionar, que la capacidad predictiva en cada una de estas relaciones ilustradas en la tabla 2.1 es reducida en cuanto a la estimación del módulo de elasticidad aparente en los materiales porosos, es decir, la estimación de las relaciones propiedad-microestructura desarrolladas tanto por la comunidad de materiales, como la comunidad de mecánica, asociadas a distintos parámetros materiales o datos experimentales de estudio respectivamente, tienen como resultado una capacidad predictiva limitada, donde su espectro de aplicabilidad solo comprenden un rango reducido de porosidad, y sobrepredicen la propiedad elásticas aparente en estudio. Esto se vislumbra, en los inicios de la comunidad de mecánica, donde las primeras ecuaciones teóricas, se desarrollaron en función de la disolución límite, que asume la reducción del parámetro de fracción de volumen, y con ello, linealiza la estimación de no interacción (Sevostianov & Kachanov, 2012), así se evalúa el efecto de un solo poro lo suficientemente pequeño para que no afecte a los demás poros de la matriz, sobre el módulo elástico aparente del sólido poroso. Sin embargo, la interacción y la interconectividad de los poros en los sólidos porosos reales, hacen que esta linealización, conlleve a una aplicabilidad reducida a aquellos sólidos porosos con bajas porosidades.

Si bien, aunque las consideraciones teóricas de cada comunidad fueron evolucionando, el problema propiedad-microestructura siguió siendo un desafío en el estudio de los materiales porosos hasta hoy en día, dado que la efectividad de la estimación de las propiedades elásticas, se logra cuando las formulaciones empíricas poseen una conexión directa con la microestructura. De esta forma casi todos los modelos y simulaciones que no consideran la microestructura predicen en exceso la resistencia de los sólidos porosos para poros conectados o interconectados (Cadena, Alfonso, Ramírez, Rodríguez-Iglesias et al., 2014; Kari et al., 2008; Kirca et al., 2007; Zhu et al., 1997), mientras que el modelado micromecánico puede predecir las propiedades macroscópicas de materiales heterogéneos en particular el módulo elástico aparente en función de las propiedades de los materiales constituyentes de forma adecuada y precisa (Kirca et al., 2007).

En este sentido, la importancia de aquellos aspectos microestructurales han generado diversas investigaciones acerca de las características morfológicas y topológicas de los sólidos porosos, tales como porosidad, espesor de pared, tamaño de poro, forma de poro, interconexión de poros, distribución de los poros, relación en el tamaño de poros, entre otros, con el fin de mejorar la conexión entre los modelos empíricos y la microestructura, junto con establecer el nivel de significancia de cada uno de estos parámetros en las propiedades mecánica.

Estas investigaciones han revelado que cada uno de los parámetros morfológicos y topológicos se caracterizan por ser desordenados, no uniformes y aperiódicos, es decir, son aspectos de gran incertidumbre, anormalidad e intangibilidad, que no se pueden cuantificar fácilmente, dado que dependen de la técnica de fabricación empleada, por lo que la descripción precisa de la estruc-

tura porosa es sumamente compleja, donde la geometría euclidiana y los métodos experimentales tradicionales no están disponibles actualmente para modelar sólidos porosos similares a los experimentales (H. P. Tang et al., 2012; H. Tang et al., 2010). Lo cual ha suscitado la implementación de diversas técnicas estereológicas junto con el uso de tecnologías, a fin de conocer y replicar la microestructura, para desarrollar modelos con una proximidad topológica similar a la real, y de esta manera predecir las propiedades mecánicas y optimizar el diseño de los sólidos porosos.

Al respecto, la microtomografía computarizada (Brydon et al., 2005; Jeon et al., 2010; Jiroušek et al., 2013; Youssef et al., 2005), ha evidenciado que generalmente los sólidos porosos exhiben un carácter fractal en los poros, es decir, existe un patrón subyacente de poros o una autosimilitud entre los macros y micro poros que implica diferentes relaciones de tamaño entre poros, que influyen de manera significativa en el porcentaje porosidad del sólido poroso (Kuls'kov et al., 2006; H. P. Tang et al., 2012), así pues, la teoría fractal se destaca como una técnica numérica necesaria para cuantificar esta autosemejanza o quasisimilitud entre los macro y micro poros (Kuls'kov et al., 2006; B. Q. Zhang et al., 2000; B. Zhang & Liu, 2000). Además, se ha evidenciado que la distribución de los poros no es estructurada, y depende de la metodología empleada en la técnica de fabricación, siendo esta de gran significancia en la interconectividad entre poros y por ende, en el porcentaje de porosidad (Pérez, Lascano, Aguilar, Domancic & Alfonso, 2015; Pérez, Lascano, Aguilar, Estay et al., 2015), que es el aspecto morfológico de mayor influencia en el módulo elástico aparente.

De esta forma, la capacidad de conocer la microestructura en los sólidos porosos, ha llevado a estudiar la relación microestructura-método de fabricación, para predecir las propiedades mecánicas, con miras a la optimización del diseño en los materiales porosos. Ello, ha empujado a utilizar técnicas numéricas para replicar características estructurales de los sólidos porosos, como lo es el método de los elementos finitos, dado que permite observar el comportamiento mecánico de modelos computacionales con dominio geométrico complejo, y, por ende, analizar materiales porosos con características topológicas similares a los materiales porosos experimentales (Cadena, Alfonso, Ramírez, Rodríguez-Iglesias et al., 2014; Gan et al., 2005; Li et al., 2005, 2006; Pérez, Lascano, Aguilar, Domancic & Alfonso, 2015; Pérez, Lascano, Aguilar, Estay et al., 2015; Perez Trigo, 2019; Ribeiro-Ayeh, 2005). Sin embargo, replicar las características estructurales de los modelos computacionales con los modelos experimentales, es decir, generar características topológicas similares a los sólidos porosos experimentales, y así reducir la incertidumbre geométrica entre la respuesta experimental es un desafío complejo y de alto costo.

No obstante, los avances recientes en la manufactura aditiva proveen la capacidad de desarrollar modelos geométricos con una proximidad microestructural robusta, porosidad predecible y definida en términos de tamaño, forma, orientación y disposición de poros (Choren et al., 2013) y de esta manera, fabricar formas y estructuras de gran complejidad, lo más ajustada al modelo computacio-

nal, así, contrastar con mayor precisión, la significancia de aspectos morfológicos como relación de tamaño de poros, distribución no estructurada de poros, porosidad, entre otros, en el módulo elástico aparente sin aquella incertidumbre causada por el desconocimiento de la microestructura del sólido poroso experimental en estudio.

2.2. PLA

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero termoplástico de base biológica, biocompostable, y biocompatible derivado del ácido láctico (Rodríguez-Panes et al., 2018), que se utiliza generalmente en tecnologías de MA, debido a su versatilidad, facilidad de procesamiento y amplia gama de propiedades que pueden ajustarse a través de su composición (Chong et al., 2022; González-Henríquez, Sarabia-Vallejos & Rodriguez-Hernandez, 2019), permitiendo una alta resistencia y buena rigidez (Sennan & Pumchusak, 2014). De esta forma, el PLA provee una imprimibilidad excepcional ya que tiene una rápida velocidad de cristalización, especialmente mediante la metodología de fabricación de filamentos fundidos, o también conocida bajo el nombre comercial modelado de deposición fundida (FDM) (Chong et al., 2022).

2.2.1. Producción, características y propiedades

El PLA es un derivado de recursos renovables, y generalmente se sintetiza a partir de almidón de maíz, chips o almidones, caña de azúcar, entre otros, destacándose por ser parte de aquellos plásticos que no son procedentes del petróleo (Rudin & Choi, 2012; Tümer & Erbil, 2021). El ciclo biológico completo del ácido poliláctico, desde la obtención de fuentes biológicas hasta su impresión por medio de la manufactura aditiva, se muestra en la figura 2.1 (Tümer & Erbil, 2021), donde se aprecia que es un polímero reciclable y biodegradable, y puede procesarse térmicamente fácilmente.

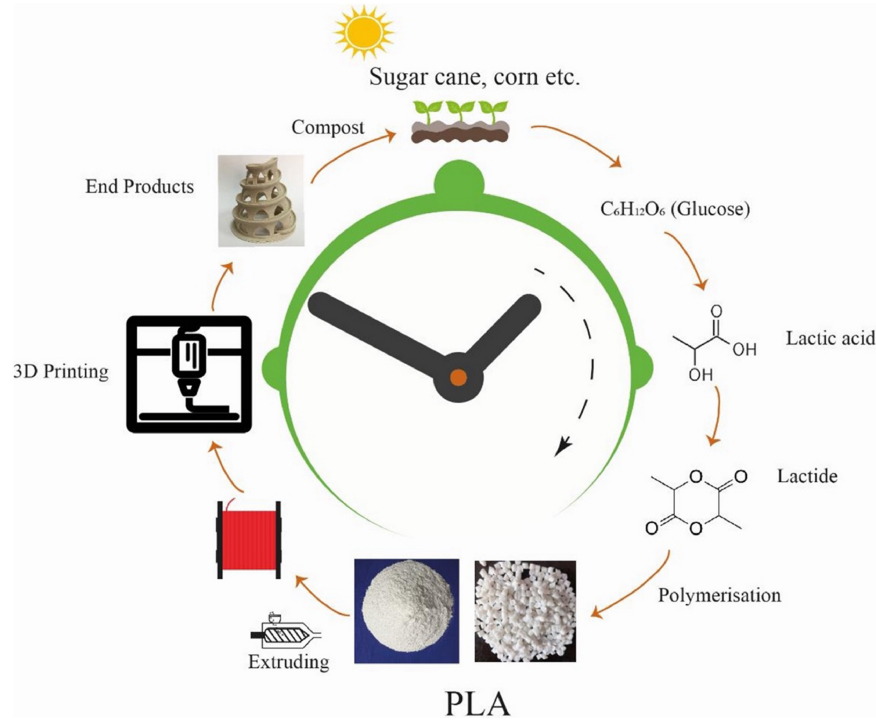


Figura 2.1: Ciclo del ácido poliláctico

Entre todos los bioplásticos, el PLA despunta como uno de los materiales más promisorios debido a su biodegradabilidad, alta transparencia y buenas propiedades mecánicas, por lo que ha sido altamente utilizado en la industria del transporte, electrónica, materiales de construcción, impresión 3D, etc. En cuanto a sus propiedades mecánicas, se destaca por su alto módulo de Young, módulo de tracción, resistencia al impacto, y elongación a la rotura en comparación con polímeros tradicionales como polipropileno, poliestireno y polietileno (Guo et al., 2023; Hamad et al., 2015; Tümer & Erbil, 2021; Xue et al., 2021, 2023).

Sin embargo, al ser altamente inflamable su aplicación es restringida en aquellas áreas, donde se requieren materiales retardantes de fuego (Kovacevic et al., 2021).

En este estudio, se utiliza el filamento SAKATA 3D PLA 850 diseñado en España por la empresa POLIMERSIA GLOBAL S.L, para su empleo en impresoras 3D que se basan en FDM. Este filamento en particular, presenta una buena adhesión a la cama, alta precisión de los detalles, bajo "warping" y "curling", baja emisión de olores, además de una alta resistencia a la temperatura. Según la ficha técnica y estudios previos, el filamento SAKATA 3D PLA 850, posee las siguientes propiedades mostradas en las tablas 2.2 y 2.3.

Cuadro 2.2: Propiedades geométricas

Especificaciones del Filamento	Unidad	Valor
Diámetro	mm	$1,75 \pm 0,05 / 2,85 \pm 0,05$
Desviación de redondez máxima	mm	0.05

Cuadro 2.3: Propiedades Físicas, mecánicas y térmicas del filamento de PLA

Propiedades Físicas	Norma	Unidad	Valor
Densidad	ASTM D792	$\frac{g}{cm^3}$	1,24
Propiedades Mecánicas	Norma	Unidad	Valor
Elóngación a la rotura	ASTM D882	%	3.31
Módulo de tracción	ASTM D638	MPa	2.315
Módulo de Young a compresión	-	MPa	265
Resistencia al impacto Izod con entalla	ASTM D256	$\frac{J}{m}$	118
Propiedades Térmicas	Norma	Unidad	Valor
Temperatura de flexión bajo carga	ASTM E2092	°C	80-90

2.3. Materiales porosos

Los materiales porosos se caracterizar por contener pequeños compartimentos de espacios abiertos o cerrados, denominados poros, que contemplan una amplia gamma de formas geométricas, dependientes de la técnica y proceso de fabricación empleado para su obtención (Gibson, 2000; Gibson & Ashby, 1997, 1999).

Estos compartimentos, influyen en la densidad relativa ($\bar{\rho}$), siendo uno de los aspectos de mayor importancia en los sólidos celulares,

$$\bar{\rho} = \frac{\rho^*}{\rho_s}, \quad (2.1)$$

donde ρ^* es la densidad del material celular y ρ_s la del material que se encuentra constituido. Este aspecto permite la clasificación entre sólidos porosos y sólidos celulares 2.2:

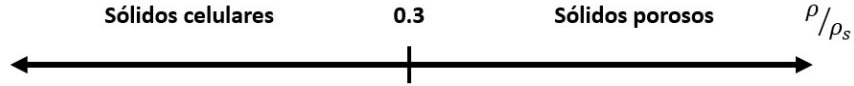


Figura 2.2: Criterio de clasificación entre sólido celular y sólido poroso

La diferencia estructural de los sólidos celulares con los sólidos porosos, se aprecia en que estos últimos poseen poros aislados, lo que implica una mayor densidad relativa y por ende una menor porosidad (P).

$$P = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}. \quad (2.2)$$

Los materiales celulares al igual que las espumas porosas, se conforman mediante dos fases, y cada una de estas fases, solo pueden estar en uno de los tres estados de la materia (Banhart et al., 1999), como se presenta en la 2.3. De esta manera, la unión de ambas fases se realiza mediante un proceso de dispersión, es decir, partículas de un material distribuidas de forma estructurada o no estructurada, se aglomeran en una fase continua.

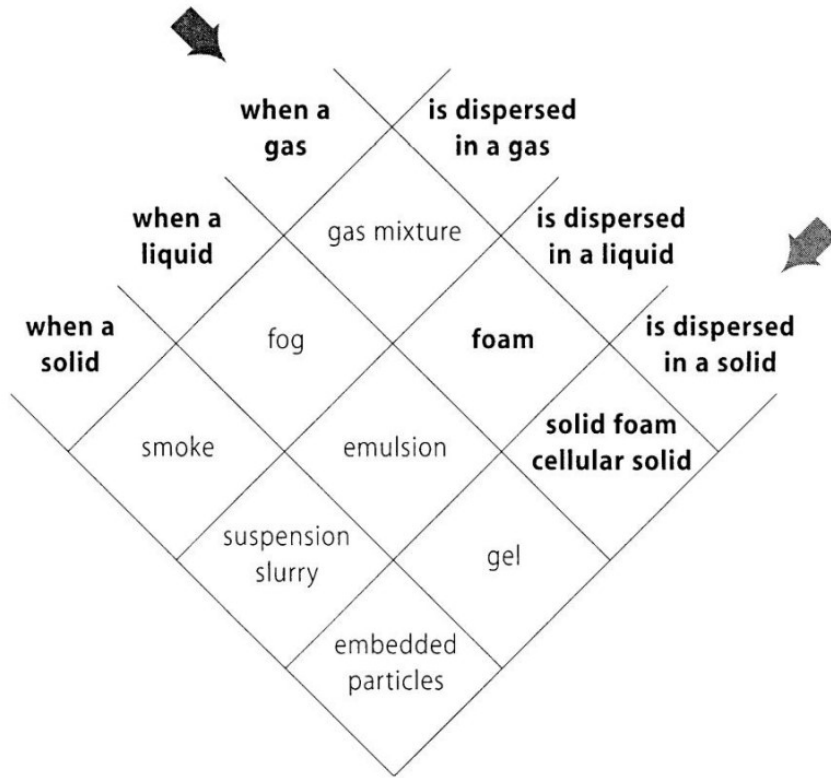


Figura 2.3: Dispersiones de una fase en una segunda.

2.3.1. Estructura

La microestructura de los sólidos celulares y materiales porosos, presentan aspectos topológicos importantes como celdas bidimensionales o celdas tridimensionales con diferentes detalles en la conectividad de los bordes y sus caras, lo que permite su clasificación en función de dichos aspectos. De esta manera, en el caso de las celdas bidimensionales, las paredes tienen un generador común, semejante a un panal de miel, en cambio para celdas tridimensionales sus paredes poseen una distribución no regular de poros (Gibson & Ashby, 1997).

Por otra parte, los sólidos porosos, pueden clasificarse como estructuras de poros abiertos o estructuras de poros cerrados. En la estructura de celda abierta el material sólido se encuentra contenido solo en los puntales que forman los bordes de las celdas, donde se encuentran unidos por medio de los vértices. En la mayoría de los casos son cuatro puntales que se conectan en cada vértice.

En cambio, la estructura de celda cerrada o poros cerrados, el material sólido está contenido tanto en los bordes como en las caras de los poros, es decir, las membranas sólidas cierran las caras de las celdas. Además, debido a la morfología y topología de los sólidos celulares o materiales porosos, generalmente el sólido no se distribuye uniformemente, por tanto, el espesor de pared es variable. En las figuras 2.4 se observan sólidos celulares. La subfigura 2.4a se muestran sólidos celulares de

mallla tridimensional con celdas cerradas, la subfigura 2.4b muestra celdas mixtas y la subfigura 2.4c presenta celdas abiertas.

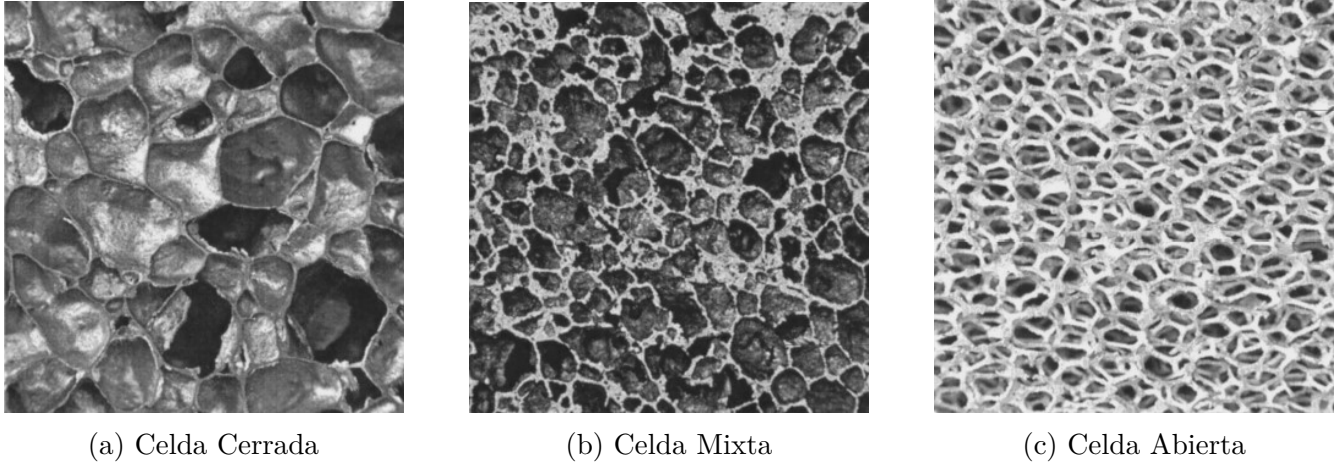


Figura 2.4: Micrografía de espumas metálica, con celda abierta, mixta y abierta.

Las leyes topológicas gobiernan la conectividad de los bordes y las caras de los sólidos porosos, e imponen restricciones en la dispersión de los tamaños de las celdas, que ayudan a comprender los aspectos morfológicos más complejos (Gibson & Ashby, 1997; Irausquin Castro, 2012).

Todos los aspectos morfológicos de los materiales celulares, tales como la distribución aleatoria de poros, forma, tamaño, interconexión de poros, junto con los aspectos topológico, que se caracterizan por ser aperiódicos, no uniformes y desordenados, dependen del método o procesos de fabricación utilizados (Pérez, Lascano, Aguilar, Estay et al., 2015).

Es decir, en el caso de las espumas, las inclusiones de un solo gas están separadas entre sí por porciones de líquidos o sólidos, donde las celdas están completamente encerradas por el líquido o sólido y no están interconectadas entre ellas.

Particularmente, si las celdas se encuentran encerradas por un sólido, entonces se denominan espumas sólidas, y sus características morfológicas depende de la minimización de la energía superficial, dado que la fase líquida se solidifica, formando las celdas cerradas. La tasa de crecimiento del volumen de la celda es:

$$\frac{dV}{dt} = C_2 (f - \bar{f}), \quad (2.3)$$

donde V es el volumen de la celda, f es el número de cara en la celda, $\bar{f}$ es el número promedio de caras por celda y C_2 es una constante del material. La tasa de crecimiento provee una tendencia a una estructura cada vez más heterogénea, que en tiempo prolongados produce una dispersión muy amplia.

En el caso de los sólidos celulares con celda abierta o cerrada, el método de fabricación no es únicamente por solidificación de una de las fases, por lo tanto, pueden tener casi cualquier morfología,

como la típica estructura abierta de polvos sinterizados (Banhart et al., 1999).

Así, otra relación entre el método de fabricación y morfología con topología, se ve en el proceso de fabricación mediante pulvimetalurgia, donde se obtienen celdas cerradas con poros interconectados, donde dependiendo del tamaño y morfología del space holder phase(SHP), las redes de poros cambia (Pérez, Lascano, Aguilar, Domancic & Alfonso, 2015).

2.3.2. Porosidad

Los sólidos celulares se destacan por ser estructuras livianas, ya que están constituidos por una fase sólida y vacíos indistintamente de su microestructura, razón por la cual, la relación entre la densidad aparente ($\rho_{aparente}$) y la densidad real (ρ_{real}), es un aspecto importante en el estudio de estos materiales. La densidad aparente es el cociente entre la masa del material y el volumen aparente del mismo, que es el volumen total de la estructura incluyendo los poros. Por otro lado, la densidad real es el cociente entre la masa del producto y su volumen real, excluyendo los huecos o cavidades en los poros.

$$\rho_{aparente} = \frac{m}{V_{aparente}} ; \rho_{real} = \frac{m}{V_{real}}. \quad (2.4)$$

Con ambas densidades, se puede calcular la porosidad P , la cual proporciona un porcentaje de volumen en estado gaseoso de la estructura del sólido celular.

$$P = \frac{\rho_{real} - \rho_{aparente}}{\rho_{real}}. \quad (2.5)$$

2.3.3. Tamaños de poros

El tamaño de los poros depende del tipo de sólido celular, junto con la técnica de fabricación empleada para su obtención. Esto se aprecia en las espumas metálicas, fabricadas mediante el proceso de infiltración, donde el tamaño de los poros se encuentran en el rango de 2 a 20 milímetros (Andrews et al., 1999; Gibson, 2000; Simone & Gibson, 1998). En cambio, para espumas metálicas elaboradas mediante la técnica de pulvimetalurgia, el tamaño y forma de los poros depende directamente de la fase soporte espacio extraíble empleada (Pérez, Lascano, Aguilar, Domancic & Alfonso, 2015).

Además, algunos estudios han establecido que los materiales porosos pueden tener diferentes tamaños de poros, dado que existe una distribución de autosemejanza estadísticas a diferentes escalas, es decir, autosemejanza entre la porosidad y microporosidad (Best, 2011; H. P. Tang et al., 2012), como se presenta en la figura 2.5.

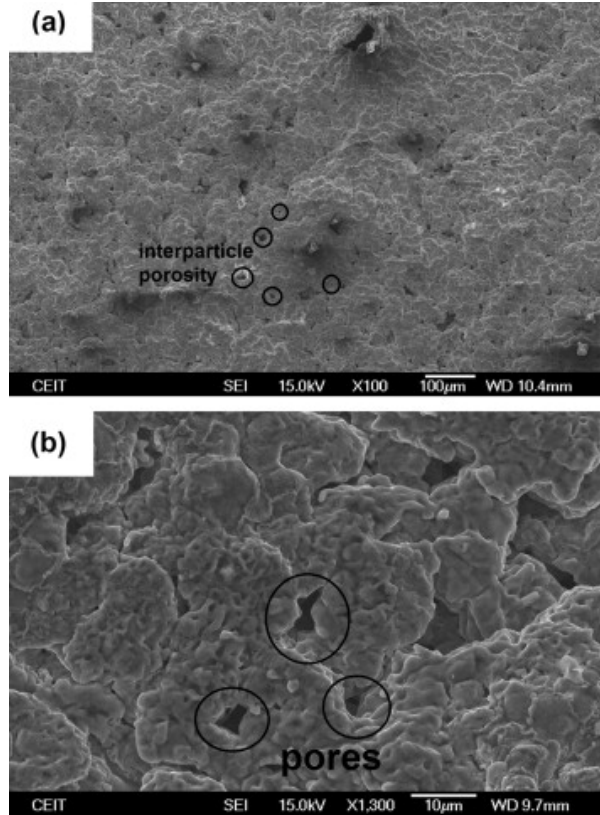


Figura 2.5: Escaner interpartícula de porosidad y microporosidad (Pérez, Lascano, Aguilar, Domancic & Alfonso, 2015).

En otras palabras, el tamaño de los poros no siempre es uniforme, como es el caso de las teselaciones de Voroni (Gibson & Ashby, 1999) o de celdas bidimensionales.

2.3.4. Espesor de Pared

El espesor de pared se define como la distancia entre un poro y todos sus vecinos, siempre y cuando estos se encuentren separados por un material en estado sólido. Este espesor es difícil de medir con precisión debido a su pequeño tamaño, y falta de uniformidad, que muchas veces se asemeja a una distribución de tipo estadística, como se ilustra en la figura 2.6.

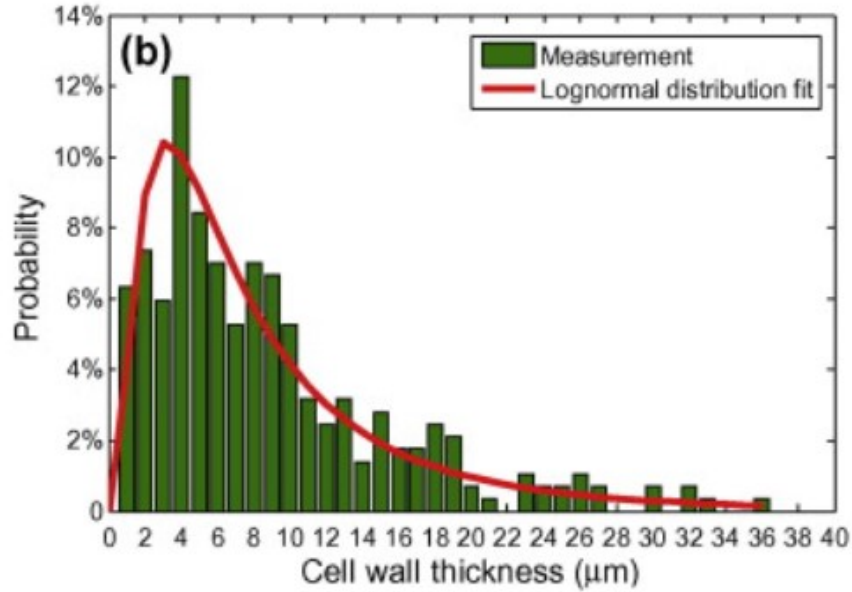


Figura 2.6: Distribución estadística del espesor de pared en una espuma (Y. Chen et al., 2015).

El espesor de pared, juega un papel importante en la rigidez de los materiales porosos. Investigaciones, han establecido que a medida que aumenta dispersión de este parámetro, disminuye sustancialmente tanto el módulo de Young, como el módulo de corte (Li et al., 2005, 2006). En tal sentido, el módulo de corte puede reducirse hasta un 19%, cuando se presenta una relación de 1:19, entre la pared más delgada con la de mayor espesor (Grenstedt & Bassinet, 2000). Sin embargo, en materiales porosos con baja dispersión, a medida que aumenta el espesor de pared, se obtiene una mayor rigidez y resistencia mecánica (Y. Chen et al., 2015; Gibson & Ashby, 1999).

2.3.5. Interconexión

La interconexión de los poros, es una de las características morfológicas, que aumenta con el porcentaje de porosidad. Además, se destaca por ser un parámetro morfológico que impide la predicción con exactitud de los modelos empíricos, ya que se encuentra en longitudes de escala pequeñas. La figura 2.7, ilustra la interconexión de poros, obtenidas la técnica de microtomografía computarizada.

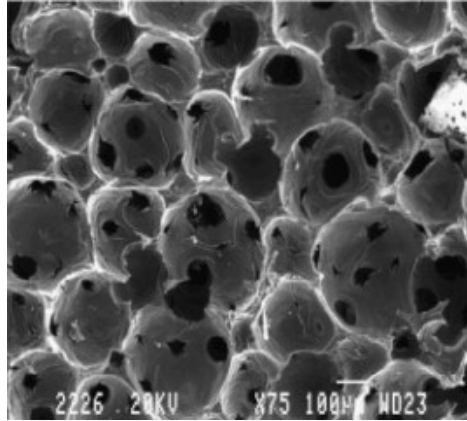


Figura 2.7: Poros interconectados

2.3.6. Comportamiento Mecánico de los sólidos porosos

Dada la complejidad de la descripción precisa de la microestructura en los materiales porosos, que generalmente posee anomalías, incertidumbre, intangibilidad, etc, la predicción o modelación del comportamiento mecánico es un desafío. Sin embargo, se sabe con certeza que bajo un estado de compresión, presentan tres comportamientos constitutivos o regímenes distintos.

Como se muestra en la figura 2.8, los sólidos celulares pueden soportar grandes deformaciones, lo que le permite absorber energía cinética. Además, los regímenes son los siguientes (Y. Chen et al., 2015; Gibson & Ashby, 1997):

- i) Región elástica lineal, asociada a pandeo de las paredes, bajo tensiones inferiores al límite elástico.
- ii) Tensión más o menos constantes, similar a la plasticidad perfecta, la cual corresponde al colapso por pandeo, fluencia o fractura.
- iii) Régimen de fuerte aumento final en la tensión con mayor deformación, correspondiente a la densificación del material.

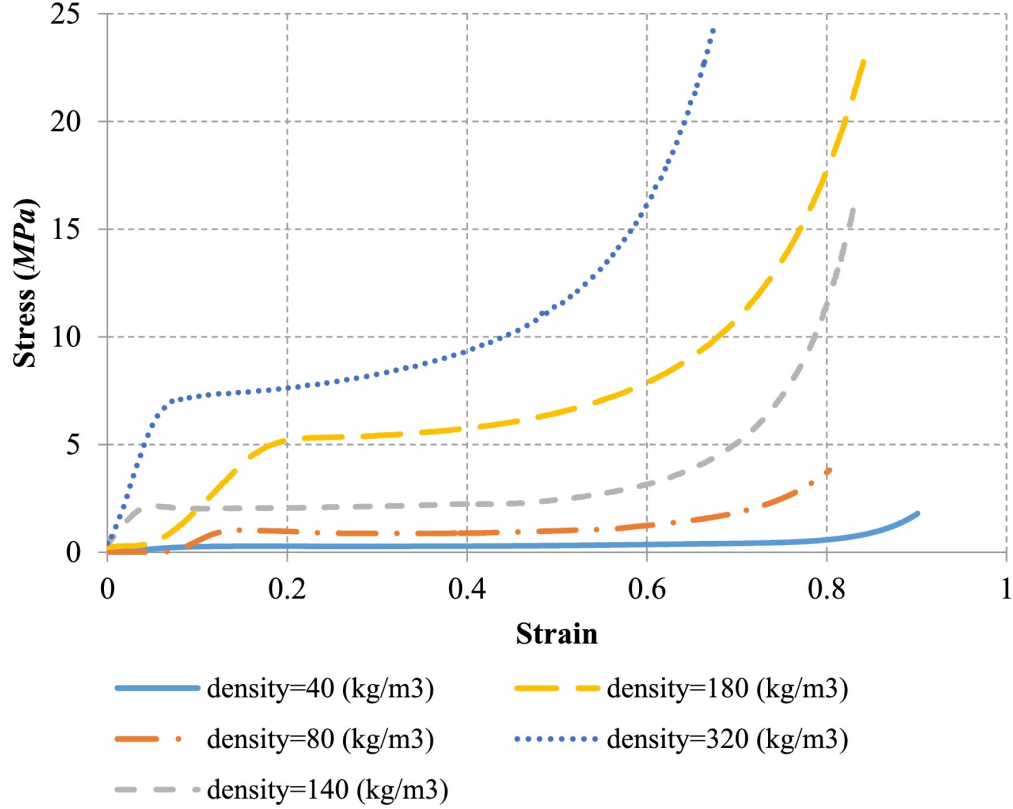


Figura 2.8: Curva esquemática de tensión-deformación para una espuma que muestra regímenes elástico lineal, plasticidad y densificación (Y. Chen et al., 2015; Gibson & Ashby, 1997; Taherkhani et al., 2016).

2.4. Procesos de fabricación

Con la finalidad de explicar correctamente las técnicas de fabricación, es imperante explicar una salvedad entre los materiales celulares y las espumas porosas, dado que no siempre se usan correctamente estos conceptos, y se tienden a confundir.

Como se mencionó anteriormente los materiales celulares al igual que las espumas porosas, se conforman mediante dos fases, y cada una de estas fases, solo pueden estar en uno de los tres estados de la materia (Banhart et al., 1999). De esta manera, la unión de ambas fases se realiza mediante un proceso de dispersión, donde las partículas de un material distribuidas de forma estructurada o no estructurada, se aglomeran en una fase continua.

En el caso de las espumas, las inclusiones de un solo gas están separadas entre sí por porciones de líquidos o sólidos, donde las celdas están completamente encerradas por el líquido o sólido y no están interconectadas entre ellas. Particularmente, si las celdas se encuentran encerradas por un sólido, entonces se denominan espumas sólidas, y sus características morfológicas depende de la minimización de la energía superficial, dado que la fase líquida se solidifica, formando las celdas

cerradas. En cambio, los sólidos celulares o celdas abiertas no están fabricados únicamente por la solidificación de una de las fases, y por lo tanto, pueden tener casi cualquier morfología, como la típica estructura abierta de polvos sinterizados. En este apartado se pone énfasis en las técnicas de producción de las espumas sólidas, como de los sólidos celulares.

Hay muchas formas de fabricar sólidos celulares, y generalmente se clasifican según el estado que proceda el metal (Banhart, 2001), como metal líquido, metal sólido en forma de polvo, de vapor de metal o compuestos metálicos gaseosos, solución de iones metálicos y manufactura aditiva.

2.4.1. Procesamiento en estado líquido de metales celulares

En esta técnica de fabricación se obtiene el material poroso a partir del metal fundido, el cual se puede tratar de diferentes maneras; usando un método indirecto mediante una espuma de polímeros, espumando directamente el metal líquido, vertiendo el metal líquido sobre un molde que contiene materiales rellenos que reservan espacio, para los que después del procesamiento adicional se convierten en el espacio poroso, o usando polvos metálicos con agentes de expansión liberadores de gas, que posterior al proceso de fundición forman el sólido celular.

El proceso de espumar el metal líquido consiste en crear burbujas de gas en el líquido, mediante la inyección de gas desde una fuente externa, o mezclando el metal líquido con algún agente externo que produce la liberación de gas. El problema de esta técnica radica en que las burbujas tienden a ascender rápidamente a la superficie debido a la fuerza de flotación del líquido de alta densidad. Para solucionar tal problema, se aumenta la viscosidad del metal líquido, por medio de la incorporación de polvos cerámicos finos o elementos de aleación que formen partículas estabilizadoras en la masa fundida.

En la figura 2.9 se aprecia de forma esquemática la ruta para obtener la espuma de metal. Donde, se introducen al metal líquido partículas de carburo de silicio, óxido de aluminio u óxido de magnesio para mejorar la viscosidad de la masa fundida. El proceso de inyección de gas se lleva a cabo por el uso de impulsores giratorios o boquillas vibratorias.

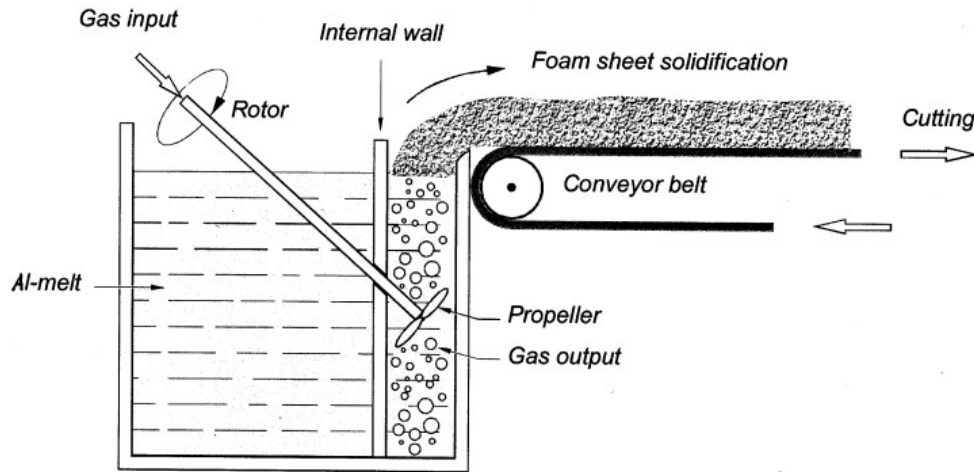


Figura 2.9: Fabricación de espumas, con metal en estado líquido.

Por otra parte, también existe otra ruta para el procesamiento del sólido celular que generalmente es fundido de aluminio, que consisten en agregar un agente de soplado en lugar de inyectarle gas (Bjorksten & Rock, 1971; Davies & Zhen, 1983; Elliot, 1961). La figura 2.10, presenta el proceso de fabricación mediante esta técnica (Schwartz et al., 1998).

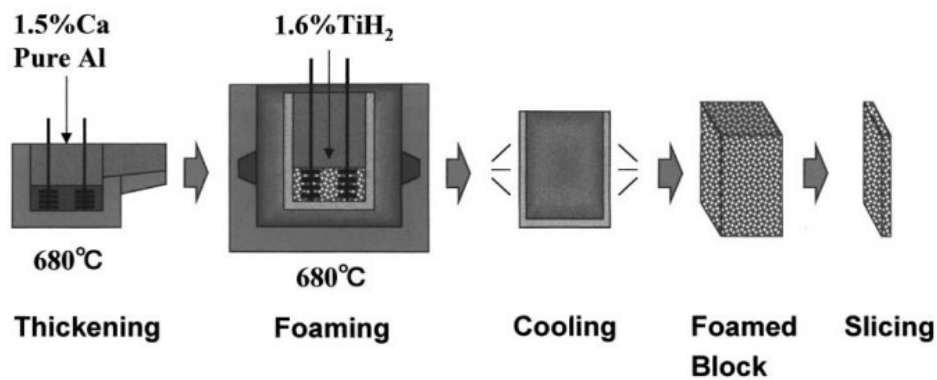


Figura 2.10: Espumado directo de masas fundidas, con agente espumante

Inicialmente a un fundido de aluminio que se encuentra a una temperatura de 680°C , se le introduce 1.5 % de calcio, posterior a ello se agita la mezcla durante varios minutos, con el fin de facilitar la formación de óxido de calcio (CaO), óxido de calcio y aluminio (CaAl_2O_4), de esta forma la viscosidad aumenta, una vez con este proceso terminado, se agrega 1.6 % de hidruro de titanio (TiH_2).

El procesamiento de los materiales celulares a partir del fundido de aluminio, provee espumas homogéneas de muy buena calidad (Otsuka et al., 1991). En la figura 2.11, se presenta la morfología de las espumas obtenidas mediante dicha técnica.

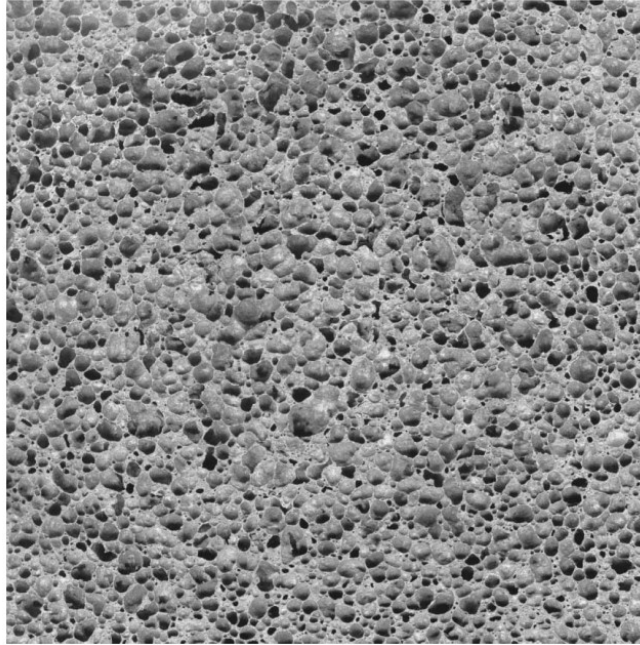


Figura 2.11: Estructura porosa de aluminio espumado mediante la adición de TiH_2 .

2.4.2. Procesamiento en estado sólido en forma de polvo

Esta técnica utiliza metal en estado sólido, para la obtención de las estructuras metálicas celulares, cuya morfología obtenida, es abierta de partículas aisladas, más menos esféricas, que se conectan por cuellos de sinterización, como se presenta en la figura 2.12 (Banhart, 2001).

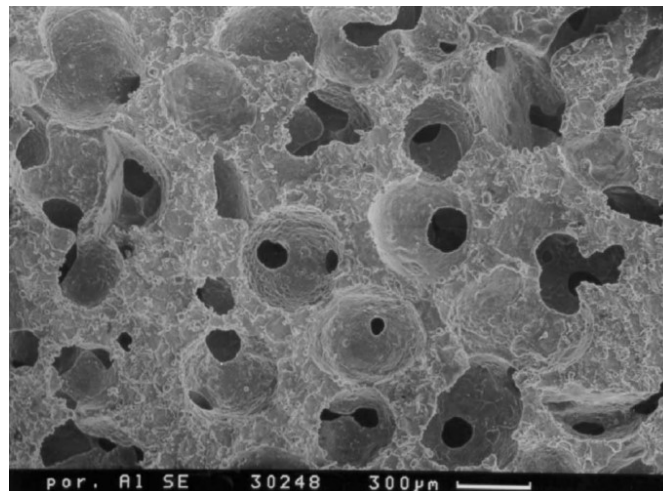


Figura 2.12: Material de aluminio celular fabricado mediante el uso de rellenos que mantienen espacios o espaciadores. Densidad $\rho = 1,1 \text{ [g/cm}^3\text{]}$.

La razón de estas características morfológicas, radica en que el polvo metálico se mantiene en

estado sólido en todo el procedimiento, y por ello, no existe la presencia de la tensión superficial, como ocurre en el procesamiento en estado líquido que obtiene espumas de celda cerrada.

Una de las técnicas más utilizadas en este tipo de procesamiento, es la que emplea fases de soporte espacio extraíbles o espaciadores, que consiste en cargar el polvo metálico con una masa de relleno, que puede ser un solvente o aglutinante orgánico, como la sal (NaCl), o bien, un solvente no orgánico; polvos metálicos y esferas huercas de cerámica, para mezclar los espaciadores con el polvo metálico. Una vez mezclados, se compacta a temperatura ambiente o a elevadas temperaturas, en el caso que estos últimos, posean resistencia al calor. Lo que, permite una mejor compactación, para iniciar el proceso de sinterización.

La sinterización consiste, en el desarrollo de un proceso de difusión entre las superficies de contacto, de las partículas de polvo metálico, como se presenta en al figura 2.13. La ventaja de la sinterización, es que las características de las partículas espaciadoras establecen la morfología y tamaño de los poros, y por ende, estos parámetros microestructurales se pueden controlar variando la cantidad y tamaño de partículas de los espaciadores (Perez Trigo, 2019).

Es importante destacar, que estos espaciadores luego se eliminan y desaparecen de los materiales celulares, y en caso no se eliminan, se les denomina espumas sintácticas.

