

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN Y
COMPRESIÓN DE COMPONENTES POLIMÉRICOS POROSOS EN
POLIMETILMETACRILATO MEDIANTE FABRICACIÓN POR FILAMENTO
FUNDIDO

SANTIAGO ANDRÉS ROJAS LOZANO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERIAS
BOGOTÁ
2017

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN Y
COMPRESIÓN DE COMPONENTES POLIMÉRICOS POROSOS EN
POLIMETILMETACRILATO MEDIANTE FABRICACIÓN POR FILAMENTO
FUNDIDO

SANTIAGO ANDRÉS ROJAS LOZANO

TRABAJO DE GRADO

Director
MARCO ANTONIO VELASCO PEÑA

Codirector
PEDRO RODRIGUEZ SANDOVAL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERIAS
BOGOTÁ
2017

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 28 de Junio de 2017

Dedico este logro antes que nada a Dios quien es el principio y el fin de todo lo creado y quien en sus caminos me da todo lo que tengo. A mi papá René y a mi mamá Rosita, por todos sus desvelos y preocupaciones, sus enseñanzas oportunas y sus correcciones fraternas, gracias a las cuales soy hoy quien soy. A Marta. A mi hermano, a mis hermanas, a mis familiares, a mis amigos y a todos los que están detrás del telón haciendo que esta obra funcione.

Agradecimientos

El autor agradece en primer lugar al Ingeniero Marco Antonio Velasco Peña por sus enseñanzas, su paciencia, su apoyo, por brindarme su tiempo para la realización del presente trabajo y por la confianza que depositó en mí.

A la empresa Voxel 3D Consulting & Training por poner a mi disposición sus instalaciones, su grupo humano y equipos, principalmente a su cabeza el Diseñador Leonardo Velasco y al Diseñador Christian Gámez que siempre estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos y aclararme dudas.

Al Centro de Materiales y Ensayos del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) por permitirme tener acceso a sus instalaciones y poder hacer uso de sus equipos y especialmente al Ingeniero Pedro Rodríguez Sandoval, quien hizo posible la realización de los ensayos de tensión y compresión requeridos para la realización del proyecto.

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	14
1. DISEÑO EXPERIMENTAL	17
1.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	17
1.1.1 Principios básicos	17
1.2 DISEÑO FACTORIAL	18
1.3 DISEÑO FACTORIAL 2 ³	18
1.4 SELECCIÓN DE NIVELES	20
1.4.1 Uso de PMMA en piezas de uso general de manufactura aditiva FDM	21
1.4.2 Uso de PMMA en ingeniería de tejidos óseos	21
1.4.3 Uso de PMMA hecho con FDM en ingeniería de tejidos	21
1.4.4 Síntesis y selección de niveles	23
1.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	23
2. ENSAYO DE TENSIÓN	24
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	24
2.2 RESUMEN DE LA NORMA ASTM D638	25
2.3 ELEMENTOS DE LA NORMA PERTINENTES A LAS PRUEBAS A REALIZAR	26
2.4 ELABORACIÓN DE PROBETAS	26
2.5 REALIZACIÓN DE ENSAYOS	38
2.6 ANÁLISIS MORFOLÓGICO	41
2.7 RESULTADOS	45
2.8 CONCLUSIONES DE CAPÍTULO	50
3. ENSAYO DE COMPRESIÓN	52
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	52
3.2 RESUMEN DE LA NORMA ASTM D695	52
3.3 ELEMENTOS DE LA NORMA PERTINENTES A LAS PRUEBAS A REALIZAR	52
3.4 ELABORACIÓN DE PROBETAS	53
3.5. REALIZACIÓN DE ENSAYOS	57
3.6 ANÁLISIS MORFOLÓGICO	61

3.7 RESULTADOS	64
3.8 CONCLUSIONES DE CAPÍTULO	69
4. ANÁLISIS DE VARIANZA Y REGRESIÓN LINEAL	71
4.1 REGRESIÓN LINEAL PARA DATOS OBTENIDOS EN Tensión	71
4.2 REGRESIÓN LINEAL PARA DATOS OBTENIDOS EN COMPRESIÓN	79
4.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	87
5. CONCLUSIONES	88
6. RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS	91
ANEXOS	94

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Pautas generales para diseñar un experimento	18
Tabla 2. Revisión bibliográfica de Scaffolds	22
Tabla 3. Niveles, factores y puntos centrales del diseño experimental.	23
Tabla 4. Condiciones de impresión por parte del fabricante.	29
Tabla 5. Especificaciones técnicas de la impresora 3D FDM para la fabricación de las probetas.	36
Tabla 6. Duración de fabricación y peso de cada probeta para ensayo de tensión.	37
Tabla 7. Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos BESMAK© BMT-E Series	39
Tabla 8. Especificaciones técnicas del microscopio digital AM4013MT.	41
Tabla 9. Propiedades mecánicas de PMMA obtenidas mediante moldeo por inyección.	46
Tabla 10. Resultados de ensayo de tensión en probetas de PMMA.	49
Tabla 11. Duración de fabricación y peso de cada probeta para ensayo de compresión.	56
Tabla 12. Resultados de ensayo a compresión en probetas de PMMA.	68
Tabla 13. Modelos de regresión para tensión.	72
Tabla 14. Resultados del ANOVA para 8 datos con respecto al diseño factorial 2^3 en la para probetas fabricadas posición 1.	72
Tabla 15. Resultados del ANOVA para 8 datos más dos puntos centrales con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1.	75
Tabla 16. Resultados del ANOVA para 8 datos con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 2.	77
Tabla 17. Resultados del ANOVA para 8 datos más dos puntos centrales con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 2.	78
Tabla 18. Modelos de regresión para compresión.	79
Tabla 19. Resultados del ANOVA para 16 datos con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1-2.	80
Tabla 20. Resultados del ANOVA para 16 datos más dos puntos centrales con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1-2.	81
Tabla 21. Resultados del ANOVA para 8 datos con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.	82
Tabla 22. Resultados del ANOVA para 8 datos más dos puntos centrales con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.	84

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Representación gráfica y simbólica del diseño factorial 2^3 . Vista geométrica	19
Figura 2. Representación gráfica y simbólica del diseño factorial 2^3 . Matriz de diseño	19
Figura 3. Representación gráfica de puntos centrales en el diseño factorial 2^2 . Dos factores.	20
Figura 4. Representación gráfica de puntos centrales en el diseño factorial 2^3 .	20
Figura 5. Curva de esfuerzo vs deformación.	24
Figura 6. Variación en las dimensiones de una probeta debido al ensayo de tensión.	24
Figura 7. Dimensiones de la probeta según su tipo.	25
Figura 8. Designaciones para las velocidades de prueba	26
Figura 9. Probetas plásticas rígidas y semi-rígidas Tipo I en software Rhinoceros©. Nota: Medidas en milímetros.	26
Figura 10. Enmallado poligonal de la probeta de tensión.	27
Figura 11. Probeta de tensión al ser transferida al software Cura©.	27
Figura 12. Posiciones de impresión. a) Posición 1 en probetas para ensayo de tensión. b) Posición 2 en probetas para ensayo de tensión.	28
Figura 13. Interfaz del software Cura©.	28
Figura 14. Selección de máquina virtual para trabajar PMMA.	29
Figura 15. Opciones para modificar los parámetros de impresión en la interfaz del software Cura©.	30
Figura 16. Opciones para modificar los parámetros de impresión en la interfaz del software Cura© en las opciones avanzadas.	32
Figura 17. G-Code generado por el software Cura©.	32
Figura 18. Procedimiento para girar una probeta en el software Cura©. a) Selección de la opción Rotate (Rotar) encerrada en la circunferencia roja. b) Selección del plano de rotación. c) Rotación con respecto al plano seleccionado.	33
Figura 19. Probeta en posición 1 a un ángulo de 22.5° grados.	34
Figura 20. Probeta de tensión en posición 1 en el software Repetier Host©. a) Primera capa de impresión. b) Primera y segunda capa de impresión. c) Todas las capas para la impresión.	34
Figura 21. Probeta de tensión en posición 2 en el software Repetier Host©. a) Primera capa de impresión. b) Primera y segunda capa de impresión. c) Última capa antes de hacer contacto con el soporte. d) Primera capa sobre el soporte. e) Todas las capas para la impresión.	35

Figura 22. Impresora 3D FDM FORMBOT –TREX. a) Vista general de la impresora. b) Cabezal de extrusión de doble extrusor.	36
Figura 23. Proceso de impresión terminado en una probeta de tensión en la posición 1.	37
Figura 24. Máquina universal de ensayos BESMAK© con algunas características. a) Máquina de ensayos universales BESMAK©. b) Mordazas para ensayos de tensión en plásticos. c) Certificado de calibración de la máquina.	38
Figura 25. Probetas para ensayo de tensión.	40
Figura 26. Ensayo de tensión. a) Montaje de probeta para ensayo de tensión. b) Muestra de falla en probeta de PMMA.	40
Figura 27. Microscopio digital AM4013MT.	41
Figura 28. Detalles morfológicos de la probeta A1 sometida a tensión. Zoom 55x. a) Relleno en vista frontal. b) Relleno en vista lateral. c) Esquina en cara ancha. d) Esquina de espesor. e) Zona de Falla 1. f) Zona de falla 2. Las flechas indican la dirección de aplicación de la fuerza.	42
Figura 29. Detalles morfológicos de la probeta H2 sometida a tensión. Zoom 55x. a) Relleno. b) Relleno en vista lateral (espesor). c) Esquina en cara ancha. d) Esquina de espesor. e) Zona de Falla 1. f) Zona de falla 2. Las flechas indican la dirección de aplicación de la fuerza.	43
Figura 30. Residuos de filamentos del soporte generado durante la fabricación.	44
Figura 31. Gráfico de análisis general de los ensayos de tensión.	45
Figura 32. Cálculo del módulo elástico convencional.	46
Figura 33. Cálculo del módulo elástico para los ensayos de tensión.	47
Figura 34. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta A1 con los niveles máximos para cada factor en la posición 1 ($e = 0.3 \text{ mm}$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).	47
Figura 35. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta A2 con los niveles máximos para cada factor en la posición 2 ($e = 0.3 \text{ mm}$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).	48
Figura 36. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta H1 con los niveles mínimos para cada factor en la posición 1 ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).	48
Figura 37. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta H1 con los niveles mínimos para cada factor en la posición 2 ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).	48
Figura 38. Propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos a tensión.	50
Figura 39. Probeta de Compresión en software Rhinoceros©. a) Vista Fontal. b) Vista superior. Medidas en milímetros.	53
Figura 40. Enmallado poligonal de la probeta de compresión.	53
Figura 41. Probeta de compresión al ser transferida al software Cura©.	54
Figura 42. Posiciones de impresión. a) Posición 1 para probetas de compresión. b) Posición 3 para probetas de compresión.	54

Figura 43. Probeta de compresión en posición 1 o 2 y posición 3 en el software Repetier Host©. a) Primera capa de impresión en la posición 1 o 2. b) Primera y segunda capa de impresión en la posición 1 o 2. c) Todas las capas para la impresión en la posición 1 o 2. d) Primera capa de impresión en la posición 3. e) Primera y segunda capa de impresión en la posición 3. f) Todas las capas para la impresión en la posición 3	55
Figura 44. Proceso de fabricación de una probeta de compresión en la posición 3.	57
Figura 45. Proceso de impresión terminado de una probeta de compresión en la posición 3.	57
Figura 46. Reconfiguración de la máquina de ensayos universales BESMAK© para ensayo de compresión. a) Pin de sujeción de la prensa superior. b) Máquina de ensayos sin la prensa superior. c) Ajuste previo de la base inferior. d) Base para ensayo de compresión ensamblada. e) Máquina preparada para el ensayo de compresión.	58
Figura 47. Probetas para ensayo de compresión	59
Figura 48. Ensayo de compresión, montaje de la probeta para ensayo de compresión.	59
Figura 49. Ensayo de compresión, muestras de probetas de PMMA al someterse al ensayo de compresión. a) Modo de falla al realizar el ensayo de compresión en la probeta A3. b) Modo de falla al realizar el ensayo de compresión en la probeta H2. c) Modo de falla al realizar el ensayo de compresión en la probeta C3.	60
Figura 50. Detalles morfológicos de la probeta A1 sometida a compresión. Zoom 55x. a) Relleno. b) Relleno en vista superior. c) Esquina en cara ancha. d) Esquina de espesor. e) Zona de Falla 1. f) Zona de falla 2. Las flechas indican la dirección de aplicación de la fuerza	61
Figura 51. Detalles morfológicos de la probeta F3 sometida a compresión. Zoom 55x. a) Relleno. b) Relleno en vista superior. c) Esquina en cara ancha. d) Esquina de espesor. e) Zona de Falla 1. f) Zona de falla 2. Las flechas indican la dirección de aplicación de la fuerza.	62
Figura 52. Efectos de la compresión en los filamentos 200x. a) Efectos de la compresión b) Efectos de tensión como reacción a la compresión en los filamentos.	63
Figura 53. Gráfico comparativo general para los ensayos de compresión.	64
Figura 54. Cálculo del módulo de elasticidad en la probeta A1.	65
Figura 55. Zona seleccionada para determinación del módulo de elasticidad de la probeta A1.	66
Figura 56. Cálculo del módulo de elasticidad en la probeta G1.	66
Figura 57. Zona seleccionada para determinación del módulo de elasticidad de la probeta G1.	67
Figura 58. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta A3 con los niveles máximos para cada factor en la posición A3 ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).	67
Figura 59. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta H3 con los niveles mínimos para cada factor en la posición 3 ($e = 0.2$ mm, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).	67
Figura 60. Propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de compresión.	69

Figura 61. Representación gráfica de R^2 . a) Valores ajustados, R^2 tiende a 1. b) Valores lejanos a la regresión. R^2 tiende a 0.	71
Figura 62. Efectos principales para el esfuerzo máximo con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1.	73
Figura 63. Efectos principales para el porcentaje de elongación con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1.	74
Figura 64. Efectos principales para el módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1.	74
Figura 65. Efectos principales para el esfuerzo máximo con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 1.	76
Figura 66. Efectos principales para el porcentaje de elongación con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 1.	76
Figura 67. Efectos principales para el módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 1.	77
Figura 68. Efectos principales para el esfuerzo máximo con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.	83
Figura 69. Efectos principales para el porcentaje de elongación con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.	83
Figura 70. Efectos principales para el módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.	84
Figura 71. Efectos principales para el esfuerzo máximo con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 3.	85
Figura 72. Efectos principales para el porcentaje de elongación con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 3.	86
Figura 73. Efectos principales para el módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 3.	86

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Curvas de Esfuerzo vs Deformación para ensayos de tensión.	94
Anexo B. Curvas de Esfuerzo vs Deformación para ensayos de compresión.	102
Anexo C. Regresiones múltiples de los parámetros de impresión vs propiedades mecánicas del PMMA.	114
Anexo D. Gráficas de regresiones para cada ANOVA.	133

INTRODUCCIÓN

La caracterización de un material polimérico poroso como el PMMA para la fabricación de *scaffolds* mediante FFF (Fabricación mediante filamento fundido), muestra el desarrollo de una metodología de análisis mediante el diseño de experimentos, en el que se pretende determinar las propiedades mecánicas del PMMA partiendo de la fabricación y posterior realización de ensayos de tensión y compresión, para finalmente, mediante un análisis estadístico poder establecer el comportamiento del material cuando se ha fabricado mediante impresión 3D.

En el país, la caracterización de materiales de ingeniería como el PMMA es reciente y aunque se han realizado estudios acerca de las propiedades del polímero y sus aplicaciones en implantes óseos (1), no se ha caracterizado este material cuando es fabricado por FFF. Por esto, con este estudio se pretende determinar las propiedades mecánicas del PMMA a tensión de acuerdo a la norma ASTM D638 y a compresión de acuerdo a la norma ASTM D695, para establecer la factibilidad de fabricación de injertos y/o prótesis a partir de este material que es de gran utilidad para la ingeniería tisular ósea (2). Por otro lado, la investigación pretende generar la implementación de nuevas tecnologías de fabricación en la academia y en los grupos de investigación de la universidad.

Consecuentemente, para lograr desarrollar implantes o injertos, se requiere: en primer lugar, tener conocimiento de propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo que soporta el material; en segundo lugar, la capacidad de fabricar implantes o injertos específicos para cada paciente. Por lo cual, el estudio del PMMA sometido a cargas mecánicas permitirá determinar si su utilización en este tipo de aplicaciones es factible o si funciona mejor para tensión que para compresión o viceversa. Para lograrlo, se planteará un diseño de experimentos que busca obtener la mayor cantidad de información con la menor cantidad de datos y en base a factores como el espesor (e), el ángulo de trama (a) y la porosidad (p), se fabricarán las probetas y de esta forma poder realizar los ensayos. Los valores de cada factor se determinaron en base a una revisión bibliográfica de *scaffolds*, describiendo algunas propiedades de estructuras porosas con las características requeridas para la elaboración de implantes.

Ahora bien, para iniciar el diseño de experimentos se seleccionó el diseño factorial de 2^3 , con dos puntos centrales para determinar si no hay linealidad del modelo (3). Luego, se hace el modelado CAD de la probeta de tensión y compresión con base en la norma ASTM D638 o ASTM D695 respectivamente, en el *software* Rhinoceros®, modelos que se transfiere al *software* en donde se configuran la impresiones y posteriormente son llevados a su fabricación. Después de la fabricación de las probetas para cada ensayo se prosigue con la realización de los mismos.

El primer ensayo realizado es el de tensión y posteriormente el de compresión, de los cuales se describen las adaptaciones de la máquina de ensayos universales utilizada para su realización. A partir de estos ensayos, se obtienen imágenes microscópicas en las que se observa el comportamiento del material luego de ser sometido a los ensayos. Además, se obtienen las gráficas correspondientes a Esfuerzo vs Deformación y una comparación

entre las gráficas obtenidas en todos los ensayos y posiciones de fabricación. Finalmente, se realiza un análisis de varianza en el que se determinan los factores que más influyen en la obtención de los mejores resultados.

El trabajo se limita al modelado CAD, caracterización mecánica y fabricación de estructuras porosas como lo son los *scaffolds*. Sin embargo, pruebas in-vitro e in-vivo, análisis químicos, caracterización de las propiedades eléctricas, térmicas, físicas u ópticas; quedan fuera del alcance de esta investigación. Se utilizó *software* de uso libre y con licencia adquirida por la Universidad Santo Tomás.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Caracterizar las propiedades mecánicas a tensión y compresión de componentes poliméricos porosos en PMMA mediante fabricación por filamento fundido.

Objetivos específicos:

- Realizar el diseño experimental para obtener las propiedades mecánicas.
- Realizar los ensayos de caracterización mecánica de conformidad con las normas ASTM D638 e ASTM D695.
- Realizar un análisis de varianza de las propiedades mecánicas en función de los parámetros de fabricación.

1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño de experimentos es parte fundamental del desarrollo del presente trabajo ya que en este se definen el número de experimentos y las combinaciones de factores necesarias para obtener la mayor cantidad de información con el menor número de ensayos. A continuación, se explica la manera como se desarrollarán los ensayos mediante la metodología de diseño de experimentos:

1.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Un experimento puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso en un sistema para identificar y cuantificar las tasas de cambios que se observan en la respuesta de salida (3). Así, el diseño experimental se define como la planeación y realización de experimentos y el análisis de los datos resultantes a fin de obtener conclusiones válidas y objetivas.

En general, los experimentos se usan para estudiar el desempeño de procesos y sistemas (4). En estas situaciones se encuentran variables controlables y no controlables. Uno de los objetivos del experimentador, es determinar la influencia que tienen estos factores sobre la respuesta de salida del sistema (5). Por lo tanto, existen varios métodos de realización de experimentos como por ejemplo el enfoque de la mejor conjetura, el enfoque de un factor a la vez y la experimentación factorial. De los métodos anteriormente mencionados, el enfoque correcto para el desarrollo del presente trabajo de grado es el experimento factorial, ya que los factores se hacen variar en conjunto en lugar de uno a la vez (5). Para experimentos factoriales con muchos factores, se utiliza un experimento factorial fraccionado, en el que solo se realizan un subconjunto de los experimentos.

Ahora bien, dentro del desarrollo de un experimento factorial se encuentran comportamientos entre cada factor y sus niveles en los que pueden presentarse interacciones. Por todo esto, los diseños factoriales permiten disminuir el tiempo y materiales utilizados en la experimentación que se desee realizar, dando visibilidad a conexiones entre factores difícilmente de ver de manera empírica, puesto que los efectos e interacciones entre los factores y sus niveles se ve reducido al menor número de ensayos para concretar determinada hipótesis

1.1.1 Principios básicos

Para el desarrollo de los diseños experimentales se tienen principios básicos como:

- Realización de réplicas, repetición del experimento básico.
- Aleatorización, la asignación del material experimental y el orden en que se realizan los experimentos o ensayos individuales se determinan al azar (5).
- Formación de bloques, este método se utiliza con la intención de mejorar la precisión de las comparaciones que se realizan entre los factores de interés (5).

Tabla 1. Pautas generales para diseñar un experimento

1. Identificación y exposición del problema
 2. Elección de los factores, los niveles y los rangos.
 3. Selección de la variable de respuesta
 4. Elección del diseño experimental.
 5. Realización del experimento.
 6. Análisis estadístico de los datos.
 7. Conclusiones y recomendaciones.
-

Fuente: Montgomery et al.(5)

Dentro de la elección de factores encontramos los factores potenciales de diseño, que son aquellos que el experimentador quiera hacer variar en el experimento como los parámetros del diseño experimental, es decir, los escogidos para el experimento. También, factores que se mantienen constantes, como las variables que pueden tener efecto en la respuesta pero que para los fines del experimento a realizar no son de interés por lo que se mantienen fijos en un nivel específico. Por otra parte, se encuentran los factores perturbadores de diseño como los factores controlables, aquellos cuyos niveles pueden ser ajustados por el experimentador; factores no controlables, si no es controlable pero medible se realiza un análisis de covarianza; factores de ruido, cuando un factor que varía de manera natural y no controlable en el proceso puede controlarse para los fines del experimento (5).

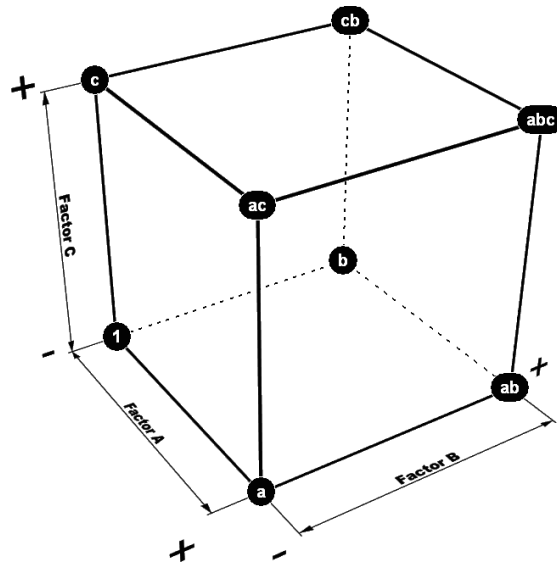
1.2 DISEÑO FACTORIAL

Un experimento factorial es un experimento diseñado con dos o más factores, cada uno de los cuales posee varios niveles y cuyas unidades experimentales abarcan todas las posibles combinaciones de todos los factores en todos los niveles. Este tipo de experimentos permiten el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable. Así, “por diseño factorial se entiende que cada ensayo o réplica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores” (5). En los diseños factoriales, el efecto que tiene un factor es definido como la medida de los cambios en la respuesta que se produce debido a la modificación en el nivel del factor (3). Luego, cuando la diferencia en la respuesta de un factor (con respecto a sus niveles) no es la misma para todos los niveles de los otros factores, esto se conoce como interacción (5), o el “efecto por el cual la aparente influencia de un factor en la respuesta depende de uno o más factores” (3).

1.3 DISEÑO FACTORIAL 2^3

Se le llama diseño factorial 2^3 cuando hay tres factores y cada uno de ellos tiene dos niveles, en donde se utiliza una notación de “+” y “-” para representar los niveles alto y bajo de cada factor (5).

Figura 1. Representación gráfica y simbólica del diseño factorial 2^3 . Vista geométrica



Fuente: Montgomery et al. (5)

En la figura 1 se muestra la representación geométrica de un diseño factorial de dos niveles y tres factores 2^3 , en el que se muestra cada factor y la relación entre ellos (a, b, c, ab, ac, cb, abc) y el nivel de cada uno (+, -).

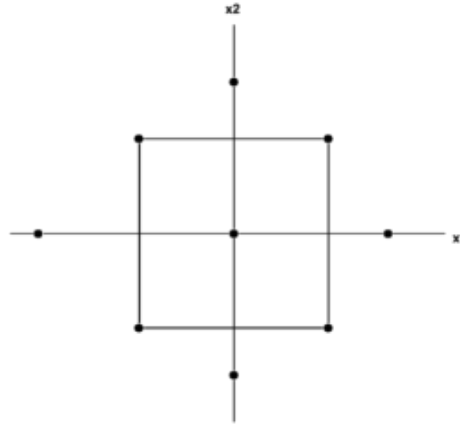
Figura 2. Representación gráfica y simbólica del diseño factorial 2^3 . Matriz de diseño

Corrida	Factor		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fuente: Montgomery et al. (5)

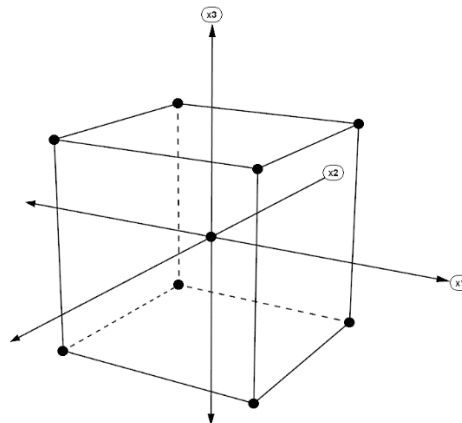
Una preocupación general cuando se realizan experimentos con dos niveles es el suponer la linealidad de los efectos de los factores. Debido a esto, existe un método para hacer pruebas en puntos intermedios del diseño factorial 2^k que no solo determinan la posibilidad de encontrar curvaturas en el modelo sino una estimación del error experimental. El método consiste en agregar *puntos centrales* en el diseño (3, 5).

Figura 3. Representación gráfica de puntos centrales en el diseño factorial 2^2 . Dos factores.



Fuente: Montgomery et al (5).

Figura 4. Representación gráfica de puntos centrales en el diseño factorial 2^3 .



Fuente: Montgomery et al (5).

1.4 SELECCIÓN DE NIVELES

A continuación, se hará una revisión bibliográfica para definir el número de niveles del experimento propuesto en el trabajo de grado.

Se debe tener en cuenta que los niveles son los valores o grados específicos de un factor cuando se realiza el experimento (6). Generalmente, un factor no tiene más de cuatro niveles (6). Como ejemplo, se puede definir como factor el espesor en el que se imprimirán las probetas para la caracterización del material y como niveles se tienen 0.3 mm (nivel alto) y 0.2 mm (nivel bajo) como ya han sido utilizados en el desarrollo de caracterización de materiales como ABS y PEEK (Ver tabla 2).

1.4.1 Uso de PMMA en piezas de uso general de manufactura aditiva FDM

El polímero PMMA (Polimetilmetacrilato) ofrece para la industria múltiples aplicaciones debido a sus propiedades físicas, como su transparencia si es requerido, mecánicas, por su resistencia a la tracción y además la resistencia a los agentes químicos (7). Entre sus aplicaciones generales es usado en cristalerías, letreros luminosos, lentes de contacto, fibra óptica, prótesis en odontología, entre otros (7). Entre las aplicaciones más comunes de materiales transparentes como el PMMA fabricado mediante FDM para la empresa Stratasys Ltd. , se encuentran plafones para iluminación, visualización de flujo de líquidos, aplicaciones médicas, modelos artísticos y de exposición (8).

1.4.2 Uso de PMMA en ingeniería de tejidos óseos

La ingeniería de tejidos es definida como “la práctica de combinar *scaffolds*, células y moléculas biológicamente activas para crear tejidos funcionales. El objetivo de la ingeniería de tejidos es recopilar ideas o teorías que restauren, mantengan o mejoren los tejidos dañados u órganos completos” (9). Por tanto, los tejidos se diseñan con materiales biocompatibles para evitar reacciones biológicas adversas, deben poseer buena resistencia mecánica y ser livianos principalmente (10). Así, como una alternativa de material para ingeniería de tejidos se utiliza el PMMA debido a que cumple con los requerimientos de diseño en la ingeniería de tejidos de tipo óseo.

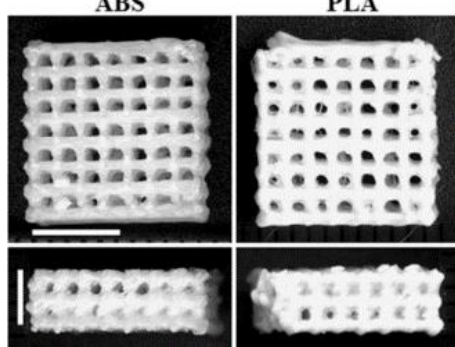
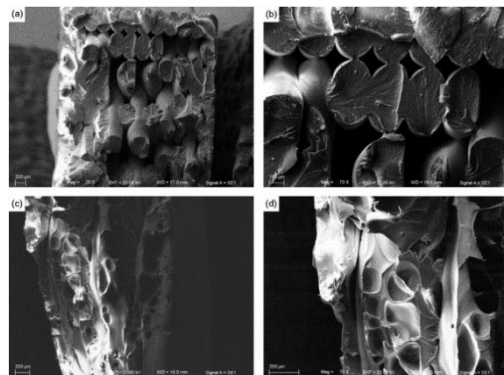
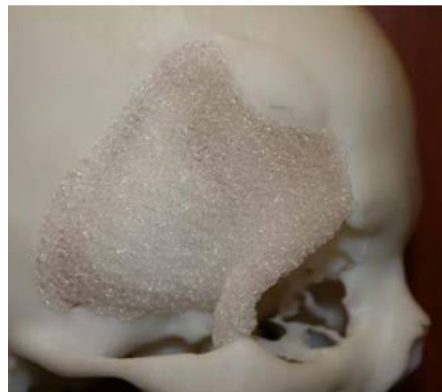
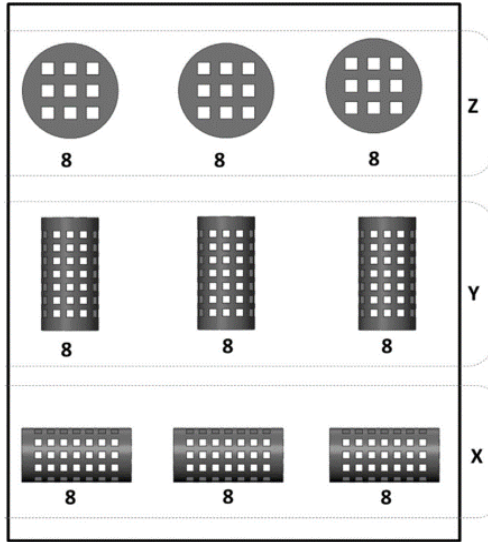
Este polímero es utilizado para la reconstrucción de tejidos óseos, principalmente en reconstrucciones craneales (1, 11, 12). En la Universidad Nacional de Colombia se realizó un estudio en el cual se busca desarrollar implantes personalizados para cada paciente utilizando manufactura aditiva para producirlos (1). En otros casos se realiza una prótesis a partir de un molde de yeso con un método conocido como Moulage Facial para después fabricarlo en el polímero (11).

1.4.3 Uso de PMMA hecho con FDM en ingeniería de tejidos

La fabricación de implantes para ingeniería de tejidos óseos ha sido realizada mediante diversas técnicas y tecnologías incluyendo los métodos tradicionales como laminación de membranas, unión de fibras, moldeo por fusión, entre otros. Sin embargo, estos métodos fueron introducidos en la industria médica sin generar estructuras porosas consistentes (13). Además, en el desarrollo de implantes en la ingeniería de tejidos, se utilizan estructuras porosas denominadas *scaffolds* (andamios), ya que se necesita que el tejido crezca entre esta estructura para generar uniformidad y rigidez entre el tejido y el polímero (14).

Los *scaffolds* son generados mediante manufactura aditiva en materiales biocompatibles como el PMMA para evitar el rechazo del organismo del paciente además de disminuir la ocurrencia de infecciones (13). Así, en las cirugías de reconstrucción de tejidos o al diseñar un injerto, se obtiene el modelo CAD específico de cada paciente a partir de la tomografía de la zona afectada, con el fin de conseguir la mayor precisión dimensional y estructural del implante (1, 15).

Tabla 2. Revisión bibliográfica de Scaffolds

Fabricación	Propiedades del material			Propiedades del Scaffold				Geometría trabajada	Pruebas realizadas	Factores que variaron	Cultivo de células	Scaffold usado	Software usado	Fuente	Observaciones						
3D-Printing	PLA		ABS	Porosidad Teórica	PLA	ABS			Matriz ortogonal de poros abiertos	Ensayo de compresión	Días de observación	SI	ABS PLA 	• MAG Biosystem 7.5 • i-control 1.9 • MTS software Test Star II • Graphpad Prism 6.0	(Rosenzweig D et al., 2015) (16)	El diseño de nuevas arquitecturas de <i>scaffolds</i> con propiedades más elásticas debe ser considerado para la construcción de matrices de regeneración.					
	Diámetro del filamento: 1,75				48%																
	Espesor de capa (e): 0,7 mm			Peso	0,152 ± 0,025 gr	0,158 ± 0,013 gr															
	Temperatura de impresión: 210 °C		Temperatura de impresión: 260 °C	Módulo de Young	~520 - 560 kPa	~195 - 193 kPa															
	Temperatura de cama: 105 °C																				
3D-Printing	Factor	PEEK	ABS	Factores fijos				Muestras estándar para ensayos mecánicos	Ensayo de tensión	Ensayo de Compresión	Espesor de capa	Ángulo de trama	NO	ABS ABS 	• CATIA V5	(Wenzheng Wu et al. 2015) (17)	Los experimentos confirmaron que el espesor de capa y el ángulo de trama tienen gran efecto sobre la resistencia a la tracción, a la compresión y a la flexión por tres puntos.				
	Resistencia a la tracción	100 MPa	37 MPa	Orientación de construcción	Dirección Y (sobre el plano)																
	Límite elástico	72 MPa	31 MPa	Patrón de relleno	Lineal																
	Resistencia a la compresión	118 MPa	37 MPa	Air Gap	0																
	Módulo de compresión	3,8 GPa	2,3 GPa	Número de contornos	2																
	Resistencia a la flexión	163 MPa	53 MPa	Diámetro interior de la boquilla	0,4																
	Módulo de flexión	4 GPa	2,2 GPa	Factores de control																	
				Espesor de capa (mm)	0,2	0,3	0,4														
				Ángulo de trama	0	30	45														
FDM	PMMA			Experimento 1				Prismas cuadrados simples	Porosidad ASTM F 2450-04	Ensayo de compresión	Porosidad	Orientación de impresión	NO	Limpieza de la boquilla		• ANOVA - Insigth V3, • Mimics®	(Espalin D. et al. 2010) (13)	Los experimentos dan evidencia de la posibilidad de utilizar FDM para la fabricación direccta de estructuras porosas personalizadas de PMMA con porosidades variables y controladas.			
	Temperatura de fusión		200-230 ° C	Frecuencia de limpieza de la boquilla		Una punta limpia por capa															
	Capacidad de absorción de agua		0,35%			Una punta limpia por 10 capas															
				Orientación de construcción		Transversal															
						Axial															
				Experimento 2																	
	Porosidades		55%, 63%, 66%, 70%																		
3D-Printing ZPrinter®	Sulfato de calcio			Tamaño del poro, Tamaño del extrusor (mm)	Porcentaje de porosidad (%)	Volumen del cilindro poroso (mm^3)	Área de la superficie esférica (mm^2)	Cilindros Porosos	Ensayo de compresión	Relación de distorsión dimensional	Posición de impresión	Porcentaje de porosidad	Espesor de capa	NO		• ANOVA • ZPrinter® 450 • CT-analyzer • SkyScan • SolidWorks	(M. Asadi-Eydivand. Et al. 2016) (18)	Este estudio demostró que los parámetros más significativos que influyen directamente en la precisión dimensional, la resistencia a la compresión y la porosidad son la orientación principalmente			
	Tamaño de las partículas 3DP Zp150																				
	Los materiales en polvo se escanearon tres veces para determinar los valores de D ₁₀ , D ₅₀ y D ₉₀ , cuyos diámetros eran 10%, 50% y 90% de las partículas por debajo de dichos tamaños.			0,4	23,60%	80,09	948,81														
				0,6																	
				0,6	36,34%	123,31	909,95														
				0,6																	
				0,8	45,04%	152,84	812,21														
				0,6																	
	El volumen total del cilindro (mm^3) = 339,29																				

Fuente: El Autor

1.4.4 Síntesis y selección de niveles

El diseño factorial que se realizará para la caracterización mecánica a tensión y compresión del PMMA fabricado mediante FFF, es 2^3 , es decir que hay tres factores y dos niveles para cada uno de ellos. Los tres factores de diseño que se estudiarán son el espesor, ángulo y la porosidad. Estos niveles se definieron en base a estudios realizados para la caracterización de materiales para la fabricación de *scaffolds* (Ver tabla 2).