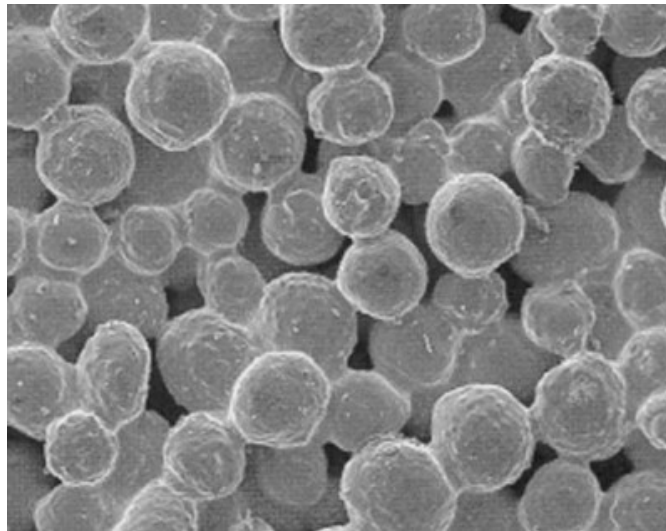


Figura 2.13: Bronce sinterizado poroso fabricado a partir de partículas de unos $100[\mu\text{m}]$ de diámetro.

Las etapas constructivas de los materiales celulares por pulvimetalurgia, son las siguientes:

1. Mezcla de polvo metálico y espaciador, junto con solvente o aglutinante, para una mejor unión superficie espaciador y polvo metálico.
2. Compresión axial o isoestática, para la compactar la espuma.

3. Eliminar los espaciadores, mediante tratamiento térmico o mediante el uso de un disolvente acuoso.
4. Sinterización, para generar la difusión y unión entre el polvo metálico.

2.4.3. Procesamiento de vapor de metal o compuesto metálico gaseoso

Este método, emplea metal o compuestos metálicos en estado gaseoso, mediante el uso de una cámara de vacío y un precursor sólido.

En esta cámara, el vapor de metal tiene contacto con un precursor frío, lo que implica que la presión de vapor del metal (PV) sea mayor que la presión de vapor de saturación (PVS), y por ende, se produzca la condensación en el precursor frío.

El metal condensado recubre la superficie del precursor polimérico y forma una película de cierto espesor que depende de la densidad del vapor y el tiempo de exposición.

Como precursor se pueden utilizar espumas de poliuretano reticulado o de polímeros de bloques reticulados. A su vez, los precursores se caracterizan por ser estructuras sólidas, cuyas dimensiones geométricas definen la morfología de la espuma o material celular a producir.

2.5. Aplicaciones de materiales porosos

Los materiales porosos poseen una amplia gamma de aplicaciones en la industria de manera estructural o funcional, dado que su estructura celular les otorga una combinación única de propiedades con bajas densidades, en comparación con otro tipo de materiales sólidos continuos.

El grado de aplicación o importancia en el uso industrial de estos materiales celulares, depende de condiciones o aspectos como la Morfología y topología, la metalurgia, el procesamiento y la económica, ya que tales condiciones controlan diferentes características, tales como; tipo y cantidad de porosidad necesaria, red de celdas abiertas o cerradas, escala de tamaños de porosidad deseada, metal o aleación de estado microestructural requerido, forma geométrica de la espuma o sólido celular, e idoneidad para la producción de gran volumen, entre otros.

La figura 2.14 muestra el grado de porosidad requerido para diversos campos de aplicación, junto con la necesidad de celdas de poros abiertos o cerrados, que se denomina grado de apertura.

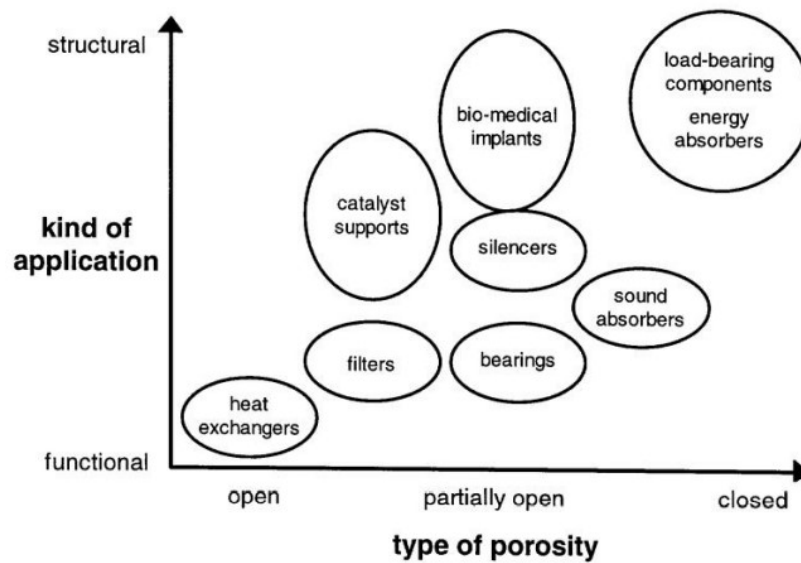


Figura 2.14: Aplicaciones de los metales celulares agrupadas según el grado de apertura necesario y si la aplicación es más funcional o necesario (Banhart, 2001)

2.5.1. Industria Automotriz

Hoy en día existe una creciente necesidad de reducir los tiempos de transporte en la sociedad, aumentando la demanda de nuevos diseños automovilísticos, bajos diferentes requisitos, tales como:

- Aumentar la seguridad de los pasajeros, por medio de una mayor rigidez, lo cual, implica un mayor peso de los componentes estructurales.
- Disminuir el peso de la estructura, para mejorar el rendimiento del combustible.
- Generar una mayor disipación de calor, ya que hoy en día, las longitudes de los automoviles son más limitadas, debido al diseño de motores más compactos.
- Reducción de las emociones acústicas, para un menor impacto medio ambiental.

De esta forma, se necesitan ciertos materiales que cumplan con estos requisitos, y que logren un punto de equilibrio entre ellos. La Figura 2.15, muestra que los materiales porosos ofrecen una posible solución a estos problemas.

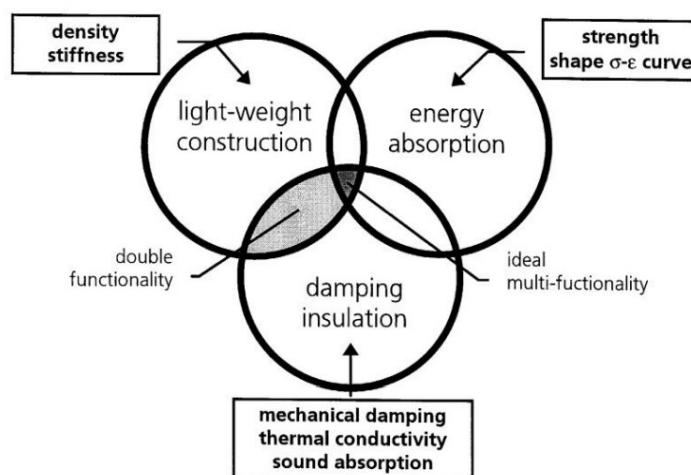


Figura 2.15: Principales campos de aplicación automovilística de los materiales porosos.

Las espumas metálicas proporcionan una relación de rigidez-masa alta, es decir, peso mínimo con una adecuada rigidez, facilitando las construcciones ligeras. A su vez, su comportamiento bajo regímenes de compresión se asemeja a un comportamiento de tensión-deformación rectangular, el cual es el ideal para materiales absorbentes de energía (Gibson & Ashby, 1997), ya que cede solo después de haber alcanzado una tensión máxima tolerable. Por otra parte, el módulo de Young de una espuma metálica es más bajo que el de un metal sólido, por consiguiente, la frecuencia natural de la espuma se desplazará a frecuencias más bajas en comparación con una estructura convencional, de modo similar el factor de amortiguamiento de las espumas es mayor, y disipan de mejor manera las vibraciones en forma de calor (Banhart et al., 1996; C. S. Liu et al., 1998a, 1998b).

2.5.2. Industria Aeroespacial

En el campo aeroespacial, se han evaluado a los materiales porosos de aluminio en diferentes usos, como elementos de choques absorbentes de energía para las plataformas de aterrizaje de vehículos espaciales, refuerzo para estructuras de carga en satélites, partes estructurales en turbinas, sellos en diferentes partes del motor, álabes de turbinas, entre otros (Schwartz et al., 1998).

2.5.3. Industria de la Construcción

Hoy en día los edificios modernos diseñados con hormigón tienen la necesidad de construir fachadas decorativas con la particularidad de ser ligeras, resistentes al fuego y rígidas, lo cual, se cumple con sólidos porosos de aluminio o los paneles de espuma. En este sentido, actualmente los

balcones son soportados por balaustradas que deben cumplir rigurosas exigencias, debido al alto peso de estos y baja tolerancia a elevadas temperaturas en caso de incendios, por lo que el uso de materiales porosos, es sumamente prometedor, dado que sería de gran ayuda debido a su bajo peso y buena resistencia a las altas temperaturas.

2.5.4. Industria Biomédica

La importancia de los andamios porosos en la ingeniería de tejidos, radica en sus propiedades mecánicas aparentes (Wheeler et al., 1983), debido a que se diseñan con una distribución de densidad similar al del hueso, con el fin de cumplir con los requisitos de resistencia, módulos de elasticidad aparentes, y comportamiento de tales componentes, para mitigar el apantallamiento de tensiones a largo plazo.

2.5.5. Aplicación Funcional: Filtros

Los parámetros morfológicos, tales como: tamaños de poros, porosidad, y espesor de paredes, hacen que las propiedades de los sólidos porosos, sean necesarias y atractivas, para el óptimo desempeño de los filtros. Las cuales son, resistencia a la corrosión, adecuadas propiedades mecánicas, capacidad de limpieza: mecánica y de filtración fina, y bajo costo.

Algunos ejemplos para filtros de medios líquidos, se visualizan en la limpieza de polímeros fundidos al momento de reciclarlos, eliminar la levadura de la cerveza, o la limpieza del aceite contaminado. En cambio, para filtros en medios gaseosos, se tiene filtración de gases diésel.

2.5.6. Aplicación Funcional: Intercambiadores de Calor

La función elemental de un intercambiador es eliminar o agregar calor a un medio gaseoso o líquido, a través del principio termodinámico de conducción. A su vez, para cumplir de manera óptima esta función, se requiere que la geometría de los intercambiadores provea un contacto óptimo con el medio, de manera tal, que la superficie de este pueda disipar o transferir calor sin zonas neutras de interferencias. Por este motivo, las espumas son una opción bastante viable y conveniente para su uso como intercambiadores, dado que una red de poros abierta, junto con un material de alta conductividad, permiten una buena transferencia de calor en la medida que el medio fluye por las celdas, además la porosidad abierta puede minimizar las caídas de presión (Banhart, 2001).

2.6. Manufactura aditiva

La manufactura aditiva (AM) es una tecnología de fabricación que permite crear objetos de geometrías complejas, con amplias flexibilidades de formas a través del diseño asistido por computadora (CAD), para casi cualquier tipo de material en especial, metales y sus aleaciones, cerámica, polímeros, materiales biológicos, etc. Esta tecnología provee diferentes procesos de ensamblaje, como la extrusión de materiales, la polimerización en tinta, la fusión de lecho de polvo, la inyección de aglutinantes y trazado 3D, los cuales se diferencian por sus mecanismos de implementación y alcances (Kabir et al., 2020; C. Liu et al., 2018; X. Wang et al., 2017).

A su vez, la AM ha presentado un crecimiento en su uso e implementación, no solo por aquellos beneficios de diseño que posee, sino también, por actores del ámbito legislativo, como la protección del medio ambiente, desafíos de sustentabilidad, que han surgido de diferentes organizaciones, en especial por la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU), mediante la Resolución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, promulgada en 2015 (Schneberger et al., 2020; Tietge, 2018).

2.6.1. Modelado por deposición fundida (FDM)

Entre los procesos de fabricación que componen la MA, se destaca la extrusión de materiales, técnica también conocida como modelado por deposición fundida (FDM), que consiste en crear componentes mediante capas secuenciales o capa por capa en una plataforma especial, a través de la extrusión de un filamento plástico fundido. Esta tecnología se destaca por su bajo costo o forma rentable de imprimir, comodidad, simplicidad y facilidad de obtener piezas (Ali et al., 2019; Kabir et al., 2020; Z. Liu et al., 2019; Marşavina et al., 2022; Singh et al., 2020; Zhao et al., 2019), por ello, se considera como la tecnología más utilizada en todo el mundo.

La investigación que gira entorno a la manufactura aditiva junto con su implementación está creciendo por todo el mundo, dado que ofrece una amplia gamma de productos en diferentes rangos de aplicaciones como la automotriz, aeroespacial, de construcción, civil, energética, deportiva, industrias médicas (Brighenti et al., 2021; García Plaza et al., 2019; Stoia, Linul & Marşavina, 2019; Stoia, Marşavina & Linul, 2019). Este último campo ha sido revolucionado con modelado por deposición fundida, ya que posee la capacidad de convertir imágenes radiográficas (Tomografía computarizada CT y escaneos de rayos X) en archivos CAD para la impresión 3D replicando detalles complejos de la anatomía del paciente, permitiendo una reproducción fiel de tejidos biológicos como huesos, cartílagos o válvulas cardíacas (R. K. Chen et al., 2016; González-Henríquez, Sarabia-Vallejos & Rodríguez-Hernandez, 2019). Razón por la cual, el mercado mundial de atención médica para AM se valoró en 973 millones de dólares en 2018 y se prevé que supere los 3 millones de dólares para 2026 (3D Printing in Healthcare Market by Component).

El procedimiento para crear un objeto utilizando la tecnología de manufactura aditiva, consta de tres pasos básicos, que se subdividen en cuatro etapas importantes, como se presenta en la figura 2.16

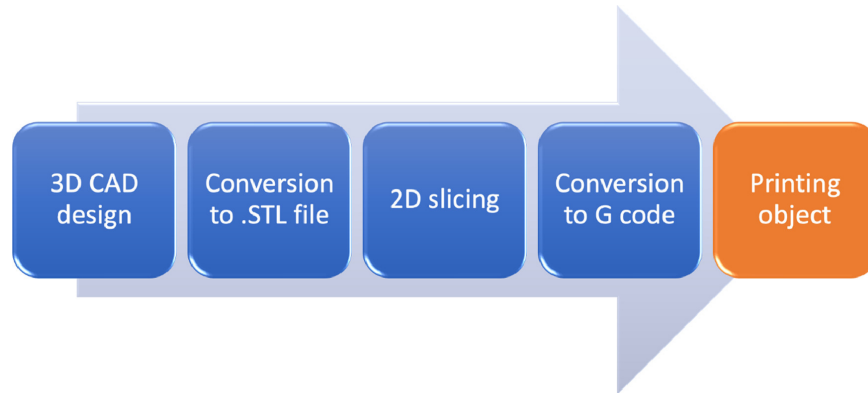


Figura 2.16: Diagrama de flujo de los pasos de fabricación digital que conducen a la impresión del objeto deseado. El diseño CAD puede derivarse de tomografías computarizadas o imágenes radiográficas como de un diseño por el método de los elementos finitos (Chong et al., 2022).

Estos pasos son los siguientes; creación de un modelo de impresión 3D, corte e impresión (X. Wang et al., 2017). El proceso de creación de un modelo 3D virtual se obtiene utilizando un software CAD, que puede generar un formato de archivo óptimo y fácilmente legible para el software de corte, generalmente este archivo es de formato Standard Triangle Language (.STL). El software de corte, procesa el modelo 3D del objeto y lo subdivide en capas secuenciales 2D, con el fin de imprimirlo en la estructura física (Bogue, 2013). La impresión es un paso importante, y varía en función del mecanismo utilizado y las formas físicas de los materiales de partida. La figura 2.17 muestra una representación esquemática del método de fabricación de fibra continua utilizando impresora 3D con cabezal tradicional.

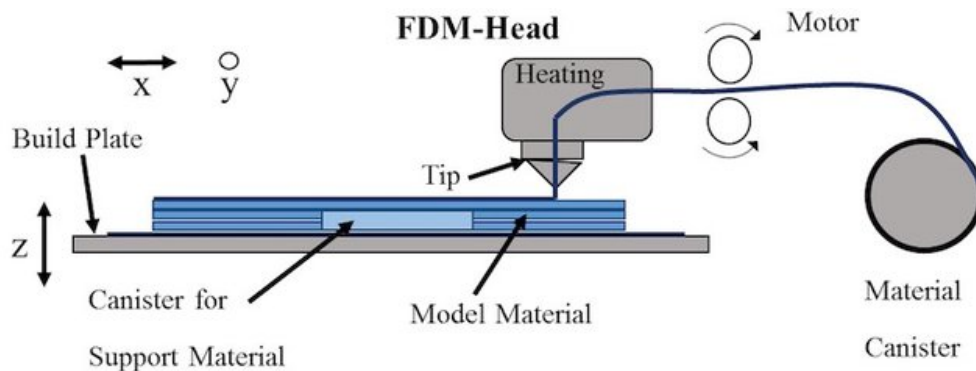


Figura 2.17: Esquema modelado deposición fundida de fibra continua (Baich & Manogharan, 2015).

La boquilla de extrusión recibe un polímero termoplástico, que se funde a la temperatura de

transición vítrea, dado que la temperatura de la boquilla se selecciona en función de las propiedades térmicas del polímero termoplástico. Una vez fundido el material, se deposita en la cama de impresión, y se adhiere a ella al solidificarse rápidamente. Este cabezal de impresión se mueve en 2D, es decir en la direcciones XY, y es responsable de diseñar cada capa de acuerdo con la trayectoria del modelo CAD 3D transferido por el software de corte. Una vez realizada la capa 2D, la boquilla sube en dirección Z a una distancia igual al espesor de capa. El tercer movimiento a lo largo de la dirección Z a una distancia igual al espesor de la capa, de forma secuencial hasta que se completa la estructura (Yang et al., 2017).

Diversas investigaciones han establecido los principales parámetros del proceso del FDM que influyen en las propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, tenacidad, ductilidad, propiedades de adhesión interfacial, unión interlaminar, tracción, compresión, flexión e impacto. Siendo la orientación de la trama, el espesor de la capa, la temperatura de la boquilla (Linul et al., 2020; Stoia et al., 2020; J. Torres et al., 2016) el color del filamento, el tipo de relleno, orientación del edificio, la dirección de impresión, ángulo de trama, velocidad de impresión, velocidad de alimentación y patrón de relleno (Kiendl & Gao, 2020; Vălean et al., 2020; Yao et al., 2020), que al combinarlos provocan una mezcla de propiedades única y óptima en función de las necesidades requeridas en los diferentes campos de aplicación.

Es importante destacar, que el FDM al igual que otros métodos de fabricación, puede presentar ciertas limitaciones técnicas inherentes a la metodología empleada en la MA. En este sentido, una de las limitaciones más influyentes en la precisión de la impresión, se denomina fenómeno escalera, y ocurre en el proceso de deposición capa por capa cuando se crean líneas visibles en la superficie, el cual consiste en el desplazamiento no programado entre las capas impresas posteriores, y se desarrolla especialmente en las capas curvas (Brooks et al., 2011) como se aprecia en la figura 2.18.

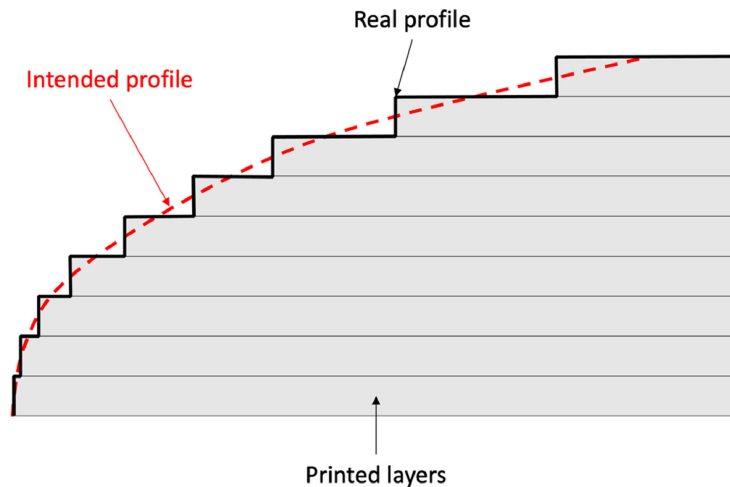


Figura 2.18: Fenómeno de escalera, dado el desplazamiento entre las capas (Chong et al., 2022).

Además del efecto escalera, también se pueden presentar otras irregularidades propias del proceso, como poros dentro de las capas, que son burbujas y bolsas de aire dentro del material impreso, junto a ello, pueden generarse vacíos entre capas, fruto de una mala adhesión de las capas posteriores al momento de solidificarse el material, que implica bajas propiedades mecánicas, tales como módulo de Young, resistencia a la tracción, y propiedades mecánicas anisotrópicas, que normalmente dependen de la dirección de fundición (Ahn et al., 2002). A su vez, estas interfases o vacíos pueden provocar la penetración de la humedad, lo que degrada la estabilidad mecánica y agrava la acumulación de tensiones térmicas, cuando se existen ciclos de temperatura desiguales (T.-M. Wang et al., 2007; Wickramasinghe et al., 2020).

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Mecánica del medio continuo

La mecánica del medio continuo es una área de la ciencia, que estudia el comportamiento de sólidos y fluidos, en una escala de longitud macroscópica, es decir, no considera las posibles discontinuidades existentes en el nivel microscópico, y de esta manera, la materia tiene una distribución uniforme en regiones del espacio.

En este contexto, las consideraciones de la mecánica del medio continuo da paso a la teoría de la elasticidad.

3.2. Teoría de la Elasticidad

La elasticidad se presenta en ciertos materiales, que pertenecen a los sólidos deformables, y se define como aquella deformación reversible o temporal de un objeto, cuando se encuentra bajo la acción de cargas externas. Esta propiedad mecánica y física, generalmente posee un determinado límite, el cual se caracteriza, por ser la transición de dos procesos termodinámicos diferentes, que en la mayoría de los casos confluyen en procesos reversible (elásticidad) y procesos irreversibles.

Un proceso reversible en un sistema termodinámico es aquel, el cual después de ser llevado de un estado inicial a uno final, puede retornar a sus propiedades originales. En cambio el proceso irreversible no puede retornar a sus propiedades originales.

El comportamiento elástico en pequeñas deformaciones debe cumplir con las condiciones básicas, para mantener su estabilidad y ser admisible dentro del conjunto (Oliver Olivella & Agelet de Saracíbar, 2002):

i) Condiciones de equilibrio interno

La condición de equilibrio interno es proporcionada por la ecuación de balance de cantidad

de movimiento, y se obtiene a través la potencia mecánica introducida P_{int} en un sólido.

$$P_{int} = \oint_S \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} dS + \int_V \rho \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} dV, \quad (3.1)$$

que de forma indicial es

$$P_{int} = \oint_S t_i v_i dS + \int_V \rho b_i v_i dV. \quad (3.2)$$

En la figura 3.1, se ilustra las cantidades de la potencia mecánica introducida, donde t_i es la fuerza de superficie aplicada sobre el contorno S . Esta fuerza de superficie se compone por el tensor de Cauchy σ_{ij} y el vector normal n_j a esta superficie S , la cual envuelve al sólido. A su vez, b_i es la fuerza por unidad de masa; $\rho = \frac{\partial M}{\partial V}$ es la densidad, y v_i es el campo de velocidades.

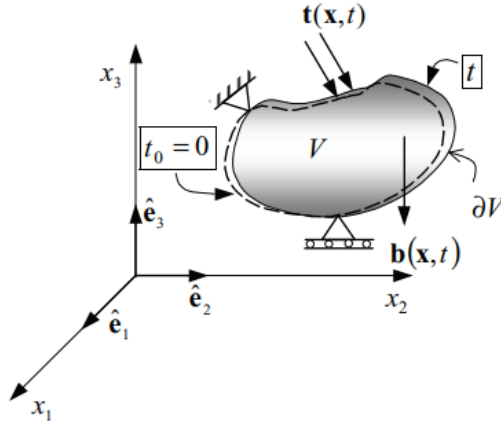


Figura 3.1: Esquema general, condición de equilibrio interno.

Por medio del teorema de Green, la integral de superficie, se puede representar como una integral de volumen, por lo que, la expresión de la potencia mecánica puede ser modificada de la siguiente forma

$$P_{int} = \int_V \left[v_i \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \right) \right] + \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dV. \quad (3.3)$$

La ecuación 3.3 es válida para todo volumen V y si $V \rightarrow 0$ Se obtiene la ecuación de Cauchy o balance de momento por unidad de volumen

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t}. \quad (3.4)$$

Pero, para problemas independientes del tiempo, como es el caso de los problemas cuasi-

estático, donde se desprecian las fuerzas inerciales, la ecuación se reduce a

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i. \quad (3.5)$$

De otra forma, esta ecuación de Cauchy, se puede reducir a la condición de equilibrio, tras analizar un elemento diferencial de un sólido deformable, que se encuentra sometido a una acción de cargas externas y cargas internas. De esta forma, el equilibrio estático consta de un análisis entre las fuerzas internas, como se aprecia en la figura 3.2 que se representan por un tensor de orden dos, y las fuerzas volumétricas que actúan en este.

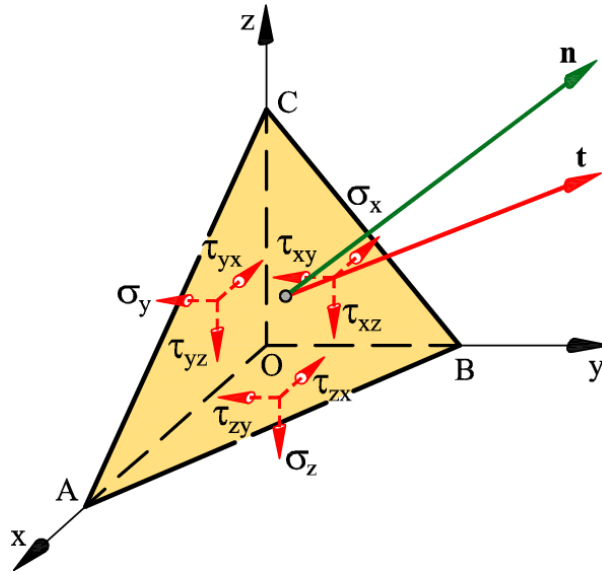


Figura 3.2: Tetraedro de Cauchy.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 + \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} &= 0, \\ \mathbf{X}_2 + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} &= 0, \\ \mathbf{X}_3 + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} &= 0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

En notación indicial, esta expresión es la siguiente

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = -\rho b_i. \quad (3.7)$$

ii) **Condición de equilibrio de contorno**

Esta condición se basa en uno de los postulados de Cauchy; *"la fuerza de contacto t es independiente de la superficie y solo depende del vector normal a ella $\hat{n}$ ".* La figura 3.3, ilustra esta relación, y se presenta la expresión de forma indicial en la ecuación 3.8.

$$\sigma_{ij}n_j = t_i. \quad (3.8)$$

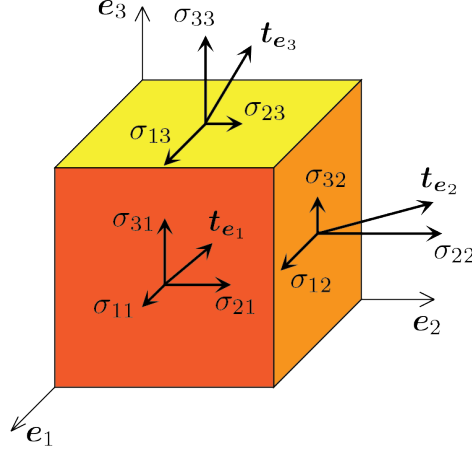


Figura 3.3: Representación del estado tensional de un punto según tres planos ortogales.

La forma matricial se presenta a continuación;

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

en esta expresión se muestran las 9 componentes del tensor de tensiones, con sus respectivas resultantes.

iii) **Condición de deformación infinitesimal**

Esta condición tiene como consecuencia que no exista diferencia entre la configuración material (correspondiente al instante de referencia t_0) de la espacial que corresponde al instante actual t , es decir, no hay diferencia entre los tensores material $\mathbf{E}(\mathbf{X}, t)$ (correspondiente al instante de refe) y espacial $\mathbf{e}(\mathbf{x}, t)$ (coordenadas eulerianas) de deformación, es decir, todas las deformaciones coinciden (Oller, 2001)

$$\mathbf{E}(\mathbf{X}, t) \approx \mathbf{e}(\mathbf{x}, t) \approx \varepsilon(\mathbf{x}, t). \quad (3.10)$$

Además, dicha condición provee una relación entre el campo de desplazamientos y el campo de deformaciones, llamada compatibilidad de deformaciones:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon} = \nabla^s \mathbf{u} = \frac{1}{2} (\mathbf{u} \otimes \nabla + \nabla \otimes \mathbf{u}) \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad i, j \in \{1, 2, 3\} \end{cases}, \quad (3.11)$$

donde $\mathbf{u}$ es el desplazamiento relativo, entre un punto coordenado $\mathbf{x}_0$ de la configuración de referencia $\mathbf{X}$ y un punto coordenado $\mathbf{x}$ de la configuración actual; $\mathbf{u} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$, y como los desplazamientos son pequeños $\mathbf{u} = 0$.

Junto con cumplir estas condiciones básicas, se requiere una relación entre el campo de tensión y deformación, denominada relación constitutiva.

Existen diferentes modelos constitutivos para los materiales elásticos, como modelo elástico de Green, modelos hipoeelásticos, modelo elástico de Cauchy, entre otros. En el presente trabajo se supone un modelo constitutivo elástico lineal o modelo elástico de Cauchy isótropo, que se caracteriza por utilizar una función tensorial lineal de argumentos tensoriales, junto con presentar las mismas propiedades en todas las direcciones:

$$\sigma_{ij} = f_{ij}(\varepsilon_{kl}) ; \quad \varepsilon_{ij} = f_{ij}^{-1}(\sigma_{kl}). \quad (3.12)$$

Estas relaciones son invertibles y también reversibles, siendo esta última aquella que vuelve a sus propiedades originales una vez aplicada las sollicitaciones mecánicas.

La ley de Hooke Generalizada provee una relación constitutiva, que relaciona las componentes de tensión $\boldsymbol{\sigma}$ y deformación $\boldsymbol{\varepsilon}$, mediante un tensor de cuarto orden $\mathbb{C}$, denominado tensor de constantes elásticas, y contiene las propiedades elásticas del material.

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t) = \mathbb{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, t) \\ \sigma_{ij} = \mathbb{C}_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad i, j \in \{1, 2, 3\} \end{cases}, \quad (3.13)$$

Este tensor de cuarto orden tiene en principio $3^4 = 81$ componentes, es independiente del sistema cartesiano en el que trabaje y simétrico. Debido a esta simetría, los 81 componentes o constantes elásticas se reducen a 21.

La expresión del tensor de constantes elásticas es la siguiente:

$$\begin{cases} \mathbb{C} = \lambda \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + 2\mu \mathbf{I} \\ \mathbb{C}_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu [\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}] \quad i, j, k, l \in \{1, 2, 3\} \end{cases}, \quad (3.14)$$

Donde λ, μ son las constantes de Lamé, que caracterizar el comportamiento elástico, y son obtenidas experimentalmente.

La ecuación constitutiva utilizada en este trabajo, corresponde al de un materiales elástico lineal isótropo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \boldsymbol{\sigma} = \lambda Tr(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{1} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon} \\ \sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{ll} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad i, j \in \{1, 2, 3\} \end{array} \right., \quad (3.15)$$

3.3. Método de los elementos finitos

Para el estudio de los fenómenos físicos, generalmente se utiliza la técnica matemática, problema de valor de contorno inicial (PVCI), que emplea ecuaciones diferenciales parciales, junto con condiciones iniciales y de contorno, para caracterizar y representar fielmente el comportamiento físico del sistema en estudio. Estas ecuaciones diferenciales parciales, demandan que el dominio en cuestión, se considere como un continuo, es decir, contenga un número infinito de elementos, cuya resolución debe ser exacta o de forma analítica.

Sin embargo, cuando el dominio físico del problema es heterogéneo, la solución analítica es difícil, y en muchos casos imposible, por lo que la resolución aproximada juega un rol preponderante, mediante el trato numérico de subdominios.

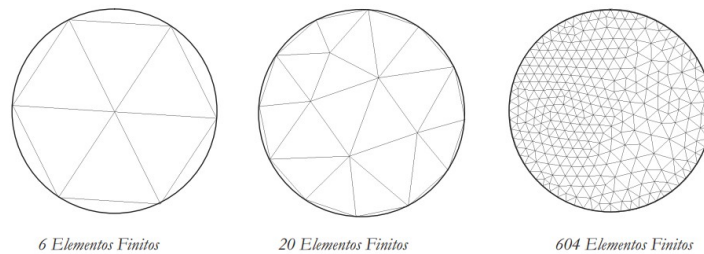


Figura 3.4: Discretización del dominio en sub-regiones.

En la actualidad, una de las técnicas más difundidas, empleadas y estudiadas en el marco de la mecánica de sólidos es el método de los elementos finitos, y consiste en discretizar el dominio de estudio en sub-regiones, como se muestra en la figura 3.4, para convertir el problema en la resolución de un conjunto de ecuaciones algebraicas.

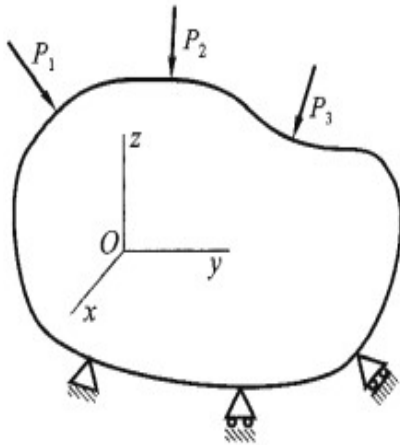
El método de los elementos finitos consta de tres pasos:

1. **Preproceso** consiste en definir el dominio geométrico del problema, las condiciones de contorno e iniciales, características del material (Zienkiewicz & Taylor, 2005), junto con los siguientes pasos:
 - El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de elementos finitos.
 - Los elementos se encuentran conectados entre sí, mediante un número finito de puntos, denominados nodos y se ubican en los contornos de los subdominios. Los desplazamientos de estos puntos nodales, son las variables del problema elástico o incógnitas fundamentales del problema.

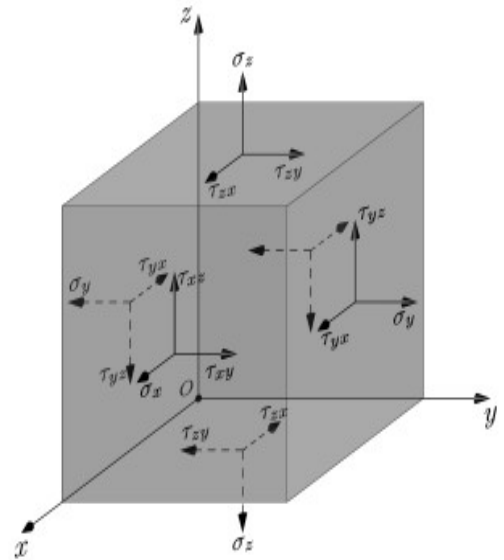
- Como se mencionó anteriormente, se utilizan funciones en el campo de los desplazamientos dentro de cada elemento finito.
2. **Solución del sistema** En este paso, se desarrolla la parte matemática del método, mediante el ensamblaje de la matriz de rigidez de todos los elementos del dominio. Una vez ensamblada la matriz, se resuelve el sistema $Ax = b$.
 - A través de las funciones del campo de desplazamiento, se definirá el campo de deformaciones, y junto a las ecuaciones constitutivas del material, se podrán obtener el campo de tensiones en todo el elemento, y por ende, dominio físico del problema.
 3. **Post-proceso** En esta fase, se procesan los resultados y se ilustran en forma de imágenes, para la visualización del usuario.

3.3.1. Formulación de un elemento finito

Si consideramos un cuerpo sometido a un sistema de fuerzas externas, como se muestra en la figura 3.5a, y se toma de este cuerpo un pequeño elemento cúbico diferencial, ubicado en el punto de origen O del eje coordenado x, y, z . Se tendrán las componentes tensionales ilustradas en la figura 3.5b. Ambas componentes representan las fuerzas externas e internas del sólido.



(a) Cuerpo sometido a fuerzas externas.



(b) Componentes de tensión

Figura 3.5: Problemas elástico de mecánica de sólidos.

Para resolver un problema estático mediante el método de los elementos finitos, se debe establecer la equivalencia estática entre las fuerzas nodales y las tensiones actuantes en el contorno y

las fuerzas distribuidas, mediante el teorema de los trabajos virtuales, el cual establece: la condición necesaria y suficiente para que una estructura esté en equilibrio es que sea nula la suma de los trabajos que realizan todas las fuerzas que actúan en la estructura para cualquier conjunto de desplazamientos y deformaciones virtuales compatibles con sus enlaces (Moreno-Zulca et al., 2020).

Es importante destacar (Dassault Systèmes Simulia, 2010), que la ecuación básica para el análisis estándar de elementos finitos basada en el desplazamiento, sujeta al principio de los trabajos virtuales, con la premisa del equilibrio de estos, es:

$$\int_V \boldsymbol{\sigma} : \delta \mathbf{D} dV = \int_S \mathbf{t}^T \cdot \delta \mathbf{v} dS + \int_V \mathbf{f}^T \delta \mathbf{v} dV. \quad (3.16)$$

El lado izquierdo, es la tasa de trabajo virtual interno, que se sustituye con la integral del volumen de referencia de la tasa de trabajo virtual por el volumen de este.

$$\int_{V^0} \boldsymbol{\tau}^c : \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV^0 = \int_S \mathbf{t}^T \delta \mathbf{v} dS + \int_V \mathbf{f}^T \delta \mathbf{v} dV, \quad (3.17)$$

donde $\boldsymbol{\tau}^c$ y $\boldsymbol{\varepsilon}$ son cualquier conjugado de medidas de tensión y deformación. Por otra parte, le interpolador de elementos finitos se puede escribir en general como

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}_N u^N, \quad (3.18)$$

donde $\mathbf{N}_N$ son las funciones de interpolación, y u^N son las variables nodales, que depende de la cantidad de grados de libertad que se tendrán en cada punto nodal, esta introducción de las funciones, restringe el desplazamiento, para que la variación del elemento sea espacial. La notación en subíndices y superíndices en mayúsculas, indican que son variables nodales.

El campo virtual en análisis, $\delta \mathbf{v}$ debe ser compatible con las restricciones cinemáticas. Además, este campo virtual debe poseer la restricción espacial, por lo que, también se expresa con la función de interpolación

$$\delta \mathbf{v} = \mathbf{N}_N \delta \mathbf{v}^N. \quad (3.19)$$

Por otra parte, la tasa de deformación del material $\boldsymbol{\varepsilon}$, se encuentra asociada con $\delta \mathbf{v}$, y generalmente esta relación es lineal, y el supuesto de interpolación es

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\beta}_N \delta \mathbf{v}^N, \quad (3.20)$$

en esta expresión la matriz $\boldsymbol{\beta}$, depende de la posición actual $\mathbf{x}$, y define la variación de la deformación a partir de las variables cinemáticas, que se derivan de las funciones de interpolación. De

esta forma, la ecuación de equilibrio 3.16, se aproxima como

$$\delta \mathbf{v}^N \int_{V^0} \boldsymbol{\beta}_N : \boldsymbol{\tau}^c dV^0 = \delta \mathbf{v}^N \left(\int_S \mathbf{N}_N^T \mathbf{t} dS + \int_V \mathbf{N}_N^T \mathbf{f} dV \right). \quad (3.21)$$

El campo virtual es una variable independiente $\delta \mathbf{V}^N$ y se puede elegir que cada una sea distinta de cero y todas las demás cero a su vez, para llegar a un sistema de ecuaciones de equilibrio no lineal:

$$\int_{V^0} \boldsymbol{\beta}_N : \boldsymbol{\tau}^c dV^0 = \int_S \mathbf{N}_N^T \mathbf{t} dS + \int_V \mathbf{N}_N^T \mathbf{f} dV. \quad (3.22)$$

3.3.2. Elementos de Ansys

Este método matemático subdivide el sistema o cuerpo sólido de estudio, en pequeños subdominios o sub-regiones con nodos asociados, que se llaman elementos. Estos elementos tienen diferentes formas, dimensiones (1D, 2D y 3D), y cantidad de nodos, donde cada una de estas características influyen en la proximidad de la respuesta numérica, con el comportamiento físico real. A su vez, la cantidad de elementos utilizados afecta la exactitud de los resultados obtenidos (Logan, 2022), debido a que una mayor cantidad de elementos, implican una mayor cantidad de nodos, y por ende, una mayor cantidad de ecuaciones, resultando en una aproximación más cercana a la solución real. Sin embargo, el aumento en la cantidad de elementos, implica una mayor cantidad de variables a calcular, y por ende, un mayor coste computacional, que se contextualiza en un mayor tiempo de cálculo.

La figura 3.6, muestra diferentes tipos de elementos, en cuanto a dimensión, forma y cantidad de nodos.

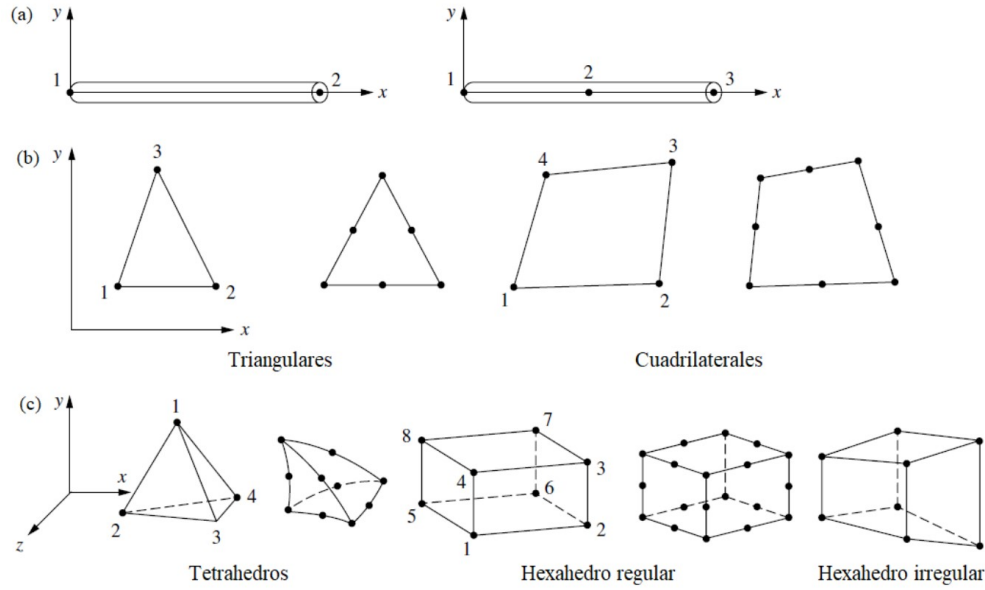


Figura 3.6: Tipos de elementos finitos; (a) Elementos lineales 1D, (b) Elementos superficiales 2D, (c) Elementos volumétricos 3D.

Cada nodo tiene asociado, diferentes grados de libertad (DOF), en cada una de las direcciones de coordenadas, y que a su vez, dependen del tipo de problema a analizar.

Para una simulación numérica de esfuerzo en problemas con geometría sólida de tres dimensiones, el software ANSYS, puede implementar los elementos; SOLID185, SOLID285, SOLI186 Y SOLID187.

El elemento SOLID185, es un cuboide y contiene ocho nodos, ubicados en cada uno de sus vértices, con tres grados de libertad por nodo, correspondiente a los desplazamiento u_x , u_y y u_z . La figura 3.7, presenta de forma gráfica este tipo de elemento sólido

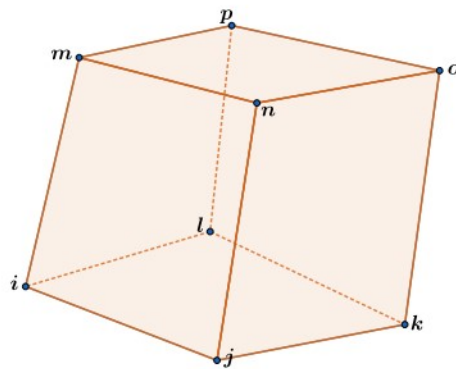


Figura 3.7: Tipo de elemento SOLID185

El elemento SOLID285, es tetraédrico, y contiene 4 nodos, con tres grados de libertad por nodo,

en la dirección del eje coordenado cartesiano de tres dimensiones. La figura 3.8, ilustra de manera gráfica este elemento sólido.

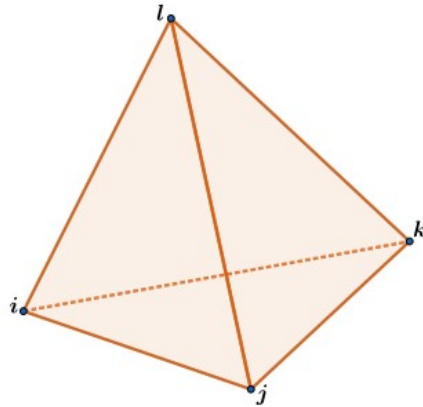


Figura 3.8: Tipo de elemento SOLID285

El elemento SOLID186, es un elemento de forma cuboide, que contiene 20 nodos, con tres grados de libertad por nodo, en las direcciones del eje coordenado cartesiano. Este elemento al tener veinte nodos, lo hace ser preciso, pero a la vez de alto costo computacional. En la figura 3.9 se presenta.

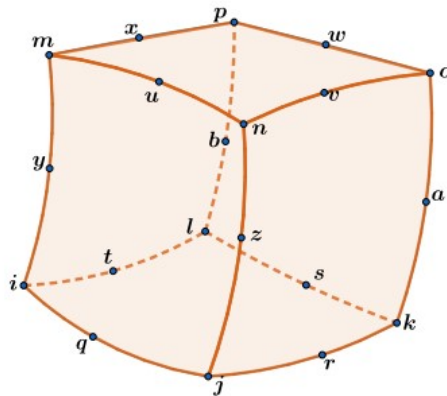


Figura 3.9: Tipo de elemento SOLID186

Por último, ANSYS permite el elemento SOLID187, que se caracteriza por una pirámide triangular, de cuatro caras, seis aristas y cuatro vértices. Este posee diez nodos, y contiene en cada nodo, tres grados de libertad, en la dirección del eje coordenado. La figura 3.10, ilustra este elemento.

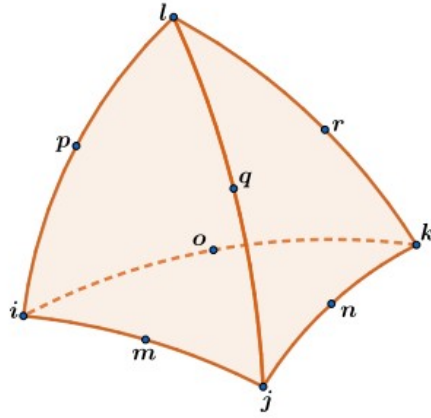


Figura 3.10: Tipo de elemento SOLID187

Este, es el utilizado en el presente trabajo, ya que se utiliza para geometrías complejas, y superficies curvas, dado que sus aristas no son rectas.

3.3.3. Formas del elemento

La forma del elemento, posee diversas propiedades que influyen en la convergencia de los resultados. Es por ello, que ANSYS dispone de ciertas características o propiedades de los elementos, con el fin de evitar dificultades numéricas.

3.3.3.1. Calidad del elemento

En esta, se compara la forma de las celdas, proporcionando una métrica de calidad, que varía entre 0 y 1. Para el cálculo de la calidad del elemento, se mide la relación entre el volumen y la raíz cuadrada, del cubo de la suma de las aristas, en los elementos tridimensionales.

$$Q = C \cdot \left[\frac{\text{Volumen}}{\sqrt{\sum (\text{aristas})^3}} \right] \quad (3.23)$$

donde, C es una constante que depende del tipo de elemento utilizado.

Cuando la métrica es 1, se representa un cubo perfecto, en cambio cuando tiene el valor de 0, indica un elemento con volumen cero o negativo. Lo ideal, es que el elemento a utilizar tenga la métrica, cercana o igual a 1.

3.3.3.2. Oblicuidad o Asimetría

La asimetría determina la cercanía de un elemento a uno equiangular, es decir que tan cerca se encuentra el elemento, de lo ideal.

En este caso, el valor 0 representa que el elemento es equilátero, y un valor 1 indica que es irregular, con ángulos muy agudos, lo cual presenta nodos casi coplanares, influyendo en el Jacobiano, y provocando una divergencia numérica.

Se calcula de la siguiente manera

$$Asimetría = \frac{T_o - t_e}{T_o}, \quad (3.24)$$

donde T_o es el tamaño óptimo del elemento, es decir el ideal, y T_e es el tamaño del elemento.

3.3.3.3 Relación de aspecto

Esta hace una relación entre el lado más corto y el más largo de un elemento. Lo ideal, que este valor sea 1 o lo más cercano a 1, de esta forma, el elemento es homogéneo, pero cuando posee valores elevados, hace que los elementos tengan esbeltez, es decir, una distorsión, y por ende, un problema en los resultados.

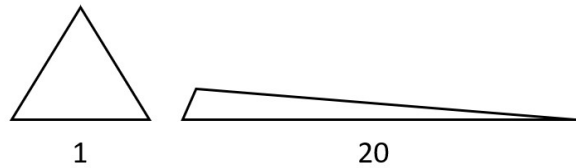


Figura 3.11: Elementos con diferencia de relación de aspectos, lado izquierdo relación 1, lado derecho distorsionado relación 20.

3.3.3.4 Calidad Ortogonal

Esta característica, posee un rango entre 0-1, donde el valor 0 corresponde a la peor calidad ortogonal del elemento posible, y un valor de 1 es el mejor.

Esta se calcula, utilizando un vector normal a cada cara del elemento (**A**), el vector desde el centroide del elemento a los centroides de los elementos adyacentes (**C**), y el vector desde el centroide del elemento hacia las caras adyacentes (**f**), la figura 3.12. se ilustra gráficamente los vectores mencionados

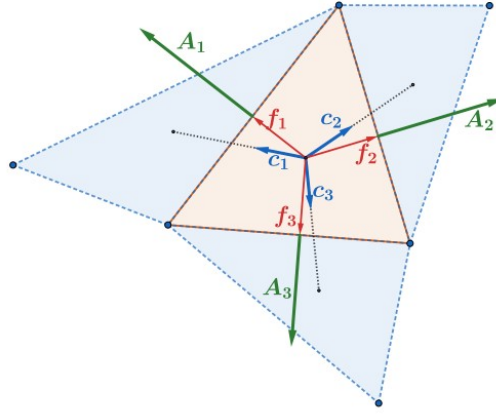


Figura 3.12: Vectores utilizados para calcular la calidad ortogonal del elemento.
(Perez Trigo, 2019).

La calidad ortogonal de cada celda de mallado es calculada como el valor mínimo entre las siguientes dos expresiones:

$$\frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{f}_i}{|\mathbf{A}_i| \cdot |\mathbf{f}_i|} \quad (3.25)$$

$$\frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{C}_i}{|\mathbf{A}_i| \cdot |\mathbf{C}_i|} \quad (3.26)$$

3.4. Teoría de Homogeneización

Los materiales no homogéneos, tienen una influencia significativa en la ciencia y tecnología de materiales, ejemplos de estos son los materiales compuestos, el hormigón, los materiales policristalinos, materiales porosos y celulares, el hueso, entre otros.

Estos materiales no homogéneos, se componen de dos o mas constituyentes denominadas fases, las cuales son diferentes entre sí, en alguna longitud de escala más pequeña. De esta forma, cada una de estas fases poseen diferentes propiedades y orientaciones, lo que implica que el dominio completo de este tipo de materiales heterogéneos, puedan presentar propiedades no homogéneas en ciertas escalas de longitud (Böhm, 2004).

En virtud de esto, se desprende que las propiedades de los materiales no homogéneos o heterogéneos, dependen por un lado, de las propiedades relevantes de los constituyentes fruto de la superposición física de cada fase, y por otro lado, por su geometría y topología o disposición de las fases (Böhm, 1998).

Es importante mencionar, que la proximidad de la predicción de las propiedades es mayor, a medida que se posea más información de estos dos aspectos previamente mencionados. Para ello, se utiliza la teoría de homogeneización (Böhm, 1998).

La teoría de homogeneización, se puede interpretar como la descripción del comportamiento de un material heterogéneo en una escala de longitud más baja, en términos de un material de referencia homogéneo ficticio que es energéticamente equivalente en una escala de longitud más alta. En otras palabras, la teoría de homogeneización, permite reemplazar el medio original, que se caracteriza por fluctuaciones de los campos físicos, por un medio efectivo, homogéneo, caracterizado por campos físicos con coeficientes constantes (Böhm, 1998, 2004; Pavliotis & Stuart, 2008).

El objetivo principal de esta teoría es evaluar las propiedades efectivas (rigidez, propiedades de expansión y resistencia térmica, conducción de calor y propiedades de transporte relacionadas, propiedades eléctricas y magnéticas, propiedades electromecánicas, etc.) del material heterogéneo, a partir del conocimiento constitutivo de su composición, es decir, de sus fases. En el caso de las propiedades elásticas de los sólidos, estas propiedades efectivas, son el tensor de tensión y el tensor de deformación.

La validez de este procedimiento, se encuentra subordinado a varias condiciones, y una de ellas, es que debe existir un volumen de elemento representativo o bien se supone que el material heterogéneo es estadísticamente homogéneo. Esto implica que los elementos de volumen suficientemente grandes seleccionados en posiciones aleatorias dentro de la muestra tienen arreglos de fase estadísticamente equivalentes y dan lugar a las mismas propiedades materiales promediadas, llamadas propiedades efectivas del material no homogéneo (Böhm, 1998; Huet, 1990).

Para describir el volumen de elemento representativo, como un medio macroscópicamente homogéneo, el macro-esfuerzo y la macro-deformación se derivan promediando el esfuerzo y la deformación sobre el volumen de RVE:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon dV, \quad (3.27)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma dV. \quad (3.28)$$

3.4.1. Ensayo de compresión uniaxial

Los módulos elásticos aparentes de los sólidos porosos con diferente porosidad, se estiman uniaxialmente en la dirección z al aplicar un desplazamiento impuesto, simulando los esfuerzos de compresión, en el extremo superior del modelo.

La ecuación 3.29, permite obtener el Módulo elástico aparente en la dirección mencionada

$$\bar{\varepsilon}_z = -\bar{\sigma}_x \frac{\nu_{xy}}{E_x} - \bar{\sigma}_y \frac{\nu_{yz}}{E_y} + \bar{\sigma}_z \frac{1}{E_z}. \quad (3.29)$$

Si la ecuación 3.29 se divide por el esfuerzo promedio predominante, que en este caso es el esfuerzo en la dirección z , denotado por σ_z , se tiene:

$$\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}_z} = -\frac{\bar{\sigma}_x}{\bar{\sigma}_z} \frac{\nu_{xy}}{E_x} - \frac{\bar{\sigma}_y}{\bar{\sigma}_z} \frac{\nu_{yz}}{E_y} + \frac{1}{E_z}. \quad (3.30)$$

Es importante destacar, que al ser una compresión uniaxial en la dirección z , los esfuerzos transversales como σ_x y σ_y , son considerablemente menores en comparación con σ_z , por lo que, las divisiones de $\frac{\bar{\sigma}_x}{\bar{\sigma}_z}$ y $\frac{\bar{\sigma}_y}{\bar{\sigma}_z}$, son despreciables, así la ecuación provee la obtención del Módulo elástico aparente

$$E_z = \frac{\bar{\sigma}_z}{\bar{\varepsilon}_z}. \quad (3.31)$$

3.5. Método de los elementos discretos

El método de los elementos discretos (DEM) es una técnica matemática creada, para describir el comportamiento de los flujos granulares o flujos de partículas.

Esta técnica numérica estudia el movimiento de cada partícula bajo eventuales colisiones, donde considera que el desplazamiento de estas es independiente una de otra, y además que las interacciones entre estas, solo ocurre en los puntos de contacto de las partículas. De esta manera, este enfoque se desmarca de la mecánica del medio continuo, el cual no provee relaciones contínuas adecuadas para el comportamiento entre elementos discretos, debido a las consideraciones de fuerzas cohesivas en los continuos (Dobry & Ng, 1992).

Durante la última década se han desarrollado diferentes estrategias para describir numéricamente los flujos granulares, donde el método de los elementos discretos se destaca, por su capacidad de resolver el medio granular a escala de partículas, permitiendo así fuerzas de contacto realistas, junto con su potencia de considerar la geometría, desplazamiento relativos y segregación de las partículas (Kloss et al., 2012).

El DEM se fundamenta en la segunda ley de Newton mediante las ecuaciones de movimiento rotacional y traslacional de la dinámica de cuerpos rígidos (Cundall & Strack, 1979; Morales Quispe, 2013), además utiliza la ley de fuerza-desplazamiento en los contactos, donde incorpora una carga de amortiguamiento para evitar vibraciones de las partículas sin contacto, y disipar la energía cinética (**onate**).

$$m_i \ddot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{F}_i, \quad (3.32)$$

$$I_i \dot{\omega}_i = \mathbf{T}_i, \quad (3.33)$$

donde $\mathbf{u}$ es el desplazamiento, $\dot{\mathbf{u}}$ es la velocidad, $\ddot{\mathbf{u}}$ es la aceleración de cada disco o esfera dependiendo en que dimensión se este trabajando, ω la velocidad angular, m la masa, $\mathbf{I}$ el momento de inercia, los vectores $\mathbf{F}_i$ y $\mathbf{T}_i$ son las sumas de todas las fuerzas y momentos aplicados a las partículas debido a las cargas externas, $\mathbf{F}_i^{\text{ext}}$ y $\mathbf{T}_i^{\text{ext}}$ respectivamente, a las interacciones de contacto entre las partículas vecinas $\mathbf{F}^{ij}$, y por último a las cargas de amortiguamiento $\mathbf{F}_i^{\text{damp}}$ y $\mathbf{T}_i^{\text{damp}}$.

Estos vectores se pueden escribir

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i^{\text{ext}} + \sum_j^{n_i^e} \mathbf{F}^{ij} + \mathbf{F}_i^{\text{damp}}, \quad (3.34)$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}_i^{\text{ext}} + \sum_{j=1}^{n_i^c} \mathbf{r}_c^{ij} \mathbf{F}^{ij} + \mathbf{T}_i^{\text{damp}}. \quad (3.35)$$

La operación del método de elementos discretos, consta de tres pasos importantes (Kloss et al., 2012):

- i) Cálculo de la fuerza de contacto entre las partículas.
- ii) integración de ecuaciones de movimiento para detectar los desplazamientos de partículas.
- iii) detección de contactos, donde se identifican contactos nuevos y se eliminan los contactos rotos.

3.5.1. Esquema de integración

El segundo paso, es determinar los desplazamientos a través de la integración en el tiempo de la segunda ley de Newton, que generalmente, se utiliza un esquema de diferencia central estándar. El operador de integración de tiempo para el movimiento de traslación en el n -ésimo paso de tiempo es el siguiente:

$$\mathbf{u}_i^n = \frac{\mathbf{F}_i^n}{m_i}, \quad (3.36)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i^{n+\frac{1}{2}} = \dot{\mathbf{u}}_i^{n-\frac{1}{2}} + \mathbf{u}_i^n \Delta t, \quad (3.37)$$

$$\mathbf{u}_i^{n+1} = \mathbf{u}_i^n + \dot{\mathbf{u}}_i^{n+\frac{1}{2}} \Delta t. \quad (3.38)$$

El procedimiento del esquema de integración par el movimiento rotacional, es similar al movimiento traslacional:

$$\dot{\omega}_i^n = \frac{\mathbf{T}_i^n}{I_i}, \quad (3.39)$$

$$\omega_i^{n+\frac{1}{2}} = \omega_i^{n-\frac{1}{2}} + \dot{\omega}_i^n \Delta t. \quad (3.40)$$

Una vez obtenida la velocidad angular, se determina el vector de rotación angular. Este vector, contiene el giro rotacional en cada uno de los ejes cartesianos $\Delta\theta_i = [\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z]$, y se calcula para la i -ésima partícula como

$$\Delta\theta_i = \omega_i^{n+\frac{1}{2}} \Delta t. \quad (3.41)$$

Con el conocimiento de la rotación incremental, se puede actualizar las fuerzas de contacto tangenciales, junto con la obtención de la posición rotacional de cada partícula (Rojek et al., 2001). La integración explícita provee una alta eficiencia computacional, y permite la solución de sistemas dinámicos, sin la necesidad de realiza iteraciones y usar métodos numéricos que inviertan matrices de alto orden, para encontrar la solución. Sin embargo, una de las desventajas de este esquema de integración, radica en que su estabilidad numéricas se encuentra condicionada por ciertas limitaciones del paso del tiempo Δt (Cundall & Strack, 1979).

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr}, \quad (3.42)$$

donde Δt es un paso de tiempo crítico determinado por la frecuencia natural más alta del sistema $\omega_{m\acute{a}x}$

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{m\acute{a}x}}. \quad (3.43)$$

Si existe amortiguamiento, para evitar vibraciones entre partículas, el incremento crítico viene dado por

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{max}} \left(\sqrt{1 + \xi} - \xi \right). \quad (3.44)$$

La variable ξ es la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente a la frecuencia más alta $\omega_{m\acute{a}x}$. De esta forma, y si fuere el caso de dos esferas, se incluyen en la lista si se cumple la siguiente condición

3.6. Principio de Arquímedes en medición de porosidad

El principio de arquímedes interpreta el fenómeno físico de flotación, donde establece que todo cuerpo sumergido en un fluido sufre un empuje o fuerza vertical hacia arriba- igual al peso del fluido desalojado, es decir, cuando un cuerpo está sumergido en el fluido, opera una fuerza hidrostática, fruto de las presiones sobre la superficie del cuerpo, que actúa hacia arriba.

En función de este principio, la porosidad se calculó con base en la siguiente fórmula

$$P = 1 - \left(\frac{W_d - W_s}{V \cdot \rho} \right), \quad (3.45)$$

donde: W_d es el peso medido antes de la inmersión; W_s es el peso sumergido adquirido en la balanza; V el volumen total; y ρ es la porosidad del líquido desplazado.

3.7. Diseño y Análisis de Experimentos

Un experimento puede definirse como un conjunto o series de pruebas en las que intencionalmente se modifican las cantidades de las variables de entrada de un proceso cualquiera, para observar e identificar los cambios en las respuestas de salida (Gutiérrez Pulido et al., 2012; Montgomery, 2008), con el fin de establecer y esclarecer, que relación de interacción entre los componentes estudiados tienen mayor influencia o significancia en los resultados. De esta forma, los experimentos se usan para estudiar el desempeño de los procesos y sistemas que son representados en la figura 3.13, en la cual, tanto los factores controlables, como los factores no controlables son aspectos de interés, para el proceso y su resultado.

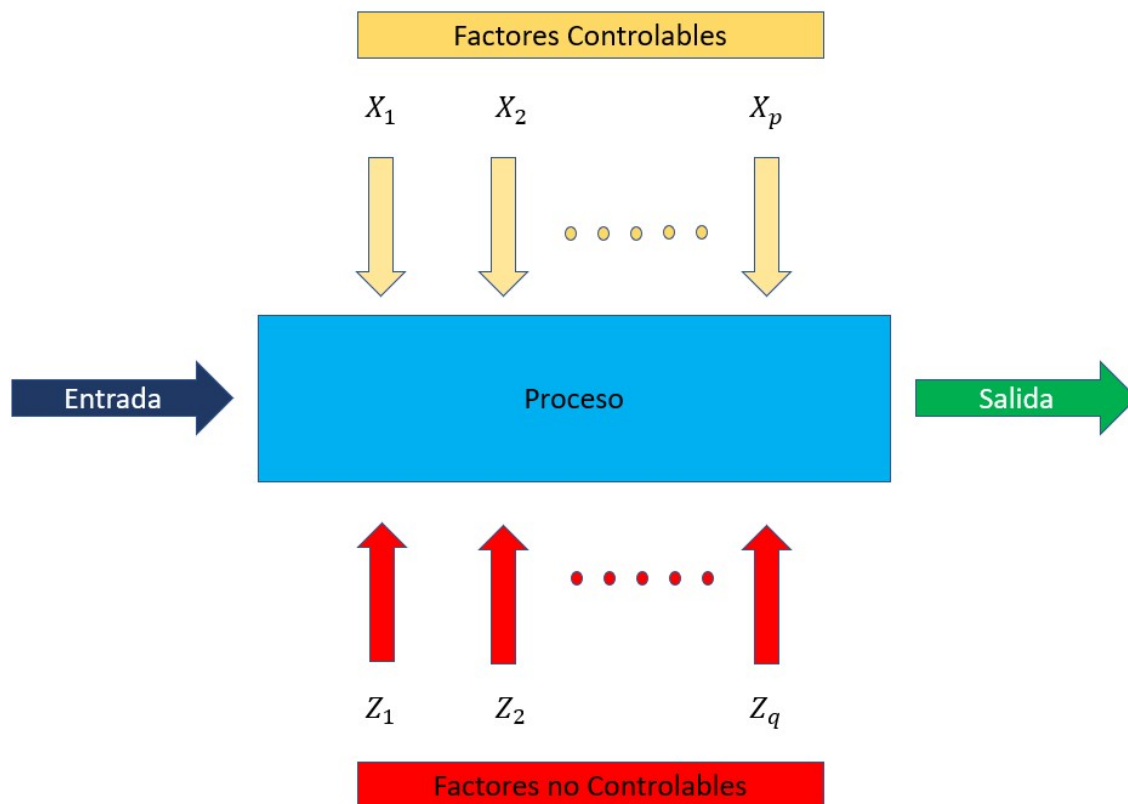


Figura 3.13: Modelo general de un proceso o sistema

Los objetivos del experimento podrían comprender los siguientes puntos (Montgomery, 2008):

1. Determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia en la respuesta a estudiar.
2. Determinar cuál es el ajuste de las variables controlables "X", que tienen mayor influencia para que la respuesta "Y" esté en el valor nominal esperado.

3. Determinar cuál es el ajuste de las variables controladas "X" que tiene mayor influencia, para que la variabilidad de la respuesta τ sea reducida.
4. Determina cuál es el ajuste de las "X" que tiene mayor influencia para que los efectos de las variables no controlables $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$ sean mínimos.

3.7.1. Análisis de Varianza

Las observaciones de un experimento se pueden escribir mediante un modelo, como

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}, \quad (3.46)$$

donde y_{ij} es la observación ij -ésima, μ_i es la media del nivel del factor o tratamiento i -ésimo, y ε_{ij} es un componente del error aleatorio que incorpora todas las demás fuentes de variabilidad del experimento. Estos componentes de los errores tienen media cero, de modo tal que el valor esperado de las observaciones son las medias de los tratamientos $E(y_{ij}) = \mu_i$, es decir, los errores no aportan en la variabilidad de la respuesta.

De esta forma, los datos se pueden expresar mediante un modelo de medias,

$$\mu_i = \mu + \tau_i, \quad (3.47)$$

y con ello, el modelo de los efectos se escribe de la siguiente manera,

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}, \quad (3.48)$$

donde μ es el parámetro de media global, τ_i es un parámetro único del tratamiento i -ésimo al que se le llama el efecto del tratamiento i -ésimo.

En base a lo expuesto, los objetivos son probar las hipótesis apropiadas acerca de las medias de los tratamientos y estimarlas. Para ello, se supone que los errores del modelo son variables aleatorias que siguen una distribución normal e independiente con media cero y varianza σ^2 constante.

$$y_{ij} \sim N(\mu + \tau_i, \sigma^2). \quad (3.49)$$

El interés se encuentra en probar la igualdad de las medias de los tratamientos, es decir $E(y_{ij}) = \mu + \tau_i = \mu_i$,

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a, \quad (3.50)$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j.$$

Pero también sabemos, que en el modelo de los efectos, la media de tratamiento se descompone en dos componentes $\mu_i = \mu + \tau_i$.

Es decir, la hipótesis puede escribirse como

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0, \quad (3.51)$$

$$H_1 = \tau_i \neq \tau_j,$$

dado que,

$$\frac{\sum_{i=1}^a \mu_i}{a} = \mu. \quad (3.52)$$

Por lo tanto, probar la igualdad de medias de los tratamientos o probar que los efectos de los tratamientos son ceros, es importante para estudiar las observaciones.

El procedimiento para estudiar la igualdad de medias de los a tratamientos es el análisis de varianza. Este análisis se deriva de la partición de la variabilidad total en sus partes componentes. Es decir, se toma la suma de cuadrados total corregida, que es una medida de la variabilidad global de los datos, y se particiona en sumas de cuadrados

$$SS_T = SS_{tratamientos} + SS_{error}. \quad (3.53)$$

- SS_{Trat} corresponde a la suma de cuadrados de las diferencias entre los promedios de los tratamientos y el gran promedio.
- SS_{err} corresponde a la suma de cuadrados de las diferencias dentro de los tratamientos y el promedio de los tratamientos.

Por ejemplo en la tabla 3.1:

Cuadro 3.1: Datos típicos para un experimento de un solo factor.

Tratamientos	Observaciones				Total	Promedios
1	y_{11}	y_{12}	$\dots$	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	$\dots$	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
a	y_{a1}	y_{a2}	$\dots$	y_{an}	$\frac{y_{a.}}{y_{..}}$	$\frac{\bar{y}_{a.}}{\bar{y}_{..}}$

$$SS_T = SS_{trata} + SS_{error}, \quad (3.54)$$

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n(\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2.$$

El análisis de varianza nos entrega dos estimaciones de σ^2 : una basada en la variabilidad inherente dentro de los tratamientos y una basada en la variabilidad entre los tratamientos. Si no hay diferencias en las medias de los tratamientos, estas dos estimaciones deberán ser muy similares, y si no lo son, se sospecha que las diferencias observada puede ser causada por diferencias en las medias de los tratamientos.

$$\begin{aligned} MS_{trat} &= \frac{SS_{trata}}{a-1}, \\ MS_E &= \frac{SS_E}{N-a}, \\ E(MS_E) &= \sigma^2, \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$E(MS_{trat}) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1}.$$

- Se ha supuesto que los errores ε_{ij} siguen una distribución normal e independiente con media 0 y varianza constante σ^2
- Las observaciones y_{ij} tienen una distribución normal e independiente con media $\mu + \tau_i$ y varianza σ^2
- Por lo tanto, según el teorema de Cochran las sumas de cuadrados, son variables aleatorias con una distribución normal. Por consiguiente, SS_T/σ^2 , SS_E/σ^2 y SS_{tra}/σ^2 tienen una distribución Ji-cuadrado.

Por lo tanto, si la hipótesis nula de que no hay diferencias en las medias de los tratamientos es verdadera, el cociente

$$F_0 = \frac{SS_{trat}/(a-1)}{SS_E/(N-a)} = \frac{MS_{trat}}{MS_E} \quad (3.56)$$

es el estadístico de prueba. En el caso de las probetas, las porosidades o familias de porosidades son aleatorias, dado que las porosidades aproximadas son aleatorias, y de la misma manera, implícitamente lo es la distribución.

El modelo estadístico lineal es

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}, \quad (3.57)$$

donde tanto τ_i como ε_{ij} son variables aleatorias. Si τ_i tiene varianza σ_τ^2 y es independiente de ε_{ij} ,

la varianza de cualquier observación es

$$V(y_{ij}) = \sigma_\tau^2 + \sigma^2. \quad (3.58)$$

Para probar las hipótesis en este modelo se requiere que los errores y parámetros de tratamientos sean normales e independientes.

A su vez, la suma de cuadrados se mantiene,

$$SS_T = SS_{tratamientos} + SS_E, \quad (3.59)$$

es decir, la variabilidad total de las observaciones se descompone en la variación entre los tratamientos y dentro de los tratamientos.

Probar la hipótesis acerca de los tratamientos individuales no tiene sentido, por lo que en su lugar se prueban hipótesis acerca del componente de la varianza

$$H_0 : \sigma_\tau^2 = 0, \quad (3.60)$$

$$H_1 : \sigma_\tau^2 > 0.$$

El estadístico F, provee información para ver si las variables son aleatorias o fijas, y de esta manera ver si puedo realizar un ANOVA de efectos fijos o también, si no es significativo, quiere decir que la variabilidad del parámetro aporta menos que el error a las observaciones:

$$E(MS_{Tratamientos}) = \sigma^2 + n\sigma_\tau^2, \quad (3.61)$$

$$E(MS_E) = \sigma^2.$$

Por los cuadrados medios esperados, se observa que bajo H_0 tanto el numerador como el denominador del estadístico de prueba son estimadores insesgados de σ^2 , mientras que bajo H_1 el valor esperado del numerador es mayor que el valor esperado del denominador. Por lo tanto, H_0 deberá rechazarse para los valores de F_0 que sean muy grandes.

Una decisión importante es la elección del tamaño de muestras, es decir, determinar el número de réplicas que deben correrse. Cuando se requiere detectar efectos pequeños, se necesitan más réplicas que cuando se requieren detectar efectos mayores.

El aumento del número de muestras, disminuye el error tipo II, el cual es la probabilidad de no rechazar la hipótesis nula, cuando esta es falsa.

$$\beta = P(\text{error tipo II}) = P(\text{rechazar } H_0/H_0 \text{ es verdadera}). \quad (3.62)$$

En ocasiones es más conveniente trabajar con la potencia de la prueba, donde

$$Poyencia = 1 - \beta = P(rechazar H_0/H_0 \text{ es falsa}). \quad (3.63)$$

3.7.2. Diseño de los Factoriales

Cuando en el experimento intervienen el efecto de dos o más factores, es recomendable utilizar el diseño factorial, el cual considera en su análisis el estudio de todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores, dando paso, al análisis de las interacciones o efecto cruzado de los factores. En este tipo de análisis el modelo de efectos se expresa en función de la cantidad de factores 3.64 modelo de dos factores, y 3.65 modelo de tres factores (Gutiérrez Pulido et al., 2012; Montgomery, 2008):

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad (3.64)$$

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}, \quad (3.65)$$

$$i = 1, 2, \dots, a,$$

$$j = 1, 2, \dots, b,$$

$$k = 1, 2, \dots, c,$$

$$l = 1, 2, \dots, n,$$

donde μ es el efecto promedio global, τ_i es el efecto de nivel i -ésimo del factor primario, β_j es el efecto del nivel j -ésimo del factor secundario, γ_k es el efecto del nivel k -ésimo del tercer factor, cuando se presentan dos factores juntos son la interacción entre ellos y ε_{ijkl} es un componente de error aleatorio. Las hipótesis a probar en este análisis, son las mismas del análisis de varianza, pero extendidas a los factores e interacciones que se suscitan por tener más factores experimentales.

Dentro del diseño factorial se encuentra el análisis de tres niveles o denominado diseño factorial 3^k , que se caracteriza por ser un arreglo factorial de k factores que poseen tres niveles cada uno 3.65. Generalmente para representar estos niveles de los factores, se utilizan los dígitos 0 (bajo), 1 (intermedio) y 2 (alto).

En este trabajo se realizó un análisis factorial de tres niveles con repeticiones, y la suma de cuadrados utilizadas se presenta en las siguientes tablas 3.2 y 3.3

Cuadro 3.2: Suma de cuadrados factores

SCT	$\sum_{i,j,k,l} y_{ijkl}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn}$
SCA	$\frac{\sum_i y_{i...}^2}{bcn} - \frac{y_{....}^2}{abcn}$
SCB	$\frac{\sum_j y_{.j..}^2}{acn} - \frac{y_{....}^2}{abcn}$
SCC	$\frac{\sum_k y_{..k.}^2}{abcn} - \frac{y_{....}^2}{abn}$

Cuadro 3.3: Suma de cuadrados de las interacciones

SC(AB)	$\frac{\sum_{i,j} y_{ij..}^2}{cn} - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SCA - SCB$
SC(BC)	$\frac{\sum_{j,k} y_{.jk.}^2}{an} - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SCB - SCC$
SC(AC)	$\frac{\sum_{i,k} y_{i.k.}^2}{bn} - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SCA - SCC$
SC(ABC)	$\frac{\sum_{i,j,k} y_{ijk.}^2}{n} - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SCA - SCB - SCC - SC(AB) - SC(AC) - SC(BC)$
SCE	$SCT - SCA - SCB - SCC - SC(AB) - SC(AC) - SC(BC) - SC(ABC)$

En este modelo, el objetivo del análisis es realizar los contrastes de hipótesis nula que, junto al estadístico de contrastes se muestran en la tabla 3.5.

Cuadro 3.4: Hipótesis nula y estadístico de contraste

$H_{0A} \equiv \tau_1 = \cdots = \tau_a = 0$	$F_A = \frac{CMA}{CME}$	$F_{(a-1),abc(n-1)}$
$H_{0B} \equiv \beta_1 = \cdots = \beta_b = 0$	$F_B = \frac{CMB}{CME}$	$F_{(b-1),abc(n-1)}$
$H_{0C} \equiv \gamma_1 = \cdots = \gamma_c = 0$	$F_C = \frac{CMC}{CME}$	$F_{(c-1),abc(n-1)}$
$H_{0(AB)} \equiv (\tau\beta)_{ij} = \cdots = 0$	$F_{AB} = \frac{CM(AB)}{CME}$	$F_{(a-1)(b-1),abc(n-1)}$
$H_{0(AC)} \equiv (\tau\gamma)_{ik} = \cdots = 0$	$F_{AC} = \frac{CM(AC)}{CME}$	$F_{(a-1)(c-1),abc(n-1)}$
$H_{0(BC)} \equiv (\beta\gamma)_{jk} = \cdots = 0$	$F_{BC} = \frac{CM(BC)}{CME}$	$F_{(b-1)(c-1),abc(n-1)}$
$H_{0(ABC)} \equiv (\tau\beta\gamma)_{ijk} = \cdots = 0$	$F_{ABC} = \frac{CM(ABC)}{CME}$	$F_{(a-1)(b-1)(c-1),abc(n-1)}$

El análisis de varianza del modelo factorial de tres factores con repeticiones, se ilustra en la tabla

Cuadro 3.5: Hipótesis nula y estadístico de contraste

F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	F_{exp}
Factor A	SCA	$a - 1$	CMA	$\frac{CMA}{CME}$
Factor B	SCB	$b - 1$	CMB	$\frac{CMB}{CME}$
Factor C	SCC	$c - 1$	CMA	$\frac{CMA}{CME}$
AxB	SC(AB)	$(a - 1)(b - 1)$	CM(AB)	$\frac{CM(AB)}{CME}$
AxC	SC(AC)	$(a - 1)(c - 1)$	CM(AC)	$\frac{CM(AC)}{CME}$
BxC	SC(BC)	$(b - 1)(c - 1)$	CM(BC)	$\frac{CM(BC)}{CME}$
AxBxC	SC(ABC)	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	CM(ABC)	$\frac{CM(ABC)}{CME}$
Error	SCE	$abc(n - 1)$	CME	
Total	SCT	$abcn - 1$	CMT	

Capítulo 4

Metodología

4.1. Características de los materiales porosos en estudio

Para el desarrollo de esta investigación, todas las espumas y modelos computacionales, poseen el mismo volumen de control, el cual se caracteriza por ser de forma cilíndrica con un radio de $R = 24 \text{ mm}$, y una altura de $H = 24 \text{ mm}$, como se ilustra en la figura 4.2 por lo que, la relación diámetro/altura es de 1[-].

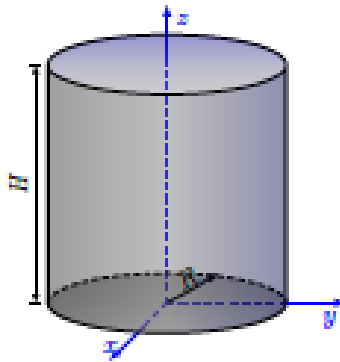


Figura 4.1: Volumen de control de forma cilíndrica del cual se establecerá para las espumas de PLA y modelos asistidos por computadora (Perez Trigo, 2019).

Con el fin de establecer una contrastación robusta y estadísticamente significativa, se estudian tres casos con diferentes patrones microestructurales, que dependen de la relación de cantidad de tamaño de poros. Donde cada poro, se considera con una configuración geométrica esférica, lo cual ha demostrado ser eficiente en otros trabajos (Baino & Fiume, 2020), y a su vez, permite esquematizar la microestructura de la espuma, por medio de un fractal con cuasi-similitud, es decir, modelar la relación de autosemejanza entre los macro y micro poros.

Los tres casos, se presentan en la figura 4.2

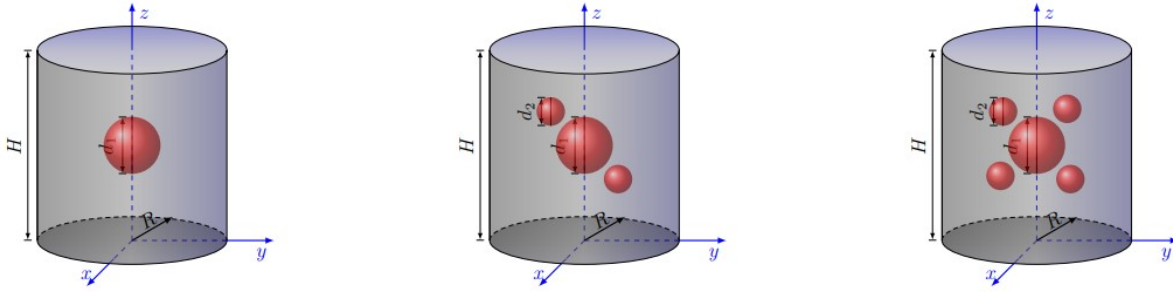


Figura 4.2: Representación cantidad de tamaño de poros (Perez Trigo, 2019).

- Caso 1: Relación de tamaño de poros 1:1. Las espumas poseen un tamaño de poro constante de 4 milímetros de diámetros ($d_1 = 4 \text{ mm}$).
- Caso 2: Relación de tamaño de poros 2:1. Cada dos poros de 2 milímetros de diámetro ($d_1 = 2 \text{ mm}$), se halla uno de 4 milímetros de diámetros ($d_2 = 4 \text{ mm}$).
- Caso 3: Relación de tamaño de poros 4:1. Por cada 4 poros de diámetro de 2 milímetros ($d_1 = 2 \text{ mm}$), hay un poro de 4 milímetros de diámetros ($d_2 = 4 \text{ mm}$).

A su vez, cada uno de estos tres casos de estudio, poseen 12 espumas con diferentes porcentajes de porosidad que van desde el 60 % hasta 75 %, y se clasifican en cuatro rangos importantes, como se presenta en la Tabla 4.1.

Cuadro 4.1: Clasificación geométricas de los modelos en estudio

Tamaño de poro	N° de Espumas	% Porosidad	Espumas por porosidad
1 a 1	12	60 %, 65 %, 70 % y 75 %	3
2 a 1	12	60 %, 65 %, 70 % y 75 %	3
4 a 1	12	60 %, 65 %, 70 % y 75 %	3

Generalmente el estudio de las propiedades mecánicas de los sólidos porosos, consiste en observar y caracterizar bajo diferentes herramientas tecnológicas, los aspectos morfológicos y topológicos de los materiales porosos, para su posterior análisis experimental y estimación de propiedades mecánicas, mediante el diseño o modelación asistida por computador, acoplado con técnicas numéricas, como el método de los elementos finitos. Sin embargo, el presente trabajo realiza un procedimiento inverso a este, dado que comienza con la creación de los sólidos porosos mediante técnicas matemáticas, por medio del método de los elementos discretos y finitos, para su posterior simulación, fabricación y análisis experimental. De esta forma, la metodología se divide entre una parte computacional y una parte experimental, que juntas componen y tributan el procedimiento mostrado en la figura 4.3

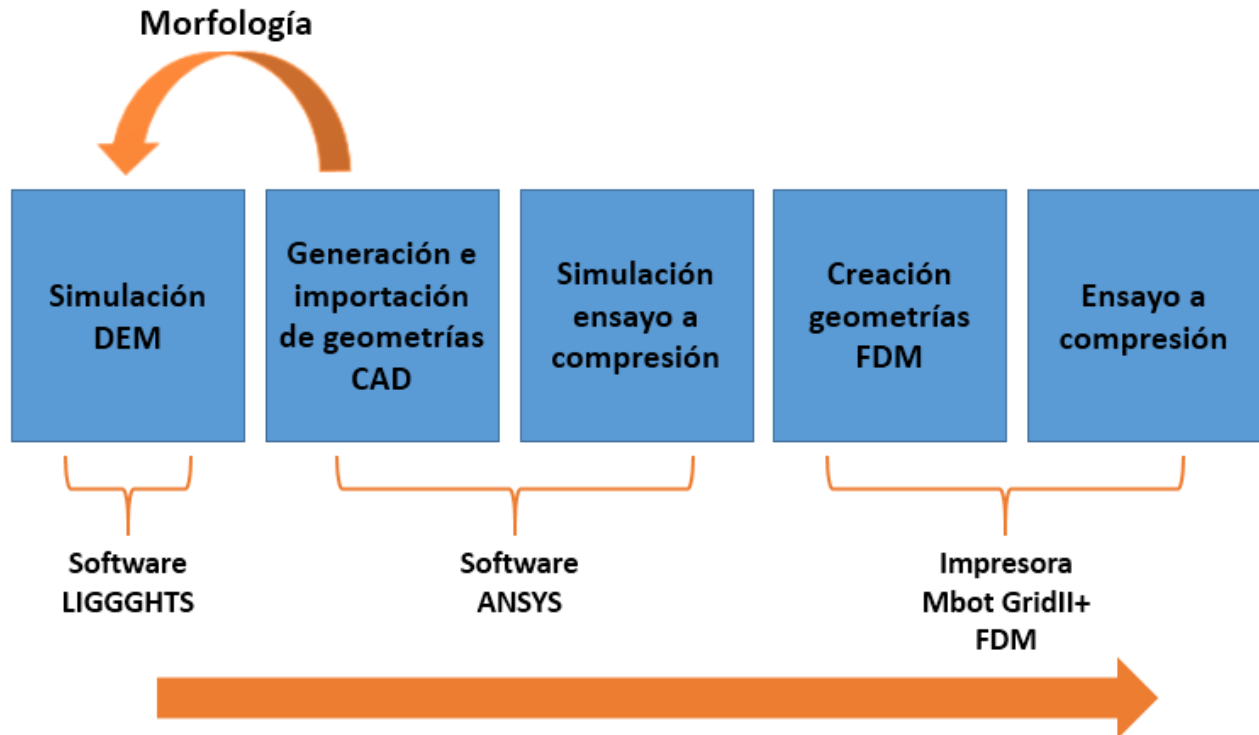


Figura 4.3: Procedimiento para generar y simular geometrías de espumas de PLA con los respectivos softwares a utilizar.

El procedimiento de la figura 4.3 consta de cinco pasos generales, iniciando con la generación de los modelos, mediante el acople del método de los elementos discretos con el método de los elementos finitos, para realizar las simulaciones numéricas del ensayo a compresión, como también proveer la información estructural de los modelos, para su fabricación en la técnica de fabricación aditiva, y posterior ensayo a compresión.

Los pasos del procedimiento que pertenecen a la metodología computacional son los siguientes

- i) Simulación mediante el método de los elementos discretos.
- ii) Generación e importación de las geometrías al diseño asistido por computadora, mediante el software comercial de elementos finitos ANSYS.
- iii) Simulación numérica de compresión uniaxial.

Por otra parte, los pasos del procedimiento que pertenecen a la metodología experimental son

- i) Fabricación de las geometrías, mediante deposición fundida.
- ii) Ensayo de compresión uniaxial.

4.2. Metodología Computacional

4.2.1. Elemento de Volumen Representativo

Para la creación y modelación de los materiales porosos de estudio, se utiliza la técnica de multiescala, conocida como homogeneización computacional, y se desarrolla mediante la información entregada por la relación de tamaño de poros, que es proporcionada por el análisis fractal desarrollado en estudios previos (Perez Trigo, 2019).

Esta técnica se cimienta en la derivación de la respuesta constitutiva macroscópica desde la microestructura interna, por medio de la definición de un elemento de volumen representativo (RVE), que se define como aquel volumen microestructural más pequeño, que representa de forma suficientemente precisa las propiedades macroscópicas generales de interés, que depende del tipo de comportamiento del material, ruta de carga macroscópica y diferencia de propiedades entre heterogeneidades.

El volumen de elemento representativo utilizado en este estudio, fue desarrollado por Pablo Perez (Perez Trigo, 2019), y se caracteriza por ser un dominio cilíndrico, con una altura de 24 milímetros y un diámetro de 24 milímetros.

4.2.2. Información centro de poros

Las espumas reales, se caracterizan por una topología aperiódica, no uniforme y desordenada, por lo tanto, aquellos trabajos de investigación que han utilizado arreglos de poros no estructurados, mediante técnicas matemáticas aleatorias, proveen un comportamiento más realista.

Por ende, para crear los modelos de espumas o materiales porosos de estudio, se utilizan dos etapas; la primera es un pre-proceso, y consiste en generar un modelo de esferas o centro de poros, distribuidas de forma no estructurada en un cierto volumen de control, que en este caso es el RVE previamente explicado.

Para ello, se usa la técnica numérica de método de los elementos discretos, utilizando el software de código abierto, llamado LIGGGHTS. Las condiciones de inserción de las partículas fueron (Pérez, Lascano, Aguilar, Estay et al., 2015);

1. Alta velocidad.
2. Alto coeficiente de restitución y bajo módulo de Young.
3. Dominio del problema, con una gravedad cercana a cero.