Además, se analizarán dos puntos centrales en el diseño, estos se seleccionan determinando el promedio entre el nivel superior y el nivel inferior en cuanto a la porosidad y el espesor. En cuanto al ángulo se seleccionaron dos, los cuales salen de dos promedios, uno entre 0° y 45° grados y el otro entre 45° y 90° . Los niveles, factores y puntos centrales seleccionados para el experimento factorial están dados en la tabla 3.

Tabla 3. Niveles, factores y puntos centrales del diseño experimental.

Probeta	Espesor	Angulo	Porosidad	Probeta	Espesor	Angulo	Porosidad
				Unidades	mm	grados	%
	(e)	(a)	(p)	Factor	(e)	(a)	(p)
A	+	+	+	A	0,3	45	65%
B	+	+	-	B	0,3	45	50%
C	+	-	+	C	0,3	0	65%
D	+	-	-	D	0,3	0	50%
E	-	+	+	E	0,2	45	65%
F	-	+	-	F	0,2	45	50%
G	-	-	+	G	0,2	0	65%
H	-	-	-	H	0,2	0	50%
I	0	0	0	I	0,25	22,5	57,5%
J	0	0	0	J	0,25	67,5	57,5%

Fuente: El Autor

1.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- En definitiva, el diseño de experimentos permite establecer un procedimiento práctico de experimentación, en el que se reducen los ensayos a realizar y se establece una lógica de interpretación con respecto al tipo de enfoque de análisis y los factores de diseño escogidos. Ahora bien, como resultado, los diseños factoriales permiten reducir el tiempo y materiales utilizados en la experimentación que se desee realizar, dando a relucir conexiones entre factores difícilmente de ver de manera empírica, ya que los efectos e interacciones entre los factores y sus niveles se reduce al menor número de ensayos para concretar una hipótesis.
- Los factores y niveles seleccionados para la fabricación de las probetas se encuentran entre los valores comúnmente utilizados para el diseño de *scaffolds*, generando mayor veracidad en los resultados esperados al momento de realizar los ensayos a tensión y compresión.

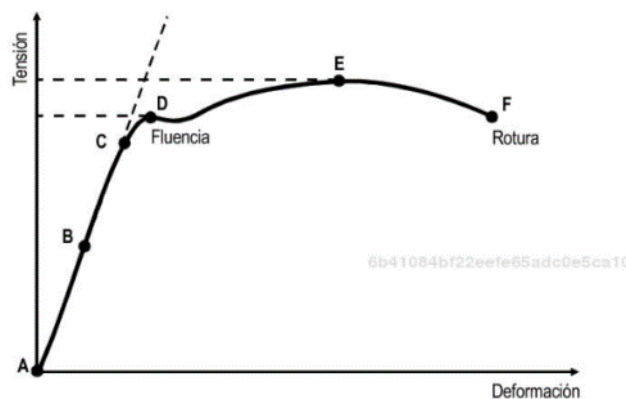
2 ENSAYO DE TENSIÓN

A continuación, se realiza la descripción del ensayo de tensión con respecto a la norma y el desarrollo del mismo en el transcurso de las pruebas y ensayos prácticos, desde la creación del modelo CAD hasta la obtención de los resultados de cada prueba.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

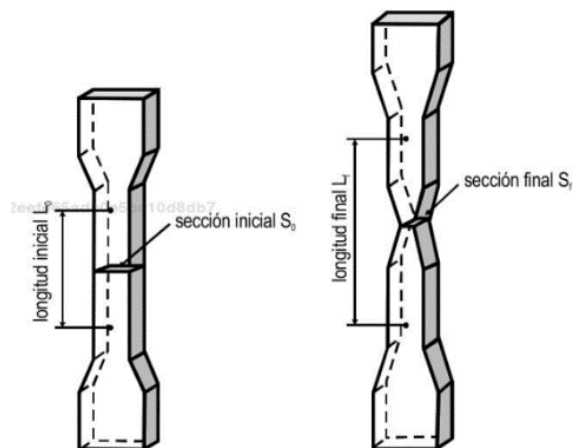
El ensayo de tensión consiste en “deformar una probeta a lo largo de su eje mayor, a una velocidad constante y aplicando una fuerza determinada hasta que la probeta se rompa o hasta que el alargamiento alcance un valor previamente elegido” (19). Por consiguiente, a partir de este ensayo se obtienen los gráficos de Esfuerzo vs. Deformación, como se muestra en la figura 5, de los cuales se obtienen datos correspondientes al esfuerzo último o de rotura (Punto F), esfuerzo máximo a la rotura (Punto E), alargamiento a la rotura, estricción, esfuerzo de fluencia (Punto D), límite elástico (Punto C) y módulo de Young o módulo elástico (E).

Figura 5. Curva de esfuerzo vs deformación.



Fuente: Fombuena et al (19).

Figura 6. Variación en las dimensiones de una probeta debido al ensayo de tensión.



Fuente : Fombuena et al (19).

2.2 RESUMEN DE LA NORMA ASTM D638

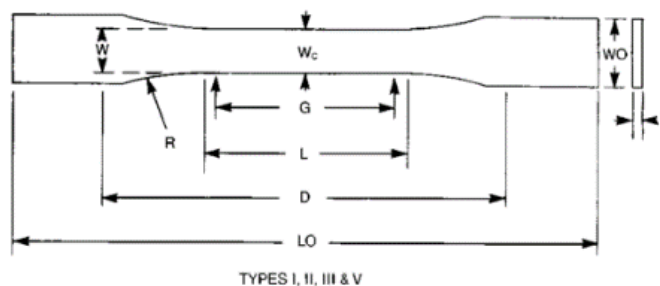
La norma ASTM D638 es el método de ensayo estándar para las propiedades de los plásticos a tensión (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, en inglés). Trata acerca del método de determinación de las propiedades a tensión de plásticos reforzados y no reforzados bajo determinada forma y condiciones de ensayo. Este ensayo está diseñado para producir datos de propiedades de tracción para el control y la especificación de materiales plásticos. Estos datos también son útiles para la caracterización cualitativa y para la investigación y el desarrollo.

Las propiedades de tracción pueden variar con la preparación de la muestra y con la velocidad y entorno de las pruebas, motivo por el cual estos factores deben ser cuidadosamente controlados. Por lo tanto, cuando se compara dentro de una serie dada de especímenes, se debe tener cuidado de asegurar un alto grado de uniformidad en los detalles de la preparación tratamiento y manipulación de las pruebas.

Por otra parte, cuando la fuerza de tracción uniaxial se aplica a un sólido, este se estira en la dirección de la fuerza aplicada, pero también se contrae en ambas dimensiones laterales a la fuerza aplicada. No obstante, si el sólido es homogéneo e isotrópico y el material se mantiene elástico bajo la acción de la fuerza aplicada. La deformación lateral tiene una relación constante con la deformación axial. Esta constante se denomina coeficiente de Poisson.

Las dimensiones de las probetas deben ajustarse a las de la figura 6, dependiendo de la cantidad de material, comparaciones ó espesor, se define el tipo de probeta a utilizar. En este caso se usará la probeta Tipo I (20).

Figura 7. Dimensiones de la probeta según su tipo.



Dimensiones de la probeta seleccionada (Tipo I)		
T	Espesor	7
W	Ancho de la sección estrecha	13
L	Longitud de la sección estrecha	57
WO	Anchura total	19
LO	Longitud total	165
R	Radio del filete	76

Fuente: ASTM (20).

2.3 ELEMENTOS DE LA NORMA PERTINENTES A LAS PRUEBAS A REALIZAR

Durante el desarrollo de las pruebas, es de gran importancia controlar aspectos como la velocidad del ensayo y el acondicionamiento del espacio en donde se realizarán los mismos. La velocidad está determinada en la norma según el tipo de probeta como se muestra en la figura 6. Por otra parte, en cuanto al acondicionamiento del espacio para realizar los ensayos requiere ciertas temperaturas y humedad relativa en el ambiente. La velocidad del ensayo fue de 3 mm/min.

Figura 8. Designaciones para las velocidades de prueba

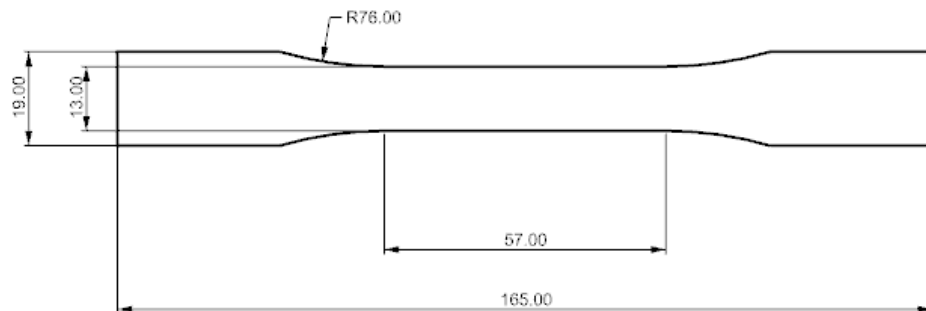
Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min [in./min]	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm· min [in./in.·min]	
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 [0.2] ± 25 %	0.1	
		50 [2] ± 10 %	1	
		500 [20] ± 10 %	10	
	IV	5 [0.2] ± 25 %	0.15	
		50 [2] ± 10 %	1.5	
	V	500 [20] ± 10 %	15	
		1 [0.05] ± 25 %	0.1	
		10 [0.5] ± 25 %	1	
	Nonrigid	III	100 [5] ± 25 %	10
			50 [2] ± 10 %	1
500 [20] ± 10 %			10	
IV		50 [2] ± 10 %	1.5	
		500 [20] ± 10 %	15	

Fuente: ASTM (20).

2.4 ELABORACIÓN DE PROBETAS

El proceso de elaboración de las probetas de tensión comienza cuando se realiza el modelo CAD de la probeta según la norma, en cuanto a su estructura externa (dimensiones y especificaciones) para probetas plásticas rígidas y semi-rígidas Tipo I (Ver figura 7). Estas probetas fueron realizadas en el software Rhinoceros©.

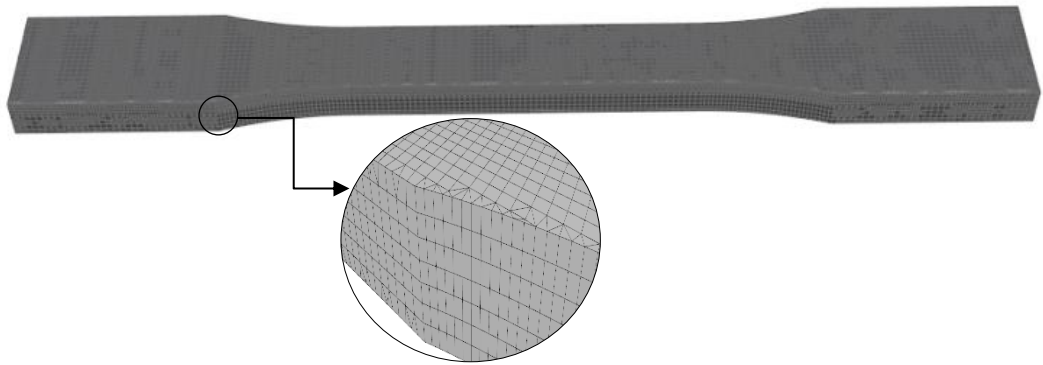
Figura 9. Probetas plásticas rígidas y semi-rígidas Tipo I en software Rhinoceros©. Nota: Medidas en milímetros.



Fuente: El autor.

Luego, a este modelo se le realiza una exportación a formato STL que servirá para generar conexión entre el software CAD y el software laminador o de corte (*slicer*) que se encargará de generar el *G-code* mediante el cual la impresora 3D tendrá definido su modo de operación, la cantidad de capas, velocidad de impresión, contornos, entre otros factores de impresión.

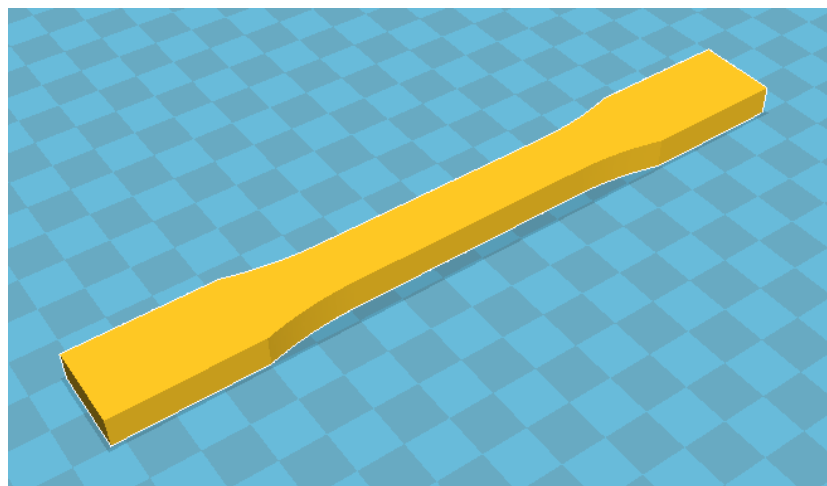
Figura 10. Enmallado poligonal de la probeta de tensión.



Fuente: El autor.

Así, uno de los software de más importantes para poder trabajar en impresión 3D son los programas laminadores o *slicers*, los cuales dividen el modelo 3D en capas y generan el *G-code* en donde se contienen las órdenes a ejecutar por la impresora para la fabricación sucesiva por capas de la pieza física (21). El software utilizado para generación del *G-code* es Cura© versión 15.04.06 de la compañía Ultimaker©, en el cual se generan las condiciones de operación de la impresora, y es en donde se procede a colocar los niveles para cada factor (Ver tabla 2).

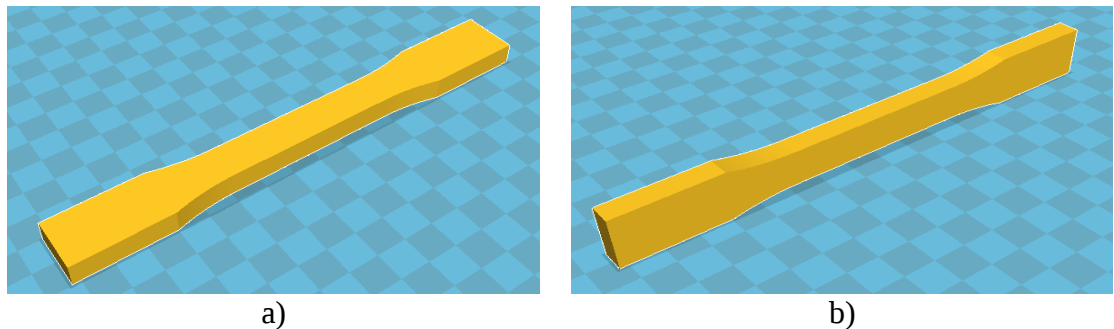
Figura 11. Probeta de tensión al ser transferida al software Cura©.



Fuente: El autor.

Para cada ensayo se probarán dos posiciones de impresión sin cambiar el espesor, el ángulo, ni la porosidad definidos en el diseño experimental para cada uno de las réplicas. Es decir, que solo se cambiará la posición de impresión de las probetas para conocer si hay cambios en los resultados obtenidos entre el mismo experimento. Por ejemplo, se puede determinar si hay cambios en el módulo de elasticidad entre la probeta impresa en la posición 1 (Figura 12 a) con respecto a la probeta impresa en la posición 2 (Figura 12 b).

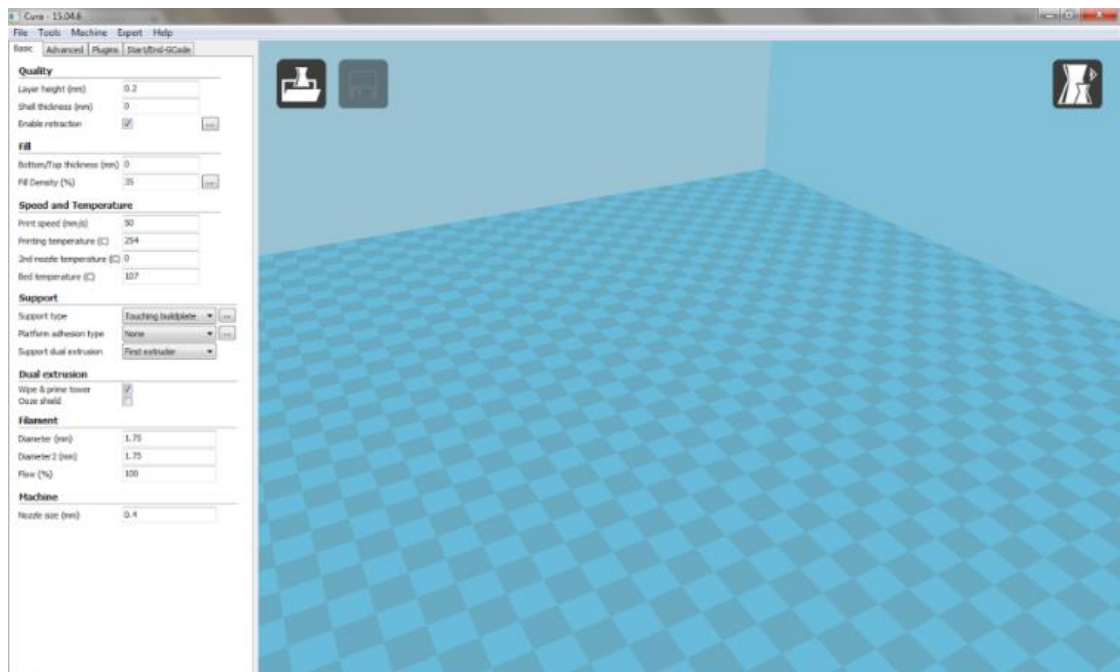
Figura 12. Posiciones de impresión. a) Posición 1 en probetas para ensayo de tensión.
b) Posición 2 en probetas para ensayo de tensión.



Fuente: El autor.