De esta forma, el software LIGGGHTS, realiza simulaciones en que una cierta cantidad de partículas con un tamaño dado, colisionan dentro de un volumen de control, produciendo aleatoriedad

de sus posiciones en distintos instantes de tiempo. Esta distribución, permite ubicar los centro de las esferas, o poros a modelar, como se muestra en la figura 4.4(Perez Trigo, 2019):

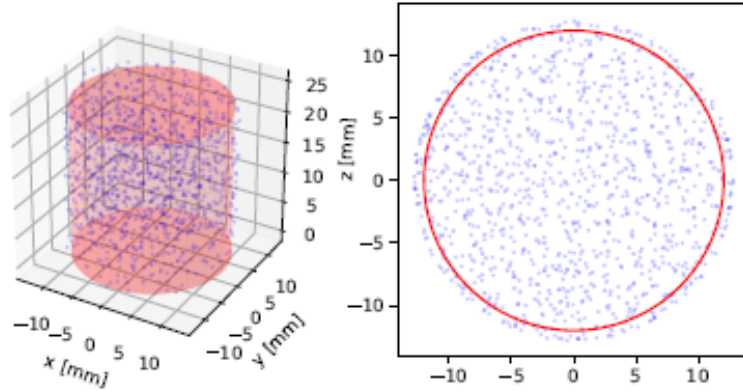


Figura 4.4: Ubicación de los centros de las esferas, obtenidos en LIGGGTHS.

4.2.2.1 Generación del material sólido

La segunda etapa del pre-procesado, utiliza los centro de los poros obtenidos con el DEM, para la generación de las espumas finales. Esto, se lleva a cabo, mediante el uso de un código de javascript, que se ejecuta en el modulo de ANSYS *Design Modeler*. El algoritmo de este código contiene operaciones sistémicas, que se traducen a dos pasos generales:

- i) Creación del un cilindro sólido, de las dimensiones del elemento de volumen representativo.
- ii) A cada centro coordenado, se le asigna una esfera con los diámetros $d = 4$ mm o $d = 2$ mm, en función de la relación de tamaño de poro utilizada.
- iii) Extracción o remoción de material, en aquellas esferas, ubicadas en los centros de poros, dados por del DEM.

Los tres pasos de este algoritmo, se aprecia la figura 4.5 (Perez Trigo, 2019):

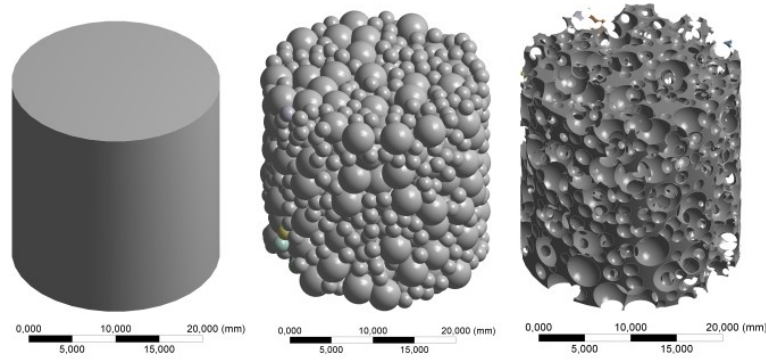


Figura 4.5: Proceso de fabricación material poroso.

4.2.3. Modelado y simulación numérica en ANSYS ®

El proceso de modelado y simulación numérica de los sólidos porosos, se lleva a cabo en la plataforma ANSYS ® *Workbench*, donde se utiliza el módulo *Static Structural*, presentado en la figura 4.6.

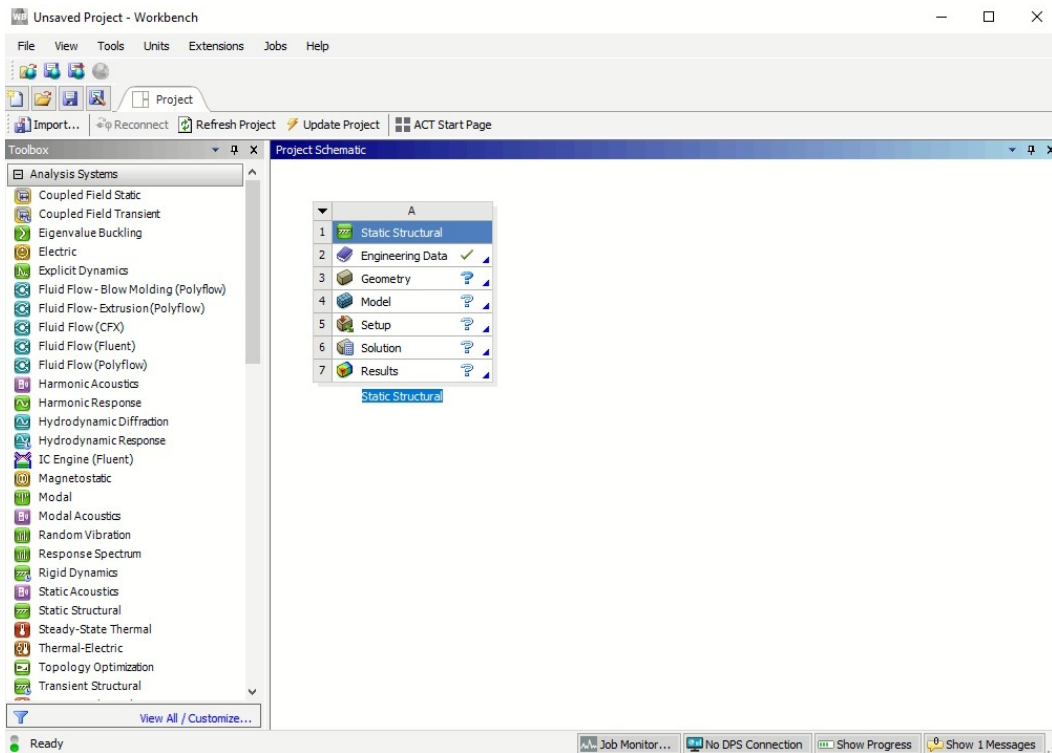


Figura 4.6: Plataforma de trabajo ANSYS ® *Worbench*, junto con la opción *Static Structural*

Este módulo permite estudiar el efecto de una carga constante o estática, sobre el modelo en estudio. Además, en esta opción de análisis, se debe asignar el tipo de material, junto con las

condiciones de contorno, borde, tipo de malla, entre otros.

La generación del sólido poroso, se realiza mediante la opción *Design-Modeler* en este mismo módulo *Static structural*. Para ello, se compila el script por medio de la operación *run script*, como se ilustra en la figura 4.7.

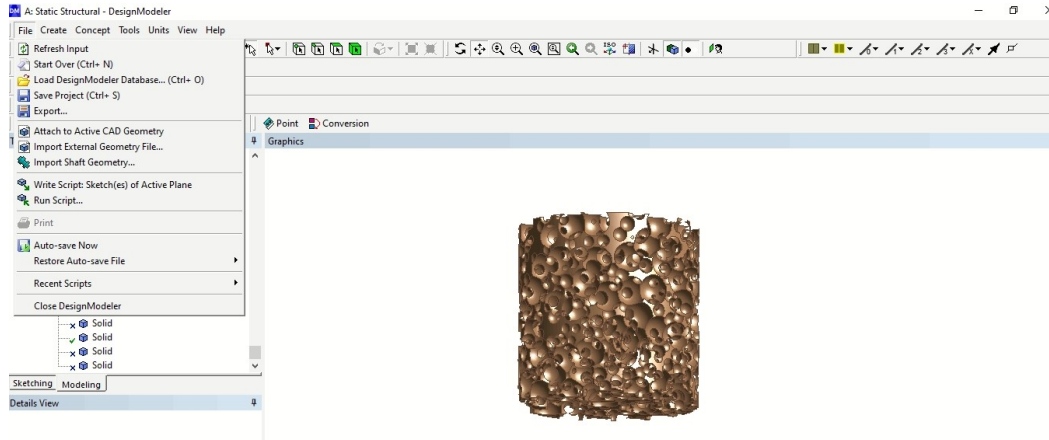


Figura 4.7: Sólido poroso, obtenido por medio del Script compilado en *Design modeler*.

4.2.3.1 Asignación de Material

En la operación de asignación de material, se utiliza las propiedades de una muestra impresa sólida de ácido poliláctico (PLA), que es caracterizada mediante un ensayo a compresión cuasi-estático, según la norma ASTM D695-16.

El PLA no se encuentra en la libreta de ANSYS, por lo que, es necesario introducir las propiedades en este step, como se ilustra en la figura 4.8.

En caso que se sobrepase el esfuerzo de fluencia en alguna zona del modelo en la simulación numérica, se escoge como material base, un material con propiedades elásticas no lineales, así se asegura que zonas localizadas con concentradores de esfuerzos no aumenten en sobremedida debido a la activación de mecanismos plásticos.

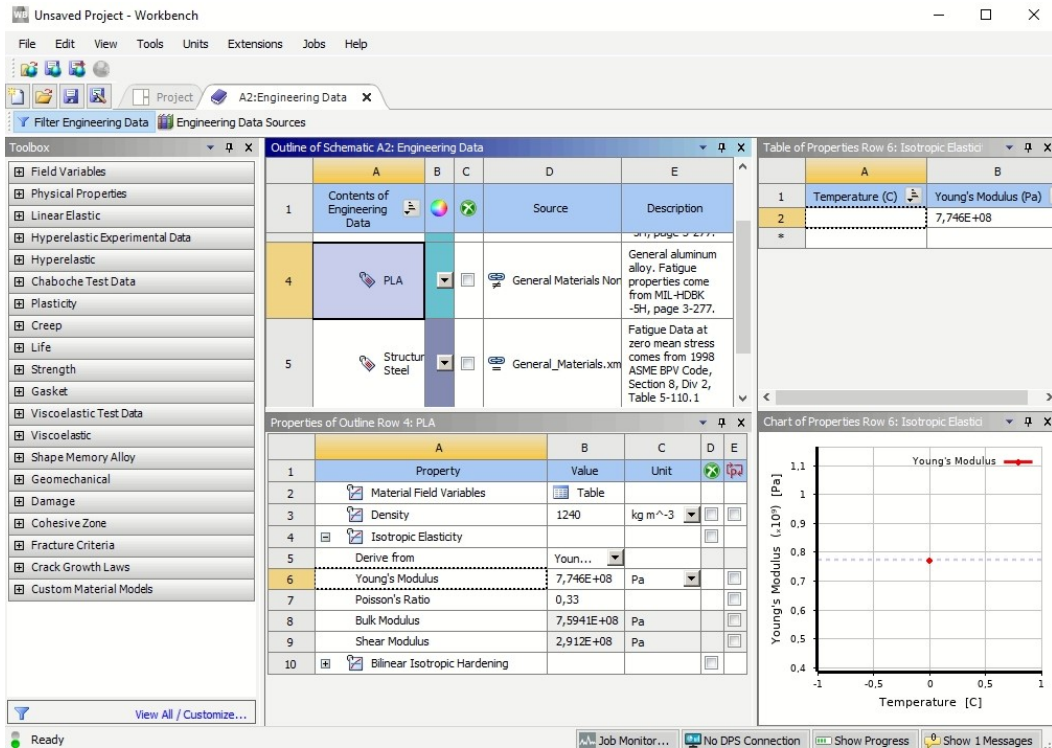


Figura 4.8: Asignación de propiedades a los modelos porosos en estudio.

4.2.3.2 Generación de Malla

Para la discretización espacial del modelo se utilizan parámetros generales del programa, con el fin de tener un mallado relativamente constante para todas las muestras, a pesar que estas, poseen una distribución no estructura totalmente diferente.

Los parámetros utilizados, son:

- *Relevant Center*=4
- *Smoothing*=High
- *Transition*=Slow
- *Span angle Center*= Medium

4.2.3.3 Condiciones de Contorno

Para minimizar las discrepancias entre los resultados numéricos de la simulación y los obtenidos en pruebas experimentales, se aplicaron condiciones de contorno para replicar fielmente los parámetros y restricciones presentes durante los experimentos físicos.

En la simulación numérica, se aplicó un soporte sencillo a la cara inferior del sólido poroso, mientras que se impuso un desplazamiento uniforme en la cara superior, emulando las condiciones experimentales. Estas condiciones aseguran que el desplazamiento se distribuya por toda la superficie superior de la muestra, reproduciendo el contacto completo de la prensa con el sólido poroso experimental. Sin embargo, la selección manual de dichas superficies son bastantes complejas, y pueden inducir al error, dado que poseen discontinuidades importantes debido a la interconexión de los poros.

Por ende, para la asignación de condiciones de contorno, se utiliza la herramienta *Named Selection*, la cual proporciona la capacidad de seleccionar todas las superficies asociadas a cierta altura, y con ello, agrupar dicha selección, para posteriormente asignar las condiciones de contorno necesarias.

Las alturas utilizadas para ello, son $z = 0$ y $z = H$, correspondientes a la superficie inferior y superior respectivamente. A su vez, las opciones de *Named Selection* se cambia el método de alcance *Scoping Method* por *Worksheet* y se rellenan las casillas, de los parámetros mostrados en la figura 4.9.

Worksheet

Selection

Generate

Note: Internal comparisons of values that have units are done in the CAD Unit System. See help for more information.
Current CAD Unit System: Metric (m, kg, N, s, V, A)

	Action	Entity Type	Criterion	Operator	Units	Value	Lower Bound	Upper Bound	Coordinate System
☒	Add	Face	Location Z	Equal	mm		N/A	N/A	Global Coordinate Sy...
☒	Convert To	Mesh Node	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Figura 4.9: Parámetros para selección de superficies en *Worksheet* de *Named Selection*

El resultado de la selección de la cara superior e inferior, se aprecia en las figuras 4.10 y , 4.11 respectivamente.

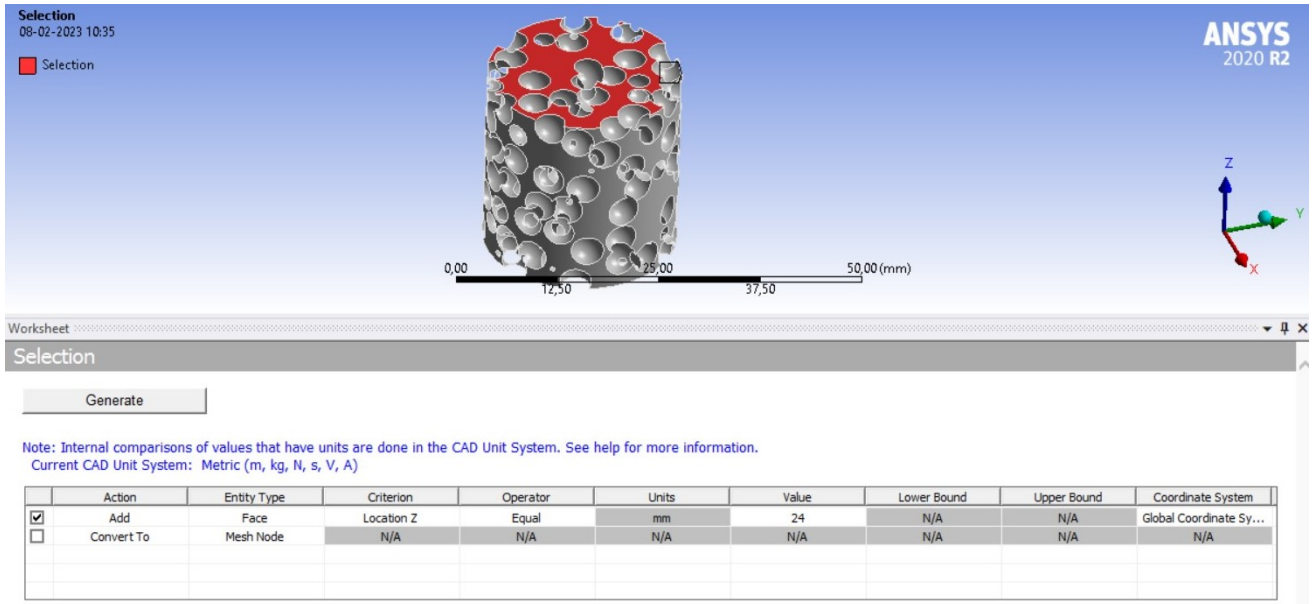


Figura 4.10: Selección de superficies en la cara superior ($z = H$)

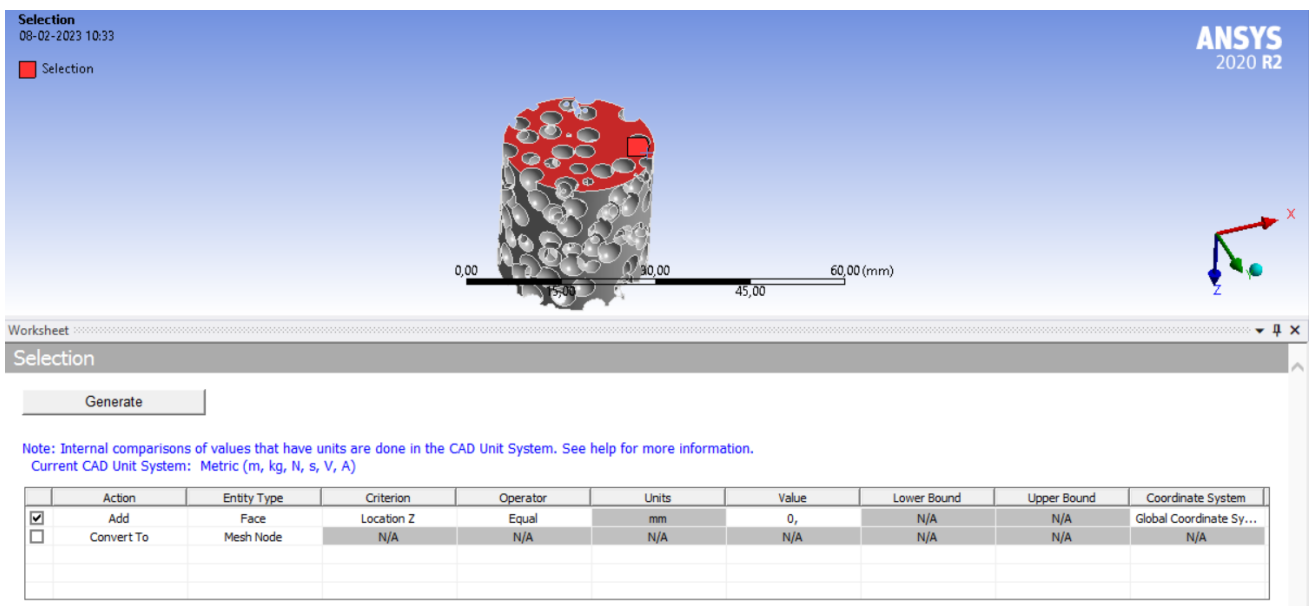


Figura 4.11: Selección de superficies en la cara inferior ($z = 0$)

Una vez, con las superficies seleccionadas se aplican las condiciones de contorno.

- Para la superficie inferior ($z = 0$) se impone la condición de desplazamiento nulo en el eje z y libre en los demás ejes, con esto, se busca limitar el desplazamiento en esa dirección. Junto a ello, el libre desplazamiento en los otros dos ejes, asimila el contacto de simplea apoyo entre la probeta y la máquina de compresión.

Esta selección, se lleva a cabo en la opción de *Displacement* en la interfaz *Mechanical* ilustrado en la figura 4.12.

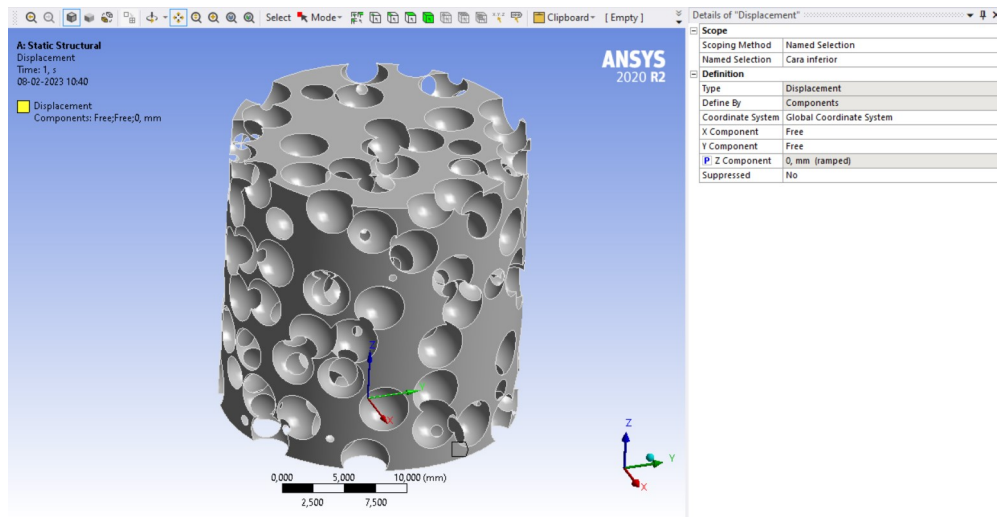


Figura 4.12: Asignación condición de contorno en la cara inferior ($z = 0$)

- Para la superficie superior ($z = H$) se impone un desplazamiento de $-1E-4$ [mm] solo en el eje z , con la herramienta *Remote displacement* en la interfaz *Mechanical*. De esta manera, se simula el contacto simple entre el plato de compresión y la probeta. A su vez, se selecciona la opción *coupled*, la cual permite acoplar el desplazamiento de todos los nodos en esa superficie, como se presenta en la figura 4.13.

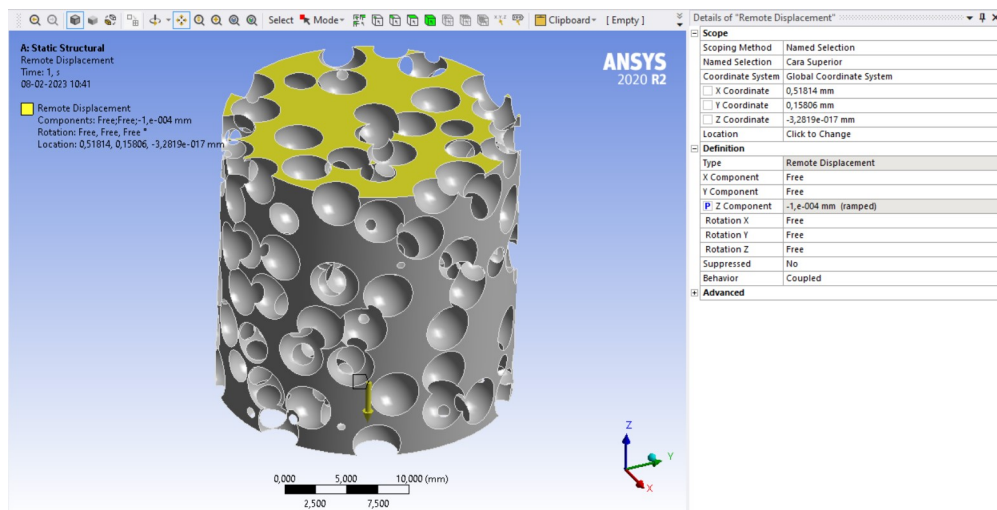


Figura 4.13: Asignación condición de contorno en la cara superior ($z = H$)

De esta forma, la condiciones de contorno aplicadas al modelo, permiten simular el ensayo a compresión desarrollado de forma experimental.

4.2.3.4 Obtención de Resultados

El resultado requerido para determinar el módulo elástico, es la fuerza de reacción en la base del modelo, por lo que, se selecciona la opción *Force reaction* en la condición de borde de *Displacement* correspondiente a la cara inferior, y por último, se seleccionan las casillas de *Result* en el eje z y en *total*, ilustrado en la figura 4.14

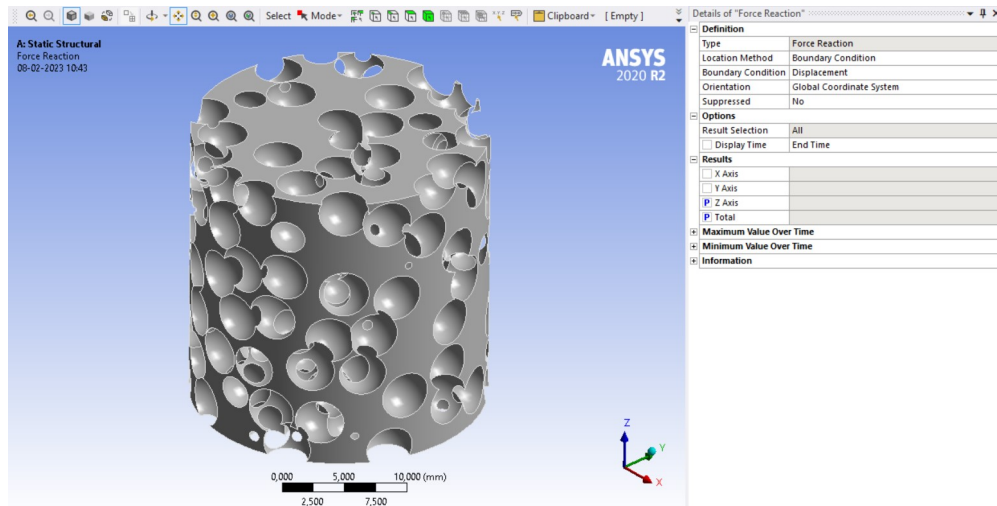


Figura 4.14: Selección fuerza de reacción en la cara inferior del modelo ($z = 0$).

4.3. Metodología Experimental

Para un adecuado análisis de resultados, de los ensayos experimentales es preponderante, tener en cuenta el error tipo I y tipo II, del análisis estadístico.

Es por ello, que la cantidad de muestras determinadas en este trabajo para realizar los ensayos a compresión, dependen del error tipo II, dado que mientras menor es este, mayor es la sensibilidad de los análisis, lo que implica calcular el estadístico de prueba, de forma segura, con poca incertidumbre. En este estudio, el nivel de significación de los ensayos es de 0.05.

Según la norma de ensayo a compresión, para materiales fabricados con el método de deposición fundida, establece que el número de replicas a considerar en el tamaño muestral, para un controlado error tipo II es de 5[-]. Por lo tanto, cada uno de los cuatro rangos de porosidad, para cada relación de tamaño de poros, posee 15 probetas, dando un total de 180[-] ensayos a compresión.

4.3.1. Generación Modelo mediante Archivo Informático .STL

Los modelos se generan mediante la manufactura aditiva utilizando como información principal, las geometrías en formato .stl creadas en ANSYS ®. Para ello, se exportó la malla de los sólidos porosos diseñados por DEM-FEM, y se procesaron mediante el programa de la impresor Mbot gri II, como se muestra en la figura 4.15

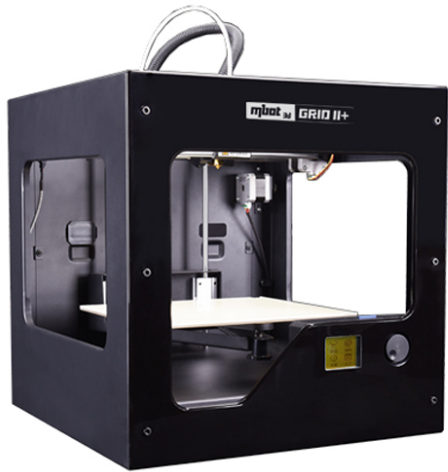
MBot GridII+		
Resolución de impresión	0.3mm - 0.15mm	
Volumen construcción	235x210x180mm	
Temperatura extrusión	210°C-260°C	
Entrada de archivo	Tarjeta SD/PC(*.x3g)	
Panel de control	Ingles/Mandarin Control por boton de rueda	
Tamaño de impresora	405x405x405mm	
Velocidad de construcción	50-120 mm/s	
Fuente	110V/220V 50Hz/60Hz 150W	
Software de impresión	Mprint	
Sistema operativo	Win 7/10 Mac OX	
Archivos soportados	STL	
Peso	33.5 KG	

Figura 4.15: Especificaciones Mbot GridII +

La impresora Mbot, utiliza el software Mprint, el cual toma archivos de geometrías en formato *.STL y genera un archivo en formato *.X3G, en el cual va incluido el algoritmo que deberá seguir el cabezal de impresión durante la generación de la pieza.

Este software permite opciones como porcentaje de relleno de la pieza, base de impresión, resolu-

ción, temperatura de extrusión, velocidad de extrusión, la altura de la primera capa, entre otros. De esta forma, una vez que el archivo del modelo se importa en formato *.STL, crea una vista previa de objeto a imprimir, con los rastros para cada capa y el tiempo estimado de impresión.

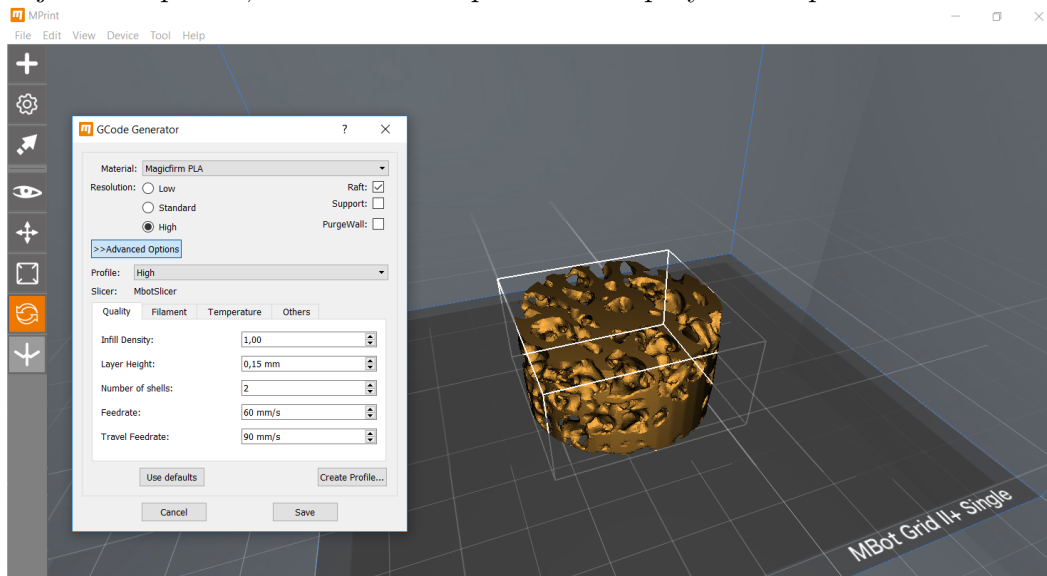


Figura 4.16: Interfaz MPrint con las especificaciones de impresión

Por otro lado, la impresora tiene dos cabezales que están programados para mantener una distancia mínima de 20 mm, evitando colisiones entre sí. Estos cabezales se mueven con respecto a los ejes horizontales, mientras que la base realiza los movimientos en el eje vertical. Antes de comenzar cada impresión, la impresora se calibra automáticamente utilizando sensores táctiles en cada eje para definir el espacio de impresión en el que funcionará. El espacio de impresión máximo corresponde a 200x200x200 mm.

4.3.2. Procedimiento Diseño de Experimentos

La robustez de la significancia estadística en el análisis de experimentos, se encuentra sujeta al cumplimiento de diferentes hipótesis, que exigen la aleatorización de los ensayos. Para cumplir con dicho requerimiento, tanto el orden de impresión, como orden de compresión fueron aleatorizados completamente.

Previo a realizar la aleatorización, se debe ordenar y enumerar las 180 impresiones, como se muestran en la tabla 4.2.

El orden y enumeración desarrollado y presentado en la tabla 4.2, consiste en dos aspectos importantes; el primero en agrupar la probetas por la relación de tamaño de poros (1:1, 2:1 y 4:1), es decir, en tres grupos, y el segundo, en ordenar de forma ascendente los porcentajes de porosidades.

Cuadro 4.2: Orden y enumeración de los sólidos porosos en estudio.

Relación tamaño de poros					
1:1		2:1		4:1	
Porosidad (%)	N°	Porosidad (%)	Nro	Porosidad (%)	N°
60.0611	1-5	60.0786	61-65	59.7784	121-125
60.0648	6-10	60.1017	66-70	59.7968	126-130
61.0374	11-15	60.1192	71-75	59.8254	131-135
65.1139	16-20	64.9619	76-80	64.4389	136-140
65.2954	21-25	64.9564	81-85	64.4443	141-145
65.3424	26-30	64.7568	86-90	64.4517	146-150
69.9153	31-35	69.4723	91-95	69.3912	151-155
69.9253	36-40	69.4750	96-100	69.4189	156-160
69.9623	41-45	69.4769	101-105	69.4446	161-165
74.7553	46-50	75.6469	106-110	74.9991	166-170
75.1285	51-55	75.6978	111-115	74.9930	171-175
75.1320	56-60	75.6635	116-120	74.9920	176-180

La figura 4.17 ilustra la primera aleatorización desarrollada con la función *Aleatorio*, de la herramienta informática *Excel*.

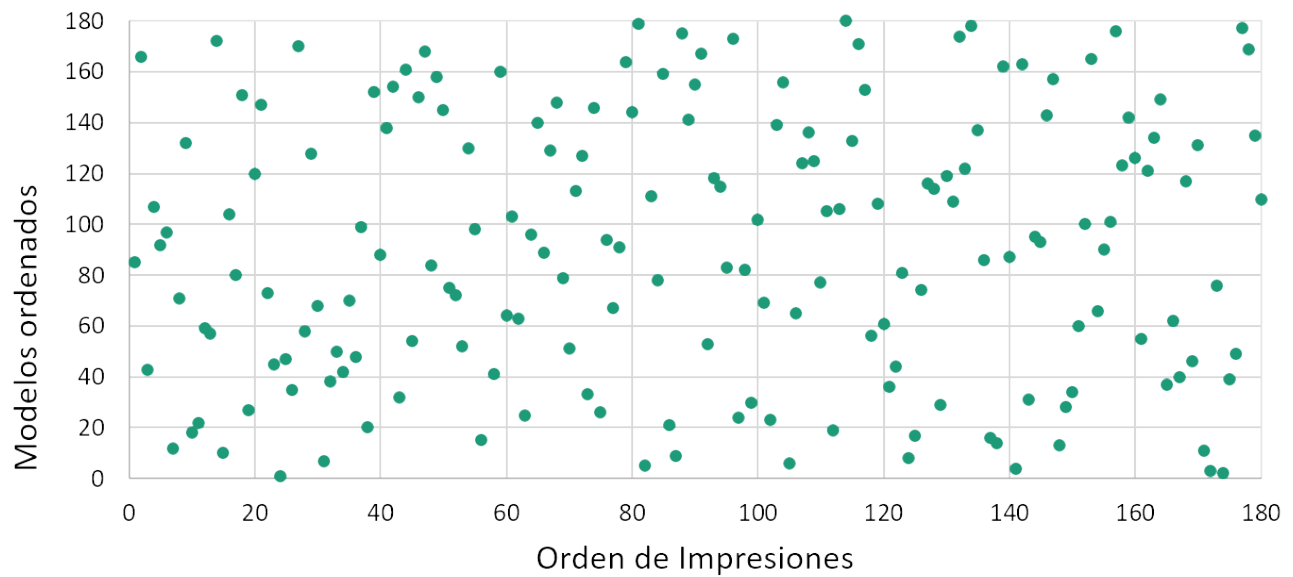


Figura 4.17: Aleatorización del orden de impresiones, para que el error tenga una distribución normal.

Con ello, se busca reducir cualquier tipo de ruido del proceso de impresión, como el error y sesgo de impresión, permitiendo así, que los resultados de las impresiones, no tengan alguna tendencia o influencia de un parámetro desconocido a medida que se realizan las 180 impresiones. Posterior al proceso de impresión, se realiza una nueva aleatorización con el mismo propósito anterior. Donde el nuevo orden de compresión de ilustra en la figura 4.18.

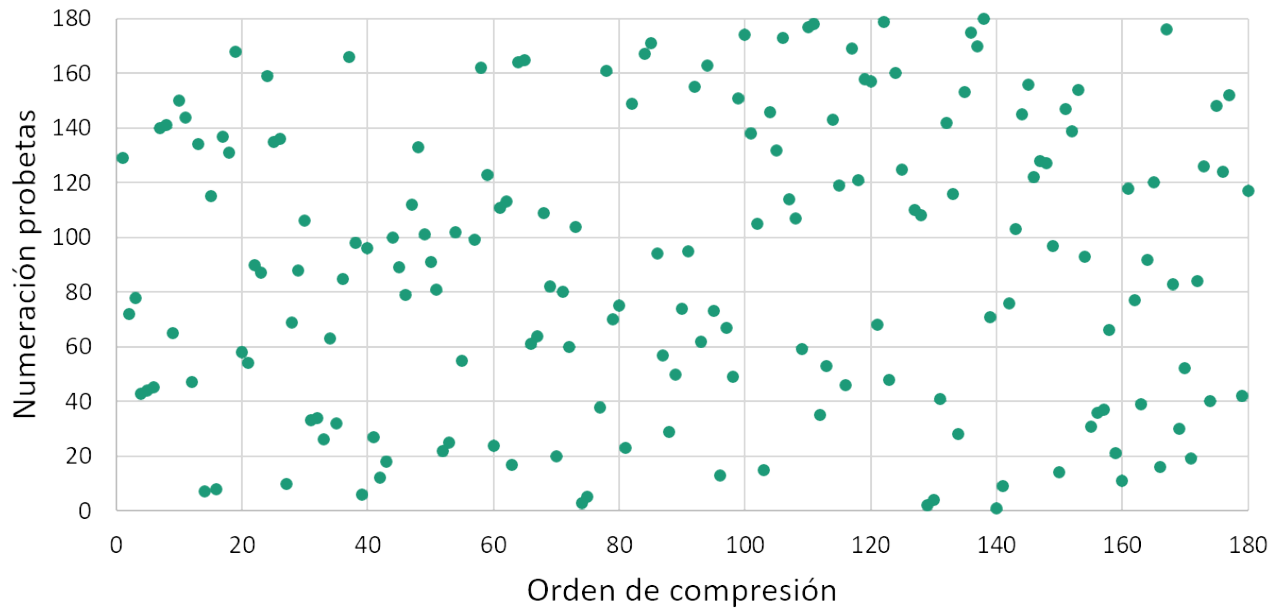


Figura 4.18: Aleatorización del orden de compresión, para que no exista error y sesgo de impresión, sobre los resultados del módulo elástico aparente.

4.3.3. Impresión 3D

Como se muestran en la figura 4.19, la fabricación de los casos de estudios, se desarrollaron mediante la impresora Mbot GridII+. Además, para cada sesión de impresión, se fabricaron 4 modelos de forma simultanea, que obedecen al orden de impresión aleatorizado.

Esta configuración de 4 modelos simultaneos, se obtuvo a raíz de ensayos previos, con el fin de conocer el máximo número de impresión en cada sesión, junto con la mejor resolución posible. De esta, forma se verificó que la impresora no presenta errores de procedimiento, para este número de impresiones.

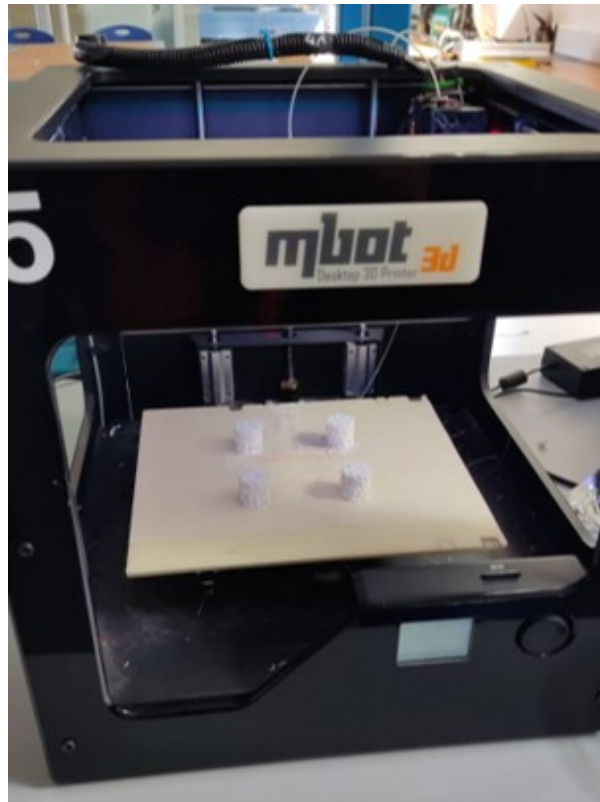


Figura 4.19: Impresión de cuatro sólidos porosos de forma simultaneas en la impresora Mbot GridII +

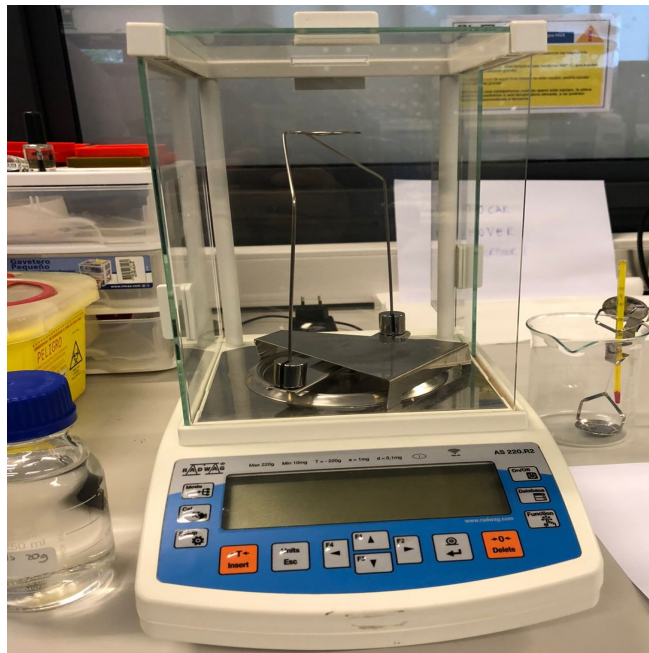
La ubicación de las 4 muestras en la cama de impresión, se realizo de forma aleatoria.

4.3.4. Medición de Porosidad

La porosidad de cada probeta impresa, se mide con la balanza analítica de masas pequeñas *Radwag AS 220-C2*, que se presenta en la figura 4.20a y 4.20b.



(a)



(b)

Figura 4.20: Balanza de masas pequeñas RADWAF AS 220-C2.

En la figura 4.20a se presenta la balanza encendida, con los implementos necesarios en su interior, como el frasco de vidrio con alcohol al 95 %, para medir la porosidad mediante el principio de arquímedes.

Esta representa el nivel estándar de balanzas analíticas, y su ficha de datos se presenta en la tabla 4.3:

Cuadro 4.3: Parámetros técnicos de la balanza RADWAF AS 220-C2

Capacidad Máxima	220 g
Carga Mínima	10 mg
Legibilidad	0.1 mg
Rango de tara	-220 g
Repetibilidad	0.15 mg
Linealidad	± 0.3 mg
Dimesión del plato	85 mm diámetro
Sensibilidad a la deriva	2ppm / °C en la temperatura +15 °C + 35 °C
Tiempo de estabilización	3.5 s
Temperatura de trabajo	10°C $\pm$ 40°C
Fuente de alimentación	Cargador 110-230V AC/50-60Hz / 13.5-16V DC
Ajuste-Calibración	Interno (automático)
Monitor	Pantall retro iluminada

Para evitar interferencias y limitaciones, se debe tener cuenta las siguientes consideraciones:

- La balanza debe estar instalada donde no existan vibraciones o choques, lejos de fuentes de calor.
- La humedad relativa no debe pasar de 80 %.
- Las cargas se ubican en el centro de la bandeja de pesaje de la balanza.
- El resultado de pesaje debe ser leído después de que se ha mostrado en la pantalla, el simbolo de estabilizado.

Los pasos a seguir, para una correcta medición de la porosidad, se muestran a continuación:

1. Calibrar la balanza.
2. Medir las dimensiones de la probeta con pie de metro (altura y diámetro).
3. Pesar la probeta en seco, y corroborar tres veces.
4. Nuevamente calibrar la balanza.
5. Pesar la probeta sumergida en alcohol, y esperar el tiempo necesario para que la balanza esté equilibrada,
6. Sacar la probeta.

4.3.5. Ensayo a compresión uniaxial

Para llevar a cabo los ensayos a compresión, se sigue la norma estándar ASTM D695, mediante el uso de una máquina de prueba electromecánica universal Test Resources modelo F1000-B, que se ilustra en la figura 4.21, la cual posee con una capacidad de carga de 1000 [Lbf] en fatiga y 2000[Kgf] (SI.) en estático o cuasiestático (celda o transductor de carga).

En esta máquina, se pueden llevar a cabo ensayos a compresión, tracción y flexión. A su vez, dicha máquina de ensayos mecánicos, cuenta con un funcionamiento servohidráulico que, transforma y envía señal, por medio de un variador de frecuencia, en término del tiempo (t), carga aplicada (N) y desplazamiento (mm), mediante la célula de carga.

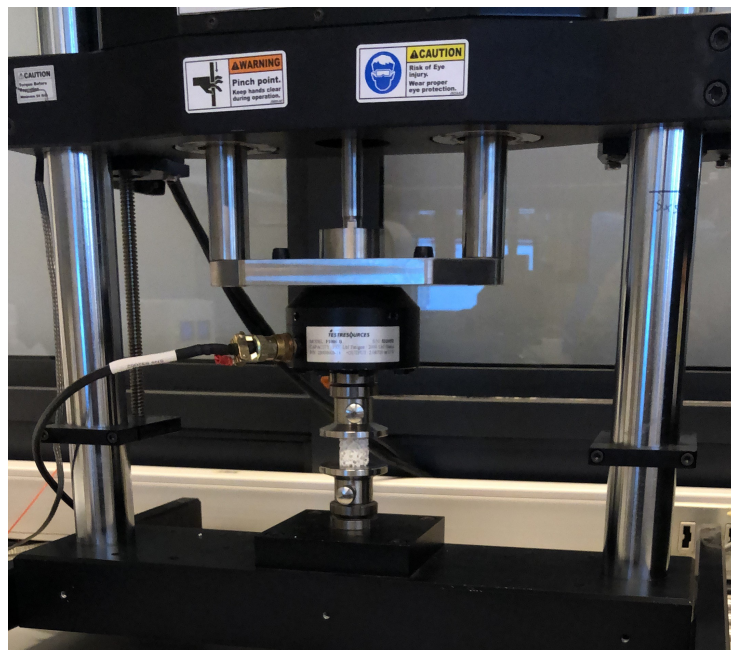


Figura 4.21: Máquina electromecánica Test-Resources.

Capítulo 5

Análisis de Resultados

5.1. Resultados Experimentales

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos en relación a la medición de porosidad de los sólidos porosos impresos, las propiedades elásticas aparentes conseguidas en los ensayos experimentales, y las simulaciones numéricas realizadas mediante el método de los elementos finitos, empleando el software ANSYS ®.

A su vez, se exponen los análisis de diseño factorial de dichos resultados, con sus respectivos veredictos, interacciones y estadísticos.

5.1.1. Geometría y características de porosidad

La Figura 5.1 muestra una muestra representativa impresa en 3D utilizada para la caracterización morfológica, confirmando la reproducción precisa de la distribución de poros definida en el modelo computacional. Las mediciones totales de altura (H) y diámetro (D) de los sólidos porosos impresos demuestran alta consistencia y uniformidad, con bajas desviaciones y errores estándar en comparación con las dimensiones teóricas. Específicamente, la variación en la altura de la muestra, independientemente de la proporción de tamaño de poro o del tipo de porosidad, permanece por debajo del 1,25 %, mientras que la variación en el diámetro es inferior al 1,7 %. En consecuencia, dada la mínima variación en ambas dimensiones globales, la relación de esbeltez resultante (H/D) muestra una diferencia inferior al 2 %, reflejando la precisión dimensional lograda mediante el proceso de fabricación aditiva.

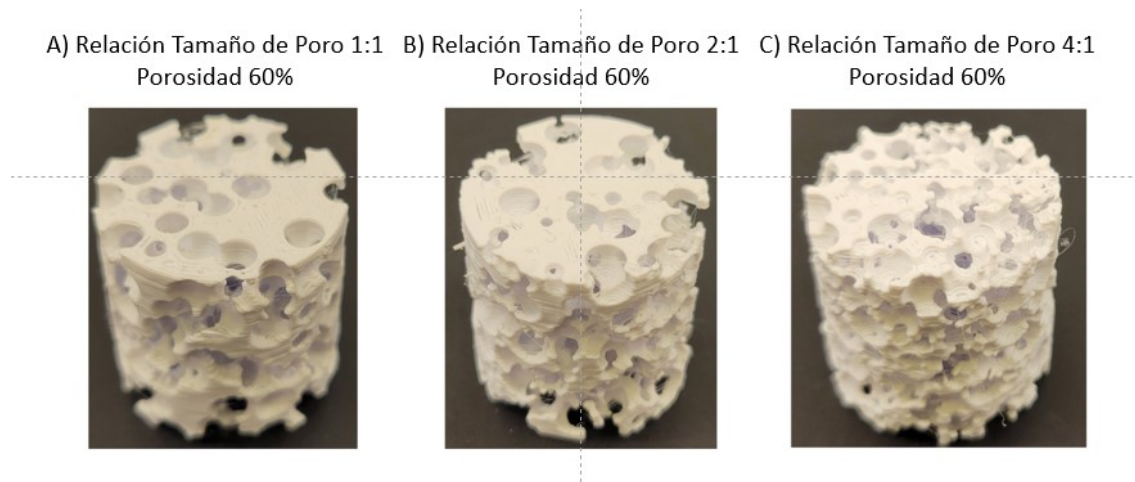


Figura 5.1: Sólidos porosos impresos con porosidad teóricamente idéntica (60 %) y distribuciones no estructuradas, mostrando una heterogeneidad creciente con mayores proporciones de tamaño de poro para 1:1, 2:1 y 4:1 en A, B y C, respectivamente.

La figura 5.2 ilustra, la comparación entre las porosidades computacionales de los modelos obtenidos a través del acomplete numérico DEM-FEM, como las porosidades experimentales obtenidas mediante el principio de Arquímedes, de los modelos impresos. Es importante mencionar, que estos resultados están clasificados en función de la relación de tamaño de poro (1:1, 2:1, y 4:1), además los valores de las porosidades ilustrados en esta figura, corresponden a los resultados a granel. La comparación de la porosidad teórica con la experimental es sumamente importante, dado que permite estudiar y corroborar que no existan mediciones experimentales fuera de margen o con grandes errores relacionado al parámetro de relleno, en los sólidos porosos fabricados mediante la técnica de manufactura aditiva.

Una de las maneras, de deferir que estas mediciones se encuentran dentro de los valores esperados, consiste en establecer una relación de tendencia entre la porosidad experimental y teórica, la cual debe ser lineal, con un ángulo de inclinación cercano a 45° , de esta manera, la razón de crecimiento de porosidad computacional es la misma con la porosidad experimental, junto con verificar que la variabilidad de los resultados se agrupen, al igual que las porosidades computacionales.

En este sentido, con los valores experimentales de porosidad contra los valores computacionales de porosidad, presentados en la figura 5.2 se establece una regresión lineal total con un R^2 de 0.988821[-], donde el ángulo de inclinación de esta regresión, es de $48,401^\circ$ estableciendo así, que las mediciones experimentales a nivel global, se encuentran dentro de los valores esperados.

Además, la variabilidad de las porosidades experimentales, para cada uno de los rangos de porosidad computacionales (60 %, 65 %, 70 %, y 75 %), indistitamente de la relación de tamaños de poros, poseen un coeficiente dispersión aceptable, cuyo valor mínimo es de 0,69 % y valor máximo es de 2,55 %, lo cual significa, que la mayor parte de las porosidades experimentales tienden a estar

agrupadas y cerca de su media.

Es decir, no existen mediciones con grandes errores, o con un ruido experimental, por lo que, agrupar las porosidades experimentales en función de las categorías de las porosidades computacionales, es estadísticamente correcto.

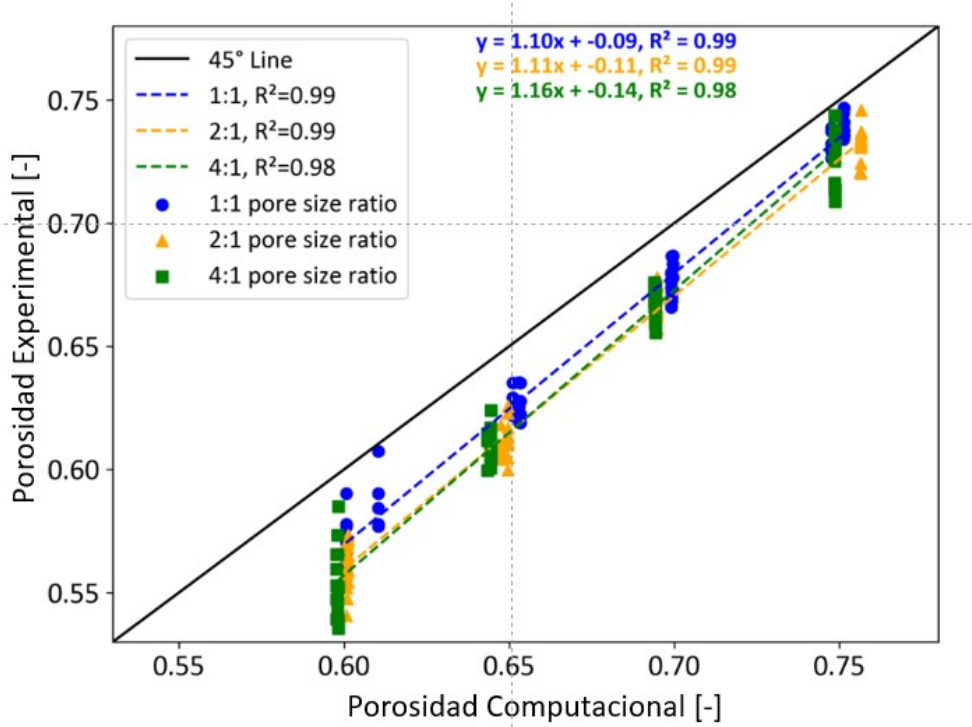


Figura 5.2: Relación entre porosidades experimentales y computacionales. Donde las líneas de guion muestran una regresión lineal siguiendo la fórmula insertada con su R^2 respectivamente. La línea de 45° insertada muestra una coincidencia casi perfecta entre la porosidad experimental y computacional. .

Ecuación 5.1 corresponde a regresión lineal de los datos globales de la figura 5.2

$$y = 1,126392 \cdot x - 0,114190; R^2 = 0,988831 \quad (5.1)$$

Por otra parte, como se expone en esta tabla 5.1, las magnitudes de las porosidades experimentales se encuentran por debajo de las porosidades teóricas, y a medida que el porcentaje de porosidad aumenta, la diferencia entre los resultados experimentales y computacionales se reducen.

Cuadro 5.1: Porosidades teóricas y experimentales.

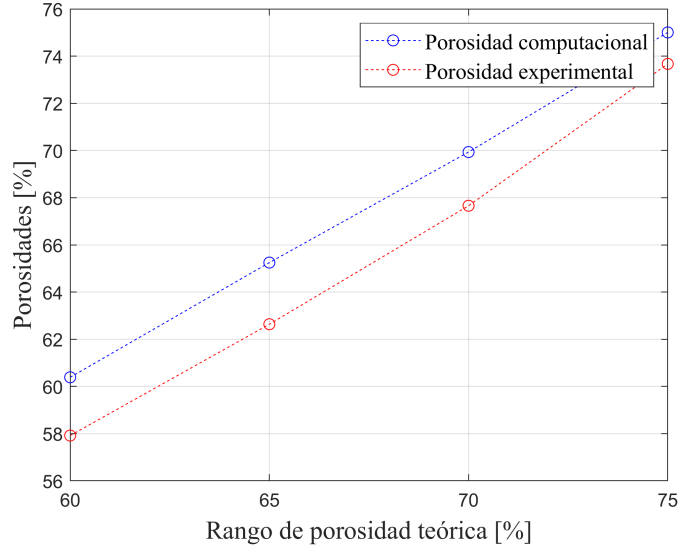
Relación tamaño de poros					
1:1		2:1		4:1	
% Teórica	% Experimental	% Teórica	% Experimental	% Teórica	% Experimental
60.0611	56.394	60.0786	55.53	59.7784	55.289
60.0648	57.62	60.1017	56.325	59.7968	54.953
61.0374	58.73	60.1192	56.461	59.8254	54.9533
65.1139	62.655	64.9619	61.379	64.4389	61.142
65.2954	62.64	64.9564	61.195	64.4443	60.61
65.3424	62.46	64.7568	61.898	64.4517	61.083
69.9153	67.5	69.4723	66.61	69.3912	67.268
69.9253	67.61	69.4750	66.808	69.4189	66.365
69.9623	67.85	69.4769	66.929	69.4446	65.665
74.7553	73.27	75.6469	73.42	74.9991	72.49
75.1285	73.83	75.6978	73.6	74.9930	71.524
75.1320	73.898	75.6635	73.621	74.9920	73.2431

Las subfiguras 5.3a y 5.3b, de la figura general 5.3, presentan la tendencia entre la porosidad teórica y la porosidad experimental, para la relación de tamaño de poro 1:1, es decir, para poros con diámetro constante.

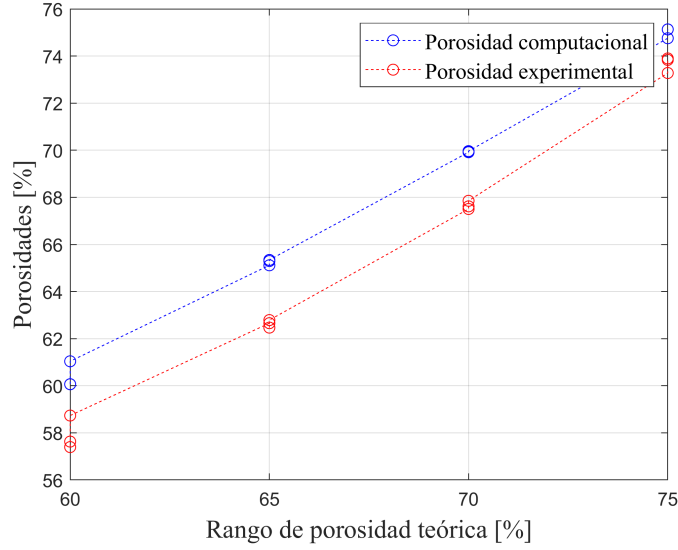
En la figura 5.3a se grafican los promedios de porosidades de ambos casos, y se aprecia que en cada rango teórico de porosidad correspondiente a 60 %, 65 %, 70 %, y 75 % , la porosidad promedio computacional es mayor a la porosidad promedio experimental. Si bien, esta diferencia en los promedios es evidente, la semejanza entre las tendencias es prácticamente imperceptible, dado que poseen una pendiente similar, lo cual permite inferir que la disimilitud en las magnitudes de los promedios de porosidad, no se debe a un error o ruido en cierto rango de porosidad en específico, sino que es atribuible a una cuestión de resolución de la impresora, independiente del modelo, distribución aleatoria de poros, y rango de porosidad, del modelo impreso.

Esta explicación se corrobora al observar la figura 5.3b, que grafica la tendencia de porosidad experimental y computacional a granel, es decir, el resultado de cada modelo de estudio por separado sin promediar. Se constata, que la variación de los resultados de forma independiente, poseen prácticamente el mismo comportamiento computacional y experimental.

Con ello, se confirma que los sólidos porosos impresos en PLA, desde el punto de vista del factor de porosidad, no presentan ruido que influya en la respuesta de dicho parámetro, para la relación del tamaño de poro 1:1.



(a) Comparación del promedio de la porosidad total.



(b) Comparación de porosidad sin promediar.

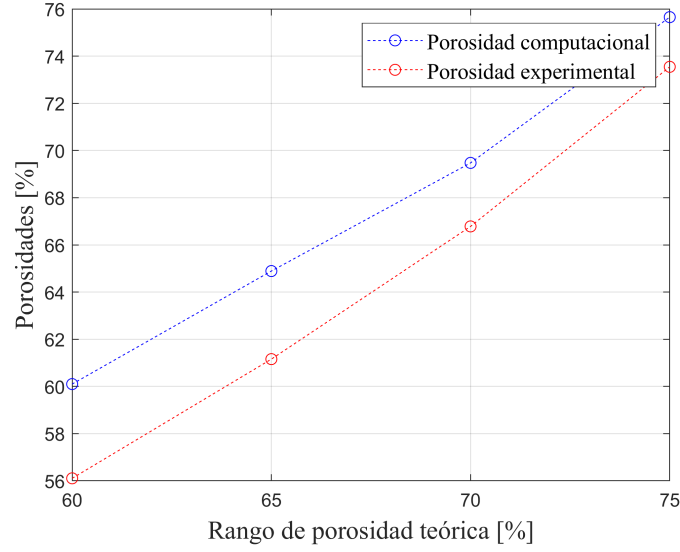
Figura 5.3: Relación de tamaño de poros 1:1.

Los sólidos porosos de relación 2:1 y 4:1, poseen un mayor grado de heterogeneidad morfológica y topológica, que se caracteriza por su dimensión fractal (Perez Trigo, 2019), la cual determina la cuasisimilitud entre los macro y micro poros. Con ello, se entiende que el proceso de fabricación mediante modelado por deposición fundida, para estos modelos de estudio es de mayor complejidad, y por ende, los resultados de porosidad obtenidos de forma experimental, pueden presentar algunas diferencias con los computacionales. Las subfiguras 5.4a y 5.4b, de la figura general 5.4 presentan la tendencia entre la porosidad computacional y la porosidad experimental, para modelos con una relación de tamaños de poros 2:1.

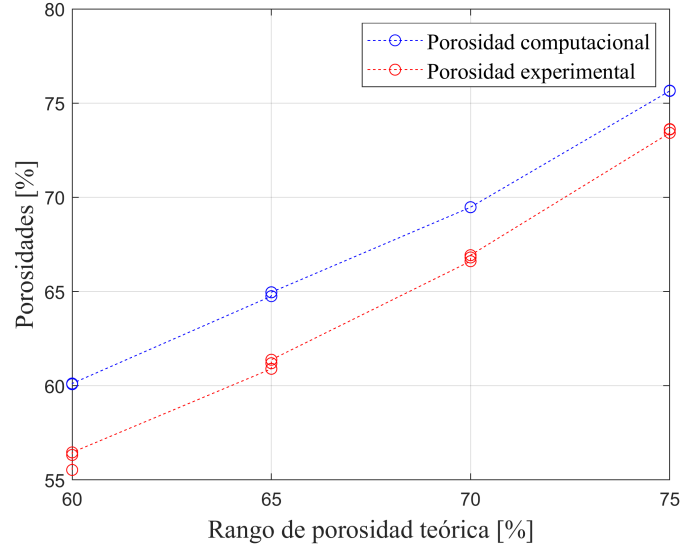
La figura 5.4a describe de forma gráfica la comparación promedio de porosidad, tanto para el

caso computacional como experimental. En esta, al igual, que en los resultados anteriores de los modelos con relación de tamaño de poro 1:1, la porosidad promedio computacional es mayor que la porosidad promedio experimental. A su vez, se visualiza que la distancia entre los promedios de porosidad computacional y promedios de porosidad experimental es de menor magnitud comparación con la relación 1:1, es decir, hay una distancia más pequeña entre las curvas de tendencia, en equiparación con la ilustradas en la figura 5.3a. De esta forma, la porosidad experimental obtenida para la relación de tamaño de poro 2:1, es un poco más próxima o convergente, a la teórica; 60 %, 65 %, 70 % y 75 %.

Estos resultados mostrados en las gráficas, resaltan dos aspectos importantes, el primero, es que las tendencias de las porosidades a granel, es decir, los resultados que no se encuentran promediados, pierden un poco el aspecto parigual entre lo experimental y computacional, si bien existe una correlación de datos, pero existe una mayor dispersión de los resultados experimentales. El segundo aspecto, reside en que a medida que aumenta la porosidad teórica, existe una mayor cercanía o proximidad entre los resultados computacionales y experimentales, lo que puede entrever que un modelo de mayor hetereneidad, influye en los resultados de porosidad impresos. Esto se visualiza de mejor manera, en la figura 5.4b, ya que, cuando crece el porcentaje de porosidad teórica, existe un aumento de pendiente entre rangos de porosidad teórica, en otras palabras, la pendiente generada por el rango 70 %-75 % es mayor al rango 65 %-70 %, y este mayor al rango de 60 %-65.



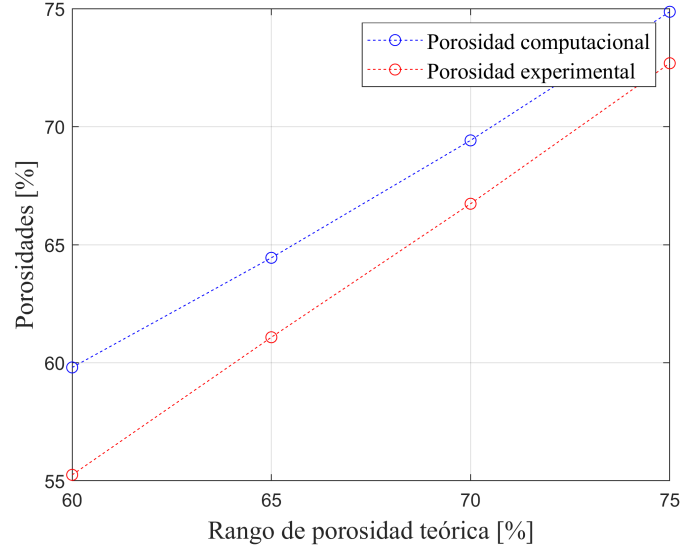
(a) Comparación del promedio de la porosidad total.



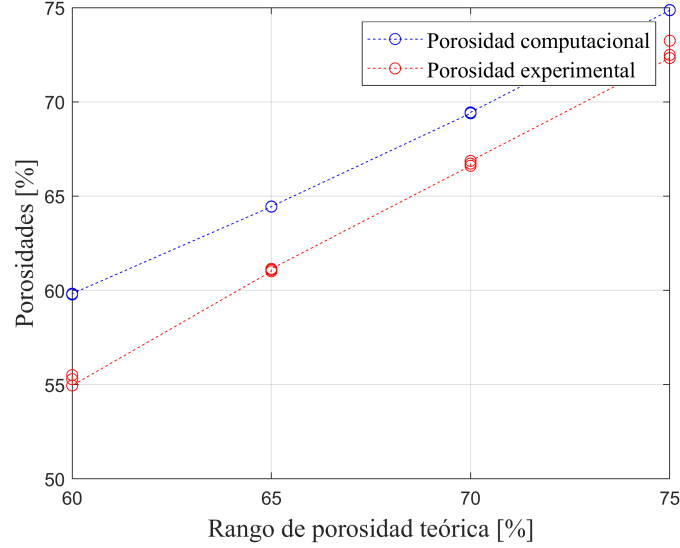
(b) Comparación de porosidad sin promediar.

Figura 5.4: Relación de tamaño de poros 2 a 1.

Las subfiguras 5.5a y 5.5b, de la figura general 5.5 muestran la tendencia entre la porosidad teórica y la porosidad experimental, para la relación del tamaño de poro 4:1. Según la figura 5.5a, la curva de tendencia de la porosidad experimental y computacional es similar y poseen practicamente un mismo comportamiento, además la porosidad experimental es menor a la computacional. En estos resultados, ocurre algo similar que en el comportamiento 2:1, ya que, los resultados experimentales y computacionales, tienden a ser más próximo, con un aumento de porosidad.



(a) Comparación del promedio de la porosidad total.



(b) Comparación de porosidad sin promediar.

Figura 5.5: Relación de tamaño de poros 4a 1

Como se mencionó anteriormente, las espumas con una relación de tamaños de poros 4:1, tienen un grado de heterogeneidad estructural mayor (Pérez, Lascano, Aguilar, Domancic & Alfonso, 2015; Perez Trigo, 2019), por ende, son dominios a imprimir con una complejidad superior a los casos de estudio 1:1 y 2:1. Esto se evidencia en la figura 5.5b, donde la dispersión de las porosidades es mayor para cada rango de porosidad teórica, especialmente en el rango de 75 % de porosidad. De esta forma, existen tres puntos importantes de análisis para los resultados de porosidad mostrados en las figuras 5.3, 5.4, y 5.5;

i) La porosidad experimental es menor a la porosidad computacional.

El análisis de este punto es de gran impacto en el presente estudio, dado que precisamente el aspecto morfológico de porosidad, es una variable de gran significancia en la respuesta elástica de los materiales porosos. A su vez, este fenómeno se presenta en los tres casos de estudio, para todos los rangos de porosidad promedio.

La diferencia entre la porosidad experimental y computacional radica en la resolución de la impresora, que se define como el movimiento más pequeño posible entre dos puntos que generalmente es medido en micras, en otras palabras, la resolución es la capacidad de imprimir el detalle de menor dimensión posible, y que bajo ciertas condiciones geométricas, junto con diferentes parámetros de fabricación, puede dar cabida a un fenómeno denominado oclusión de los poros, como se presenta en la figura 5.6. En esta figura, se aprecia un aumento del espesor de pared del modelo impreso en comparación con el modelo computacional (Melenka et al., 2015; Vallejos Baier et al., 2021).

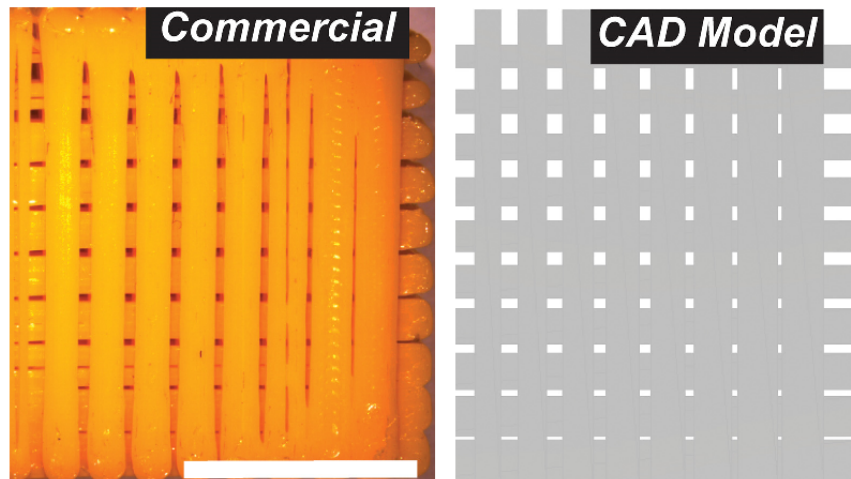


Figura 5.6: Comparación geométrica entre un modelo CAD y un modelo fabricado con la impresora comercial Mbot Gridd (utilizada en este trabajo), por medio de una estructura porosa con 81 poros de áreas variables.

Estudios previos, han establecido que este problema de oclusión de poros, generalmente se produce cuando el área de los poros o discontinuidades geométricas poseen una dimensión reducida. En este sentido, la impresora Mbot Grid utilizada bajo los parámetros de impresión implementados en el presente trabajo, tiende a disminuir su resolución y por ende, a disminuir el tamaño efectivo de poro, como se ilustra en la figura 5.7, dando cabida al fenómeno de agrandamiento del espesor de pared.

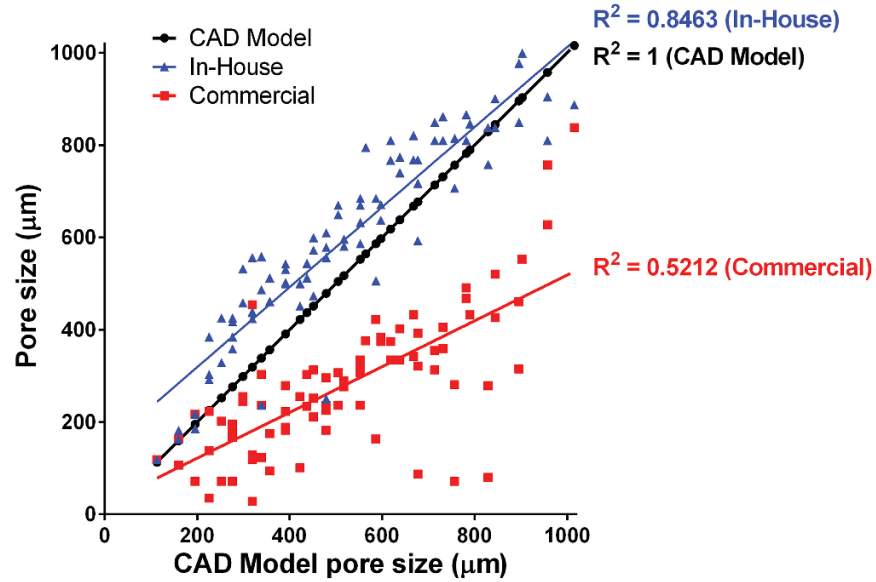


Figura 5.7: Cuantificación de todos los tamaños de poro en ambas estructuras en comparación con el modelo CAD.

De esta forma, un crecimiento del espesor de pared entre poros, produce un aumento de volumen sólido en el material poroso, lo que implica que la porosidad experimental se reduzca, y con ello, sea menor a la porosidad computacional.

ii) En tanto que el nivel de heterogeneidad del dominio geométrico es mayor, la porosidad obtenida es más próxima a la computacional.

Como se mencionó anteriormente, a medida que la relación de los tamaños de poros aumenta, es decir desde 1:1 , 2:1, hasta 4:1, se acentúa la heterogeneidad en la estructura, dado que se posee una mayor cantidad, aglomeración, e interconectividad de poros, para obtener el mismo porcentaje de porosidad, como se presenta en las figuras 5.24a, 5.24b y 5.24c (Perez Trigo, 2019).

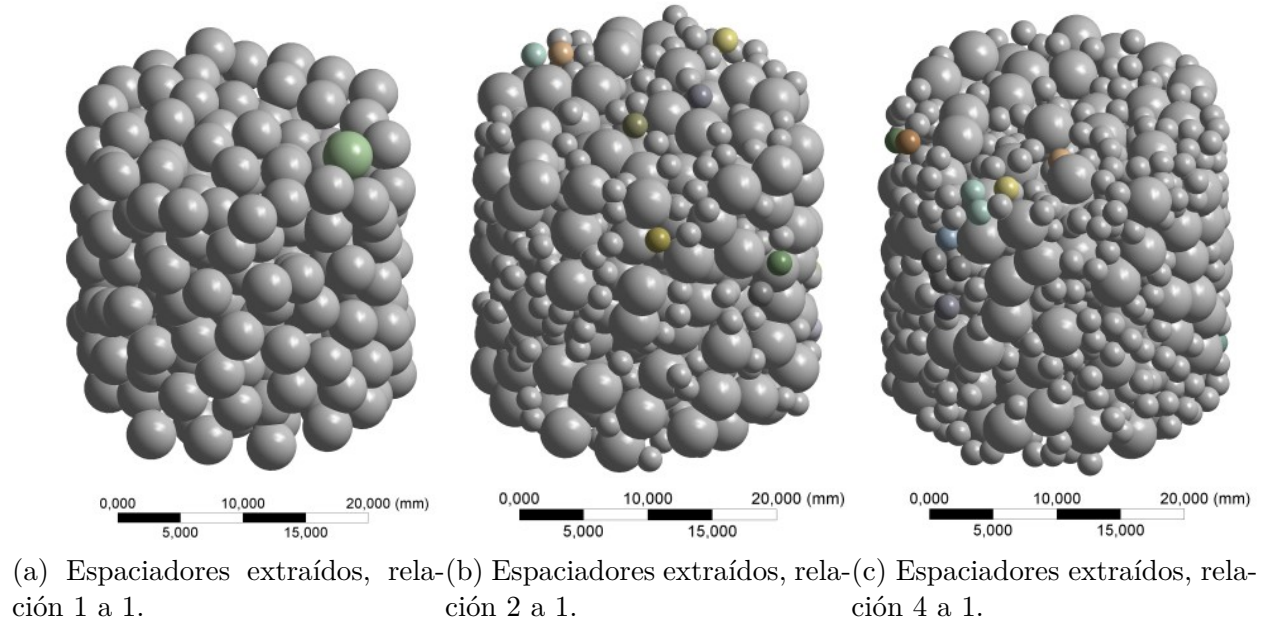


Figura 5.8: Comparación de cantidad y relación de tamaños de poros.

De esta manera, una elevada cantidad e interconectividad de poros en los sólidos porosos, implica una disminución en el espesor de pared promedio o distancia entre poros, como se presenta en las figuras 5.9a, (Perez Trigo, 2019).

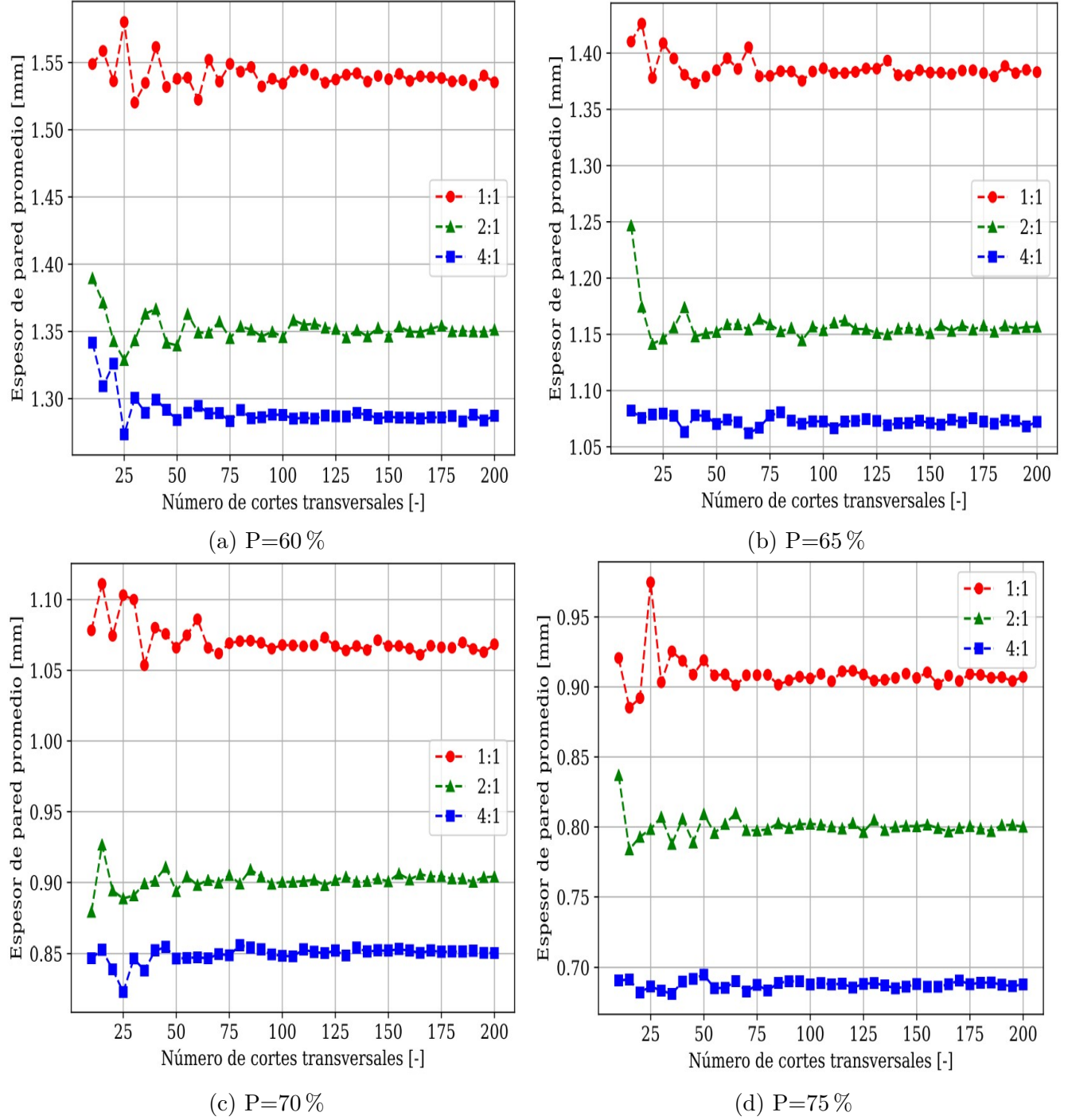


Figura 5.9: Convergencia del espesor de pared promedio respecto al número de cortes.

Estas conexiones de pared delgada pequeña, hacen que la anchura de los perímetros de los rellenos es demasiado pequeño, que producen falta de PLA en paredes finas, y con ello, un aumento de porosidad, a medida que el grado de heterogeneidad de la estructura aumenta. Por otra parte, la probeta sólida impresa con un 100 % de relleno, logró una porosidad máxima del 97.5 %, por lo que, existe también una variable de porosidad mínima o relleno máximo de la impresora.

5.1.2. Módulos Elásticos Aparentes Generales

Los ensayos experimentales de compresión uniaxial realizadas en muestras porosas permitieron obtener las curvas representativas esfuerzo-deformación, que se presentan en la Figura 5.10. Cada curva corresponde a una relación específica de tamaño de poro a un nivel de porosidad dado, ilustrando la respuesta elástica típica y el comportamiento inicial de compresión de las estructuras porosas impresas.

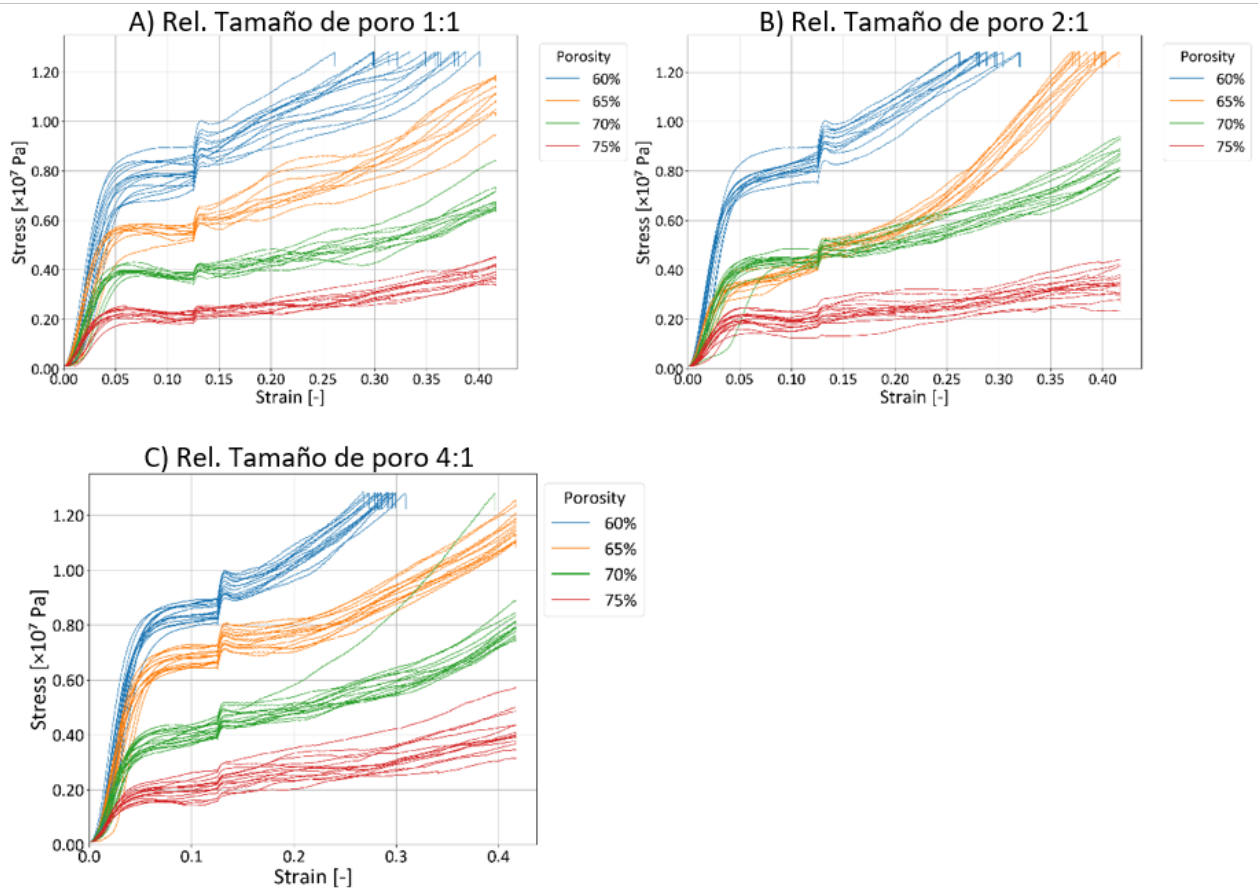


Figura 5.10: Respuesta tensión-deformación de muestras porosas impresas mostrando la región elástica lineal inicial seguida de deformación plástica y densificación estructural, para porosidades del 60 %, 65 %, 70 % y 75 %, en todas las proporciones de tamaño de poros.

Todas las curvas en la Figura 5.10 presentan una región lineal inicial correspondiente al comportamiento elástico del material, seguida de una transición no lineal asociada a la plasticidad y la densificación estructural, vinculada al pandeo local y el colapso de los poros. Como era de esperar, el aumento de la porosidad conduce a una reducción del módulo elástico aparente y a una respuesta no lineal más pronunciada. Esto implica que, a mayor porosidad, la variación de la carga o tensión aplicada sobre el sólido poroso muestra una tasa de cambio mayor en la deformación elástica, ya que el módulo elástico aparente representa la pendiente de estas magnitudes. Los sólidos porosos con una relación de tamaño de poro de 2:1 muestran una superposición en las tendencias correspondientes (Figura 5.10) para porosidades del 65 % y 70 %. En particular, las muestras con un 65 % de porosidad comienzan el proceso de densificación antes que aquellas con 70 %, lo que provoca el cruce de ambas curvas.

Las pruebas experimentales de compresión de las muestras sólidas impresas arrojaron un módulo elástico medio de $E_s = 784,290$ [MPa].

En la figura 5.11 se presenta la relación entre la porosidad experimental y el módulo elástico aparentes, obtenidos de la recopilación de datos proporcionados por los ensayos experimentales y computacionales.

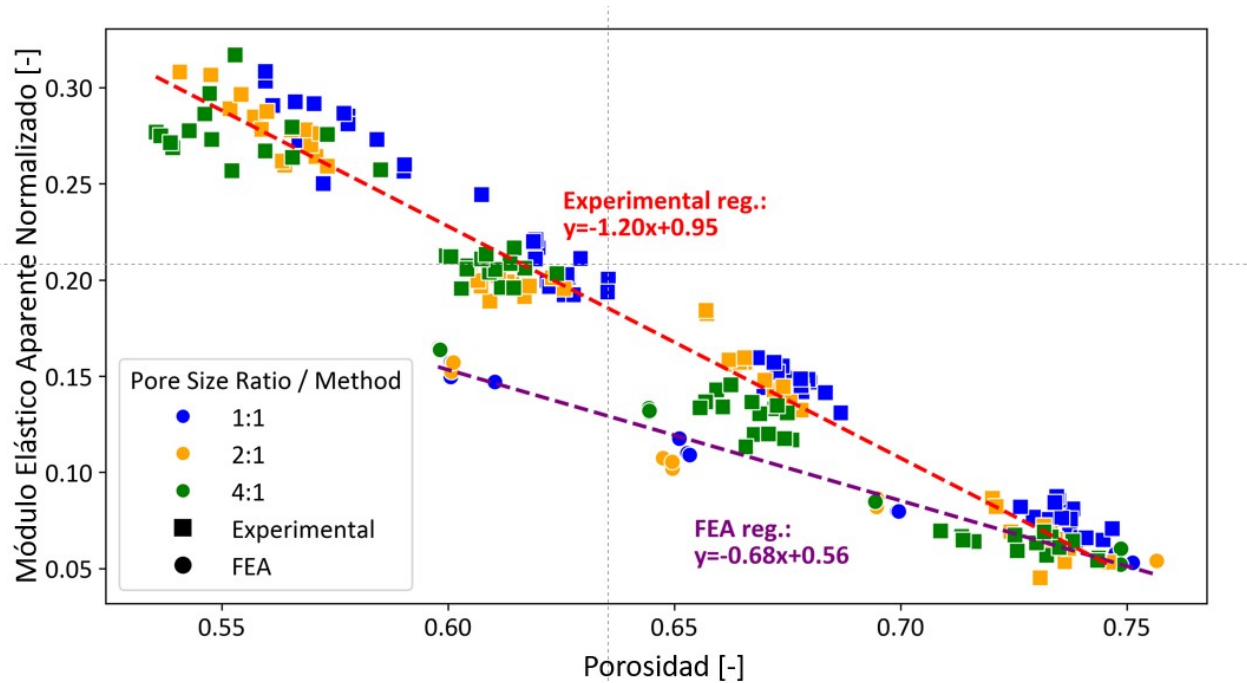


Figura 5.11: Comparación del módulo elástico aparente normalizado experimental y computacional para modelos porosos entre porosidades del 60–75 % y relaciones de tamaño de poro de 1:1, 2:1 y 4:1. Las líneas discontinuas indican ajustes de regresión lineal para cada tipo de dato.