La interfaz de Cura© (Figura 13) permite realizar cambios en los parámetros de fabricación fácilmente, parámetros que serán descritos a continuación:

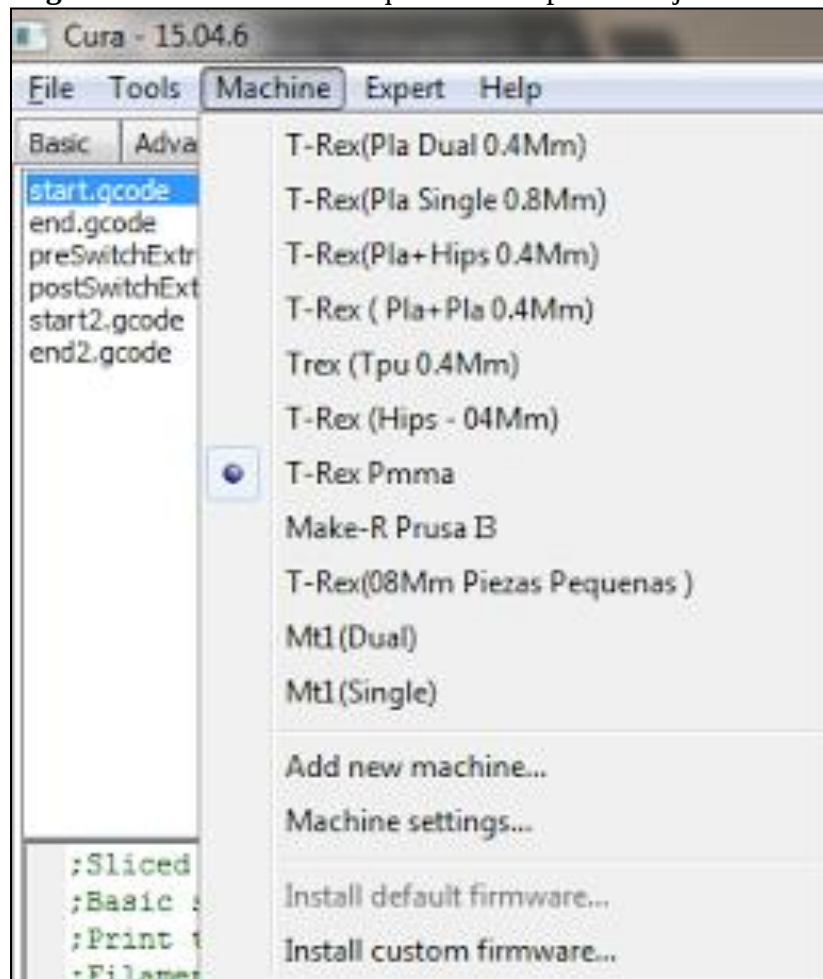
Figura 13. Interfaz del software Cura©.



Fuente: El autor.

- Se abre el archivo CAD de la probeta en el software Cura©.
- Se selecciona la máquina virtual creada para la impresión de PMMA (Figura 14).

Figura 14. Selección de máquina virtual para trabajar PMMA.



Fuente: El autor.

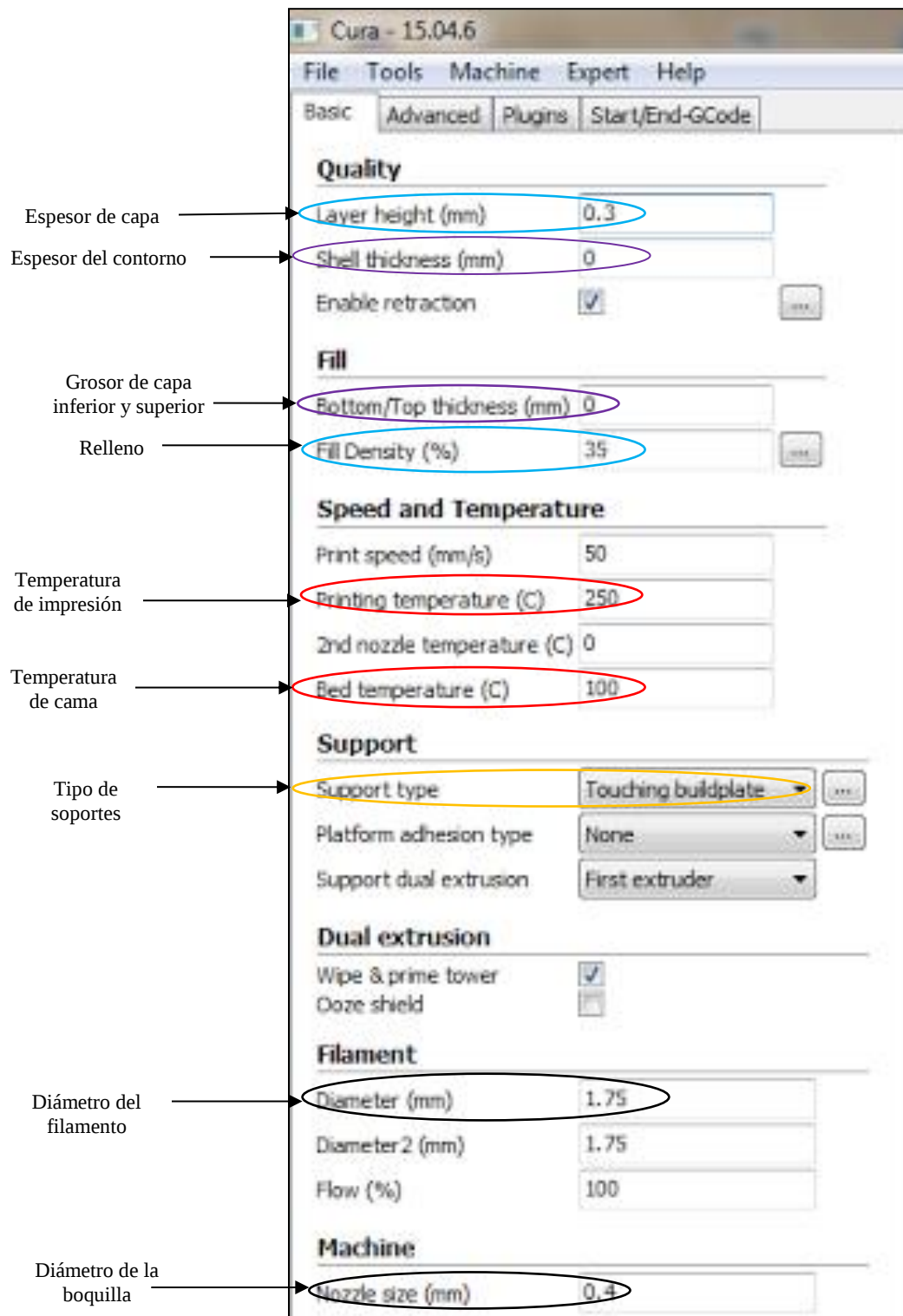
- Se modifican los parámetros de impresión que varían dependiendo de la configuración de las probetas (Ver figura 15) y las condiciones de temperatura de la boquilla y de la cama exigidas por el fabricante (Ver tabla 4).

Tabla 4. Condiciones de impresión por parte del fabricante.

Condición	Temperatura °C
Boquilla	250-260
Calefacción de la cama	100

Fuente: Barnatt et al (22).

Figura 15. Opciones para modificar los parámetros de impresión en la interfaz del software Cura®.



Fuente: El autor.

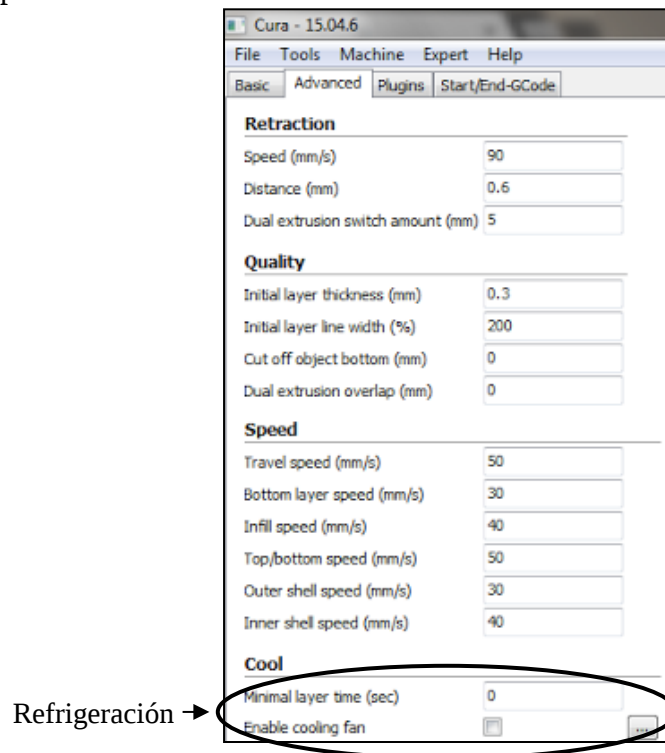
A continuación, se describen las opciones resaltadas en la figura 16:

- *Layer height* (mm): es el espesor de capa.
- *Shell thickness* (mm): es el espesor de los contornos que se le realicen a la pieza. Sin embargo, su valor es cero (0) para evitar que estos puedan influir en la capacidad del elemento en soportar esfuerzos.
- *Enable retraction*: es la opción que hace que en los desplazamientos el extrusor retraiga un poco el material para que no gotee (23).
- *Bottom/top thickness* (mm): es el espesor de la capa superior e inferior en mm. No obstante, si valor es cero (0) con el fin de que no influyera en la capacidad de soportar esfuerzos de la estructura porosa.
- *Fill Density* (%): es el relleno que lleva la figura geométrica y está dado en porcentajes, estos valores están dados para cada réplica según el diseño de experimentos.
- *Printing Temperature* (C): es la temperatura de impresión o la temperatura de la boquilla de impresión. Esta puede variar según el rango de temperaturas dado por el fabricante del filamento.
- *Bed Temperature* (C): es la temperatura de la cama de impresión. Esta puede variar según el comportamiento del material.
- *Support type*: es el tipo de soporte que puede necesitar la pieza que se imprime, dependiendo de su posición en la cama, y puede variar según su aplicación. En este caso se seleccionó *Touching buildplate* (Tocando el plato de construcción, en español), debido a que hace que el soporte se adhiera más a la cama de impresión que a la pieza evitando generar más esfuerzos en la pieza o disminuirlos dado el caso.
- *Diameter* (mm): es el diámetro del filamento utilizado.
- *Nozzle size* (mm): es el diámetro de la boquilla de impresión.

Las opciones que no fueron nombradas, hacen parte de otras opciones ajenas al proceso de fabricación de las probetas de tensión o compresión en este estudio y que el software usa debido a la capacidad de la máquina como *Dual extrusion* utilizada en los casos en los que se construirá una pieza con dos materiales simultáneamente. Lo que no se hará en este trabajo.

- Por otro lado, solo se modificó una opción en la pestaña de avanzado (Advanced) y fue desactivar la refrigeración de la cama por medio de un ventilador debido a que generaba aún más contracción en el material (Ver figura 16).

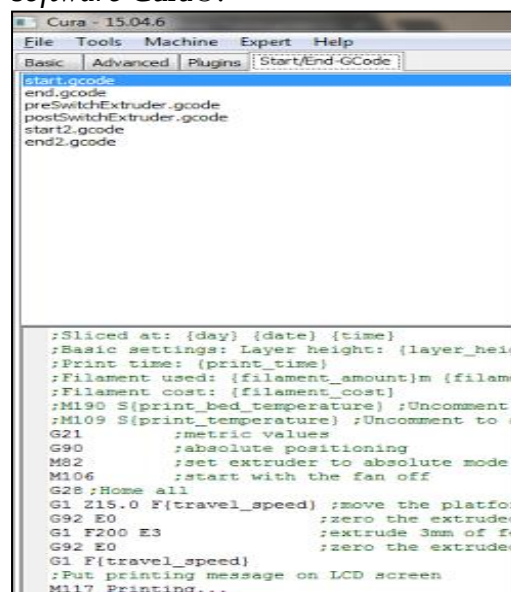
Figura 16. Opciones para modificar los parámetros de impresión en la interfaz del software Cura© en las opciones avanzadas.



Fuente: El autor.

- Finalmente podemos observar el *G-Code* generado por el software.

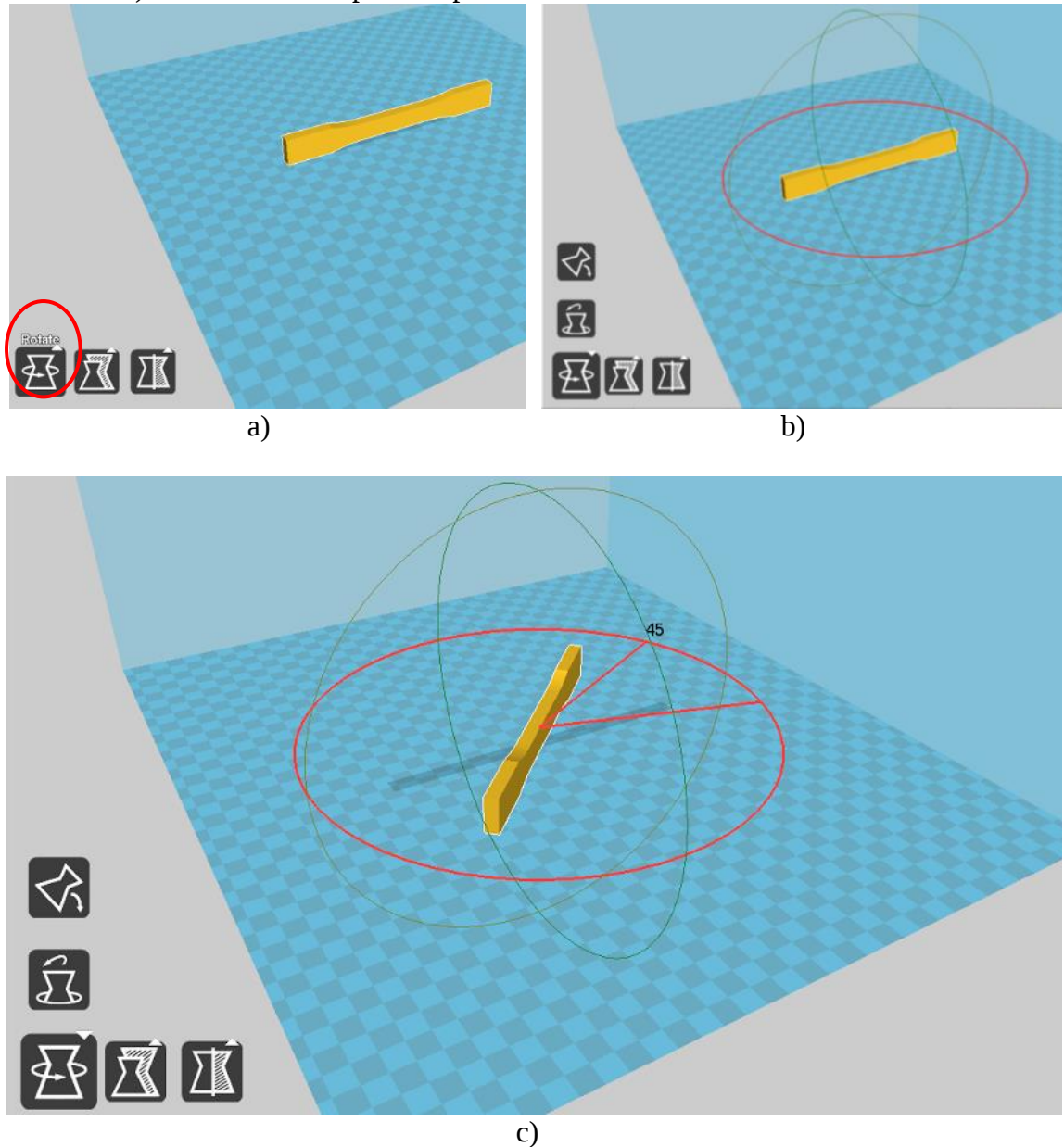
Figura 17. *G-Code* generado por el software Cura©.



Fuente: El autor.

Después de configurar la impresión según las características del material, dependiendo la configuración dada para cada probeta en el diseño del experimento, se gira esta misma al ángulo que se necesite (Figura 18).

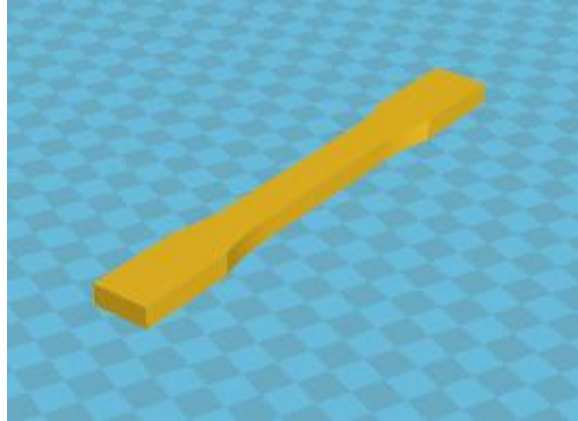
Figura 18. Procedimiento para girar una probeta en el software Cura©. a) Selección de la opción Rotate (Rotar) encerrada en la circunferencia roja. b) Selección del plano de rotación. c) Rotación con respecto al plano seleccionado.



Fuente: El autor.

Cuando se gira la probeta en este software se obtiene la impresión a un ángulo de 90° grados, mientras que en la posición original se obtiene un ángulo de 45° grados. Sin embargo, para los dos puntos centrales los ángulos de 67.5° y 22.5° se hace desde el software de modelado *Rhinoceros*© y luego se importa a Cura©.

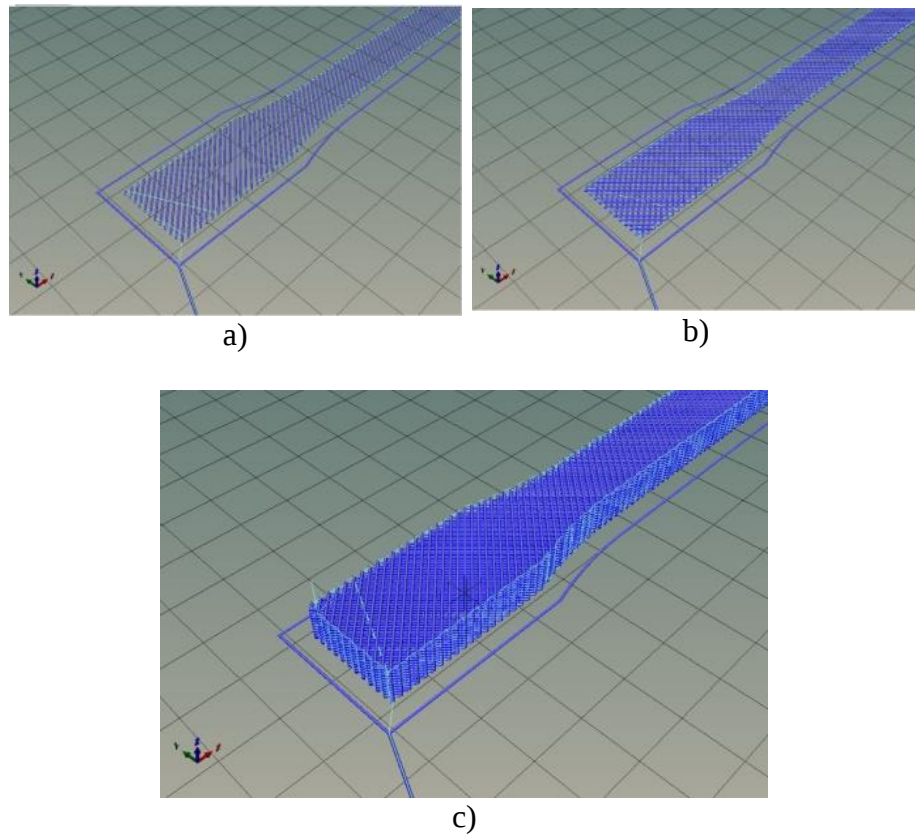
Figura 19. Probeta en posición 1 a un ángulo de 22.5° grados.



Fuente: El autor.

Posteriormente, el archivo el objeto CAD es guardado como “*.STL*” y se transfiere al software *Repetier Host*®, que es el encargado de ubicar espacialmente la probeta en la impresora, y en la cual se pueden observar los movimientos que realizará el cabezal para generar la probeta y cada una de las capas que tendrá.

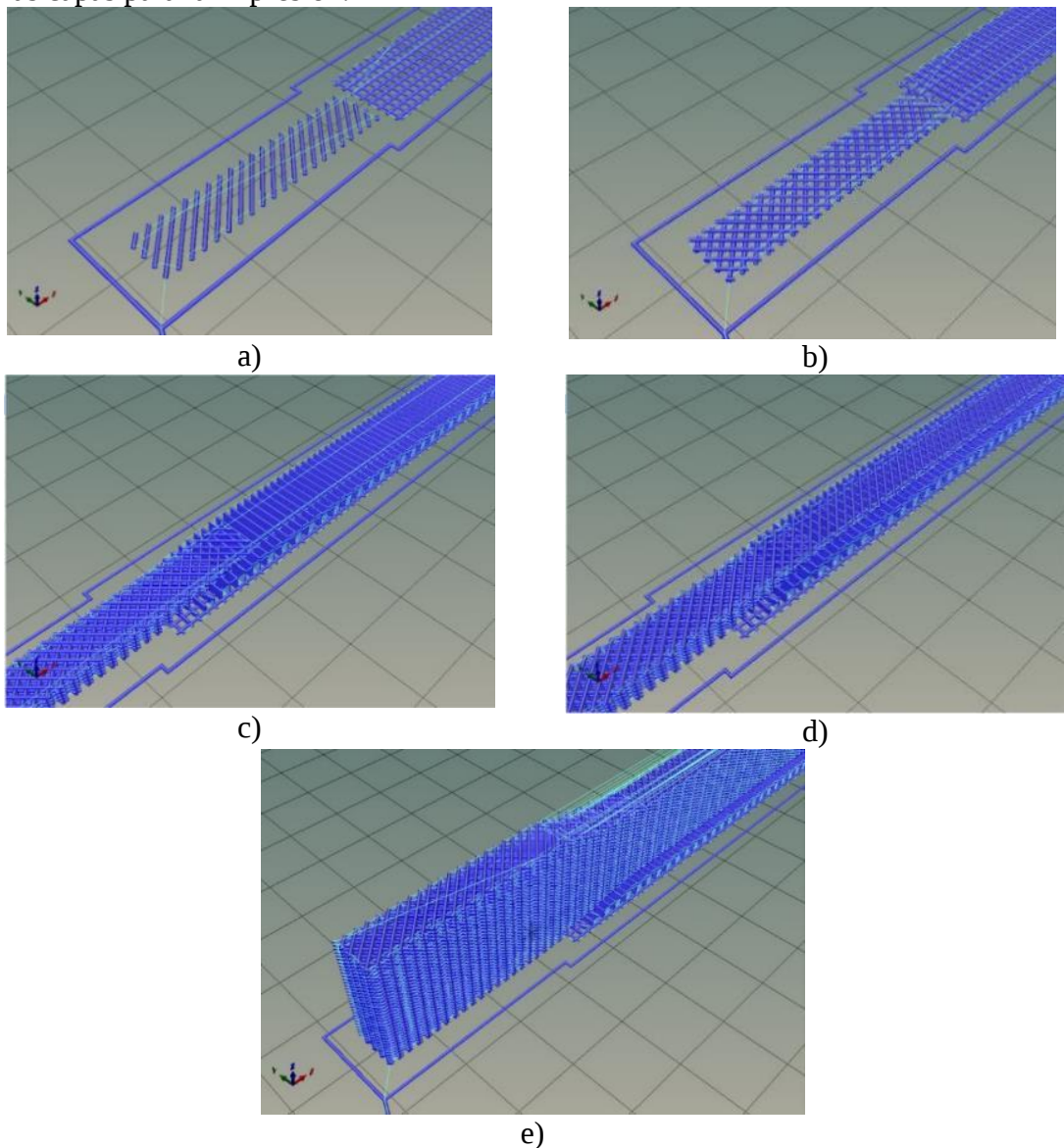
Figura 20. Probeta de tensión en posición 1 en el software *Repetier Host*®. a) Primera capa de impresión. b) Primera y segunda capa de impresión. c) Todas las capas para la impresión.



Fuente: El autor.

En las probetas que se fabricarán en la posición 2 se debe generar soporte debido a que en el espacio entre la cama de impresión y la probeta en la parte central no hay material dentro del diseño original especificado por la norma. Debido a esto, se deben generar estos soportes por medio de la opción *Support* en el menú básico del software Cura© (Ver figura 15) en donde se selecciona *Touching buildplate* (Tocando el plato de construcción, en español). Así, al transferir la pieza al software *Repetier Host*© se observa la siguiente construcción de la probeta:

Figura 21. Probeta de tensión en posición 2 en el software *Repetier Host*©. a) Primera capa de impresión. b) Primera y segunda capa de impresión. c) Última capa antes de hacer contacto con el soporte. d) Primera capa sobre el soporte. e) Todas las capas para la impresión.

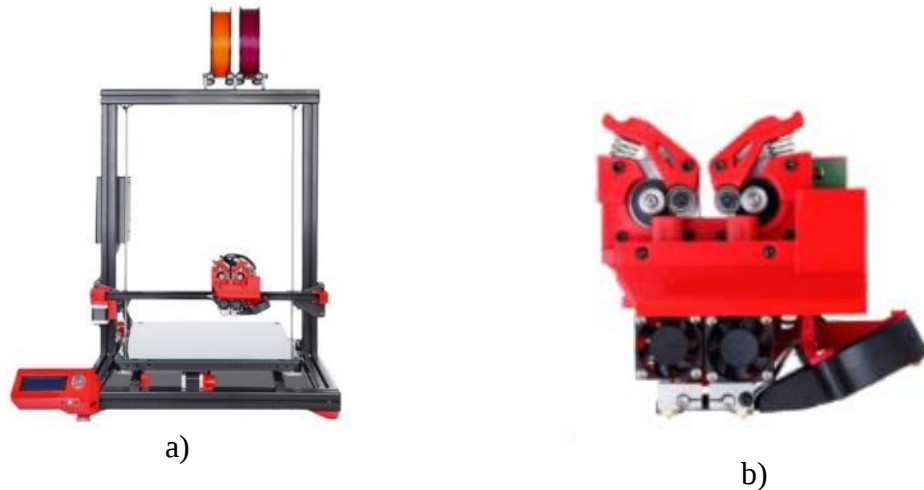


Fuente: El autor.

Finalmente, se lleva a la impresora 3D para comenzar con el proceso de impresión. Este proceso, requiere de ciertas condiciones de entorno y preparación exigidos por el material

así como condiciones de impresión dadas por el fabricante del filamento y necesarios para el proceso (22).

Figura 22. Impresora 3D *FDM* FORMBOT –TREX. a) Vista general de la impresora. b) Cabezal de extrusión de doble extrusor.



Fuente: Voxel C&T(24)

Tabla 5. Especificaciones técnicas de la impresora 3D *FDM* para la fabricación de las probetas.

Fabricante:	FROMBOT	País de origen:	Colombia
Distribuidor autorizado:	Voxel C&T	Teléfono:	(571)7026792
Página web:	voxel3d.net/		
Modelo:	TREX	Tecnología:	FFF (Fused Filament Fabrication)
Diámetro del filamento	1.75 mm ± 0.1mm		
Materiales	PMMA		
Volumen de impresión	X: 400mm, Y: 400mm, Z: 450mm		
	Resolución de impresión		
Resolución normal	0.2 mm		
Resolución alta	0.1 mm		
	Temperatura de impresión (C)		
Sencillo/Doble	280		
Alta temperatura	350		
Velocidad de impresión	1-180 mm/s		
	Dimensiones de la máquina		
Con soporte para carrete alimentador:	Ancho:	560 mm	
	Alto:	630 mm	
	Profundidad:	520 mm	
Sin soporte para carrete alimentador:	Ancho:	460 mm	
	Alto:	630 mm	
	Profundidad:	520 mm	
Peso total	16.5 kg		

Fuente: Voxel C&T(24)

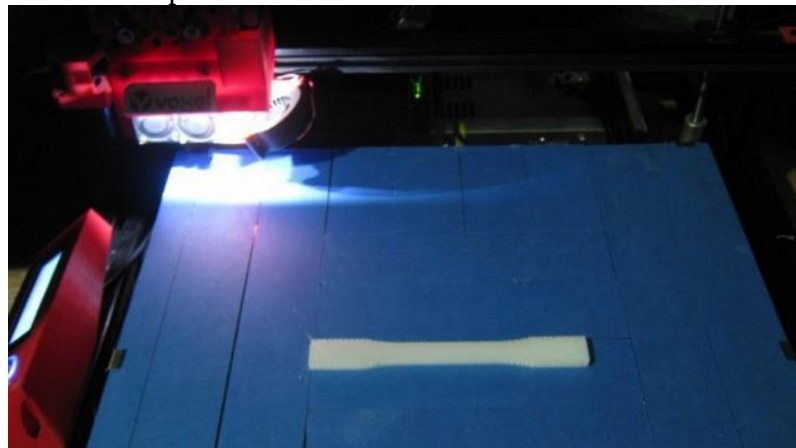
La duración y el peso (gr) de cada probeta impresa variaron con respecto a su posición y diferentes factores dados en el diseño experimental, como se muestra a continuación:

Tabla 6. Duración de fabricación y peso de cada probeta para ensayo de tensión.

Probeta	Factor	Espesor	Angulo	Porosidad	Duración de fabricación (min)	Peso (gr)
	Unidades	mm	grados	%		
	Posición [1,2]	(<i>e</i>)	(<i>a</i>)	(<i>p</i>)		
A	1	0,3	45	65%	30	8
	2	0,3	45	65%	48	9
B	1	0,3	45	50%	39	12
	2	0,3	45	50%	47	12
C	1	0,3	0	65%	26	8
	2	0,3	0	65%	30	8
D	1	0,3	0	50%	40	12
	2	0,3	0	50%	44	12
E	1	0,2	45	65%	48	8
	2	0,2	45	65%	58	9
F	1	0,2	45	50%	63	12
	2	0,2	45	50%	71	12
G	1	0,2	0	65%	43	8
	2	0,2	0	65%	58	12
H	1	0,2	0	50%	61	11
	2	0,2	0	50%	72	12
I	1	0,25	22,5	57,50%	62	10
	2	0,25	22,5	57,50%	75	11
J	1	0,25	67,5	57,50%	64	10
	2	0,25	67,5	57,50%	74	11

Fuente: El autor.

Figura 23. Proceso de impresión terminado en una probeta de tensión en la posición 1.



Fuente: El autor.

Las probetas están marcadas según el diseño experimental mediante letras A, B, C, D, E, F, G, H, I, J (ver tabla 3) y con respecto a su posición de impresión mediante números 1, 2 (Ver figura 12). Por ejemplo, la probeta de la figura anterior se marcó como A1.

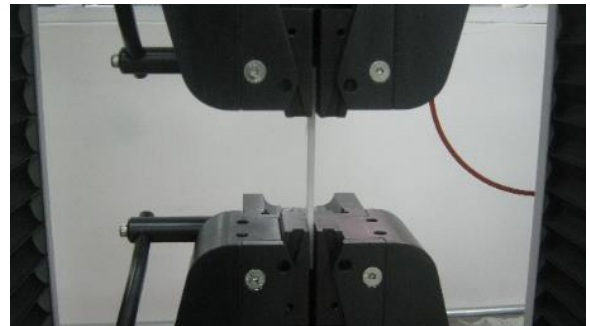
2.5 REALIZACIÓN DE ENSAYOS

Las pruebas se realizaron de manera estándar en la máquina de ensayos universales BESMAK© (Ver tabla 6). Estos obedecieron a la norma ASTM D638 que es el método de ensayo estándar para las propiedades de los plásticos a tensión.

Figura 24. Máquina universal de ensayos BESMAK© con algunas características. a) Máquina de ensayos universales BESMAK©. b) Mordazas para ensayos de tensión en plásticos. c) Certificado de calibración de la máquina.



a)



b)



c)

Fuente: El autor.

La máquina fue calibrada y certificada por la empresa Concrelab. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de ensayos del SENA en ubicado en el centro de materiales y ensayos de

la institución. Estos, se realizaron bajo la norma correspondiente a cada tipo de ensayo y con un ambiente controlado.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos BESMAK© BMT-E Series

Fabricante: BESMAK©	País: Turquía
Modelo: BMT-E SERIES	
Capacidad de carga de	5 Toneladas fuerza
Mandíbulas y tiradores estándar	
Sistema de 2 columnas y un sistema neumático de mandíbula tipo "V" para muestras planas y cilíndricas.	
La medición y control de carga se procesa con célula de carga y tiene una sensibilidad de clase 0,5 entre% 1 -% 100 de capacidad, de acuerdo con la norma ISO 7500-1.	
La velocidad de carga es ajustable	0.01kN / sy 15kN / seg.
La medición y control de la posición se puede realizar con una sensibilidad de 0.0001mm, mediante un sensor de posición integrado en el interior del dispositivo.	
Control:	1- Controlador DOLI 2- DOLI RMC 3- Software de ordenador "Test & Motion" (con control de carga y desplazamiento)
Sensibilidad:	0.01mm / min o 0.01kN / seg.
Resolución:	18 bits - 22 bits
Frecuencia de control de carga:	0.01kN / seg.
Sensibilidad de la velocidad de control	≤% 1 del valor ajustado
Sensibilidad de la medida del desplazamiento:	±% 0.5
Estabilidad de la medición del desplazamiento:	0.01μm
Velocidad de control del desplazamiento:	0,01 - 500 mm / min
Sensibilidad de la medida de la deformación:	0.01mm / min
Velocidad de control de deformación:	0.01mm / min
Distancia de prueba superior:	1195mm
Distancia de prueba inferior:	1100mm
Ancho de prueba horizontal:	500mm
Dimensiones:	(ancho x largo x alto): (mm) 955 x 1050 x 2300
Peso:	1000 kg
El software para PC:	Test & Motion

Fuente: BESMAKLAB (25).

Consecuentemente, se organizaron y marcaron las probetas para realizar el ensayo de manera alfabética según el diseño de experimentos (Ver tabla 3) y según su posición, obteniendo un total de 20 ensayos de tensión. Estas, estaban separadas cada una en una bolsa sellada con el fin de evitar absorción de humedad por parte del material debido a la hidrofiliidad de los polímeros (2), y evitar roces entre las probetas, con el fin de disminuir la aparición de imperfecciones o desprendimiento de los filamentos del material.

Figura 25. Probetas para ensayo de tensión.



Fuente: El autor.

A continuación, se muestra uno de los ensayos de tensión realizados:

Figura 26. Ensayo de tensión. a) Montaje de probeta para ensayo de tensión. b) Muestra de falla en probeta de PMMA.



a)



b)

Fuente: El autor.

Los ensayos se realizaron con una longitud inicial de 80 mm entre las dos mordazas y teniendo en cuenta las especificaciones de la norma con respecto a la velocidad de ensayo (Ver figura 8) y el entorno.

2.6 ANÁLISIS MORFOLÓGICO

El análisis morfológico, se realizó en dos probetas principalmente A1 ($e = 0.3\text{mm}$, $\alpha = 45^\circ$, $p = 65\%$) y H2 ($e = 0.2\text{mm}$, $\alpha = 0^\circ$, $p = 50\%$), utilizando el microscopio digital AM4013MT (Ver figura 27 y tabla 8) para evidenciar diferencias microscópicas en su fabricación que puedan influir en los resultados obtenidos en los ensayos a tensión.

Figura 27. Microscopio digital AM4013MT.