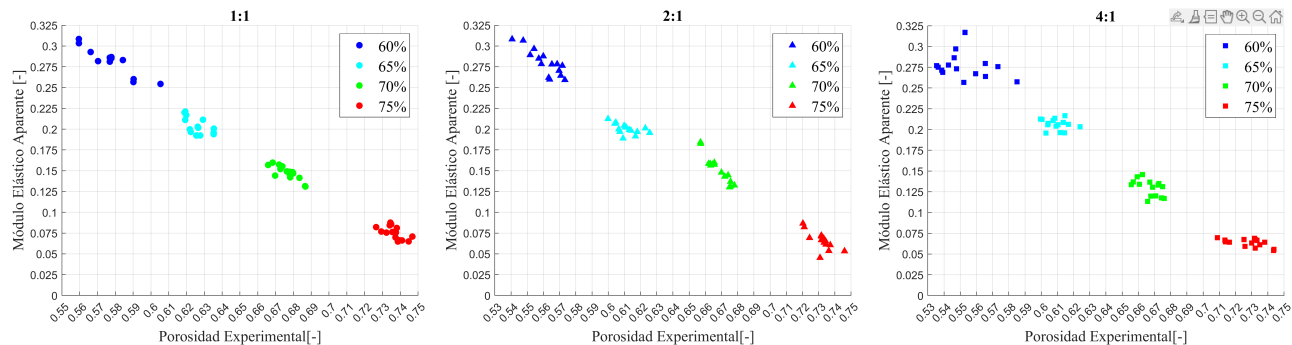
La relación entre los valores obtenidos en pruebas experimentales y los calculados mediante simulación numérica mediante el método de elementos finitos (FEM) se presenta en la Figura 5.11. Se

observa que la respuesta elástica aparente computacional es de menor magnitud que la respuesta elástica experimental, lo cual es coherente con el hecho de que la porosidad computacional es mayor que la porosidad experimental.

Además, se exhibe una tendencia hacia la convergencia entre las respuestas elásticas experimentales y computacionales, a medida que aumenta el nivel de porosidad, ya que la porosidad de las muestras impresas tiende a acercarse a la porosidad computacional.

Respecto a las subfiguras 5.12, se visualiza que para los grupos de 60 % y 65 % de porosidad, de la relación de tamaños de poros 1:1 (figura 5.12a), se presenta una mayor variabilidad en la respuesta elástica aparente normalizada, en comparación con la relación 2:1 y 4:1 (figuras 5.12b y 5.12c). Sin embargo, para los grupos de porosidad de 70 % y 75 %, la relación de tamaño 2:1 posee una mayor variabilidad en la respuesta elástica aparente normalizada, seguido por la relación 4:1, y la relación 1:1. Indistitamente de esto, el coeficiente de variabilidad no excede el 17 %, por lo que, los resultados son homogéneos.

De forma general, aquellos sólidos porosos cuya porosidad es próxima al rango de 60 %, poseen un coeficiente de variabilidad de 5,843 % en su respuesta elástica y un 2,79287 % en su porosidad experimental, analógicamente los sólidos porosos cercanos al rango de porosidad de 65 %, presentan un coeficiente 3,934 % en su respuesta elástica y un 1,585 % en su porosidad experimental, a su vez, los sólidos porosos cercanos al rango de 70 % de porosidad, exhiben un coeficiente de variabilidad de 10,744 % en su respuesta elástica y un 1,164 % en su porosidad experimental, y por último, los sólidos porosos pertenecientes al rango de 75 % de porosidad muestran un coeficiente de variabilidad de 13,878 % en su respuesta elástica y un 1,158 % en su porosidad experimental. De esta manera, se expone que el promedio de la respuesta elástica aparente normalizada para cada rango de porosidad, junto el promedio de las porosidades experimentales, son representativas con respecto al conjunto de datos, por ende se consideran datos homogéneos.



(a) Respuesta elástica aparente normalizada, relación 1 a 1. (b) Respuesta elástica aparente normalizada, relación 2 a 1. (c) Respuesta elástica aparente normalizada, relación 4 a 1.

Figura 5.12: Módulo elástico aparente normalizado, según la relación de tamaños de poros.

La figura 5.13 muestra la relación entre el módulo elástico aparente normalizado y la porosidad

experimental para proporciones de tamaño de poro de 1:1, 2:1 y 4:1. Los diagramas de caja ilustran que aumentar el nivel de porosidad conduce a una disminución progresiva y prácticamente monótona del módulo elástico aparente, disminuyendo de valores cercanos a 0,28 para porosidad del 60 % a aproximadamente 0,06 con porosidad del 75 %. Esta tendencia se observa para cada relación de tamaño de poros, lo que sugiere que la porosidad constituye un factor dominante en la respuesta elástica mecánica, frente a la influencia de las relaciones de tamaño de poro.

Junto a ello, las medias y medianas permanecen cercanas en todos los grupos analizados, lo que indica distribuciones simétricas y una baja influencia de valores extremos sobre las tendencias centrales. Esto sugiere que las irregularidades en la morfología de los poros y los defectos de microimpresión no introducen un sesgo significativo.

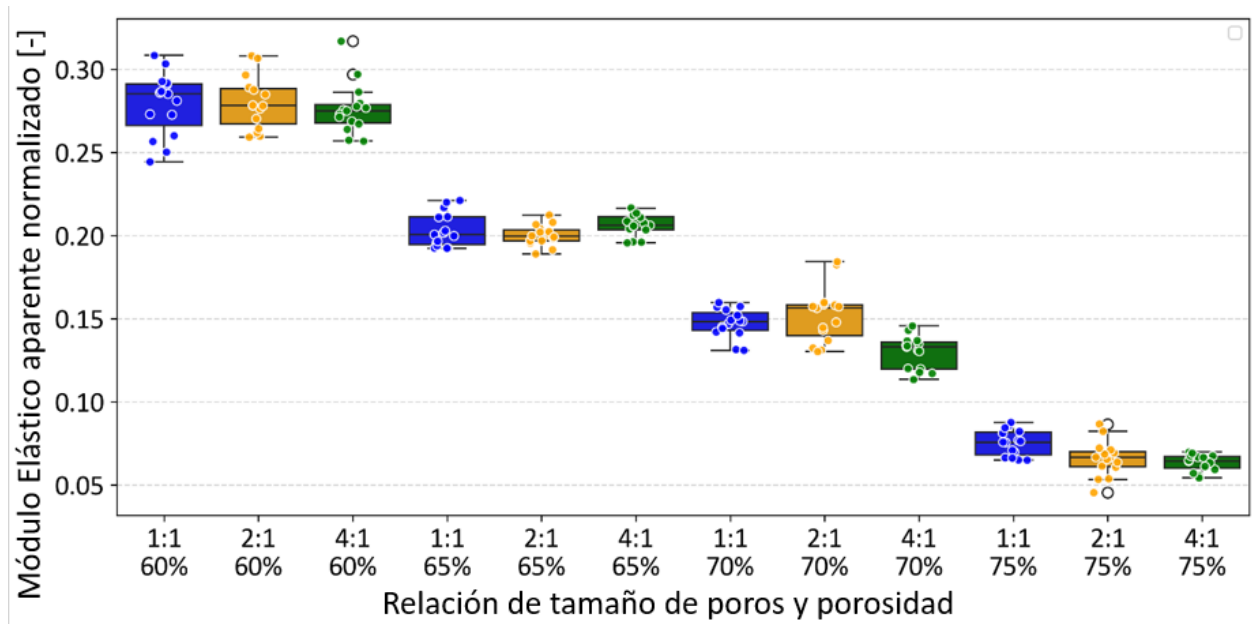


Figura 5.13: Gráfico de caja y bigote del módulo elástico aparente normalizado para diferentes niveles de porosidad y proporciones de tamaño de poros, mostrando la mediana así como los valores máximos y mínimos de la respuesta elástica de las muestras impresas.

Las figuras 5.14, 5.15 y 5.16, muestran la respuesta de la propiedad elástica aparente, obtenidas en los ensayos experimentales de compresión, para los sólidos porosos impresas con las distintas relaciones de tamaño de poros (1:1, 2:1, y 4:1), en función de las porosidades presentadas anteriormente. En cada una de estas figuras, se visualiza la variabilidad de la respuesta del módulo elástico aparente para cada réplica, junto con su respectivo valor de módulo elástico aparente superior e inferior, primer cuartil, segundo cuartil y tercer cuartil.

Para los casos de estudio por separado, se aprecia que la dispersión de la respuesta dentro de cada rango de porosidad tienden a ser cercanas entre sí, es decir, el rango estadístico es similar en cada uno de los grupos de porosidad teórica.

Según la figura 5.14, se aprecia que la mayor dispersión de los resultados de módulo elástico aparente se ubican en la primera vecindad de porosidad experimental, correspondiente a las porosidad de entre 55 % a 58 %. A pesar de ello, el límite inferior de la respuesta de este rango, es decir el menor valor del módulo elástico aparente, no se encuentra en el rango estadístico de la siguiente vecindad de porosidad experimental, que corresponde al rango de 61.5 % a 63.5 %. Por otra parte, es importante mencionar, que tanto los límites superiores e inferiores de la respuesta elástica en el interior de cada vecindad de porosidad; 61.5 % a 63.5 %, 67.5 % a 68 % y 73 % a 74 %, se ubican dentro de la dispersión esperada, es decir, no existen valores aislados.

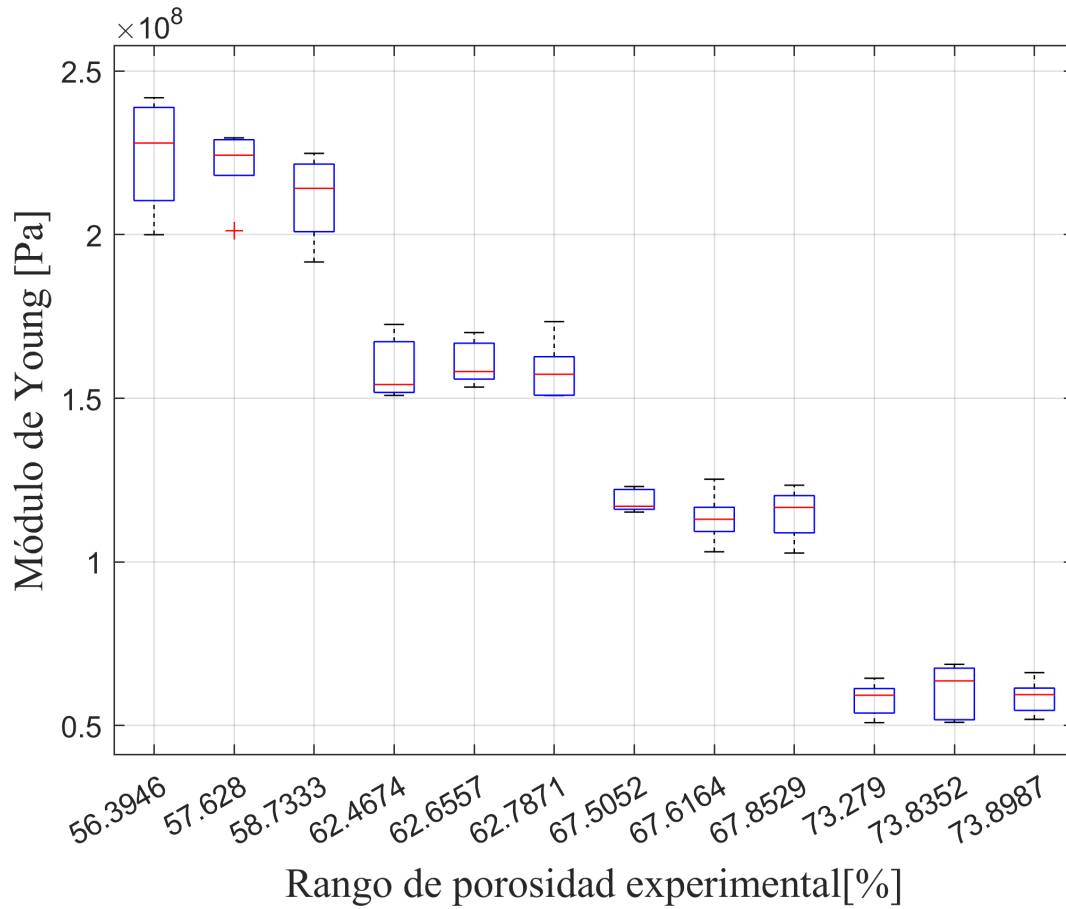


Figura 5.14: Respuesta elástica aparente en relación de tamaños de poros 1:1

Respecto la figura 5.15, se presenta la respuesta del módulo elástico aparente en función de la porosidad, para los sólidos porosos impresas con la relación de tamaño de poros 2:1. La mayor dispersión de la respuesta se encuentra en la vecindad de porosidad de entre 55 % a 56.5 %, y en la vecindad con los límites de porosidad de entre 66 % a 67 %. A su vez, se aprecia que la mediana de distribución, correspondiente al lugar central de los datos, son similares en cada vecindad o rango teórico de porosidad, a excepción del primer rango correspondiente a los límites de 55 % a 56.5 %. Por otra parte, los límites superiores e inferiores de la respuesta de cada rango de vecindad, no se encuentran o intersectan con los límites de la respuesta de otras vecindades de porosidad, y con ello, no se evidencia alguna respuesta elástica aparente aislada.

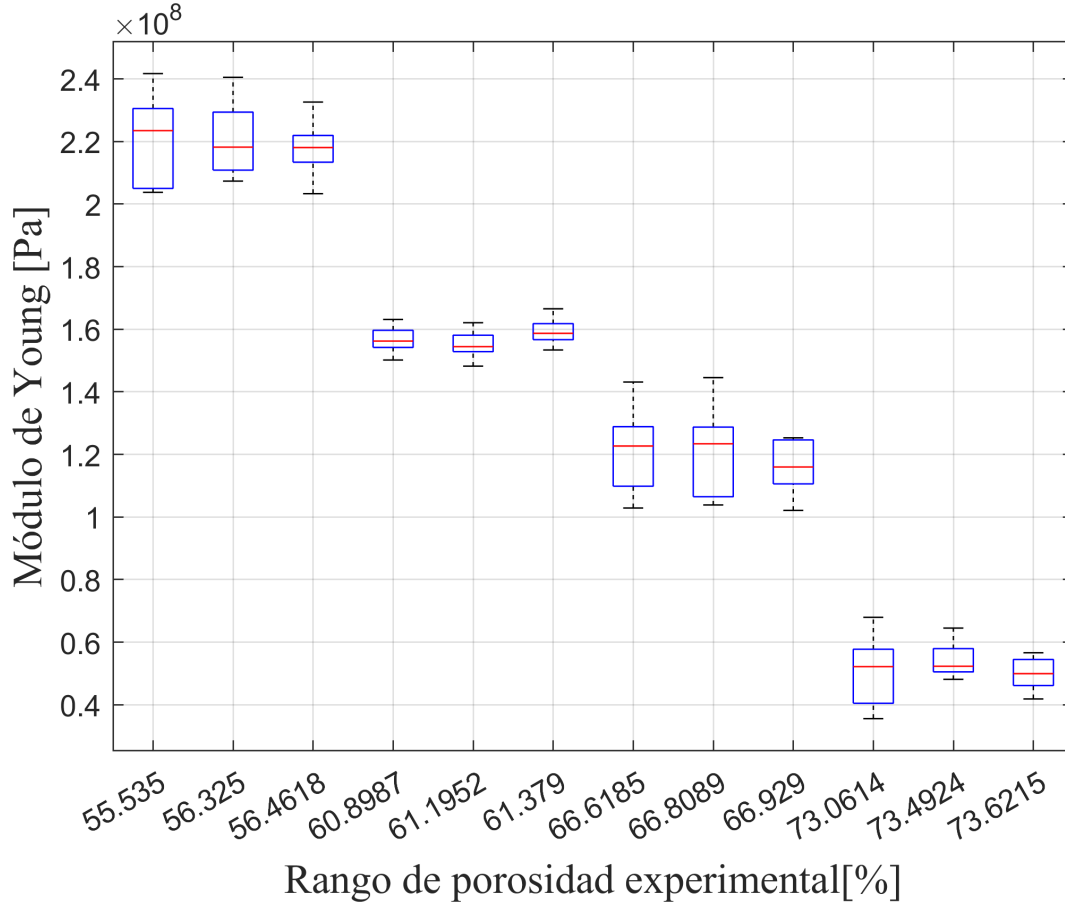


Figura 5.15: Respuesta elástica aparente en relación de tamaños de poros 2:1

En tanto, la respuesta elástica aparente para la relación de tamaño de poros 4:1, se muestra en la figura 5.16, donde se presenta una dispersión mayor del módulo elástico aparente, en la vecindad con los límites de porosidad de entre 54.9% a 55.6%. Es importante destacar, que el dominio geométrico de esta relación de tamaño de poros, posee una mayor complejidad y heterogeneidad en comparación a los modelos de las relaciones anteriores. Sin embargo, la respuesta elástica aparente de los ensayos experimentales de compresión, poseen tendencias similares a los casos de estudio anteriores, con una dispersión esperada, es decir, los límites superiores e inferiores de cada vecindad, no se intersecta con los extremos de las otra vecindades.

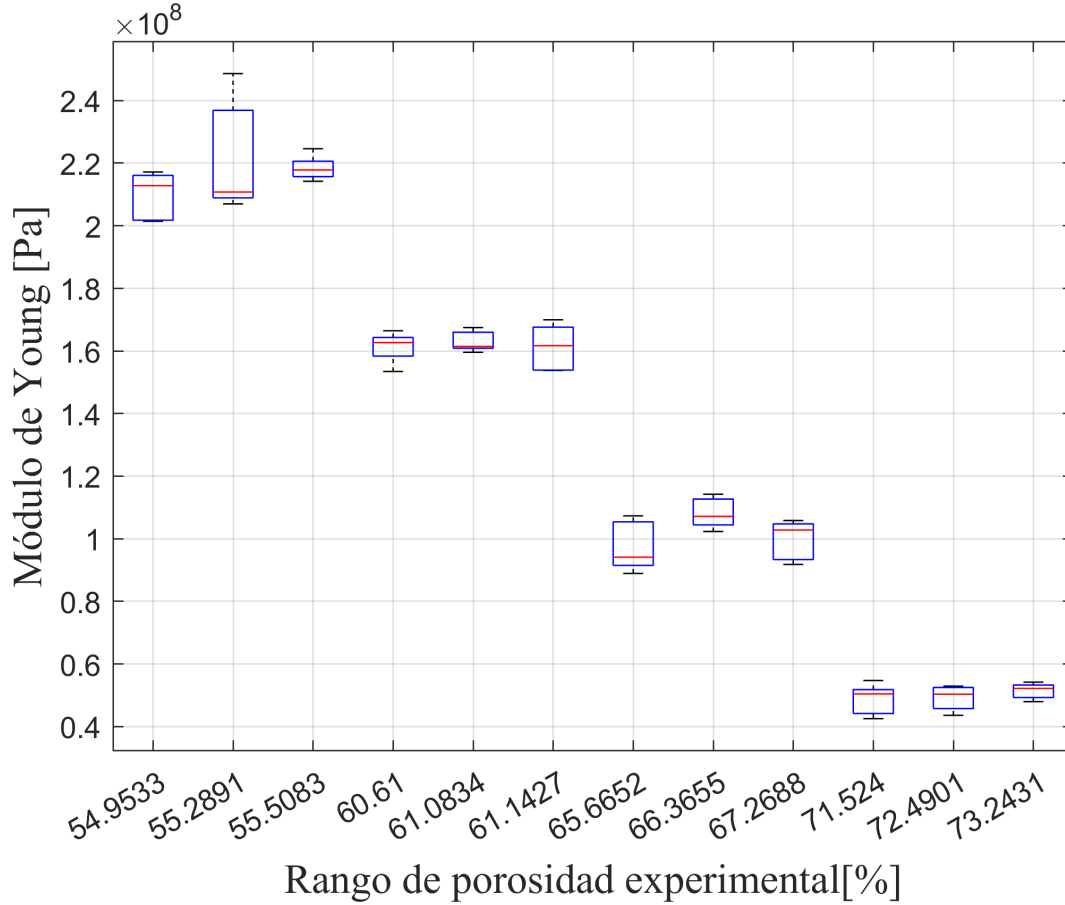


Figura 5.16: Respuesta elástica aparente en relación de tamaños de poros 4:1

Tal como se observa en la Figura 5.17, la porosidad y el módulo elástico aparente presentan una correlación negativa bien establecida en la literatura, por medio de varios modelos matemáticos que describen el módulo elástico aparente normalizado en función de la porosidad en sólidos porosos manufacturados por aditivos (Choren et al., 2013; Dudescu & Racz, 2017; Hashin, 1960; Hasselman, 1962; Herakovich & Baxter, 1999; Maitra & Phani, 1994; Rice, 1996; Roberts & Garboczi, 2000). En general, los sólidos porosos estudiados se encuentran dentro del rango de respuesta esperado según su porosidad. Para muestras porosas impresas con porosidades entre el 55 % y el 70 %, la respuesta elástica normalizada se encuentra dentro de las proyecciones de Paul (Roberts & Garboczi, 2000) y Hasselman (Hasselman, 1962). Para porosidades experimentales superiores al 70 %, la respuesta queda por debajo de la proyección de Hasselman pero dentro de la de Maitra (Maitra & Phani, 1994). Para respuestas elásticas normalizadas obtenidas mediante simulaciones FEM, los valores están dentro de las estimaciones proporcionadas por Rice (Rice, 1996) y Maitra (Maitra & Phani, 1994).

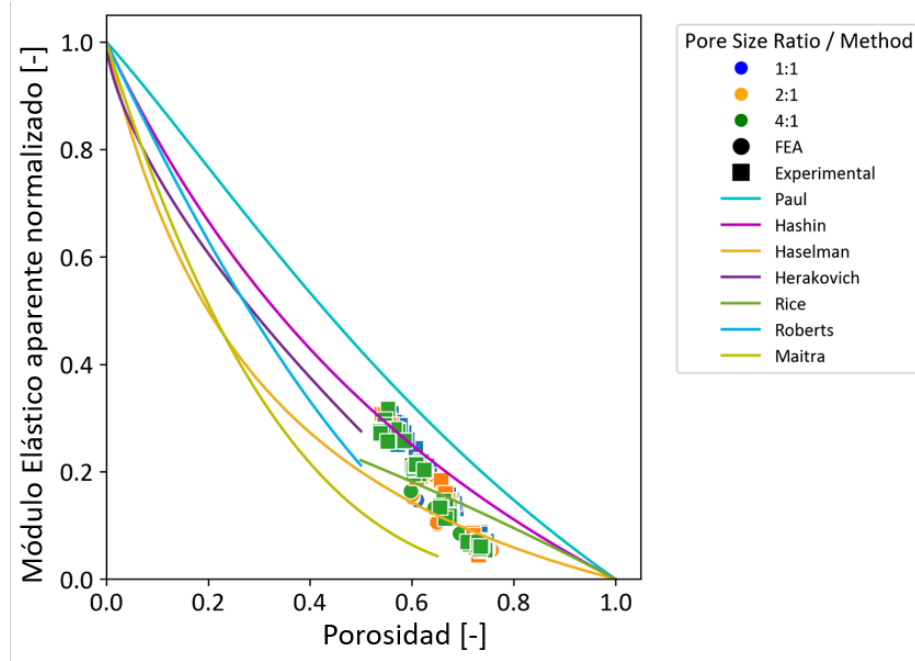


Figura 5.17: Comparación gráfica del módulo normalizado en función de la porosidad volumétrica para las diferentes ecuaciones de porosidad (Dudescu & Racz, 2017; Hashin, 1960; Hasselman, 1962; Herakovich & Baxter, 1999; Maitra & Phani, 1994; Rice, 1996; Roberts & Garboczi, 2000).

5.1.3. Comparación de Módulos de Elasticidad Aparente Computacionales

Desde un punto de vista comparativo, los mayores valores de módulo de elasticidad aparente, para las vecindades de porosidad de 60 % y 65 % se encuentran en la relación de tamaño de poros 4:1, los valores medios de la respuesta elástica se ubican en la relación de tamaño de poros 1:1, y en la relación 2:1 se sitúan las menores magnitudes de módulos de Young. Sin embargo, para las zonas donde se presenta la transición de tendencia no ocurre lo mismo, dado que en las vecindades de 65 % y 75 %, la respuesta elástica, es similar indistintamente de la relación de tamaño de poros, donde la dispersión de cada relación, es bastante parecida.

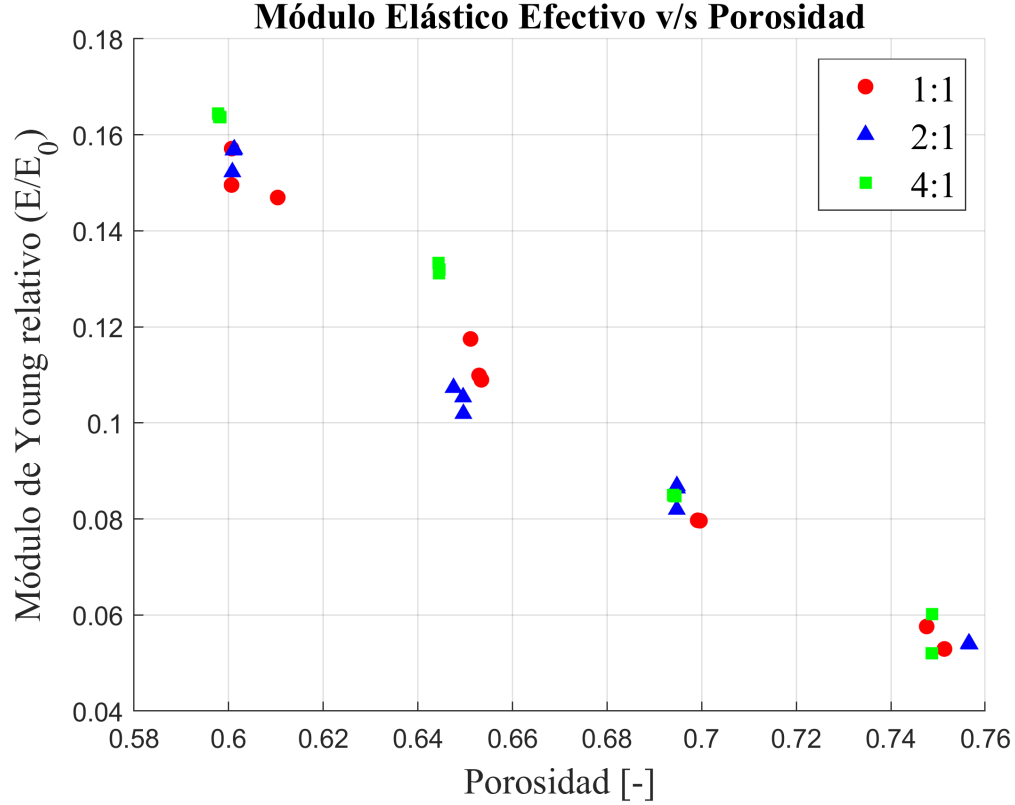


Figura 5.18: Módulo de elástico aparente computacional

Es importante destacar, que precisamente los modelos con menor heterogeneidad, presentan una respuesta elástica cuya tendencia es prácticamente lineal.

5.1.4. Comparación Módulo Elástico Aparente Experimentales

En el caso de la tendencia del módulo elástico aparente versus porosidad, para los resultados obtenidos mediante los ensayos experimentales de las espumas con relación de tamaño de poro 1:1, 2:1 y 4:1, se ilustran en la figura 5.19. Estas tendencias corresponden a un ajuste de curva polinomial de tercer grado, al igual que la figura anterior que presenta los resultados computacionales.

En estos resultados, se muestra que el módulo elástico aparente disminuye a medida que aumenta la porosidad. A su vez, en el caso de los sólidos porosos con una relación 1:1, la tendencia obtenida entre las vecindades o rangos de porosidad es prácticamente lineal, no así para la relación 2:1 y 4:1. Lo cual es similar a los resultados computacionales.

Si bien, la respuesta elástica entre las vecindades de porosidad, en los materiales porosos con una relación 4:1 no es del todo lineal, tampoco presentaría una respuesta elástica con una varianza elevada si se realiza una predicción de los resultados de forma lineal. Sin embargo, para la relación de tamaño de poros 2:1, la variación de la respuesta elástica posee una transición en su tendencia,

en las vecindades 65 % y 70 %, lo cual, evidencia que dicha tendencia es no lineal.

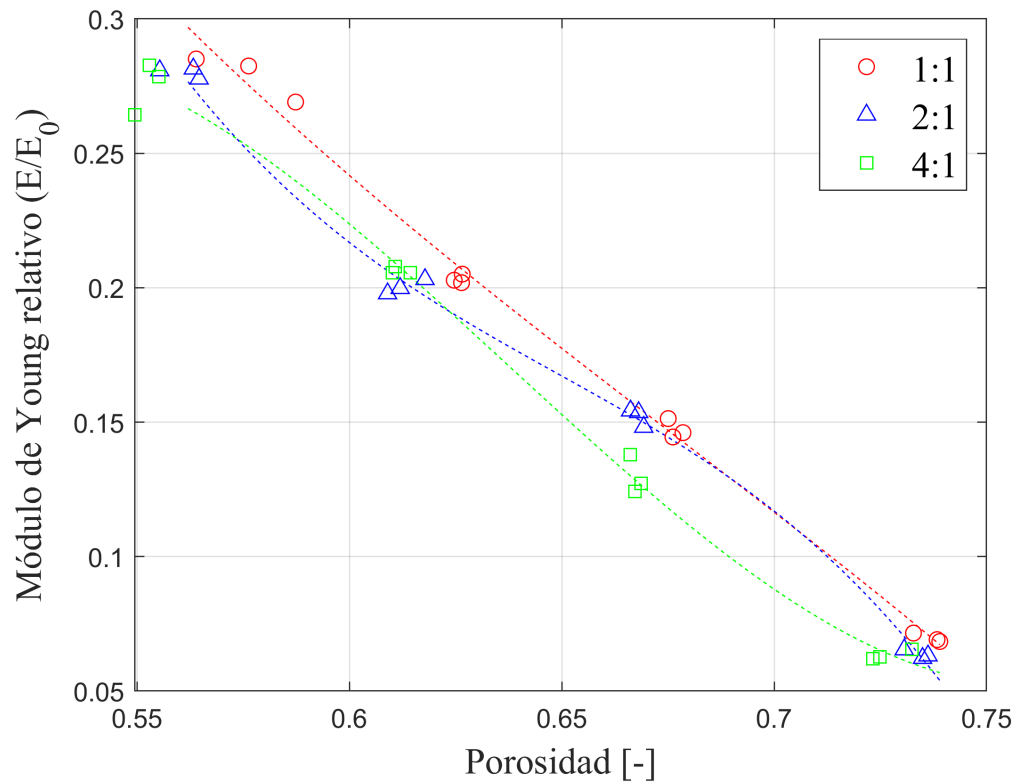


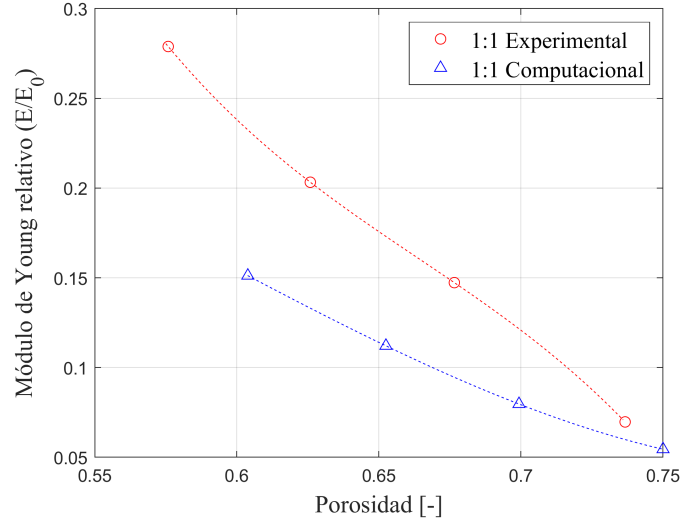
Figura 5.19: módulo elástico aparente experimental

5.1.5. Comparación del Módulo Elástico Aparente Experimental y computacional

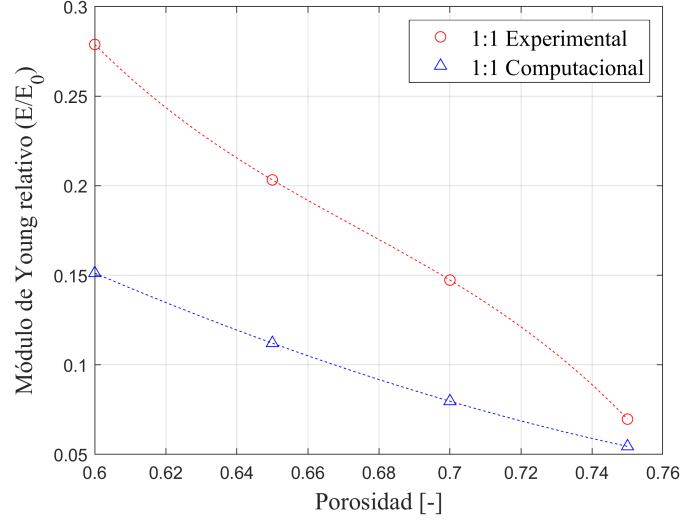
En cuanto a la comparación de los resultados computacionales y experimentales, se visualiza que la respuesta elástica aparente experimental posee una mayor dispersión que la respuesta computacional, que se debe a ciertos aspectos estocásticos propios de los ensayos experimentales. Sin embargo, independiente de ello las tendencias son similares en cada relación, e inclusive se repite la tendencia casi lineal de las propiedades elásticas de aquellas espumas con una relación de tamaño de poro 1:1. En este mismo sentido, al tener propensiones similares, se requieren de mayor detalle para análisis, es por ello que las figuras 5.20, 5.21 y 5.22 exponen la comparación entre los resultados experimentales y computacionales por separado, en función de cada relación de tamaño de poro.

5.1.5.1 Relación de tamaño de poros 1:1

De esta manera, la figura 5.20 muestra la comparación de la respuesta elástica versus la porosidades calculadas de forma computacional y experimental, como también de la porosidad teóricas, de las espumas con una relación de tamaño de poro 1:1. Así, la subfigura 5.20a posee la comparación en función de las porosidad obtenidas mediante software y arquímedes, y la figura 5.20b presenta una comparación en función de las porosidades teóricas, es decir, 60 %, 65 %, 70 % y 75 %. La diferencia entre los valores de la respuesta elástica, obtenidos de forma experimental y mediante simulaciones numéricas, se muestra de forma clara en la figura 5.20b, ya que poseen como factor común la porosidad teórica. De este modo, a medida que aumenta la porosidad teórica, el módulo elástico aparente experimental y computacional poseen una mayor proximidad, y las curvas de tendencia se van acercando. De esta manera, la curva tendencia del módulo elástico aparente experimental, presenta una mayor tasa de cambio a medida que aumenta la porosidad, especialmente entre la vecindad de 70 % y 75 %.



(a) Comparación del módulo elástico relativo o normalizado, en función de la porosidad.



(b) Comparación del módulo elástico relativo o normalizado, en función teórica.

Figura 5.20: módulo elástico aparente relativo en espumas con relación 1:1.

La tabla 5.2, presenta de forma numérica la diferencia de módulo elástico aparente relativo en cada rango de porosidad teórica.

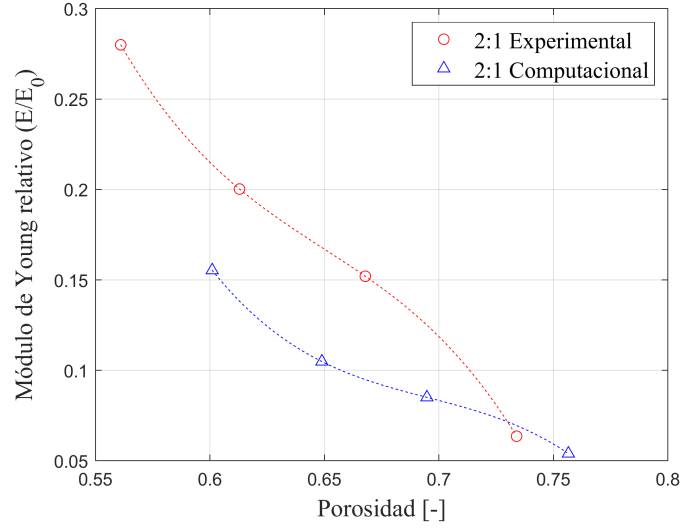
Cuadro 5.2: Módulo elástico aparente relativo promedio

Porosidad [-]	Diferencia $\frac{E}{E_0}$
0.60	0.12768
0.65	0.09114
0.70	0.06763
0.75	0.01521

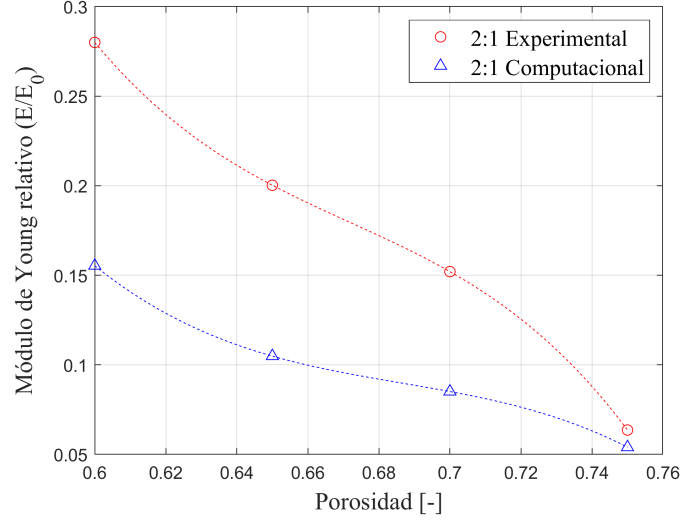
La razón de este acercamiento en los resultados experimentales y computacionales, radica en la proximidad de las porosidades calculadas, ya que a medida que aumenta la porosidad teórica, las porosidades se aproximan entre sí, como se presentó anteriormente. Con ello, se corrobora que la porosidad es un aspecto morfológico en las espumas porosas, sumamente influyente en las propiedades elásticas, específicamente en el módulo elástico aparente.

5.1.5.2 Relación de tamaño de poros 2:1

Para los materiales porosas con una relación de tamaño de poros 2:1, se emplea la figura 5.21, que presenta la comparación del módulo elástico con las porosidades calculadas de forma computacional y experimental, como la porosidad teórica, mostrada en las subfiguras 5.21a y 5.21b respectivamente. En este caso, la respuesta elástica experimental es mayor a la computacional, y la tendencia del polinomio de tercer grado implementado como ajuste de curva experimental, posee una similitud con el computacional, dado que la curvatura entre punto a punto, posee un patrón de comportamiento próximo y parigual, es decir la tangente de la tendencia entre vecindades es similar. Es importante aclarar, que esta similitud se debe a la similitud de tendencia de la porosidad, dado que, la porosidad entre los resultados experimentales y computacionales, son pariguales, lo que implica que en la respuesta elástica debe ocurrir lo mismo. En otras palabras, se comprueba que la porosidad es sumamente influyente, en las propiedades elásticas de un sólido poroso de celda abierta.



(a) Comparación del módulo elástico relativo o normalizado, en función de la porosidad.



(b) Comparación del módulo elástico relativo o normalizado, en función teórica.

Figura 5.21: módulo elástico aparente relativo en sólidos porosos con relación 2 a 1.

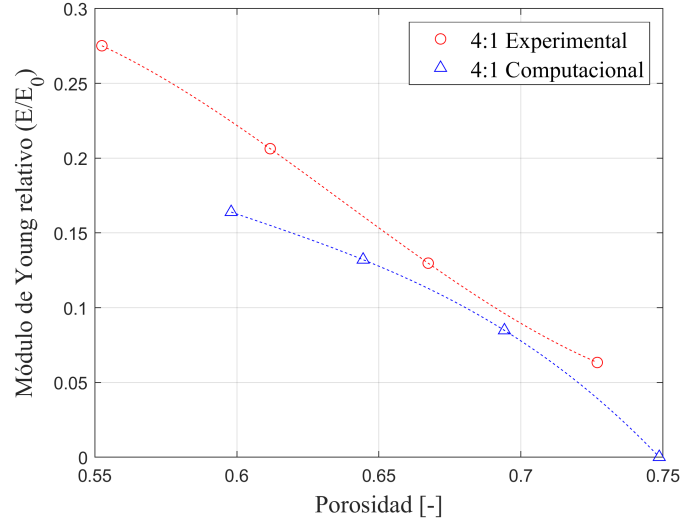
La tabla 5.3, muestra la diferencia numérica del módulo elástico aparente relativo, producido entre el obtenido de forma experimental y el computacional. En esta tabla, se aprecia que la diferencia de módulo relativo, disminuye a medida que la porosidad teórica es menor.

Cuadro 5.3: Módulo elástico aparente relativo promedio

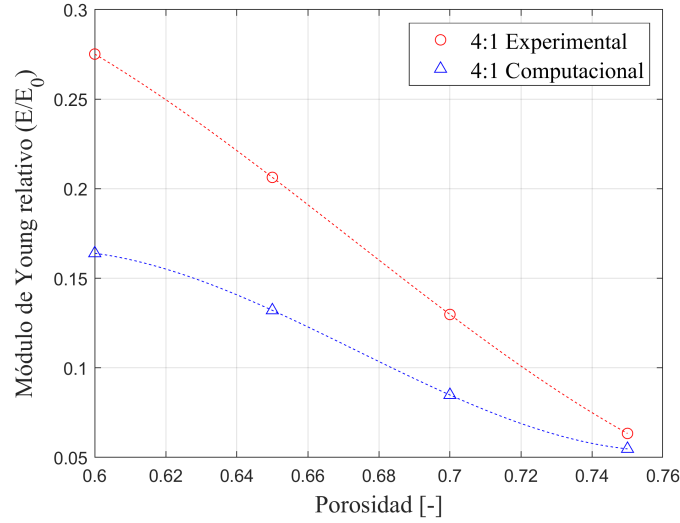
Porosidad [-]	Diferencia $\frac{E}{E_0}$
0.60	0.12464
0.65	0.09538
0.70	0.06695
0.75	0.00954

5.1.5.3 Relación de tamaño de poros 4:1

Las figura 5.22, con sus respectivas subfiguras, ilustran la tendencia de la respuesta experimental y computacional, para la relación de tamaño de poros 4 a 1. Es importante mencionar que los materiales porosos con esta relación, poseen una mayor proximidad en los valores de porosidad, que se ve reflejado con una mayor cercanía en los módulos elásticos obtenidos. En este sentido, dicho caso de estudio a diferencia de los anteriores, posee mejores resultados esperados, por dicha contigüidad.



(a) Comparación del módulo elástico relativo o normalizado, en función de la porosidad.



(b) Comparación del módulo elástico relativo o normalizado, en función teórica.

Figura 5.22: módulo elástico aparente relativo en sólidos porosos con relación 4 a 1.

La contigüidad de la respuesta se encuentra detallada de forma numérica en en la tabla 5.4, donde es evidente que la diferencia entre las cantidades medidas es menor, en comparación con la tabla 5.2 y 5.3.

Cuadro 5.4: Módulo elástico aparente relativo promedio

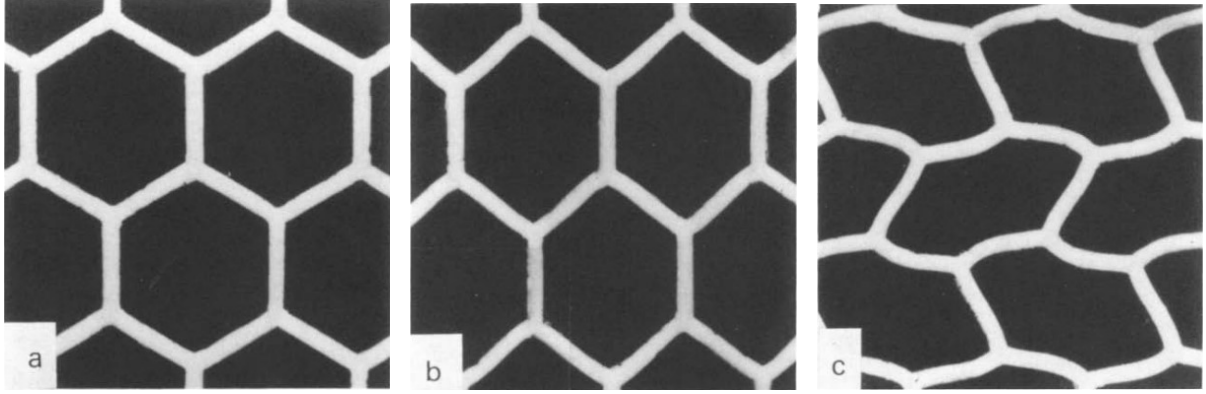
Porosidad [-]	Diferencia $\frac{E}{E_0}$
0.60	0.11121
0.65	0.07422
0.70	0.0449
0.75	0.008637

De los resultados expuestos, se desprenden dos puntos de análisis importantes:

i) El módulo elástico aparente experimental es mayor al módulo elástico aparente computacional.