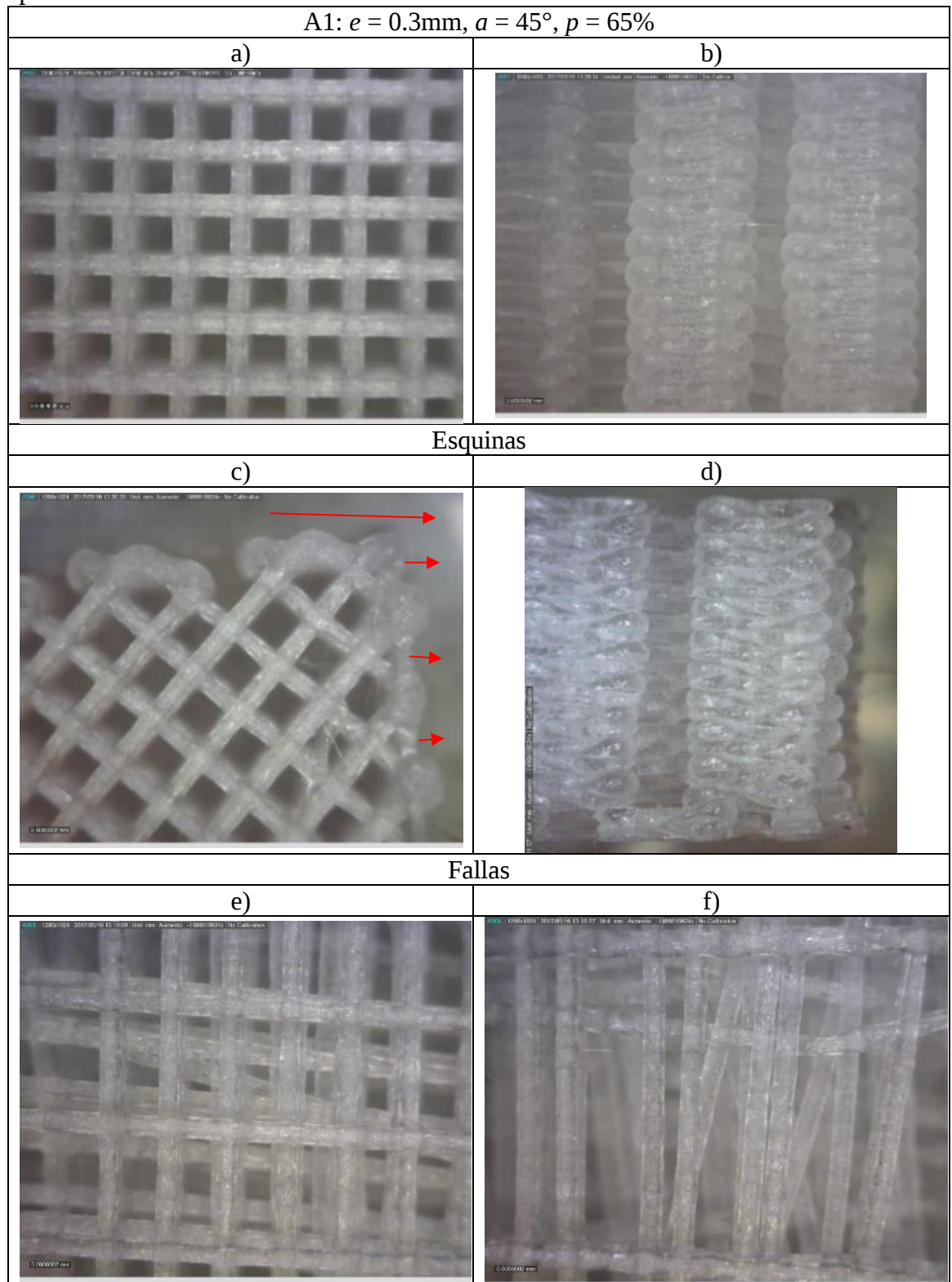
Fuente: El autor.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del microscopio digital AM4013MT.

Fabricante	AnMo Electronics Corporation	País	China
Página Web	http://www.dino-lite.com	Teléfono	+886-2-29749126
Dirección	17F, No. 97, Sec. 4, ChongHsin Rd., Sanchong Dist., New Taipei City, 241 Taiwan	Modelo	AM4013MT Dino-Lite Premier
Resolución	1.3 Mega pixeles (SXGA)		
Rango de aumento	20x~50x, 200x		
Sensor	Color CMOS		
Cuadros por segundo	Hasta 30fps		
Formatos de guardado	Imagen: DinoCapture2.0: BMP, GIF, PNG, MNG, TIF, TGA, PCX. Video: DinoCapture2.0: WMV, FLV, SWF		
Microtouch	Toque el disparador sensible en el microscopio para tomar fotos.		
Iluminación	8 luces LED blancas encendidas / apagadas por software		
Función de medición	Si		
Función de calibración	Si		
Sistema operativo compatible	Windows 10, 8, 7, Vista, XP. MAC OS 10.4 o posterior.		
Peso de la unidad	140g		
Dimensiones de la unidad	10,5 cm (H) x 3,2 cm (D)		

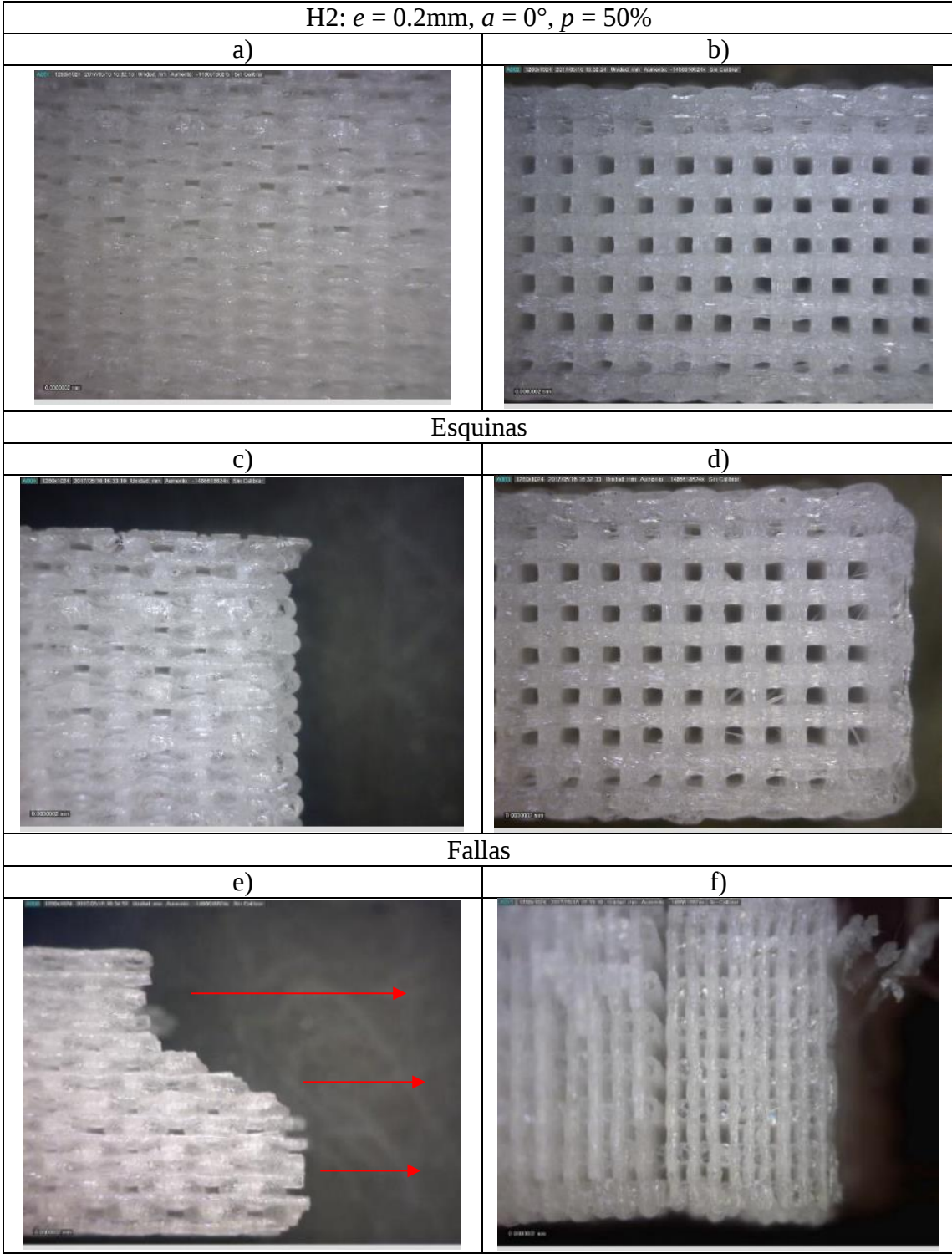
Fuente: AnMo Electronics Corporation (26).

Figura 28. Detalles morfológicos de la probeta A1 sometida a tensión. Zoom 55x. a) Relleno en vista frontal. b) Relleno en vista lateral. c) Esquina en cara ancha. d) Esquina de espesor. e) Zona de Falla 1. f) Zona de falla 2. Las flechas indican la dirección de aplicación de la fuerza.



Fuente: El autor.

Figura 29. Detalles morfológicos de la probeta H2 sometida a tensión. Zoom 55x. a) Relleno. b) Relleno en vista lateral (espesor). c) Esquina en cara ancha. d) Esquina de espesor. e) Zona de Falla 1. f) Zona de falla 2. Las flechas indican la dirección de aplicación de la fuerza.



Fuente: El autor.

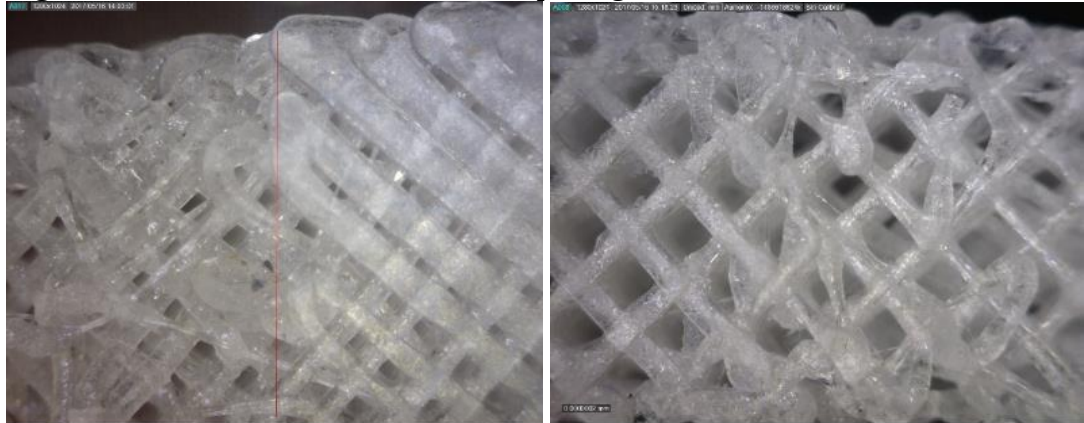
En la figura 28 a) se observa el relleno de la probeta A1 (0.3mm , $\alpha = 45^\circ$, $p = 65\%$), también se muestra que la zona ancha de la probeta no sufre ninguna deformación permanente en esa cara ni en la cara lateral que es la que corresponde al espesor de la probeta como se muestra en la figura 28 b). También, se puede observar en la figura 28 c), como no hay contornos, tal como se determinó durante el diseño experimental, únicamente existe la estructura porosa sin perder la estructura geométrica determinada por la norma ASTM D638. Por otra parte, en la figura 28 d), se observa la influencia de la cama de la impresora 3D en la deformación de los filamentos de la base de las probetas.

También, se observa en la figura 28 e) y f) las zonas de falla. Estas zonas muestran como queda el lugar en donde falló la probeta en distintos lugares de observación. En ambas figuras se aprecia que no se desprende totalmente la probeta ya que algunos filamentos permanecen unidos aún después de haber fallado. En cuanto a la figura 28 e), se observan los filamentos más unidos y en mayor cantidad, y en la figura 28 f) se ve la zona en la que más se desprendieron los filamentos además del lugar en donde más se deformó la probeta.

En cuanto a la probeta H2 ($e = 0.2\text{mm}$, $\alpha = 0^\circ$, $p = 50\%$), en la figura 29 a), se observa el relleno de la cara ancha de la probeta, que cambia con respecto a la figura 28 a) debido a la posición de fabricación, siendo este tipo de geometría la que se somete al ensayo de tensión. A su vez, el “relleno del espesor” que se observa en la figura 29 b) corresponde al relleno que se configuró desde el diseño de experimentos. También, se observa en la figura 29 c) el efecto de la cama de impresión en la esquina que estaba en contacto al momento de imprimirse. En la figura 29 d) se muestra también, la influencia de la cama de impresión en la cara correspondiente al espesor de la probeta. Ahora bien, en la figura 29 e) y f), se muestra el tipo de falla que se presentó en la probeta, de manera más plástica, generando un desprendimiento total de la probeta debido a la ruptura transversal de todos los filamentos, además de la separación entre capas a través de la misma.

Las probetas fabricadas en la posición 2, tuvieron que ser hechas con soporte debido a su geometría y presentan algunos residuos como se muestra en la figura 30.

Figura 30. Residuos de filamentos del soporte generado durante la fabricación.

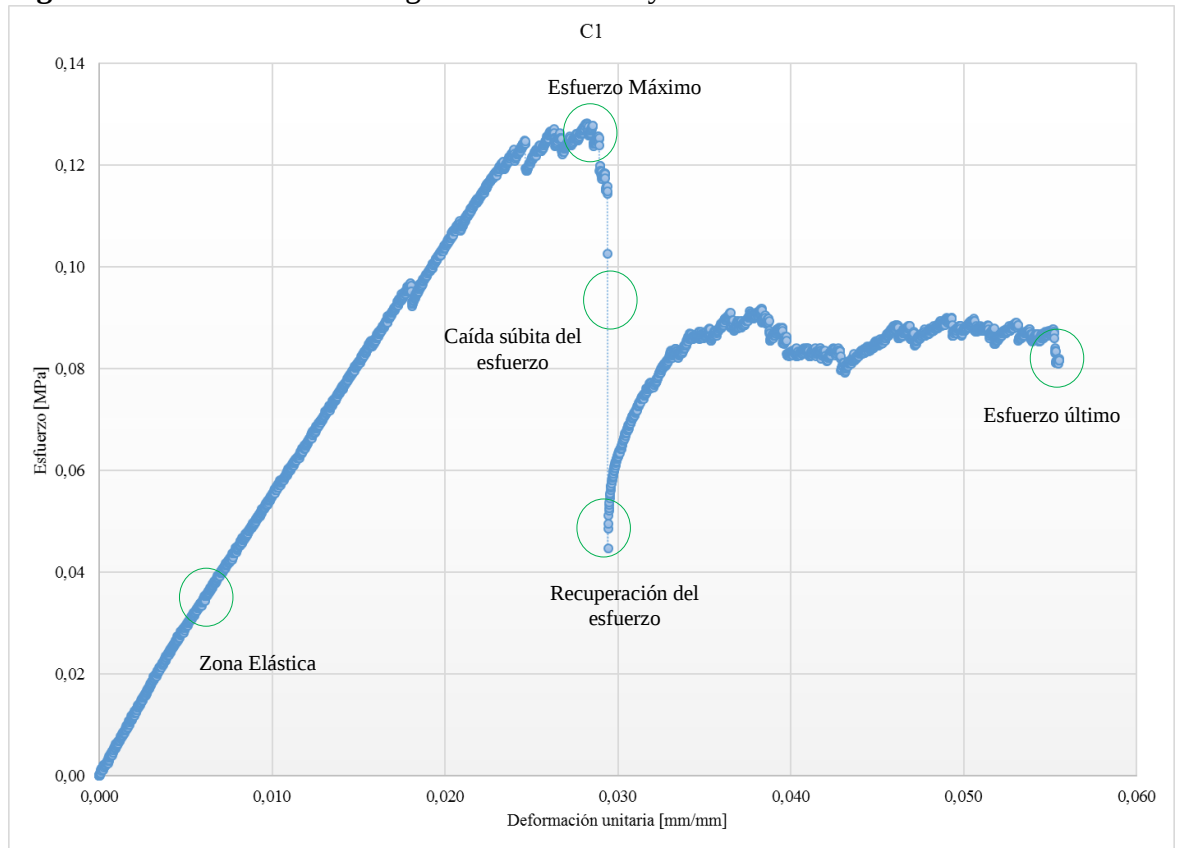


Fuente: El autor.

2.7 RESULTADOS

los resultados obtenidos se pueden observar gráficamente en el Anexo A. Estos, varían con respecto al tiempo que estuvo la probeta en la máquina sin separarse completamente. No obstante, en algunos casos se detuvo el ensayo ya que el comportamiento de la gráfica demostraba que su comportamiento después de alcanzar el esfuerzo máximo sería constante. Pese a esto, los resultados proyectaron claramente los esfuerzos máximos de cada ensayo ya que se esperó un tiempo prudente en cada ensayo para no seccionar ningún comportamiento no esperado que pudiera influir en el análisis de los resultados obtenidos. También se observó que en algunos casos los esfuerzos logrados después del esfuerzo máximo y descender drásticamente, volvían a recuperar cierta parte de su resistencia muy por encima del valor del esfuerzo de rotura.

Figura 31. Gráfico de análisis general de los ensayos de tensión.



Fuente: El autor.

Las propiedades físicas y mecánicas del PMMA fabricado por FFF tienen características cualitativas similares a las del PMMA obtenido mediante moldeo por inyección (27). En este caso, se observó que varias de las probetas presentaban baja elongación y no se rompían en la ruptura, es decir que, aunque ya había fallado el espécimen, no se separaba totalmente. Por otro lado, las propiedades mecánicas obtenidas mediante moldeo por inyección muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Propiedades mecánicas de PMMA obtenidas mediante moldeo por inyección.

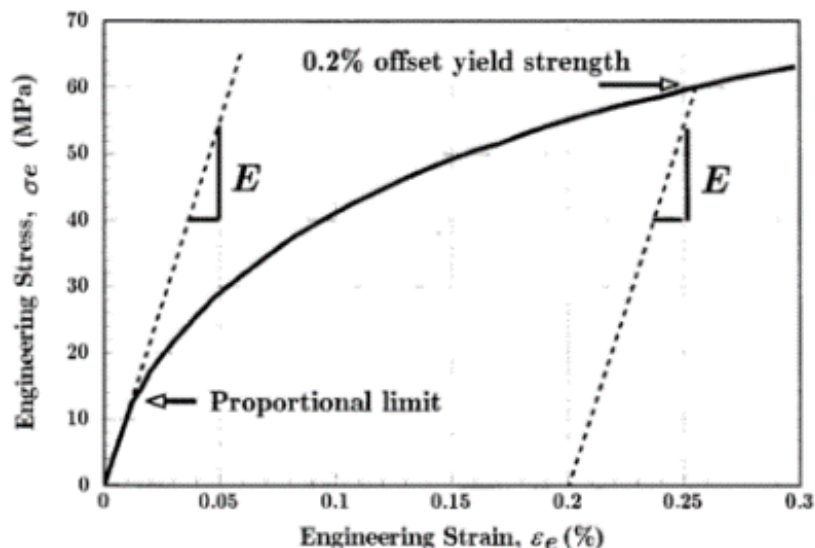
Propiedades Mecánicas	Valor
Resistencia última a la tracción	47 – 79 MPa
Ruptura de elongación	1 – 30 %
Módulo de tensión	2.2 – 3.8 GPa

Fuente: Adaptado de Ackermann et al (27).

Por consiguiente, se determinarán las propiedades como el esfuerzo máximo, el porcentaje de elongación y el módulo de elasticidad a partir de las gráficas resultantes de la experimentación. Para esto, hay que tener en cuenta el modo en que se determinará el módulo de elasticidad de cada ensayo a partir de los datos obtenidos.

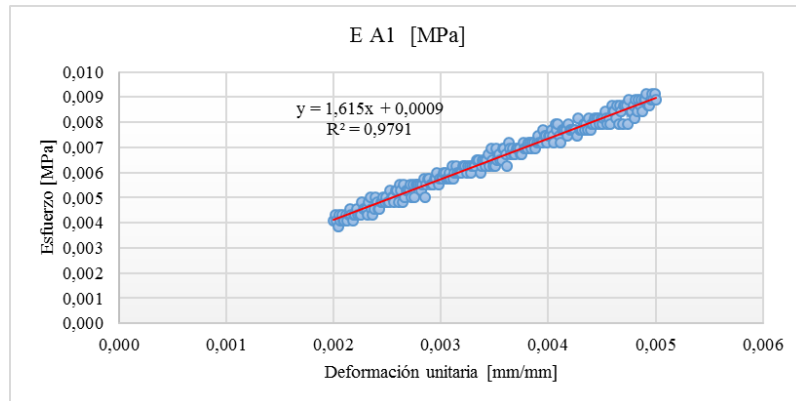
El módulo de elasticidad está definido como la pendiente de la recta en la zona de proporcionalidad directa entre tensión y deformación (28). Normalmente, se determina con el rango de datos dados entre cero (0) y el 0.2 % como se puede muestra en la figura 32. Sin embargo, en algunos casos los datos obtenidos no permiten que se pueda utilizar ese rango debido a que algunos datos son cero en esa zona o presentan valores negativos, debido a que no estaba haciendo contacto la prensa con la probeta en el caso de los ensayos de compresión. Luego, debido a que se requiere tener un rango de análisis general para todos los ensayos se definirá en su mayoría (si no presenta un comportamiento especial) entre 0.002 y 0.005, como se puede observar en el cálculo de la probeta A1 a tensión.

Figura 32. Cálculo del módulo elástico convencional.



Fuente: Roylance (29).

Figura 33. Cálculo del módulo elástico para los ensayos de tensión.

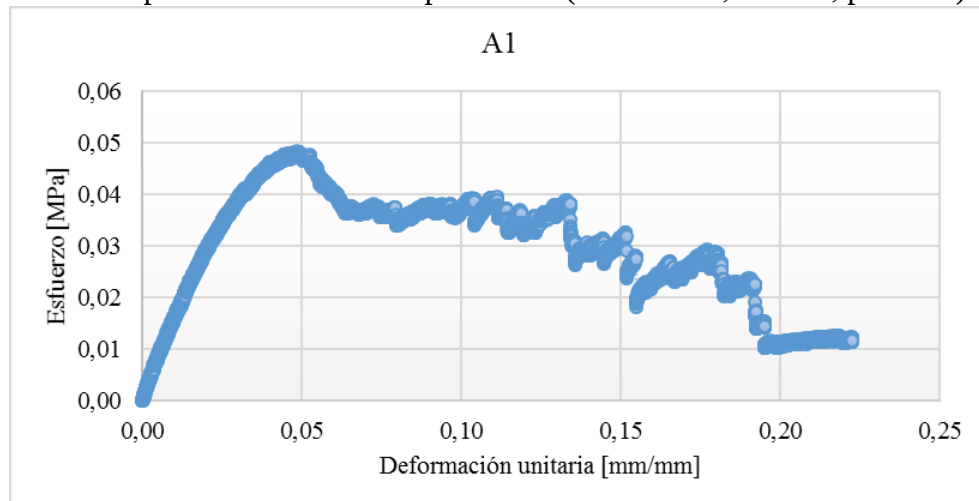


Fuente: El autor.

Se observa que el módulo elástico de la probeta A1 es de 1,62 MPa, y fue determinado mediante la ecuación dada por la línea de tendencia entre 0.002 y 0.005, y un coeficiente de correlación (R^2) de 0.97 que garantiza que la relación entre las variables es lo suficientemente estrecha. Por otro lado, en algunas gráficas se cambió el rango de datos tomados para determinar el módulo elástico (Ver Anexo A), pero en su mayoría ninguna supero el 0.01 de deformación, excepto algunas probetas sometidas al ensayo de compresión, que serán analizadas en el capítulo 4.

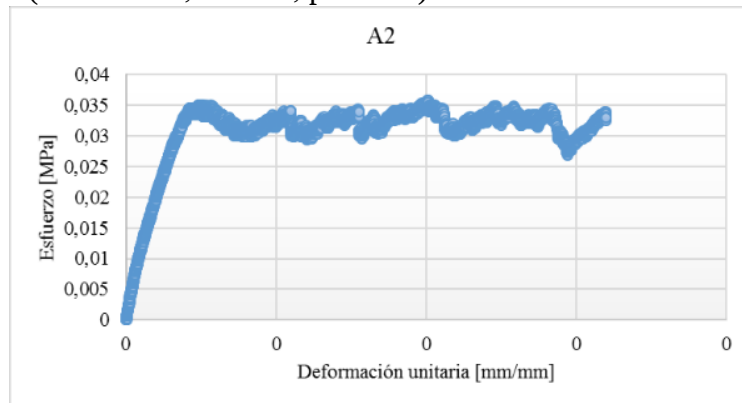
Ahora bien, las curvas de esfuerzo de las figuras 34, 35, 36 y 37 muestran el comportamiento de las probetas correspondientes a la primera y última configuración del diseño experimental en sus dos posiciones, en donde se observa una gran diferencia en su comportamiento y entre la magnitud del esfuerzo máximo alcanzado.

Figura 34. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta A1 con los niveles máximos para cada factor en la posición 1 ($e = 0.3$ mm, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



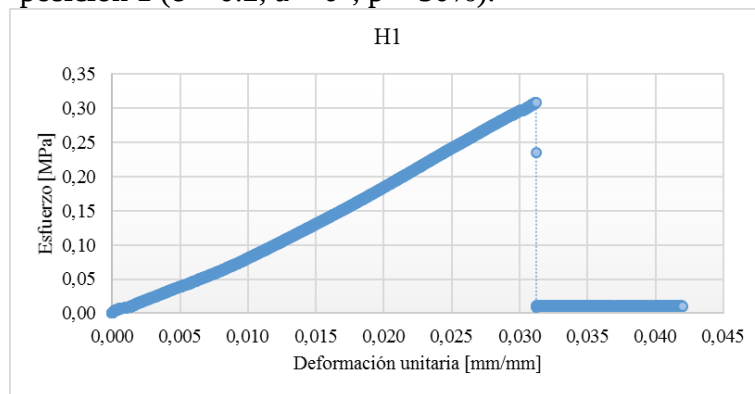
Fuente: El autor.

Figura 35. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta A2 con los niveles máximos para cada factor en la posición 2 ($e = 0.3 \text{ mm}$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



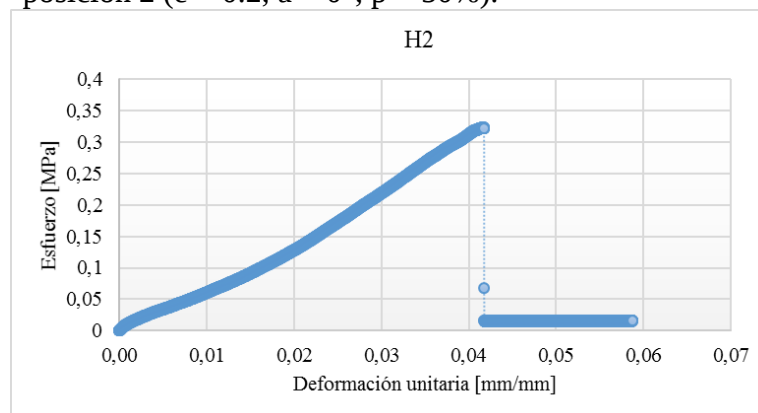
Fuente: El autor.

Figura 36. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta H1 con los niveles mínimos para cada factor en la posición 1 ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



Fuente: El autor.

Figura 37. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta H1 con los niveles mínimos para cada factor en la posición 2 ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



Fuente: El autor.

Además de obtener las gráficas de esfuerzo vs deformación, se obtuvo el módulo de elasticidad, el porcentaje de elongación, y el esfuerzo máximo a la tensión (ver tabla 10).

Tabla 10. Resultados de ensayo de tensión en probetas de PMMA.

TENSIÓN							
Probeta	Parámetros de impresión				Propiedades mecánicas		
	Factor	Espesor	Angulo	Porosidad	Módulo de elasticidad [MPa]	Elongación [%]	Esfuerzo Máximo [MPa]
	Unidades	mm	°	%			
	Posición [1,2]	(e)	(a)	(p)			
A	1	0,3	45	65%	1,6150	5,79	0,049
	2	0,3	45	65%	2,1589	4,05	0,036
B	1	0,3	45	50%	2,2073	4,75	0,042
	2	0,3	45	50%	2,4999	3,41	0,049
C	1	0,3	0	65%	5,8005	3,24	0,128
	2	0,3	0	65%	1,4005	2,08	0,151
D	1	0,3	0	50%	8,6438	4,84	0,308
	2	0,3	0	50%	2,8933	3,12	0,326
E	1	0,2	45	65%	3,8843	4,15	0,116
	2	0,2	45	65%	2,8813	4,28	0,089
F	1	0,2	45	50%	6,9311	6,00	0,185
	2	0,2	45	50%	4,3887	3,83	0,132
G	1	0,2	0	65%	8,3829	3,62	0,164
	2	0,2	0	65%	2,9488	4,84	0,264
H	1	0,2	0	50%	7,8622	3,12	0,308
	2	0,2	0	50%	5,3396	4,15	0,323
I	1	0,25	22,5	57,50%	3,4586	4,28	0,131
	2	0,25	22,5	57,50%	3,2399	6,00	0,133
J	1	0,25	67,5	57,50%	5,5821	3,83	0,146
	2	0,25	67,5	57,50%	4,6462	3,62	0,148

Fuente: El autor.

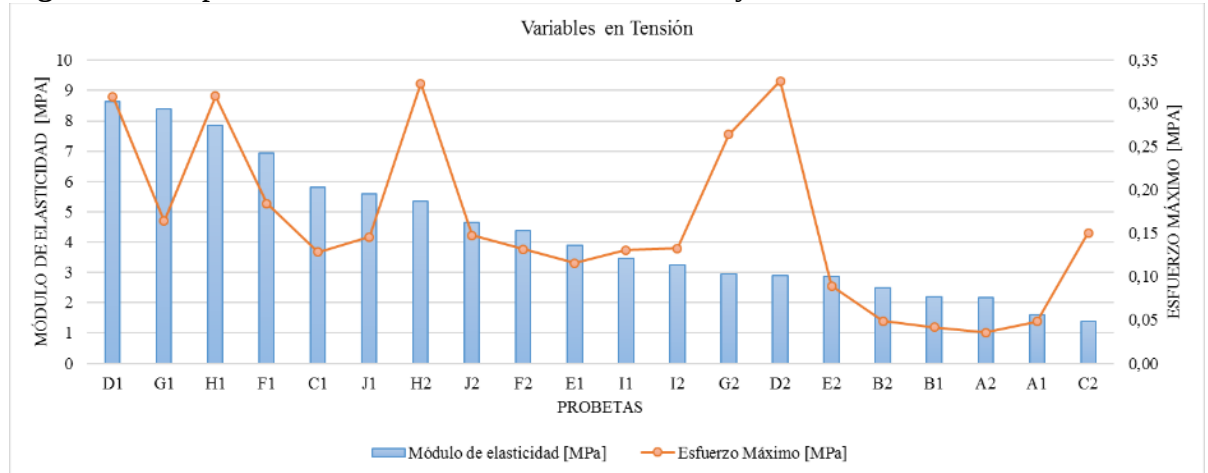
En cuanto al esfuerzo máximo en tensión, las probetas D2, H2, H1 y D1 diseñadas con una porosidad del 50 % y un ángulo de trama de 0°-90°, obtuvieron los valores más altos (0,33 MPa, 0,32 MPa, 0,31 MPa, 0,31 MPa; respectivamente). Mientras que las probetas B2, A1, B1 y A2 obtuvieron los valores más bajos (0,05 MPa, 0,05 MPa, 0,04 MPa, 0,04 MPa; respectivamente). El diseño con un ángulo de trama (a) de 45°, una porosidad (p) del 50% para las probetas B y una porosidad (p) del 65% para las probetas A.

En relación con el módulo de elasticidad en tensión, las probetas D1, G1, H1 y F1 obtuvieron los valores más altos (8,54 MPa, 8,38 MPa, 7,86 MPa, 6,93 MPa; respectivamente). Estas fueron diseñadas con una porosidad del 50 % para las probetas D1, H1 y F1 y del 65 % para la probeta G1. Por otra parte, las probetas B1, A2, A1 y C2 obtuvieron los valores más bajos (2,21 MPa, 2,12 MPa, 1,62 MPa, 1,40 MPa; respectivamente), diseñadas con un espesor de capa de 0.3 y una porosidad del 65% para las probetas A1, A2 y C2 y con una porosidad del 50% para la probeta B1.

Cabe resaltar que las probetas D1 y H1 estuvieron entre los valores más altos en el módulo de elasticidad o el esfuerzo máximo para el ensayo de tensión. Además, el porcentaje de elongación se encuentran en el rango determinado para PMMA cuando se fabrica por

moldeo por inyección (Ver tabla 9) que establece un rango entre 1 – 30 %, y la probeta con menor elongación fue C2 con el 2.08% y la probeta con mayor elongación fue F1 con el 6%, reafirmando los hallazgos y encontrándose en los rangos teóricos.

Figura 38. Propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos a tensión.



Fuente: El autor.

Es necesario resaltar que, de las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos a tensión, las probetas que obtuvieron el mayor módulo de elasticidad 7 de las primeras 10 fueron fabricadas en la posición 1 (D1, G1, H1, F1, C1, J1 y E1) y además 5 de 10 que obtuvieron los valores más altos en el esfuerzo máximo también se fabricaron en la posición 1 (H1, D1, F1, G1 y J1). Los gráficos comparativos entre posiciones de fabricación se encuentran en el Anexo A.

2.8 CONCLUSIONES DE CAPÍTULO

- A partir de la aplicación del diseño factorial para la realización de *scaffolds* el cual facilita el estudio de las propiedades del material y de la función investigativa del trabajo y debido a esto se puede determinar el menor número de ensayos de tensión para obtener la mayor cantidad de información sobre propiedades mecánicas.
- De la misma forma se puede concluir, que el diseño de cada probeta genera un estricto plan de desarrollo, desde el planteamiento de los niveles de cada factor hasta la programación de los mismos dentro del *software* Cura©. Estos requieren verificaciones debido a que son el inicio del proceso de fabricación y si se presentan errores en este punto, los pasos posteriores son defectuosos y hacen inadecuado el producto terminado (en este caso las probetas) para la experimentación.
- En cuanto a la fabricación de las probetas en la impresora 3D, que tiene variables que cambian dependiendo del tipo de impresora en donde se fabriquen, en este caso las impresiones se realizaron en una máquina que no es sellada, exponiendo a corrientes de aire alrededor de la probeta en fabricación, cambios de temperatura ambiente o aumento y/o disminución de la humedad en el ambiente. De ahí que, ese tipo de variables no sean totalmente controlables dentro del proceso de

fabricación, por lo que es necesario disponer de un espacio físico donde se controlen ese tipo de factores externos en la fabricación.

- También, se determinó que el tiempo de fabricación de cada probeta varía con respecto a cada cambio en los niveles de porosidad, espesor de capa o si es necesario la utilización de soporte como en el caso de las probetas fabricadas en posición 2 (Ver figura 21), puesto que entre más pequeño el espesor de capa, entre más baja la porosidad o la construcción de soporte, mayor es el tiempo de impresión. Por ejemplo, la probeta A1 demoró 30 minutos, mientras que la probeta A2 demoró 48 minutos (ver tabla 6).
- Debido a la experimentación, se observó que el PMMA es un material que al ser fabricado mediante FFF requiere de altas temperaturas de fabricación con respecto al PLA (ver tabla 2). Por esta razón, se generan constantemente problemas de contracción durante la fabricación de las probetas, influyendo en la adhesión entre el material y la cama de impresión, entre las mismas capas del modelo y en algunas ocasiones entre los mismos filamentos. Esto puede deberse a las corrientes de aire en el entorno, calentamiento irregular en la cama de impresión, la ventilación propia del cabezal de impresión y/o a la posición de impresión de la probeta.
- Debido a que en el análisis se realizó en estructuras porosas como los *scaffolds*, se llevaron a cero (0) los valores de espesor de la capa superior e inferior, además de los contornos, ya que estos debido a la configuración misma de las impresoras 3D hubiesen generado estructuras más rígidas desviando de los resultados reales que lograría obtener una estructura porosa. Así, aumenta la veracidad de los resultados obtenidos en la caracterización del material en los ensayos de tensión.
- El comportamiento de algunas probetas, como se observa en las gráficas resultantes del ensayo de tensión de las probetas A1 y A2, muestra que las probetas no fallan súbitamente luego de llegar a su esfuerzo máximo como en el caso de H1 y H2, sino que al parecer luego de que llegan a su esfuerzo máximo la caída del esfuerzo es mínima, tiende a recuperarse y repite este comportamiento en varias ocasiones mientras la probeta sigue deformándose sin llegar a la fractura total. Esto puede deberse, a que solo se genera la ruptura de algunos filamentos en los que se está realizando la mayor parte de la carga y, cuando estos se rompen, otros filamentos comienzan a soportar esa carga hasta su ruptura y así consecutivamente.
- Entre las probetas que obtuvieron los mejores resultados en cuanto al esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad, se encuentran las que se diseñaron con un ángulo de fabricación de 0°-90°, como las probetas D, G y H. Esto al parecer se debe a que gran parte de sus filamentos son mucho más largos a través de la probeta y están posicionados en la misma dirección de la carga de tensión.

3 ENSAYO DE COMPRESIÓN

A continuación, se realiza la descripción del ensayo de compresión con respecto a la norma ASTM D695 y el desarrollo del mismo en el transcurso de las pruebas y ensayos prácticos, desde la creación del modelo CAD hasta la obtención de los resultados de cada prueba.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

En el ensayo de compresión “se comprime la probeta a lo largo de su eje mayor a una velocidad constante aplicando una carga determinada sobre su superficie hasta que la probeta rompa o hasta que alcance un valor de deformación previamente establecido” (19). Así, se obtienen gráficos semejantes a los ensayos de tensión según alcancen su punto de fluencia o se rompan las probetas.