Como se presentó anteriormente, los tres casos de estudio indistintamente de la vecindad o rango de porosidad teórico estudiado, poseen propiedades elásticas experimentales superiores a las computacionales. Tal diferencia en la respuesta elástica, se centra en que las porosidades experimentales son menores a las computacionales, en cada uno de estos rangos de porosidad teórico. Es importante mencionar, que la totalidad de los modelos de estudio poseen un 99 % de interconexión entre sus poros, es decir, son materiales reticulares que se conforman de una estructura interna abierta, y su conexión entre poros consiste en una red interconectada de ligamentos o puntales. De esta forma, la diferencia de porosidad entre un modelo experimental y computacional, con la misma relación de tamaño de poros y distribución no estructura de estos, se contextualiza en puntales de desiguales dimensiones, en otras palabras, los puntales o espesores de pared de los sólidos porosos experimentales, son mayores a las computacionales.

Dicha diferencia en los espesores de los puntales, es la clave a la respuesta elástica, dado que diferentes estudios (Gibson, 2000; Moongkhamklang et al., 2010; Nazir & Jeng, 2020; S. Wang et al., 2020) datan que dicha respuesta de los sólidos porosos comprimidos de celda abierta, se ve significativamente afectada por las propiedades de los materiales base, y la flexión de los puntales, que se representa mediante la figura 5.23.



(a) Material celular sin sollicitación mecánica. (b) Material celular con poca flexión, bajo compresión. (c) Material celular con flexión, bajo compresión.

Figura 5.23: Comparación de cantidad y relación de tamaños de poros.

De esta forma, los puntales fabricados dentro de los sólidos porosos presentan el rendimiento elástico de los materiales base ρ^2 , que concuerda con una relación previamente reportada entre los módulos elásticos de las materiales porosos de celda abierta y los parámetros estructurales (Gibson, 2000; Moongkhamklang et al., 2010; Nazir & Jeng, 2020; S. Wang et al., 2020), ya que, según la ecuación de la deflexión de un puntal, producida por un momento flector bajo la acción de una carga a compresión,

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI}, \quad (5.2)$$

se visualiza, que la deflexión se encuentra en función del módulo de Young del material base, y del momento de inercia del puntal, que en este caso depende de la densidad relativa de forma implícita, es decir, del espesor de pared de los sólidos porosos experimentales.

Con ello, se concibe que tanto los resultados experimentales como computacionales, poseen una respuesta elástica aparente con una fuerte dependencia de :

- Propiedad del material a granel.
- Flexión de los puntales.

Justificando, que la diferencia de la porosidad calculada, para sólidos porosos con una misma relación de tamaño de poros, porcentaje de interconectividad, distribución no estructurada de poros, y porosidad teórica, pueden presentar diferentes respuestas elástica aparente, dependientes del espesor de pared.

ii) En tanto que el nivel de heterogeneidad del dominio geométrico es mayor, la respuesta elástica experimental obtenida es más próxima a la computacional.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación muestran una proximidad de la respuesta elástica experimental y computacional, a medida que aumenta la relación de tamaño de poros, es decir, cuando el grado de heterogeneidad en el dominio geométrico es de mayor complejidad, ya que crece la cantidad de poros, para porosidades similares. En primera instancia, se debe

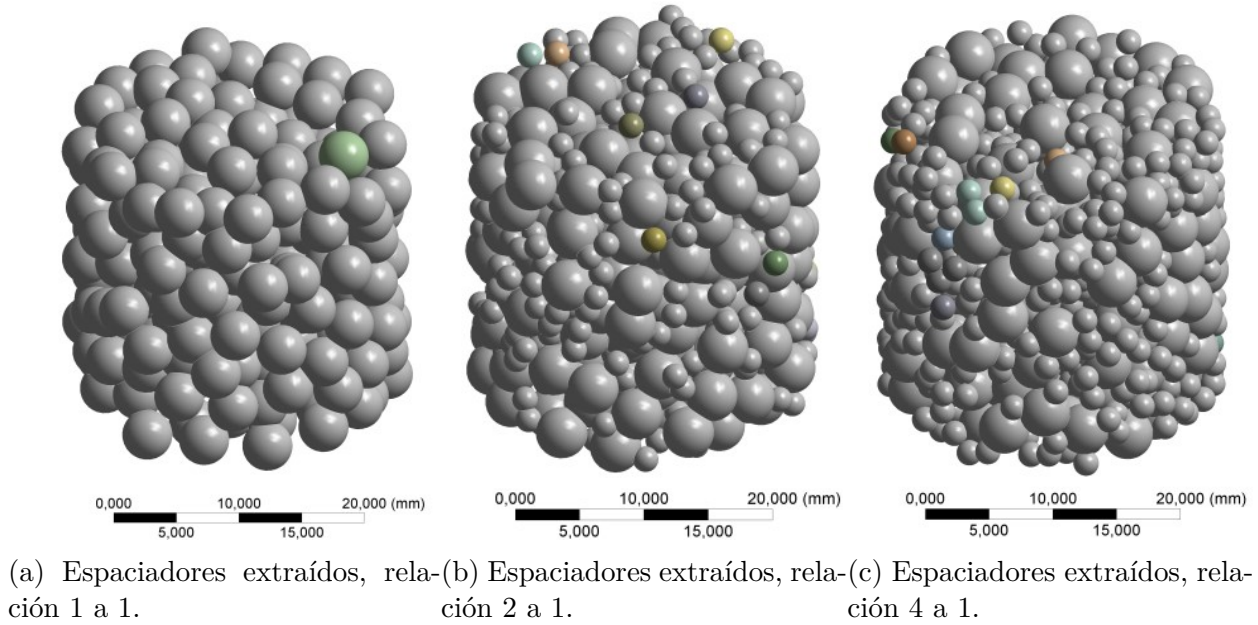


Figura 5.24: Comparación de cantidad y relación de tamaños de poros.

tener en cuenta que la diferencia de porosidad entre los resultados experimentales y computacionales disminuye, en cuanto la relación de tamaño de poros crece, es decir, para la relación de tamaño de poros 1:1, las diferencias de porosidad son mayores a la relación 2:1, y esta mayor a la relación 4:1. A su vez, en función de diferentes estudios, una de las características de mayor influencia en las propiedades mecánicas, en especial el módulo elástico aparente en los sólidos porosos de celda abierta o cerrada, es la porosidad, por lo que, esta proximidad de porosidad se materializa con valores elásticos cercanos, y convergentes.

En segunda instancia, desde un punto de vista estructural, una mayor proximidad en la porosidad, para los materiales porosos de igual relación de tamaños de poros y de igual distribución no estructurada de estos, significará una mayor cercanía dimensional de los puntales, y como se mencionó anteriormente, los puntales juegan un papel clave en el primer régimen o etapa inicial de la relación esfuerzo deformación, cuando los sólidos porosos de celda abierta son sometidos a compresión.

5.1.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados numéricos y experimentales se realizó utilizando el software estadístico Minitab en conjunto con Microsoft Excel y python. En todos los casos, el nivel de significación se estableció en $\alpha=0,05$.

La tabla 5.5, muestra los coeficientes de Spearman ρ con el estadístico t para cada relación de tamaño de poros, con el fin de comprobar si existe resistencia y dirección de la asociación monótona entre la porosidad experimental y el módulo elástico aparente, y con ello definir una dependencia estadística y correlación lineal.

Cuadro 5.5: Análisis de Correlación de Spearman

Relación tamaño de poros	Coef. Spearman	t-Student	t-Crítica
1 a 1	-0.9811	-38.678	$[-2,1, 2,1]$
2 a 1	-0.9856	-44.401	$[-2,1, 2,1]$
4 a 1	-0.962	-26.905	$[-2,1, 2,1]$

Los coeficientes de correlación de Spearman, para cada relación de tamaño de poros, son negativos y cercanos a 1, por ende, se establece estadísticamente que existe una casi perfecta asociación negativa entre los rangos, es decir, existe correlación inversamente proporcional entre la porosidad experimental y la respuesta elástica aparente. Además, el estadístico de t-student indistitamente de la relación de tamaños de poros, rechaza la hipótesis nula, y con ello, existe evidencia estadística suficiente, para concluir hay correlación lineal entre estas variables.

De esta manera, con el fin de establecer la significancia estadística de la porosidad sobre el módulo elástico aparente, para cada una de las relaciones de tamaños de poroso, se desarrolló un análisis de regresión lineal entre estos factores.

Las tablas 5.6, 5.7, y 5.8, presentan este análisis de regresión lineal para la relación de tamaños de poros 1:1, 2:1, y 4:1 respectivamente. Donde, se muestra, que existe una relación estadísticamente significativa, entre la porosidad experimental y la respuesta elástica aparente de los sólidos porosos en estudio.

Cuadro 5.6: Análisis de regresión lineal en la relación de tamaños de poros 1:1.

FV	S. C.	G.L.	C.M.	F_0	P-Value
Regresión	2.0783E+17	1	2.0783E+17	3804.211	3.67E-74
Error o residual	3.16863E+15	58	5.46316E+13		
Total	2.10999E+17	59	3.57625E+15		

De esta forma, la porosidad como variable independiente, es estadísticamente significativa en la respuesta elástica aparente de los sólidos porosos en estudio, siendo la variable dependiente.

Cuadro 5.7: Análisis de regresión lineal en la relación de tamaños de poros 2:1.

FV	S. C.	G.L.	C.M.	F ₀	P-Value
Regresión	2.23891E+17	1	2.23891E+17	2896.194	3.30E-51
Error o residual	4.48371E+15	58	7.73054E+13		
Total	2.28375E+17	59	3.87076E+15		

Cuadro 5.8: Análisis de regresión lineal en la relación de tamaños de poros 4:1.

FV	S. C.	G.L.	C.M.	F ₀	P-Value
Regresión	2.33134E+17	1	2.33134E+17	2115.819	2.42E-5147
Error o residual	6.3908E+15	58	1.10186E+14		
Total	2.39525E+17	59	4.05974E+15		

En la figura 5.25, se grafican las ecuaciones lineales establecidas por el análisis de regresión, junto con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2).

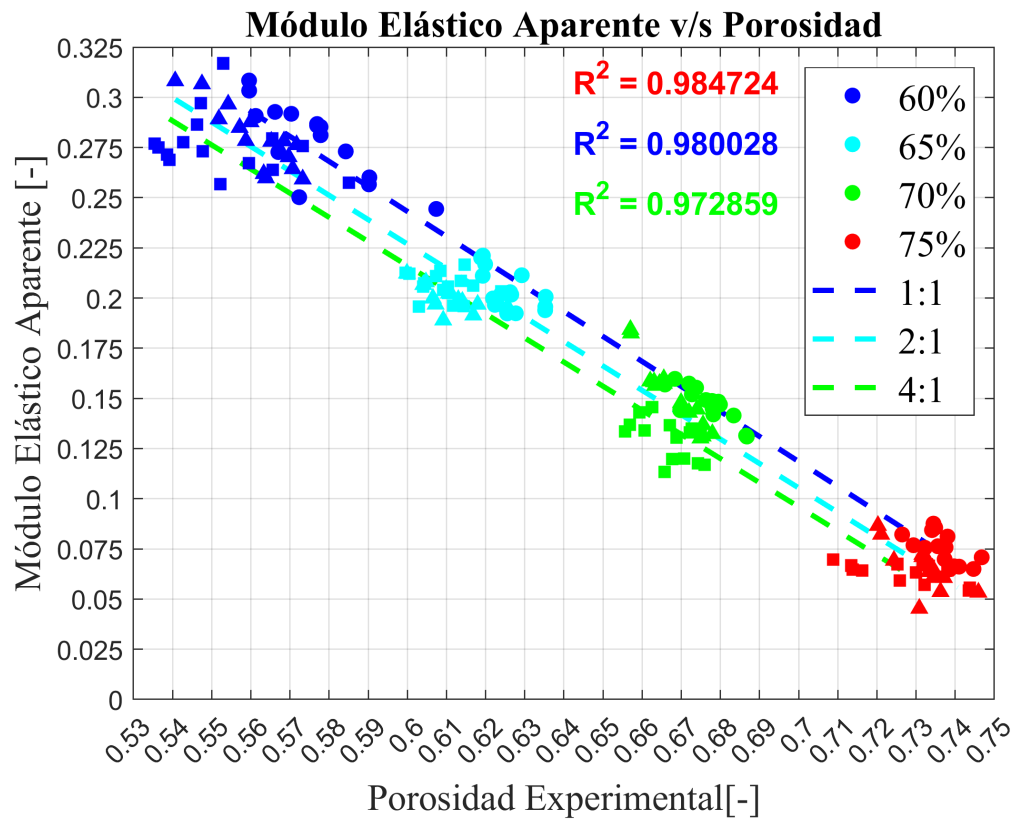


Figura 5.25: Análisis de Regresión lineal entre porosidad experimental, y Módulo Elástico Aparente normalizado

Las ecuaciones 5.4, 5.4, y 5.5, presentan de forma numérica, la relación entre la porosidad experimental y la respuesta elástica aparente, obtenidos mediante el análisis de regresión lineal, para la relación de tamaños de poros 1:1, 2:1, y 4:1.

$$1 - 1 \rightarrow y = 777081736 - 9772996,747 \cdot X; R^2 = 0,984 \quad (5.3)$$

$$2 - 1 \rightarrow y = 749715732,8 - 9529445,831 \cdot X; R^2 = 0,980 \quad (5.4)$$

$$4 - 1 \rightarrow y = 735212091,9 - 9427898,47 \cdot X; R^2 = 0,972 \quad (5.5)$$

A modo de comparación, también se desarrolló un análisis de regresión exponencial ajustada con análisis estadístico, con el fin de establecer los coeficientes de determinación (R^2), y compararlos con los proporcionados por el ajuste lineal. Dicho ajuste estadístico exponencial se presenta en la figura 5.26.

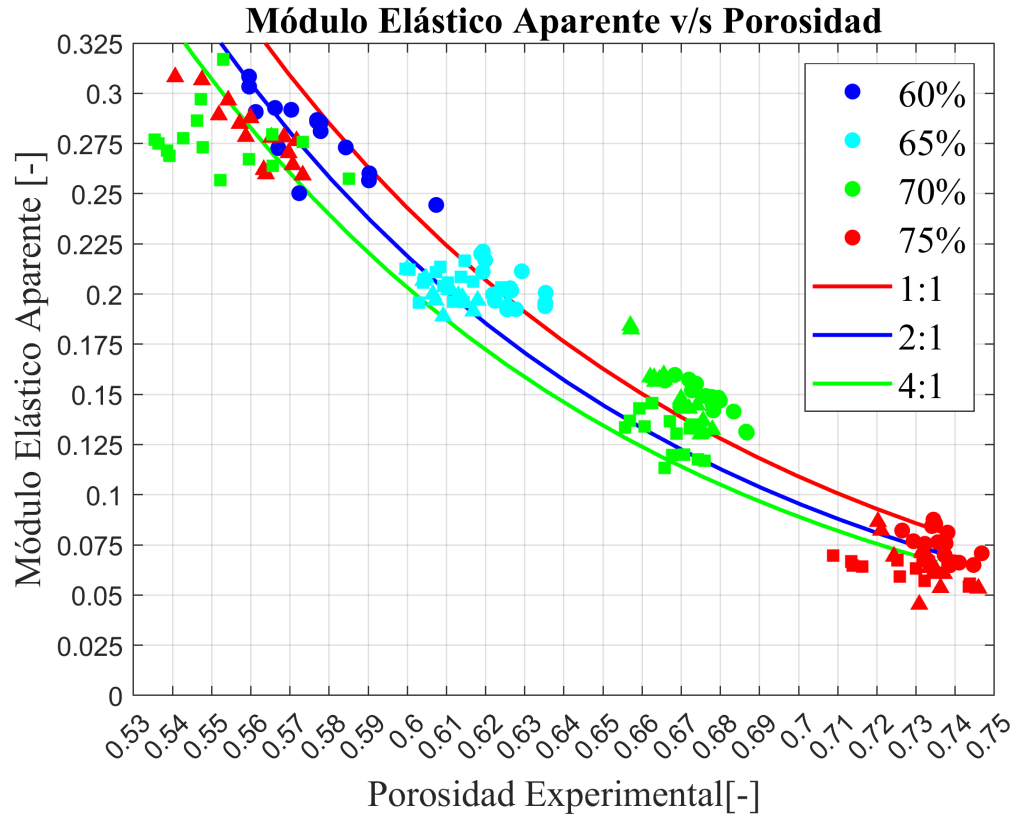


Figura 5.26: Análisis de Regresión exponencial entre porosidad experimental, y Módulo Elástico Aparente normalizado

La tabla 5.9, muestra los coeficientes para las diferentes curvas de aproximación exponenciales graficadas en la figura 5.26.

Cuadro 5.9: Análisis de regresión Exponencial, para diferentes tamaños de poros

Ecuación	k	m	R^2
1:1	29.6468	-8.0077	0.9621
2:1	31.5610	-8.2855	0.9327
4:1	28.6850	-8.2506	0.9486

De acuerdo a los coeficientes de ajuste R^2 de la regresión exponencial, se aprecia, que la regresión lineal es más aceptable y predice de mejor manera, la respuesta elástica aparente en función de la relación de tamaños de poros y porosidad.

Si bien, se ha probado que la porosidad influye en la respuesta elástica aparente, los análisis no han determinado la significancia de la relación de tamaños de poros, es por ello, que la tabla 5.10, ilustra un análisis de covarianza, para establecer si la relación de tamaños de poros, es estadísticamente significativa sobre la respuesta elástica aparente.

Cuadro 5.10: Análisis de Covarianza

F. Variación	G.D.L.	SS	MSE	F0	P-value
Rel. tamaño de poros	0.0233	2	0.01169	49.364	$9,5852E - 18$
Error	0.0416	176	0.00023		
Total	0.0650	179			

Dado los resultados del análisis de covarianza, se comprueba que existe evidencia estadística que prueba la significancia de la relación de tamaño de poros sobre el comportamiento elástico aparente. De esta forma, tanto la relación de los tamaños de los poros y la porosidad ejercen efectos significativos (valor $P < 0.005$) sobre el módulo elástico aparente.

Además la interacción entre ambos factores también fue estadísticamente significativa (valor $P < 0.005$), lo que pone de manifiesto su influencia combinada en la respuesta elástica. Finalmente, se observa que el efecto de la relación del tamaño de los poros varía en función de la porosidad.

La tabla 5.11, presenta los resultados de la regresión lineal múltiple codificada extendida, confirmando la significancia estadística de la porosidad, la relación de tamaño de poros y la interacción entre estos factores en la respuesta elástica.

En este contexto, la porosidad es el factor con mayor significancia que influye en la respuesta elástica, seguida de la relación entre el tamaño de poros, y, finalmente, la interacción entre ambos factores.

Cuadro 5.11: Análisis de Regresión lineal múltiple

Estadísticos de regresión	
Coficiente de correlación múltiple	0.9658
Coficiente de determinación R^2	0.93378
Regresión múltiple	
Factor	Coficiente β
Intercepción	1.79058
Porosidad	-3.68
Relación tamaño de poro	-0.04137
Porosidad x Rel. tamaño de poro	0.02885
Porosidad x Porosidad	1.86780
Rel. tamaño de poro x Rel. tamaño de poro	0.00312

La figura 5.27 muestra la superficie de respuesta obtenida mediante la regresión múltiple. La superficie coloreada representa la respuesta predicha por el modelo, mientras que los marcadores rojos corresponden a los datos experimentales. Los resultados ponen de manifiesto la influencia tanto de la porosidad como de la relación de tamaño de poro en el aparente comportamiento elástico del material.

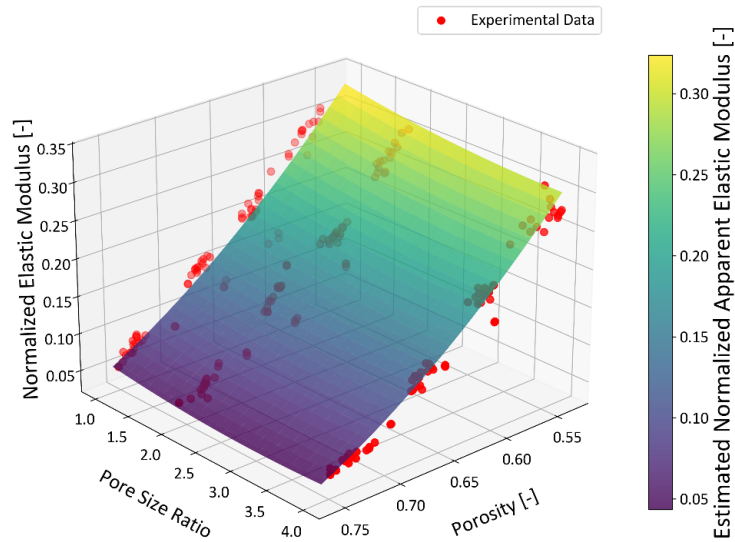


Figura 5.27: Superficie de respuesta obtenida a partir de un modelo de regresión lineal múltiple que muestra el efecto combinado de la porosidad y la relación de tamaño de poro (1:1, 2:1 y 4:1) sobre el módulo elástico aparente normalizado.

Se observa que el módulo elástico aparente disminuye con el aumento de porosidad. De manera similar, pero menos pronunciada se visualiza una reducción en la respuesta elástica, a medida que aumenta la relación de tamaño de poros. Estos resultados indican que no solo la cantidad de porosidad afecta a la rigidez de la estructura, sino también a la distribución de los tamaños de los poros. Las estructuras con una distribución más heterogénea (es decir, con una mayor proporción de tamaño de poros) tienden a ser menos rígidas que aquellas con poros más homogéneos. En tanto para la comparación estadística entre la respuesta elástica aparente computacional y experimental. La figura 5.28, presenta la relación del módulo elástico y la porosidad de la data computacional (figura 5.28a), junto con la regresión lineal de los resultados computacionales y experimentales (figura 5.28b), y sus respectivos coeficientes de ajuste.

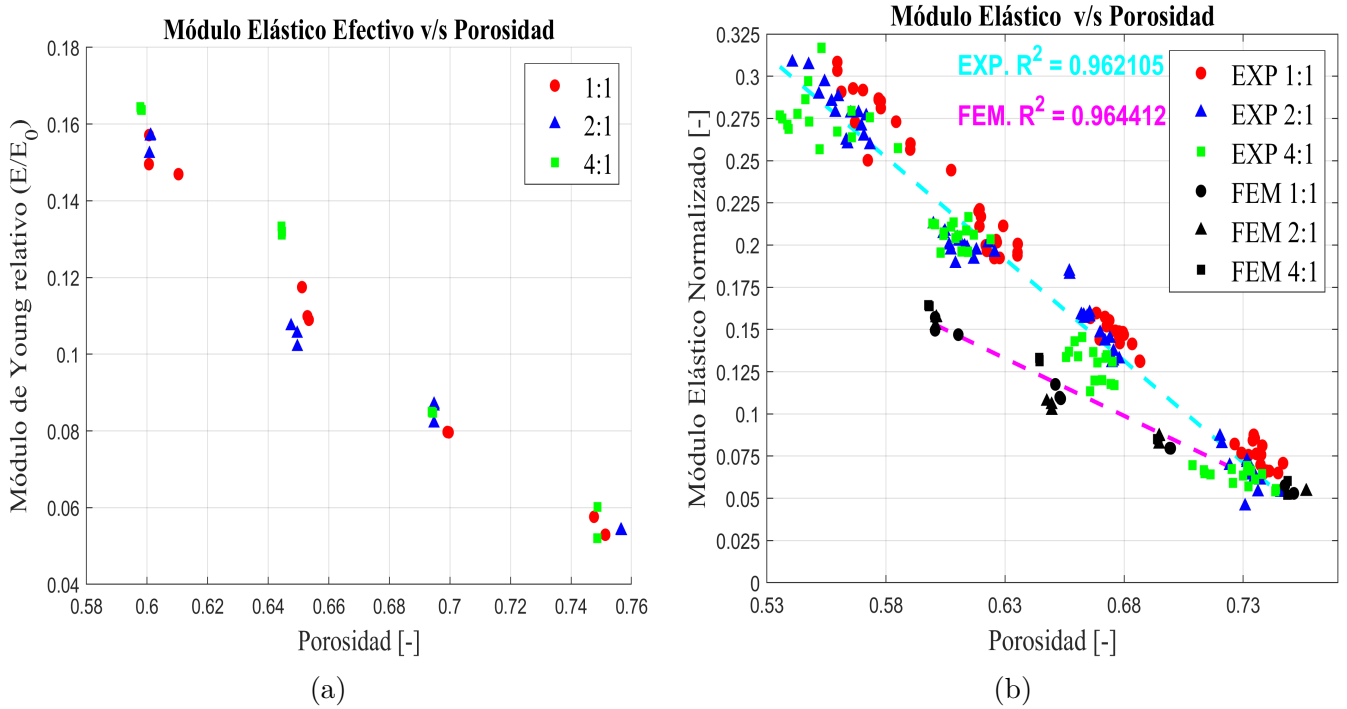


Figura 5.28: Análisis de Regresión lineal de respuesta elástica experimental y computacional

En estas figuras, se aprecia, que la respuesta elástica aparente computacional es inferior en magnitud, a la respuesta elástica aparente experimental, lo cual, es esperable dado que existe una diferencia de porosidades entre ambas datas. Además, se visualiza que la respuesta elástica experimental y computacional se aproxima a medida que aumenta la porosidad, puesto que, las porosidades de las muestras impresas y de los modelos computacionales, tienden a converger, cuando aumenta la porosidad teórica.

5.1.7. Análisis de Experimentos, diseño factorial

Con el fin de comprobar si la porosidad, junto con la relación de tamaño de poros, y la variabilidad de porosidad en cada vecindad o rango teórico de porosidad, son significantes o influyen en las propiedades mecánicas, específicamente en la respuesta del módulo elástico aparente, en los sólidos porosos impresos en manufactura aditiva. Se implementó un análisis de diseño factorial 3^k , con de tres factores fijos, que corresponden a cada factor mencionado, donde cada uno de estos factores a su vez poseen tres niveles, que deben ser equidistantes entre sí:

- Factor A: Porosidad de 60 %, 65 %, 70 %, y 75 %.
- Factor C: Relación de tamaño de poros 1:1, 2:1, y 4:1.
- Fator B: Variabilidad de porosidad, en cada vecindad o rango teórico.

En relación al primer factor, pese a que las porosidad obtenidas de forma experimental son menores a las teóricas, las figuras 5.3, 5.4 y 5.5, muestran que las porosidades experimentales poseen la misma tendencia a las teóricas, y presentan una relación prácticamente de 45° , por lo cual, se respeta tal factor por vecindades.

Es importante mencionar que si bien el tercer factor, esto es, la variabilidad de porosidad en cada vecindad, se encuentra influenciado por la relación de tamaño de poros y cantidad de estos (porosidad), su resultado es consecuencia de un proceso estocástico, y se considera como una variable independiente a estos dos factores. Es decir, aunque las condiciones de contorno son las mismas (tamaño de poros y cantidad de partículas) para ciertas espumas porosas, las pequeñas diferencias de porosidad obtenidas en cada rango teórico, se deben a que las simulaciones implementadas a través el software de elementos discretos LIGGTHS, emplea una nueva distribución no estructurada o aleatoria de poros, y como consecuencia de ello, las porosidades en cada rango son cercanas, pero no iguales.

En miras al análisis, el diseño factorial considera en su análisis el estudio de todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores, dando paso, al análisis de las interacciones o efecto cruzado de los factores, según la tabla 3.5. A su vez, es pertinente establecer que la variabilidad de porosidad, en cada vecindad, junto con la relación de tamaño de poros, se consideran factores categóricos, y que las vecindades o rangos de porosidad se consideran factores numéricos.

Como se mencionó anteriormente, en el diseño factorial 3^k , cada factor posee tres niveles, por esta razón dicho análisis estadístico se subdivide en dos partes. La primera se presenta en la tabla

5.12, donde el factor de porosidad que corresponde al de porosidad, contiene las vecindades de porosidad 60 %, 65 % y 70 %.

Cuadro 5.12: Factore diseño factorial 3^k , primera parte.

Factor	Niveles	Valores
A	3	60; 65 ; 70
B	3	1;2;3
C	3	1;2;3

La segunda parte del análisis estadístico, se muestra en la tabla 5.13, y se consideran las vecindades de porosidad de 65 %, 70 % y 75 %.

Cuadro 5.13: Factores diseño factorial 3^k , segunda parte.

Factor	Niveles	Valores
A	3	65; 70 ; 75
B	3	1;2;3
C	3	1;2;3

Para desarrollar adecuadamente un análisis de diseño factorial 3^k es en extremo importante satisfacer tres supuestos o hipótesis (Montgomery, 2008):

1. Los factores son fijos.
2. Los diseños son completamente aleatorizados.
3. Se deben satisfacer los supuestos de normalidad usuales.

En relación a estos supuestos; la primera hipótesis se cumple como se expuso previamente, dado que los tres factores son fijos e independientes entre sí. De la misma forma, la segunda hipótesis se cumple, ya que tanto el orden del proceso de impresión o fabricación de los sólidos porosos, como el orden de los ensayos a compresión, fueron aleatorizados como se presenta en las figura 4.17 y 4.18, respectivamente en el apartado de metodología.

Por último, la tercera hipótesis que consiste en cumplir el supuesto de normalidad $NID \sim (0, \sigma^2)$ para los errores, se corrobora a través de la construcción y análisis de una gráfica de probabilidad normal con los residuales.

Si la distribución fundamental de los errores es normal, esta gráfica tendrá la apariencia de una línea recta (Montgomery, 2008). Es importante mencionar, que para visualizar esta línea recta, deberá prestarse más atención a los valores centrales de la gráfica que a los valores extreños.

La figura 5.29 ilustra el gráfico de probabilidad normal de los residuales, para el primer análisis estadístico, que corresponde al rango de porosidad de 60 %, 65 % y 70 %. En tal figura, se visualiza claramente que el 96.1 % de los residuales se encuentran en la línea recta, y solo el 3.9 % de los residuales no están en ella. Sin embargo, este 3.9 % pertenece solo a los extremos, por lo que se comprueba el supuesto de normalidad, para el primer diseño factorial.

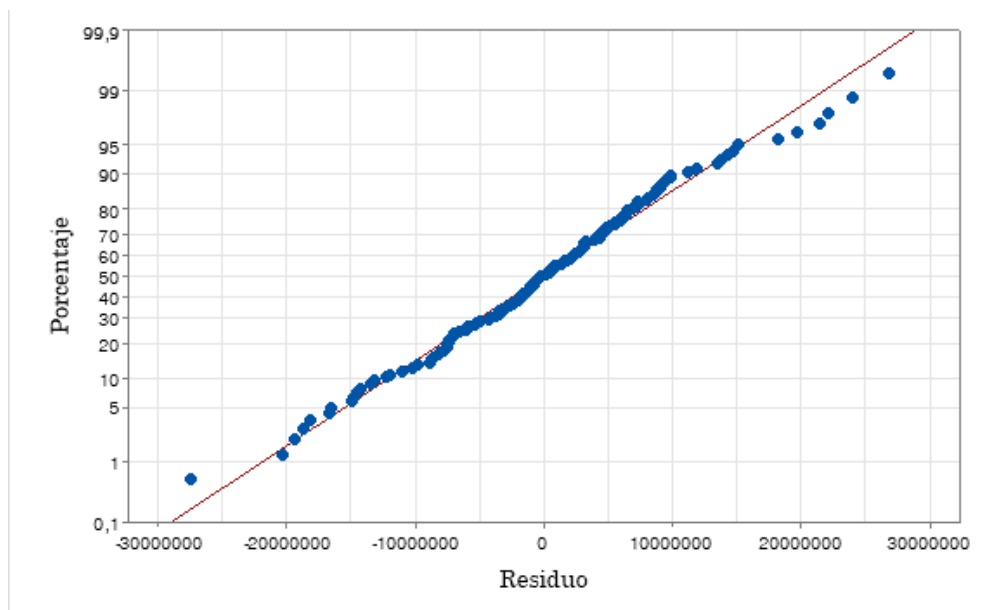


Figura 5.29: Grafica de probabilidad normal, rango de porosidad 60 %, 65 % y 70 %.

A su vez, la figura 5.30 muestra el gráfico de probabilidad normal de los residuales, para el segundo análisis estadístico de diseño factorial 3^k , donde el factor de rango de porosidad comprende los valores de 65 %, 70 % y 75 %.

En la figura 5.30, se presenta que el 97.2 % de los valores, están ubicados sobre la línea recta, y solo el 2.7 %, no se ubica sobre ella. Si bien, este 2.7 % de valores pertenecen a los extremos, se aprecia que dos de ellos están más alejados de la línea recta de los esperado, por lo que es pertinente realizar un análisis de residuos estandarizados, con el fin de descartar un punto atípico potencial, y de esa manera, que el estadístico de significancia no posea un ruido.

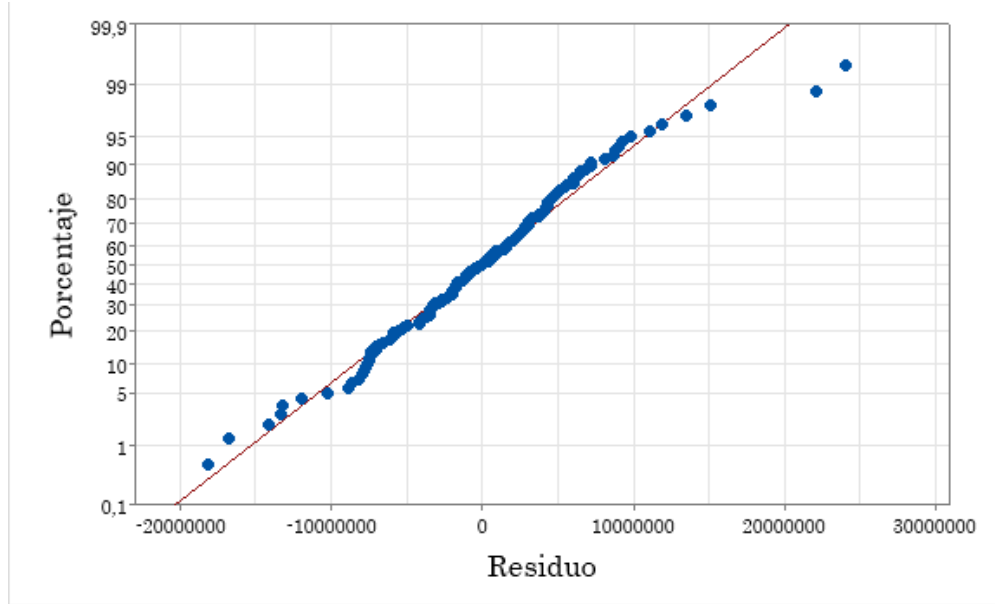


Figura 5.30: Gráfica de probabilidad norma, rango de porosidad 65 %, 70 % y 75 %.

Según la literatura, la ecuación 5.6, proporciona el cálculo del residuo estandarizado, y establece que cerca de 68 % de los residuos estandarizados deberán estar incluidos dentro de los límites ± 1 , cerca del 95 % de ellos deberán estar incluidos dentro de ± 2 y virtualmente todos ellos deberán estar incluidos dentro de ± 3 o 4. Un residual mayor que 4 desviaciones estándar a partir de cero es un punto atípico potencial.

$$d = \frac{e}{\sqrt{MS_E}}. \quad (5.6)$$

La tabla 5.14, muestra el cálculo de los dos residuales estandarizados, y se aprecia que ninguno de estos, es un punto atípico, por ende, el supuesto de normalidad no corre peligro, y el estadístico no posee ruido.

Cuadro 5.14: Residuos estandarizados

Valor	$\sqrt{MS_E}$	Residuo Estandarizado
21800000	7318469.8	2.978
24000000	7318469.8	3.27

El análisis de diseño factorial, para los dos casos ya mencionados, se realizó con un valor de probabilidad $\alpha = 0,05$ asociado al error tipo I. Esto se traduce a un nivel significación o coeficiente de confianza del 95 %, lo que implica que el estadístico calculado en el análisis de diseño factorial es correcto el 95 % de las veces, y por ende, existe una evidencia estadística con un error tipo I del 5 % de rechazar la hipótesis nula, cuando esta es verdadera.

En la tabla 5.15 se presentan los resultados del primer análisis de diseño factorial. El P-crítico de este análisis es 0.05, y todos los factores o interacciones que tengan un P-Value menor al crítico (P-Value <P-Crítico), influyen o poseen una evidencia estadística significativa con la respuesta, que en este caso el módulo elástico aparente.

De esta forma, se aprecia que el factor A correspondiente a la porosidad, influye en la respuesta del módulo elástico aparente, también el factor C, que representa la relación de tamaño de poros es significativa con la respuesta del módulo elástico aparente, y por último la interacción de los factores A y C, que es la combinación del efecto de porosidad con la relación de tamaño de poros, influyen en la propiedad elástica.

Cuadro 5.15: Datos típicos para un experimento de un solo factor.

FV	S. C.	G.L.	C.M.	F₀	F Crit.	P-Value
Factor A	2.526E+17	2	1.263E+17	1182.79	3.08	3.67E-74
Factor B	6.232E+14	2	3.116E+14	2.917	3.08	0.0583
Factor C	7.884E+14	2	3.942E+14	3.690	3.08	0.0281
AxB	3.818E+14	4	9.546E+13	0.89	2.45	0.470
AxC	2.029E+15	4	5.0739E+14	4.750	2.455	0.00143
AxBxC	4.369E+14	8	5.462E+13	0.511	2.025	0.8455
Residual	1.153E+16	108	1.068E+14			
Total	2.685E+17	134				

La figura 5.31, ilustra de forma gráfica el nivel de significancia o influencia de los efectos estandarizados con la respuesta del módulo elástico aparente. En esta, se vislumbra que el efecto del factor A (porosidad) es el más influyente en la respuesta, dado que posee un efecto estandarizado del 7.5[-], luego sigue la interacción AC, la cual presenta un efecto estandaizado menor al factor A de 3.5[-], y la última influencia, viene el efecto estandarizado del factor C (relación de tamaño de poros).

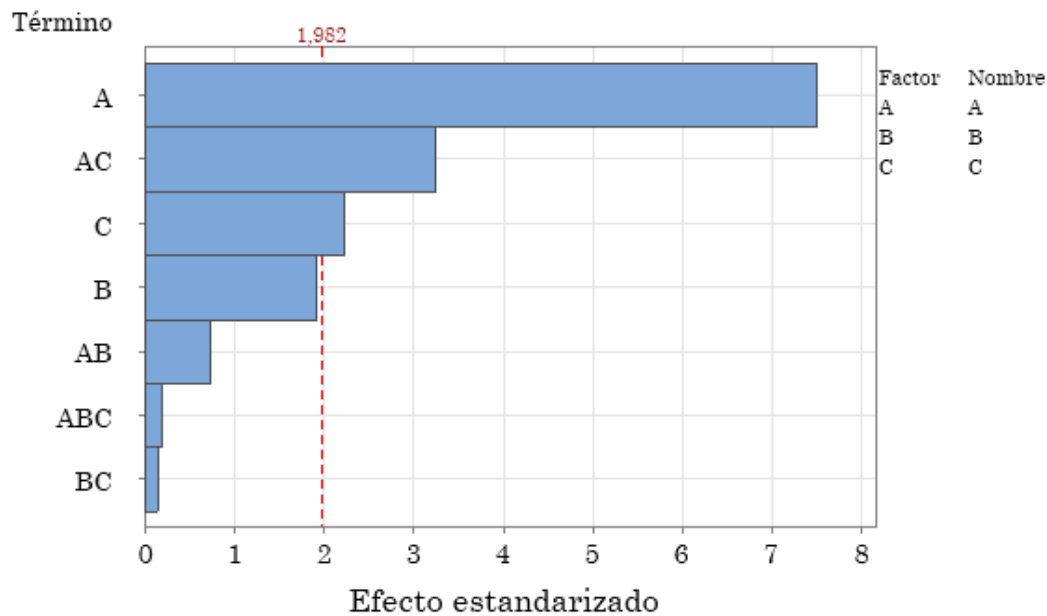


Figura 5.31: Diagrama de pareto, rango de porosidad 60 %, 65 % y 75 %.

La diferencias en la magnitud de los efectos principales estandarizados mostrados en la figura 5.31, se aprecian de mejor forma en la figura 5.32. Donde se presenta, la influencia de cada efecto principal por separado, sobre la repuesta del módulo elástico aparente. En tal figura, se puede ver, que la variación del factor A (porosidad), genera un cambio significativo en la respuesta elásticas de los materiales porosos impresos, en comparación con el efecto de los factores B, y C.

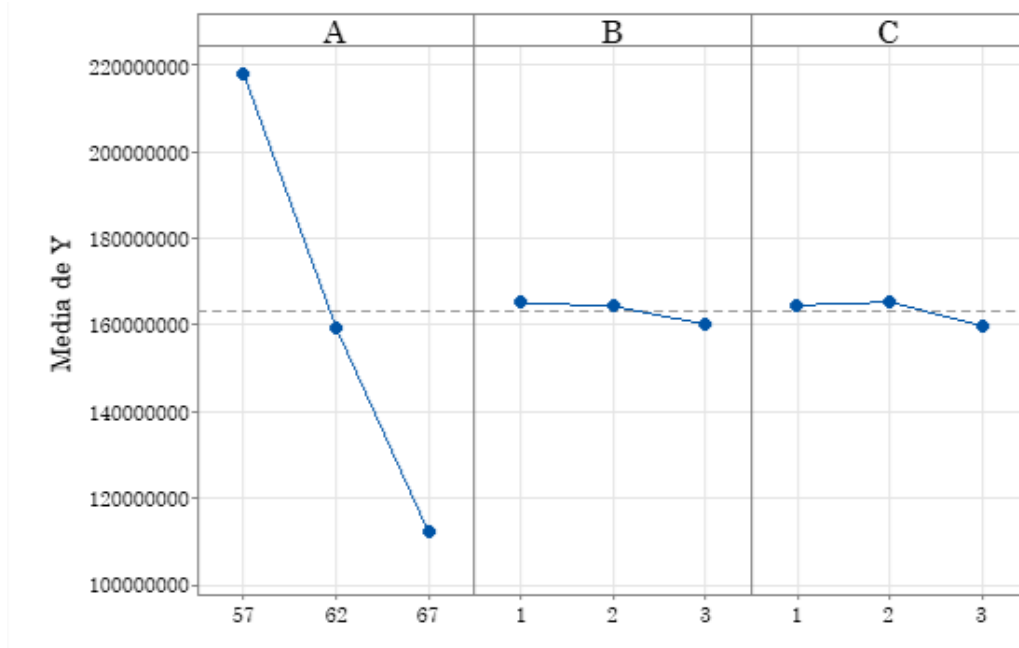


Figura 5.32: Gráfica de efecto principales, rango de porosidad 60 %, 65 % y 70 %.

Los efectos de las interacciones o combinación de los factores, sobre la propiedad elásticas de los sólidos porosos fabricados, se muestran en la figura 5.33. Es claro que la interacción entre los factores BxC, no presentan un efecto significativo en la respuesta, es decir, la variabilidad de la porosidad en cada vecindad o rango teórico de porosidad con la interacción de la relación de tamaño de poro, no produce una respuesta de influencia en el módulo elástico aparente, dado que la tendencia de la media es prácticamente horizontal.

En el caso de la interacción entre los factores AxB, se aprecia que la respuesta del módulo elástico aparente varía. sin embargo, para cualquier variabilidad interna de porosidad indistintamente de la vecindad graficada, es decir, para los tres niveles del factor de B, la tendencia en el módulo elástico aparente es prácticamente igual, por lo que la variación de esta propiedad elásticas en la presente interacción, se debe a la influencia del factor A (porosidad) por sí sola.

En la última interacción, donde se combinan los factores de AxC, se visualiza que la respuesta del módulo elástico aparente cambia, a medida que estos factos varían. A su vez, la tendencia de esta respuesta elástica, para las distintas relaciones de tamaño de poros, no es la misma, por lo que, la interacción de estos dos factores es de influencia en la respuesta del módulo elástico aparente.

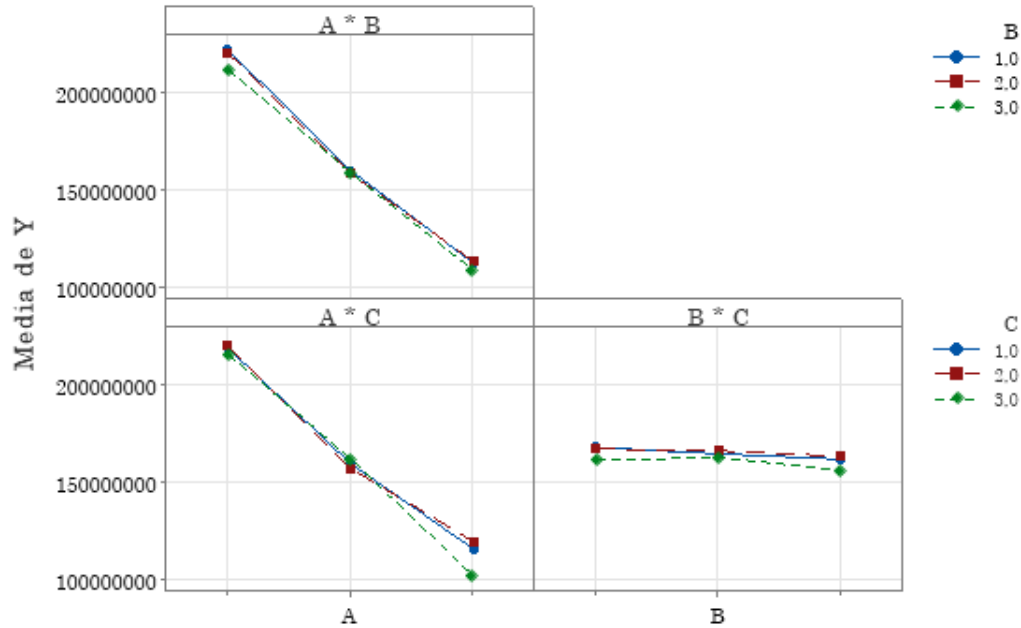


Figura 5.33: Gráfica de interacciones o efectos combinados, rango de porosidad 60 %, 65 % y 70 %.

En la tabla 5.16 se presentan los resultados del segundo análisis de diseño factorial. Al igual que en el análisis anterior, el P-crítico de este análisis es 0.05, y todos los factores o interacciones que tengan un P-Value menor al crítico (P-Value < P-Crítico), influyen o poseen una evidencia estadística significativa con la respuesta, que en este caso el módulo elástico aparente.

Cuadro 5.16: Datos típicos para un experimento de un solo factor.

FV	S. C.	G.L.	C.M.	F ₀	F Crit.	P-Value
Factor A	2.638E+17	2	1.319E+17	2463.25	3.08	7.927E-91
Factor B	6.889E+13	2	3.444E+13	0.643	3.08	0.527
Factor C	7.362E+14	2	3.681E+14	6.872	3.08	0.00155
AxB	1.323E+14	4	3.308E+13	0.617	2.45	0.650
BxC	1.512E+14	4	3.781E+13	0.706	2.455	0.589
AxC	2.205E+15	4	5.512E+14	10.291	2.455	4.246E-7
AxBxC	2.395E+14	8	2.994E+13	0.558	2.025	0.809
Residual	5.784E+15	108	5.356E+13			
Total	2.731E+17	134				

Según esta tabla 5.16, se observa que el factor A influye en la respuesta elástica, de la misma manera que el factor C, como también la interacción de ambos factores.

El diagrama de Pareto de los efectos estandarizados se presenta en la figura 5.34, e ilustra de forma gráfica el nivel de significancia o influencia de los efectos estadarizados, sobre la respuesta del módulo de elástico aparente. En esta, se vislumbra que el efecto del factor A (porosidad) es

el más influyente en la respuesta, dado que posee un efecto estandarizado del 7.5[-], luego sigue la interacción AC, la cual presenta un efecto estandarizado menor al factor A de 5.5[-], y la última influencia, viene el efecto estandarizado del factor C (relación de tamaño de poros) con un valor de 3.2[-].

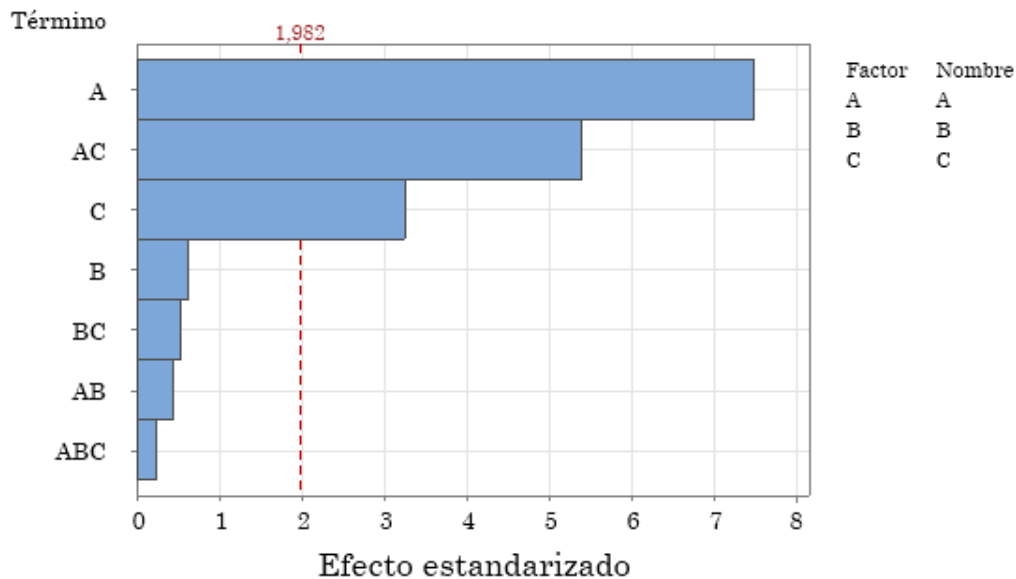


Figura 5.34: Diagrama de pareto, rango de porosidad 65 %, 70 % y 75 %.

A diferencia del diagrama de Pareto obtenido en el primer análisis de diseño factorial, los factores A, C y la interacción AC, poseen efectos estandarizados con mayor magnitud, a diferencia de los efectos e interacciones que no son significantes en la respuesta del módulo de elástico.

Dicha diferencia en la magnitud de los efectos principales significantes con los no significantes, se visualiza en la figura 5.35, donde se puede ver, que la variación del factor A (porosidad), genera un cambio significativo en la respuesta elásticas de las espumas impresas, en comparación con el efecto de los factores B y C. Es importante destacar, que el efecto principal del factor C en comparación con el efecto del factor B, produce una mayor influencia en la propiedad elástica, como se aprecia en la figura.

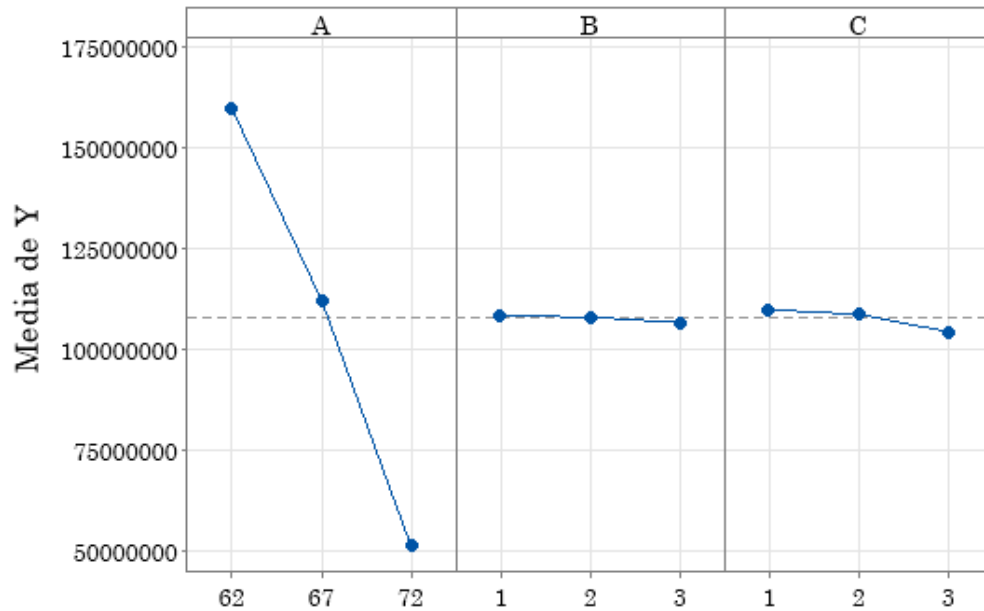


Figura 5.35: Gráfica efectos principales, rango de porosidad 65 %, 70 % y 75 %.

Los efectos de las interacciones o combinación de los factores, sobre la propiedad elásticas de los materiales porosos impresos, se muestran en la figura 5.36. Los veredictos de estas interacciones, son los mismos que los obtenidos en el primer análisis, donde la variabilidad de la porosidad en cada vecindad de porosidad teórica, junto con la relación de tamaño de poros, no provee una significancia estadística en la respuesta elásticas.

Lo mismo ocurre, en la interacción de los factores $A \times B$, donde los niveles del factor B en combinación con las vecindades de porosidad, no son influyentes en la respuesta elástica de los sólidos porosos fabricados con manufactura aditiva.

Sin embargo, la interacción de los factor $A \times C$, si influyen en la respuesta elástica, lo cual se visualiza claramente, dado que la tendencia de esta respuesta elástica, para las distintas relaciones de tamaño de poros, no es la misma, por lo que, afecta en la elasticidad.

La tendencia de la interacción $A \times C$, también muestra que, la respuesta del módulo de Young en la relación 4:1, es prácticamente lineal, a diferencia de la relación 2:1, y 1:1, ya que estas últimas, prácticamente poseen un efecto combinado muy similar, lo cual es sumamente interesante, dado que este efecto combinado se acentúa, en modelos con una mayor heterogeneidad.

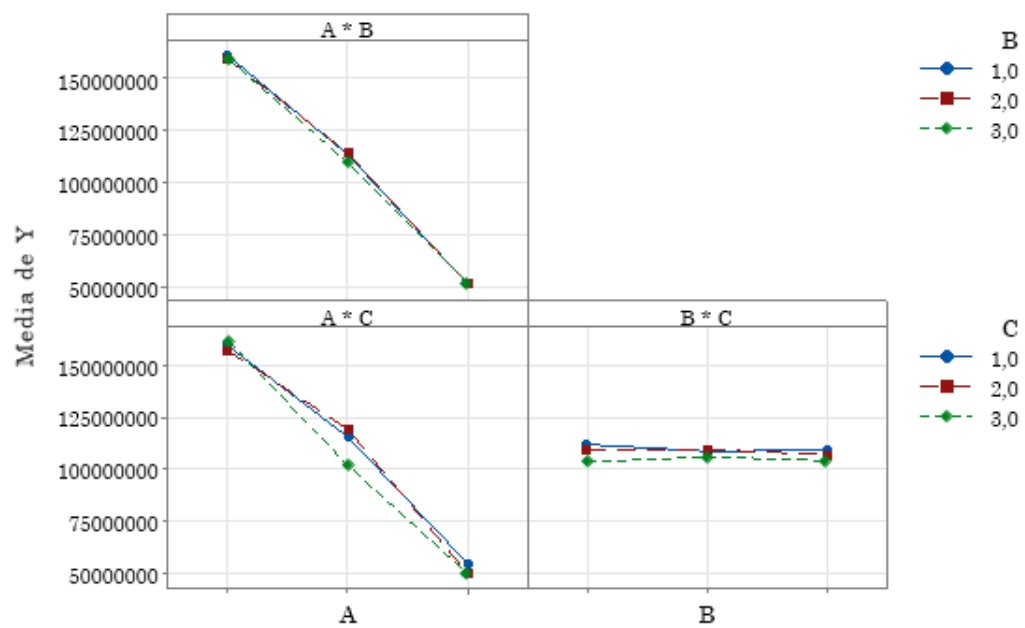


Figura 5.36: Gráfica de interacciones o efectos combinados, rango de porosidad 65 %, 70 %, y 75 %.

Capítulo 6

Conclusión

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo realizado.

Se logró realizar las simulaciones numéricas, fabricación de los modelos computacionales, y los ensayos experimentales, para analizar de manera completa los tipos de geometría en este estudio. En primera instancia, se corrobora que la fabricación mediante manufactura aditiva, proporciona impresiones de materiales porosos, con buena precisión, cuya morfología y topología es próxima a la computacional, dado que la porosidad calculada por el principio de Arquímedes, y la respuesta elástica obtenida mediante ensayos experimentales de compresión, presentan valores cercanos a los computacionales, y sus respectivas tendencias son pariguales, en todos los rangos de porosidad teóricos.

Por ende, el uso de la manufactura aditiva, para fabricar geometrías complejas como los sólidos porosos, es conveniente con el fin de obtener muestras impresas con aspectos morfológicos controlados, como es el caso de la relación de tamaño de poros, distribución no estructurada de poros, y porosidad, lo que implica una predicción adecuada de sus propiedades mecánicas.

De esta manera, se entregan como conclusiones importantes, los siguientes puntos.

- La porosidad experimental obtenida por el principio de Arquímedes, es inferior a la porosidad computacional, lo que implica y se ratifica en las propiedades de estudio, dado que la respuesta elástica del módulo elástico aparente experimental, es superior a la respuesta elástica del módulo elástico aparente computacional, en todos los rangos de porosidad. De esta forma, se infiere que la diferencia entre estos resultados, se debe netamente a un tema de porcentaje de porosidad.
- Se encuentra evidencia estadística con un intervalo de confianza del 95 %, que tanto la porosidad como la relación de tamaño de poros como efectos independientes son significantes, y por ende, ambas por separado influyen en la respuesta del módulo elástico aparente. Así, la porosidad posee un efecto estandarizado mayor que la relación de tamaño de poros

sobre el módulo elástico aparente, y se ve reflejado en el diagrama de pareto en la figura 5.31 y figura 5.34, con valores de 7.5[-] y 3.1[-] respectivamente.

- La interacción o combinación de los factores de porosidad y relación de tamaño de poros, son significantes en la respuesta del módulo elástico aparente, con un efecto estandarizado de 5.3[-], de esta manera, cuando se combina estos factores, se puede optimizar la respuesta elástica.
- No se encontró evidencia estadística, con un intervalo de confianza del 95 %, que la variación de la porosidad dentro de las vecindades, sean influyentes o significativas en el módulo elástico aparente, por lo que, aquellas variaciones de porosidad dentro de cada vecindad, pueden considerarse como valores cerrados de 60 %, 65 %, 70 %, y 75 %.
- Al no tener evidencia estadística de la significancia de aquellas variaciones dentro de la vecindad de porosidad sobre el módulo elástico aparente, se concluye que la distribución no estructurada de poros no influye o no es significativa en la respuesta del módulo elástico aparente, siempre y cuando, la porosidad y la relación de tamaños de poros sean fijas. De esta forma, si se poseen dos modelos con igual porosidad y relación de tamaño de poros, la respuesta elástica debe ser cercana a pesar, que la distribución de los poros no estructurada sea completamente diferente.

Referencias

- Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248-257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Ali, N. B., Khlif, M., Hammami, D., & Bradai, C. (2019). Mechanical and morphological characterization of spherical cell porous structures manufactured using FDM process. *Engineering Fracture Mechanics*, 216, 106527.
- Andrews, E., Sanders, W., & Gibson, L. J. (1999). Compressive and tensile behaviour of aluminum foams. *Materials Science and Engineering: A*, 270(2), 113-124.
- Antunes, F. V., Ferreira, J. A. M., & Capela, C. (2011). Numerical modelling of the Young's modulus of syntactic foams. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(2), 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2010.09.007>
- Ashby, M. F., & Medalist, R. F. M. (1983). The mechanical properties of cellular solids. *Metallurgical Transactions A*, 14(9), 1755-1769. <https://doi.org/10.17141/urvio.13.2013.1178>
- Ashby, M. F., & Gibson, L. J. (1997). Cellular solids: structure and properties. *Press Syndicate of the University of Cambridge*, 175-231.
- Baich, L., & Manogharan, G. (2015). Study of infill print parameters on mechanical strength and production cost-time of 3D printed ABS parts. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Baino, F., & Fiume, E. (2020). Modelling the elastic mechanical properties of bioactive glass-derived scaffolds. *Biomedical Glasses*, 6, 50-56. <https://doi.org/10.1515/bglass-2020-0005>
- Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46(6), 559-632.
- Banhart, J., Ashby, M., & Fleck, N. (1999). Espumas metalicas y estructuras metalicas porosas. *Conferencia sobre espumas metalicas y estructuras metalicas porosas*, 14, 16.
- Banhart, J., Baumeister, J., & Weber, M. (1996). Damping properties of aluminium foams. *Materials Science and Engineering: A*, 205(1-2), 221-228.

- Barthelat, F. (2015). Architected materials in engineering and biology: fabrication, structure, mechanics and performance. *International Materials Reviews*, 60(8), 413-430. <https://doi.org/10.1179/1743280415Y.0000000008>
- Best, S. T. (2011). Development and implementation of a dual-porosity pore network structure using X-ray computed tomography for pore network modeling purposes. *The University of Texas at Austin*.
- Bjorksten, J., & Rock, E. J. (1971). *Method for foaming metals* (US 3,561,972).
- Bogue, R. (2013). 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing? *Assembly Automation*, 33(4), 307-311.
- Böhm, H. J. (1998). A short introduction to basic aspects of continuum micromechanics. *CDL-FMD Report*, 3.
- Böhm, H. J. (2004). *A short introduction to continuum micromechanics*. Springer.
- Bolzoni, L., Carson, J. K., & Yang, F. (2021). Combinatorial structural-analytical models for the prediction of the mechanical behaviour of isotropic porous pure metals. *Acta Materialia*, 207, 116664. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116664>
- Brighenti, R., Cosma, M. P., Marsavina, L., Spagnoli, A., & Terzano, M. (2021). Laser-based additively manufactured polymers: a review on processes and mechanical models. *Journal of Materials Science*, 56(2), 961-998.
- Brooks, H., Rennie, A., Abram, T., McGovern, J., & Caron, F. (2011). Variable fused deposition modelling - Concept design and tool path generation, rapid design. *Prototyping and Manufacturing*, 113-122.
- Brydon, A. D., Bardenhagen, S. G., Miller, E. A., & Seidler, G. T. (2005). Simulation of the densification of real open-celled foam microstructures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53(12), 2638-2660. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.07.007>
- Cadena, J. H., Alfonso, I., Ramírez, J. H., Rodríguez-Iglesias, V., Figueroa, I. A., & Aguilar, C. (2014). Improvement of FEA estimations for compression behavior of Mg foams based on experimental observations. *Computational Materials Science*, 91, 359-363. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.04.053>
- Cadena, J. H., Alfonso, I., Ramírez, J. H., Rodríguez-Iglesias, V., Figueroa, I. A., & Aguilar, C. (2014). Improvement of FEA estimations for compression behavior of Mg foams based on experimental observations. *Computational Materials Science*, 91, 359-363. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.04.065>
- Chen, R. K., Jin, Y.-a., Wensman, J., & Shih, A. (2016). Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses—A review. *Additive Manufacturing*, 12, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.04.002>

- Chen, Y., Das, R., & Battley, M. (2015). Effects of cell size and cell wall thickness variations on the stiffness of closed-cell foams. *International Journal of Solids and Structures*, 52, 150-164.
- Chong, W. J., Shen, S., Li, Y., Trinchì, A., Pejak, D., Kyrtziz, I. L., Sola, A., & Wen, C. (2022). Additive manufacturing of antibacterial PLA-ZnO nanocomposites: Benefits, limitations and open challenges. *Journal of Materials Science & Technology*, 111, 120-151. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.09.039>
- Choren, J. A., Heinrich, S. M., & Silver-Thorn, M. B. (2013). Young's modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications. *Journal of Materials Science*, 48(15), 5103-5112.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- Dassault Systèmes Simulia. (2010). *Abaqus Theory Manual* (v6.10). Dassault Systèmes.
- Davies, G. J., & Zhen, S. (1983). Review Metallic Foams: Their Production, Properties and Applications. *Journal of Materials Science*, 18, 1897-1911.
- Degischer, H.-P., & Kriszt, B. (2002). *Handbook of cellular metals* (Vol. 71). Wiley-VCH.
- Dobry, R., & Ng, T.-T. (1992). Discrete modelling of stress-strain behaviour of granular media at small and large strains. *Engineering Computations*, 9(2), 129-143.
- Dudescu, C., & Racz, L. (2017). Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed materials. *Acta Universitatis Cibiniensis*, 69(1), 23-30. <https://doi.org/10.1515/auce-2017-0004>
- Elliot, J. C. (1961, mayo). *Metal foam and method for making* (US 2,983,597).
- Gan, Y. X., Chen, C., & Shen, Y. P. (2005). Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams. *International Journal of Solids and Structures*, 42(26), 6628-6642. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.06.006>
- García Plaza, E., López, P. J. N., Torija, M. Á. C., & Muñoz, J. M. C. (2019). Analysis of PLA geometric properties processed by FFF additive manufacturing: Effects of process parameters and plate-extruder precision motion. *Polymers*, 11(10), 1581.
- Gibson, L. J. (2000). Annual Review of materials science. *Annual Review of Materials Research*, 30, 191-227.
- Gibson, L. J. (2003). Cellular Solids. *MRS Bulletin*, 28(4), 270-274. <https://doi.org/10.1557/mrs2003.79>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). The structure of cellular solids. En *Cellular Solids: Structure and Properties* (2.^a ed., pp. 15-51). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326.004>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press.

- González-Henríquez, C. M., Sarabia-Vallejos, M. A., & Rodríguez-Hernandez, J. (2019). Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, *94*, 57-116. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001>
- González-Henríquez, C. M., Sarabia-Vallejos, M. A., & Rodríguez-Hernandez, J. (2019). Antimicrobial Polymers for Additive Manufacturing. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*(5), 1210. <https://doi.org/10.3390/ijms20051210>
- Grenestedt, J. L., & Bassinet, F. (2000). Influence of cell wall thickness variations on elastic stiffness of closed-cell cellular solids. *International Journal of Mechanical Sciences*, *42*(7), 1327-1338. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00043-7)
- Guo, W., Yang, Y., Liu, C., Bu, W., Guo, F., Li, J., Wang, E., Peng, Z., Mai, H., You, H., & Long, Y. (2023). 3D printed TPMS structural PLA/GO scaffold: Process parameter optimization, porous structure, mechanical and biological properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *142*, 105848. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105848>
- Gutiérrez Pulido, H., De la Vara Salazar, R., Gutiérrez González, P., Téllez Martínez, C., & Temblador Pérez, M. d. C. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill.
- Hamad, K., Kaseem, M., Yang, H. W., Deri, F., & Ko, Y. G. (2015). Properties and medical applications of polylactic acid: A review. *Express Polymer Letters*, *9*(5), 435-455.
- Hashin, Z. (1960). *The elastic moduli of heterogeneous materials* (Vol. 9). US Department of Commerce.
- Hasselman, D. P. H. (1962). On the porosity dependence of the elastic moduli of polycrystalline refractory materials. *Journal of the American Ceramic Society*, *45*(9), 452-453. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11188.x>
- Herakovitch, C. T., & Baxter, S. C. (1999). Influence of pore geometry on the effective response of porous media. *Journal of Materials Science*, *34*(7), 1595-1609. <https://doi.org/10.1023/A:1004554320216>
- Huet, C. (1990). Application of variational concepts to size effects in elastic heterogeneous bodies. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *38*(6), 813-841. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(90\)90041-2](https://doi.org/10.1016/0022-5096(90)90041-2)
- Irausquin Castro, I. A. (2012). *Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía* [Tesis de Máster]. Universidad de Sevilla.
- Jeon, I., Asahina, T., Kang, K.-J., Im, S., & Lu, T. J. (2010). Finite element simulation of the plastic collapse of closed-cell aluminum foams with X-ray computed tomography. *Mechanics of Materials*, *42*(3), 227-236. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.11.015>
- Jiroušek, O., Doktor, T., Kytýř, D., Zlámál, P., Fíla, T., Koudelka, P., Jandajsek, I., & Vavřík, D. (2013). X-ray and finite element analysis of deformation response of closed-cell metal

- foam subjected to compressive loading. *Journal of Instrumentation*, 8(02), C02012. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/C02012>
- Kabir, S. M. F., Mathur, K., & Seyam, A.-F. M. (2020). A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 232, 111476. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>
- Kari, S., Berger, H., Gabbert, U., Guinovart-Díaz, R., Bravo-Castillero, J., & Rodríguez-Ramos, R. (2008). Evaluation of influence of interphase material parameters on effective material properties of three phase composites. *Composites Science and Technology*, 68(3), 684-691. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.09.009>
- Kiendl, J., & Gao, C. (2020). Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layup. *Composites Part B: Engineering*, 180, 107562.
- Kirca, M., Gül, A., Ekinçi, E., Yardım, F., & Mugan, A. (2007). Computational modeling of micro-cellular carbon foams. *Finite Elements in Analysis and Design*, 44(1), 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.08.008>
- Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., Amberger, S., & Pirker, S. (2012). Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 12(2-3), 140-152.
- Kovacevic, Z., Flincec Grgac, S., & Bischof, S. (2021). Progress in Biodegradable Flame Retardant Nano-Biocomposites. *Polymers*, 13(5), 741. <https://doi.org/10.3390/polym13050741>
- Kuls'kov, S. N., Tomaš, J., & Buyakova, S. P. (2006). Fractal dimension of the surface of porous ceramic materials. *Technical Physics Letters*, 32(1), 73-75. <https://doi.org/10.1134/S106378500601021X>
- Li, K., Gao, X.-L., & Subhash, G. (2005). Effects of cell shape and cell wall thickness variations on the elastic properties of two-dimensional cellular solids. *International Journal of Solids and Structures*, 42(5-6), 1777-1795. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.08.014>
- Li, K., Gao, X.-L., & Subhash, G. (2006). Effects of cell shape and strut cross-sectional area variations on the elastic properties of three-dimensional open-cell foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 54(4), 783-806. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.10.009>
- Linul, E., Marsavina, L., & Stoia, D. I. (2020). Mode I and II fracture toughness investigation of Laser-Sintered Polyamide. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 106, 102497.
- Liu, C. S., Zhu, Z. G., Han, F. S., & Banhart, J. (1998a). Internal friction of foamed aluminium in the range of acoustic frequencies. *Journal of Materials Science*, 33(7), 1769-1775.
- Liu, C. S., Zhu, Z. G., Han, F. S., & Banhart, J. (1998b). Low-frequency internal friction of foamed Al. *Philosophical Magazine A*, 78(6), 1329-1337.

- Liu, C., Huang, N., Xu, F., Tong, J., Chen, Z., Gui, X., Fu, Y., & Lao, C. (2018). 3D printing technologies for flexible tactile sensors toward wearable electronics and electronic skin. *Polymers*, 10(6), 629.
- Liu, Z., Wang, Y., Wu, B., Cui, C., Guo, Y., & Yan, C. (2019). A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9), 2877-2889.
- Logan, D. L. (2022). *A First Course in the Finite Element Method* (Enhanced SI). Cengage Learning.
- Maitra, A. K., & Phani, K. K. (1994). Ultrasonic evaluation of elastic parameters of sintered powder compacts. *Journal of Materials Science*, 29(17), 4415-4419. <https://doi.org/10.1007/BF00376263>
- Marşavina, L., Vălean, C., Mărghitaş, M., Linul, E., Razavi, S. M. J., Berto, F., & Brighenti, R. (2022). Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 274, 108766. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108766>
- Melenka, G. W., Schofield, J. S., Dawson, M. R., & Carey, J. P. (2015). Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D desktop printer. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 506-519. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2013-0084>
- Montgomery, D. C. (2008). *Diseño y análisis de experimentos* (5.^a ed.). Limusa.
- Moongkhamklang, P., Deshpande, V. S., & Wadley, H. N. G. (2010). The compressive and shear response of titanium matrix composite lattice structures. *Acta Materialia*, 58(8), 2822-2835. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.01.004>
- Morales Quispe, M. (2013). Formulacion de Elementos Finitos y Elementos Discretos. *Centro de Investigacion en Matematicas (CIMAT)*.
- Moreno-Zulca, P. A., Llanes-Cedeño, E. A., Guña-Fernández, W. V., & Jima-Matailo, J. C. (2020). Análisis estructural de un bus por el método de elementos finitos. *Polo del Conocimiento*, 5(1), 799-837.
- Nazir, A., & Jeng, J.-Y. (2020). Buckling behavior of additively manufactured cellular columns: Experimental and simulation validation. *Materials & Design*, 186, 108349. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108349>
- Nomura, N., Sakamoto, K., Takahashi, K., Kato, S., Abe, Y., Doi, H., Tsutsumi, Y., Kobayashi, M., Kobayashi, E., Kim, W.-J., Kim, K.-H., & Hanawa, T. (2010). Fabrication and Mechanical Properties of Porous Ti/HA Composites for Bone Fixation Devices. *Materials Transactions*, 51(8), 1449-1454. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2010092>
- Oliver Olivella, X., & Agelet de Saracibar, C. (2002). *Mecánica de medios continuos para ingenieros* (Vol. 92). Universitat Politècnica de Catalunya.

- Oller, S. (2001). *Fractura mecánica: un enfoque global* (Vol. 1). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).
- Otsuka, M., Kojima, A., Itoh, M., & Ishii, E. (1991). Science and engineering of light metals. *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Science and Engineering of Light Metals (RASELM)*, 45-52.
- Pavliotis, G. A., & Stuart, A. M. (2008). *Multiscale Methods: Homogenization and Stochastic Modeling* (Vol. 53). Springer.
- Pérez, L., Lascano, S., Aguilar, C., Domancic, D., & Alfonso, I. (2015). Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy. *Materials & Design*, 83, 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.038>
- Pérez, L., Lascano, S., Aguilar, C., Estay, D., Messner, U., Figueroa, I. A., & Alfonso, I. (2015). DEM-FEA estimation of pores arrangement effect on the compressive Young's modulus for Mg foams. *Computational Materials Science*, 110, 281-286. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.08.042>
- Perez Trigo, P. (2019). *Caracterizacion numerica del efecto de la distribucion de particulas espaciales y su dimension fractal sobre el Modulo de Young de espumas de aluminio fabricadas por el metodo de infiltracion* [Tesis de Magister]. Universidad Tecnica Federico Santa Maria.
- Ribeiro-Ayeh, S. (2005). *Finite element modelling of the mechanics of solid foam materials* [Licentiate Thesis]. KTH Royal Institute of Technology.
- Rice, R. W. (1996). Evaluation and extension of physical property-porosity models based on minimum solid area. *Journal of Materials Science*, 31(1), 102-118. <https://doi.org/10.1007/BF11476115>
- Roberts, A. P., & Garboczi, E. J. (2000). Elastic properties of model porous ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(12), 3041-3048. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01689.x>
- Rodríguez-Panes, A., Claver, J., & Camacho, A. M. (2018). The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials*, 11(8), 1333. <https://doi.org/10.3390/ma11081333>
- Rojek, J., Oñate, E., Zarate, F., & Miquel, J. (2001). Modelling of rock, soil and granular materials using spherical elements. *European Conference on Computational Mechanics*, 742-743.
- Rudin, A., & Choi, P. (2012). *The elements of polymer science and engineering*. Academic Press.
- Schneberger, J.-H., Kaspar, J., & Vielhaber, M. (2020). Post-processing and testing-oriented design for additive manufacturing – A general framework for the development of hybrid AM parts. *Procedia CIRP*, 90, 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.059>
- Schwartz, D. S., Shih, D. S., Evans, A. G., & Wadley, H. N. (Eds.). (1998). *Porous and Cellular Materials for Structural Applications* (Vol. 521). Materials Research Society.

- Sennan, P., & Pumchusak, J. (2014). Improvement of mechanical properties of poly (lactic acid) by elastomer. *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 18(3), 669-675.
- Sevostianov, I., & Kachanov, M. (2012). Effective properties of heterogeneous materials: Proper application of the non-interaction and the “dilute limit” approximations. *International Journal of Engineering Science*, 58, 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2012.03.031>
- Simone, A. E., & Gibson, L. J. (1998). Aluminum foams produced by liquid-state processes. *Acta Materialia*, 46(9), 3109-3123.
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2020). 3D Printing of polymer composites: A short review. *Material Design & Processing Communications*, 2(2), e97.
- Stoia, D. I., Linul, E., & Marşavina, L. (2019). Influence of manufacturing parameters on mechanical properties of porous materials by selective laser sintering. *Materials*, 12(6), 871.
- Stoia, D. I., Marsavina, L., & Linul, E. (2020). Mode I fracture toughness of polyamide and alumide samples obtained by Selective Laser Sintering additive process. *Polymers*, 12(3), 640.
- Stoia, D. I., Marşavina, L., & Linul, E. (2019). Correlations between process parameters and outcome properties of Laser-Sintered Polyamide. *Polymers*, 11(11), 1850.
- Taherkhani, A., Sadighi, M., Vanini, A. S., & Mahmoudabadi, M. Z. (2016). An experimental study of high-velocity impact on elastic–plastic crushable polyurethane foams. *Aerospace Science and Technology*, 50, 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.11.013>
- Tang, H. P., Wang, J. Z., Zhu, J. L., Ao, Q. B., Wang, J. Y., Yang, B. ., & Li, Y. N. (2012). Fractal dimension of pore-structure of porous metal materials made by stainless steel powder. *Powder Technology*, 217, 383-387.
- Tang, H., Zhu, J., Xi, Z., Di, X., Wang, J., & Ao, Q. (2010). Impact factors of fractal analysis of porous structure. *Science China Technological Sciences*, 53(2), 348-351. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-0014-4>
- Tietge, U. (2018). *CO2 Emissions from New Passenger Cars in the EU: Car Manufacturers’ Performance in 2017* (White Paper). International Council on Clean Transportation (ICCT).
- Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z., & Gordon, A. P. (2016). An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 387-404.
- Torres, Y., Lascano, S., Bris, J., Pavón, J., & Rodriguez, J. A. (2014). Development of porous titanium for biomedical applications: A comparison between loose sintering and space-holder techniques. *Materials Science and Engineering: C*, 37, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.11.036>
- Tümer, E. H., & Erbil, H. Y. (2021). Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review. *Coatings*, 11(4), 390. <https://doi.org/10.3390/coatings11040390>

- Upadhyay, R., & Ramakrishnan, N. (2012). Prediction of elastic properties of cellular solids with oriented porous architecture. *Mechanics of Materials*, 47, 55-68.
- Vălean, C., Marşavina, L., Mărghiţaş, M., Linul, E., Razavi, J., & Berto, F. (2020). Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens. *Procedia Structural Integrity*, 26, 313-320.
- Vallejos Baier, R., Contreras Raggio, J. I., Toro Arancibia, C., Bustamante, M., Pérez, L., Burda, I., Aiyangar, A., & Vivanco, J. F. (2021). Structure-function assessment of 3D-printed porous scaffolds by a low-cost/open source fused filament fabrication printer. *Materials Science and Engineering: C*, 123, 111945. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.111945>
- Wang, S., Ding, Y., Yu, F., Zheng, Z., & Wang, Y. (2020). Crushing behavior and deformation mechanism of additively manufactured Voronoi-based random open-cell polymer foams. *Materials Today Communications*, 25, 101406. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101406>
- Wang, T.-M., Xi, J.-T., & Jin, Y. (2007). A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(11-12), 1087-1096. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0556-9>
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-458.
- Warren, W. E., & Kraynik, A. M. (1988). The linear elastic properties of open-cell foams. *Journal of Applied Mechanics*, 55(2), 341-346.
- Wheeler, K. R., Karagianes, M., & Sump, K. (1983). *Titanium alloys in surgical implants*. ASTM International.
- Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P. (2020). FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. *Polymers*, 12(7), 1529. <https://doi.org/10.3390/polym12071529>
- Xue, Y., Feng, J., Ma, Z., Liu, L., Zhang, Y., Dai, J., Xu, Z., Bourbigot, S., Wang, H., & Song, P. (2021). Advances and challenges in eco-benign fire-retardant polylactide. *Materials Today Physics*, 21, 100568. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100568>
- Xue, Y., Zhang, T., Tian, L. r., Feng, J., Song, F., Pan, Z., Zhang, M., Zhou, Y., & Song, P. (2023). A molecularly engineered bioderived polyphosphonate containing Schiff base towards fire-retardant PLA with enhanced crystallinity and mechanical properties. *Chemical Engineering Journal*, 472, 144986. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144986>
- Yang, C., Tian, X., Liu, T., Cao, Y., & Li, D. (2017). 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 209-215.

- Yao, T., Ye, J., Deng, Z., Zhang, K., Ma, Y., & Ouyang, H. (2020). Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Composites Part B: Engineering*, 188, 107894.
- Youssef, S., Maire, E., & Gaertner, R. (2005). Finite element modelling of the actual structure of cellular materials determined by X-ray tomography. *Acta Materialia*, 53(3), 719-730. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.10.024>
- Zhang, B. Q., Liu, X. F., & Li, S. F. (2000). Theoretical verification of the scaling relation to determine surface fractal dimension of porous media. *Transactions of Tianjin University*, 6(2), 156-160.
- Zhang, B., & Liu, X. (2000). Comments on “Mechanism Discrimination in Heterogeneous Catalytic Reactions: Fractal Analysis”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39(2), 573-574. <https://doi.org/10.1021/ie990714o>
- Zhao, Y., Chen, Y., & Zhou, Y. (2019). Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses. *Materials & Design*, 181, 108089.
- Zhu, H. X., Mills, N. J., & Knott, J. F. (1997). Analysis of the high strain compression of open-cell foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(11), 1875-1904. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(97\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00027-6)
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method for solid and structural mechanics* (6.^a ed.). Elsevier.

Anexos

6.1. Diseño Factorial 3^2

El diseño factorial 3^2 , es un diseño que contempla dos factores fijo, donde cada factor contiene 3 niveles. De esta manera, este análisis permite determinar la significancia estadística de la porosidad y relación de tamaños de poros, junto con su interacción en la respuesta elástica aparente, sin tener en cuenta si la variabilidad de la porosidad en cada vecindad o rango, es influyente en el comportamiento elástico aparente a compresión de las muestra porosas impresas.

Dado, el cociente de cambio, entre la porosidad experimental y computacional en la figura 5.2, y el coeficiente de variabilidad en cada rango de porosidad experimental, se asume que la porosidad experimental puede agruparse en vecindades, al igual que la porosidad computacional.

Con ello, los factores son :

- Factor A1: Relación de tamaños de poros 1:1, 2:1 y 4:1.
- Factor B1: Porosidad 60 %, 65 % y 70 %.
- Factor A2: Porosidad 65 %, 70 % y 75 %. Relación de tamaños de poros 1:1, 2:1 y 4:1.
- Factor B2: Porosidad 65 %, 70 % y 75 %.

La separación de los factores, es netamente por los niveles del diseño factorial 3^2 .

El análisis de diseño factorial, para ambos casos, se realizó con un valor de probabilidad $\alpha = 0,05$. En la tabla 6.1, se presentan los resultados del primer análisis de diseño factorial. El P-critico de este análisis es 0.05. Se aprecia que el factor A1 (relación de tamaño de poros), influye en la respuesta elástica aparente, al igual que el factor B1 (porosidad), y por ende, la interacción entre ambos factores influye en la respuesta elástica aparente.

Cuadro 6.1: Datos típicos para un experimento de un solo factor.

FV	S. C.	G.L.	C.M.	F₀	F Crit.	P-Value
Factor A	7.984E+14	2	3.99E+14	3.79	3.068	0.025
Factor B	2.53E+17	2	1.26E+17	1202.6	3.068	8.158E-83
AxB	2.024E+15	4	.06E+14	4.809	2.44	0.0121
Residual	1.325E+16	126	1.052E+14			
Total	2.691E+17	134				

En la tabla 6.2, se muestran los resultados del segundo diseño factorial, se observa que el factor A2, factor B2, y la interacción A2B2, son significantes en la respuesta elástica aparente.

Cuadro 6.2: Datos típicos para un experimento de un solo factor.

FV	S. C.	G.L.	C.M.	F₀	F Crit.	P-Value
Factor A	1.022E+15	2	5.112E+14	8.996	3.068	0.0002
Factor B	2.524E+17	2	1.262E+17	2220.5	3.068	5.83R-99
AxB	2.316E+15	4	5.790E+14	10.188	2.443	3.526E-7
Residual	7.161E+15	126	5.683E+13			
Total	2.629E+17	134				

Lo cual confirma los análisis estadísticos desarrollados en el capítulo de análisis de resultado, de este trabajo.

6.2. Superficie regresión múltiple,

Además, se llevó a cabo un análisis mediante regresión lineal múltiple utilizando los factores codificados, considerando la interacción entre ambos factores, a diferencia de lo representado en la superficie de la figura 5.27.

De esta manera, la regresión en este análisis se muestra en la ecuación 6.1.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \varepsilon \quad (6.1)$$

La regresión lineal múltiple con factores codificados permite realizar análisis sin requerir que los factores tengan niveles equidistantes entre sí.

Así, la figura 6.1 muestra una representación de la superficie de respuesta para todos los rangos de porosidad y relaciones de tamaño de poros.

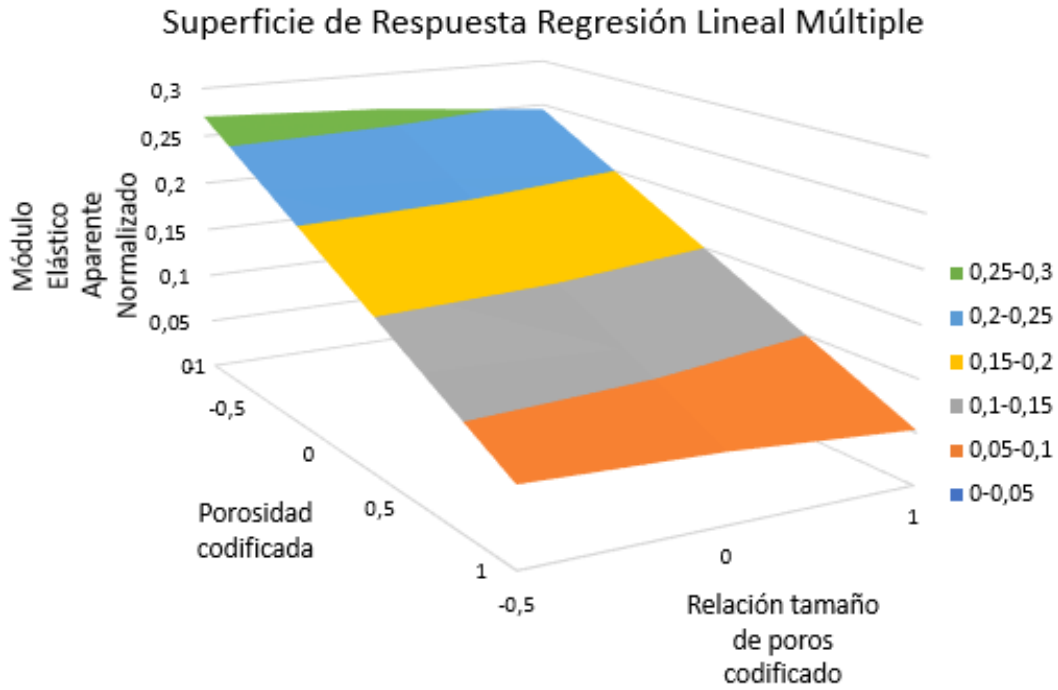


Figura 6.1: Superficie de respuesta codificada de la regresión múltiple.

La expresión matemática de la regresión múltiple, se presenta en la ecuación 6.2

$$y = 0,1641 - 0,0154x_1 - 0,097x_2 + 0,0016x_1x_2 \quad (6.2)$$

En la figura 6.1, y en la ecuación 6.2, se aprecia como influye la porosidad en la respuesta elástica aparente, con un coeficiente β de 0.097, mayor a los coeficientes de relación tamaño de poros 0,0154, y al de interacción 0,0016. Asimismo, la relación de tamaño de poros es significativa en la respuesta elástica aparente, con un coeficiente β de 0.0154. En este sentido, la superficie de colores muestra como a menor relación de tamaños de poros, hay una mayor respuesta elástica aparente.