3.2 RESUMEN DE LA NORMA ASTM D695

La norma ASTM D695 es el método de ensayo estándar para las propiedades de los plásticos rígidos a compresión (*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*, en inglés). Esta trata acerca del método de determinación de las propiedades mecánicas de plásticos reforzados y no reforzados bajo determinada forma y condiciones de ensayo, cuando son sometidos a compresión. Sin embargo, los materiales que poseen una baja ductilidad puede que no muestren su límite elástico. Las pruebas de compresión proporcionan un método estándar para la obtención de datos factibles en investigación y desarrollo. Para algunos materiales hay que definir determinada deformación en la cual el ensayo se dé por terminado, debido a que no presentan una falla evidente y se genera ambigüedad en los resultados obtenidos.

El espécimen de prueba estándar debe tener la forma de un cilindro o prisma cuya longitud sea el doble de su ancho o diámetro principal. Cuando se desee un módulo de elasticidad y datos de tensión y deformación compensados, la muestra del ensayo deberá tener dimensiones tales que la relación de esbeltez esté en el intervalo de 11 a 16:1. Generalmente los tamaños de los especímenes de prueba preferidos son 12.7 x 12.7 x 50.8 mm (0.5 x 0.5 x 2 in), o 12.7 mm de diámetro por 50.8 de cilindro (30).

3.3 ELEMENTOS DE LA NORMA PERTINENTES A LAS PRUEBAS A REALIZAR

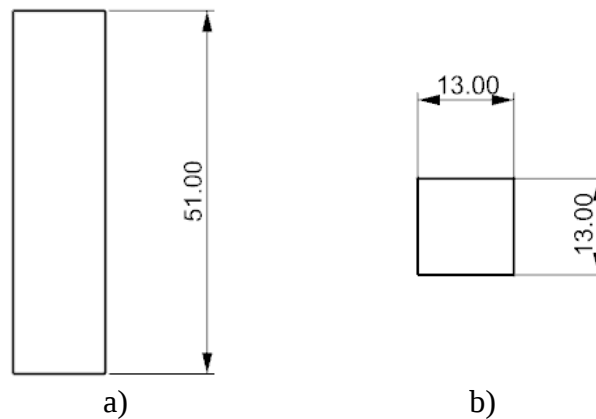
En el caso de un material que falla en compresión por una fractura, la resistencia a la compresión tiene un valor definido, pero en el caso de un material que no falla a compresión por una fractura, la resistencia a la compresión es arbitraria y depende del grado de distorsión que se considere como indicación de un fallo completo del material. Esto se debe a que muchos materiales plásticos continuarán deformándose hasta que se produzca un disco plano, ya que el aumento constante del esfuerzo nominal debido a la compresión no generaría ninguna fractura bien definida. Así, la fuerza de compresión no tendría significado en tal caso.

Durante el desarrollo de las pruebas, es de gran importancia controlar aspectos como la velocidad del ensayo y el acondicionamiento del espacio en donde se realizarán los mismos. La velocidad estándar de las pruebas será la velocidad relativa al movimiento de los dispositivos que generan la compresión, que es de $1.3 \pm 0.3 \text{ mm}$ ($0.05 \pm 0.01 \text{ in}$) / min (30). La velocidad utilizada para esta caracterización fue de 1.6 mm/min.

3.4 ELABORACIÓN DE PROBETAS

El proceso de elaboración de las probetas de compresión es similar a la elaboración de las probetas de tensión y comienza cuando se realiza el modelo CAD de la probeta según la norma, en cuanto a su estructura externa (dimensiones y especificaciones) dado en resumen de la norma. Estas probetas fueron realizadas en el software Rhinoceros®.

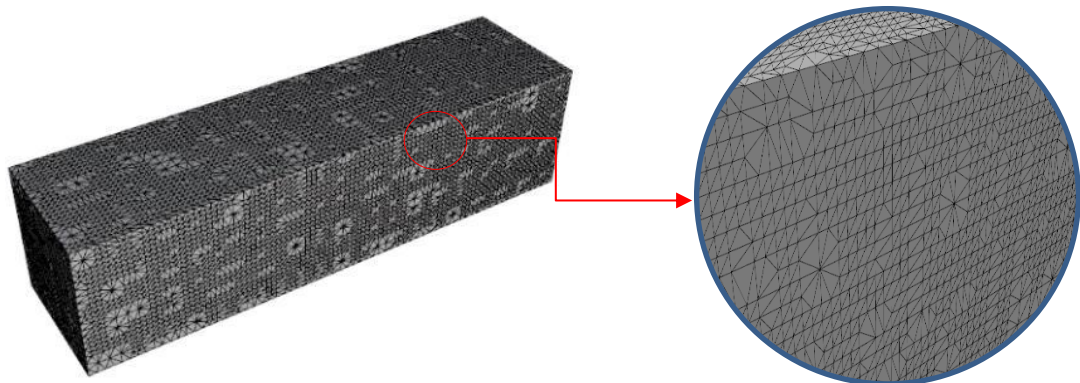
Figura 39. Probeta de Compresión en software Rhinoceros®. a) Vista Frontal. b) Vista superior. Medidas en milímetros.



Fuente: El Autor

Luego, a este modelo se le realiza un enmallado poligonal que servirá para generar conexión entre el software CAD y el software laminador o de corte (*slicer*), mediante el cual la impresora 3D tendrá definido su modo de operación, la cantidad de capas, velocidad de impresión, contornos, entre otros factores de impresión.

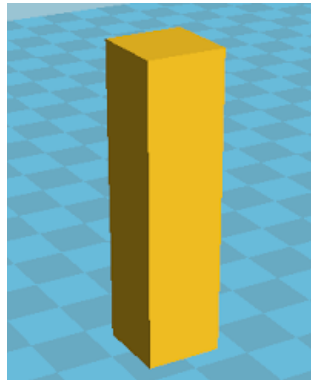
Figura 40. Enmallado poligonal de la probeta de compresión.



Fuente: El Autor.

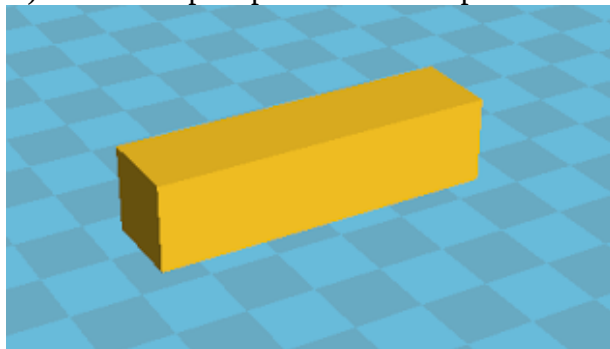
Luego, igual que para las probetas de tensión, el software utilizado para generación del G-code es Cura© de la compañía Ultimaker©, en el cual se generan las condiciones de operación de la impresora, y es en donde se procede a colocar los niveles para cada factor (Ver tabla 2). Para cada ensayo se probarán dos posiciones de impresión sin cambiar el espesor, el ángulo, ni la porosidad definidos en el diseño experimental para cada uno de las réplicas

Figura 41. Probeta de compresión al ser transferida al software Cura©.

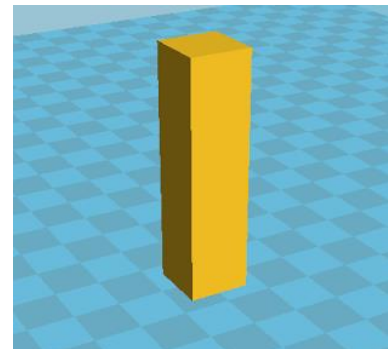


Fuente: El autor.

Figura 42. Posiciones de impresión. a) Posición 1 para probetas de compresión.
b) Posición 3 para probetas de compresión.



a)



b)

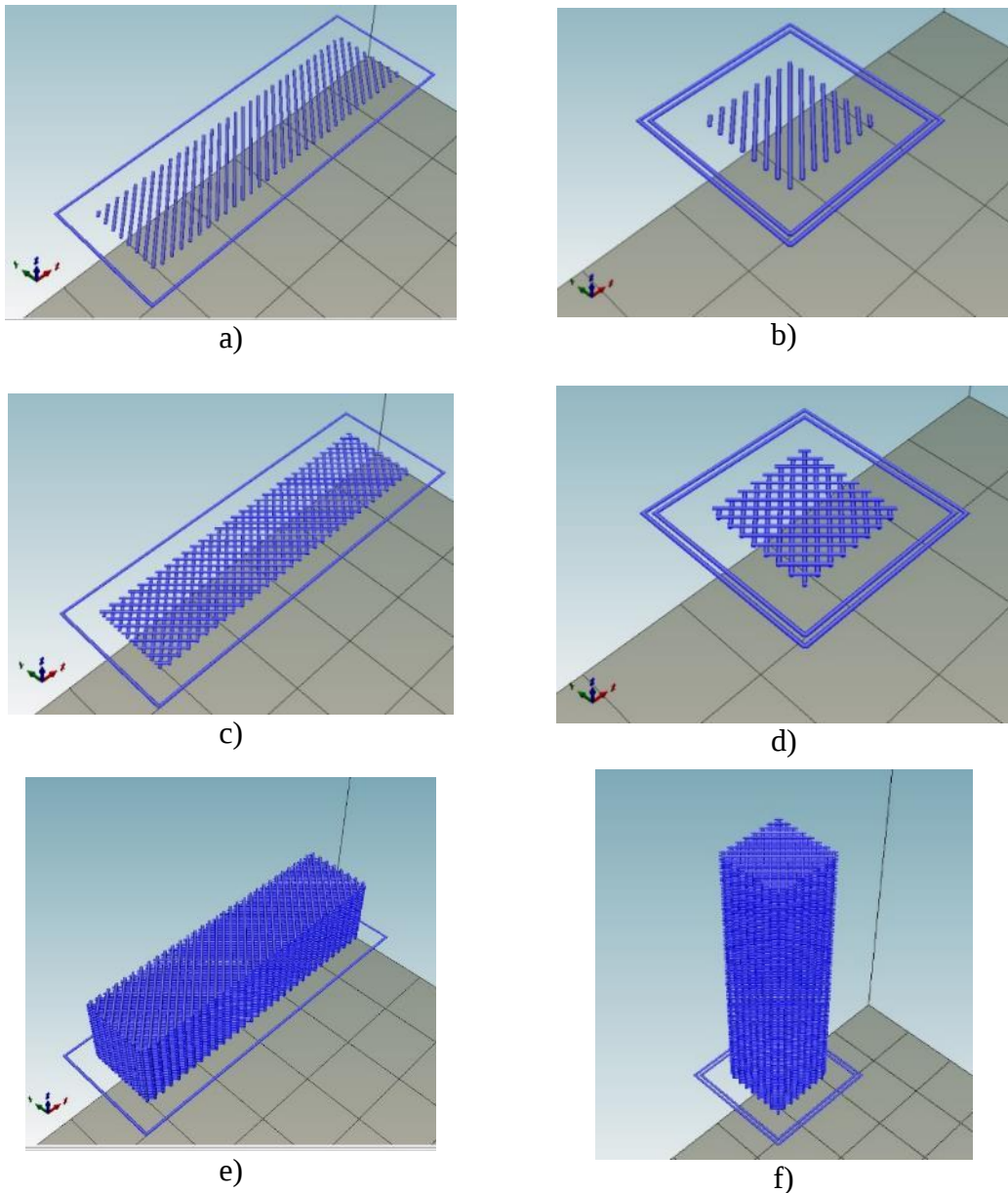
Fuente: El autor.

Debido a que la segunda posición es igual a la primera (Un giro de 90 grado sobre el eje más largo de la probeta), se crearán dos probetas con la misma configuración según el diseño experimental para la posición 1, pero la segunda probeta con la misma posición se marcará con el número 2, es decir que la probeta A1 será igual en su posición de impresión que A2.

El procedimiento siguiente es similar al de las probetas de tensión (ver sección 4 del capítulo 2), ya que primero se configura cada una de las probetas según el diseño de experimentos (ver tabla 3) en el software Cura©. Posteriormente, la información dada por el software Cura©, el archivo es guardado con extensión STL y se transfiere al software Repetier Host©, que es el encargado de ubicar espacialmente la probeta en la impresora, y

en la cual se pueden observar los movimientos que realizará el cabezal para generar la probeta y cada una de las capas que tendrá.

Figura 43. Probeta de compresión en posición 1 o 2 y posición 3 en el software *Repetier Host*®. a) Primera capa de impresión en la posición 1 o 2. b) Primera y segunda capa de impresión en la posición 1 o 2. c) Todas las capas para la impresión en la posición 1 o 2. d) Primera capa de impresión en la posición 3. e) Primera y segunda capa de impresión en la posición 3. f) Todas las capas para la impresión en la posición 3.



Fuente: El Autor

Finalmente, se lleva a la impresora 3D con la es especificaciones descritas en el capítulo anterior, para comenzar con el proceso de impresión (Ver figura 22 y tabla 5). La duración

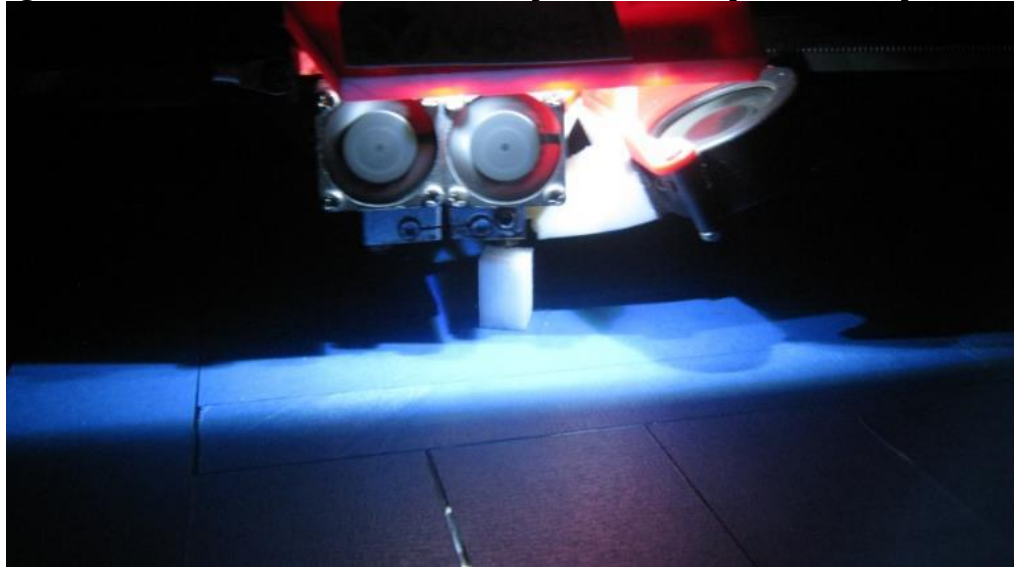
y el peso de cada probeta impresa variaron con respecto a su posición y diferentes factores dados en el diseño experimental, como se muestra a continuación:

Tabla 11. Duración de fabricación y peso de cada probeta para ensayo de compresión.

Probeta	Factor	Espesor	Angulo	Porosidad	Duración de fabricación (min)	Peso (gr)
	Unidades	mm	grados	%		
	Posición [1,2,3]	(e)	(a)	p		
A	1	0,3	45	0,65	16	4
	2	0,3	45	0,65	17	4
	3	0,3	45	0,65	20	4
B	1	0,3	45	0,5	20	5
	2	0,3	45	0,5	19	5
	3	0,3	45	0,5	20	5
C	1	0,3	0	0,65	13	4
	2	0,3	0	0,65	12	4
	3	0,3	0	0,65	17	4
D	1	0,3	0	0,5	19	5
	2	0,3	0	0,5	17	5
	3	0,3	0	0,5	19	5
E	1	0,2	45	0,65	25	4
	2	0,2	45	0,65	23	4
	3	0,2	45	0,65	30	4
F	1	0,2	45	0,5	28	5
	2	0,2	45	0,5	28	5
	3	0,2	45	0,5	32	5
G	1	0,2	0	0,65	19	4
	2	0,2	0	0,65	20	4
	3	0,2	0	0,65	25	4
H	1	0,2	0	0,5	26	5
	2	0,2	0	0,5	27	5
	3	0,2	0	0,5	29	5
I	1	0,25	22,5	0,575	26	5
	2	0,25	22,5	0,575	26	5
	3	0,25	22,5	0,575	29	4
J	1	0,25	67,5	0,575	27	5
	2	0,25	67,5	0,575	27	5
	3	0,25	67,5	0,575	29	4

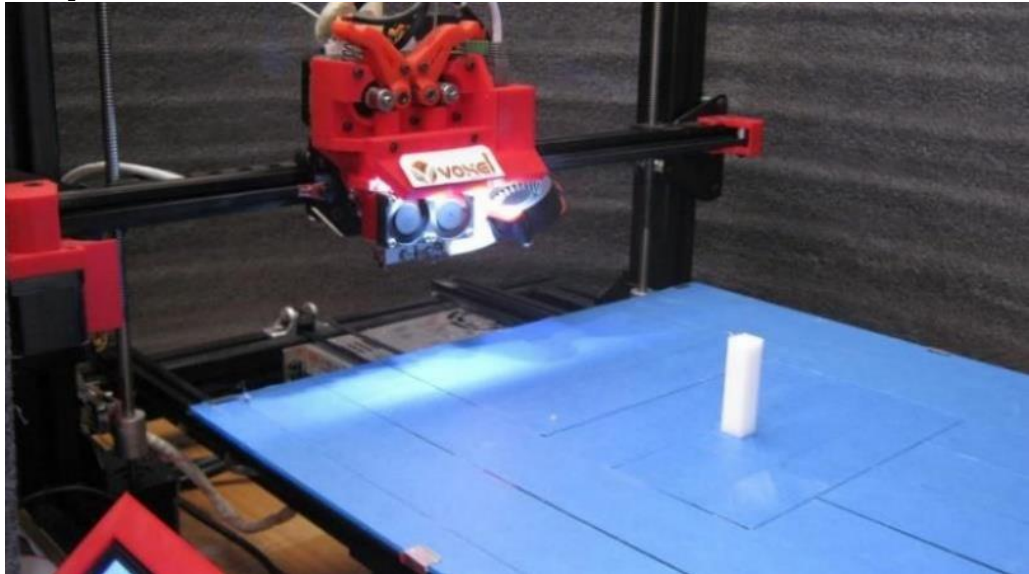
Fuente: El autor.

Figura 44. Proceso de fabricación de una probeta de compresión en la posición 3.



Fuente: El autor.

Figura 45. Proceso de impresión terminado de una probeta de compresión en la posición 3.



Fuente: El autor.

En la figura 45, se puede observar la espuma utilizada para evitar corrientes de aire en la zona de impresión.

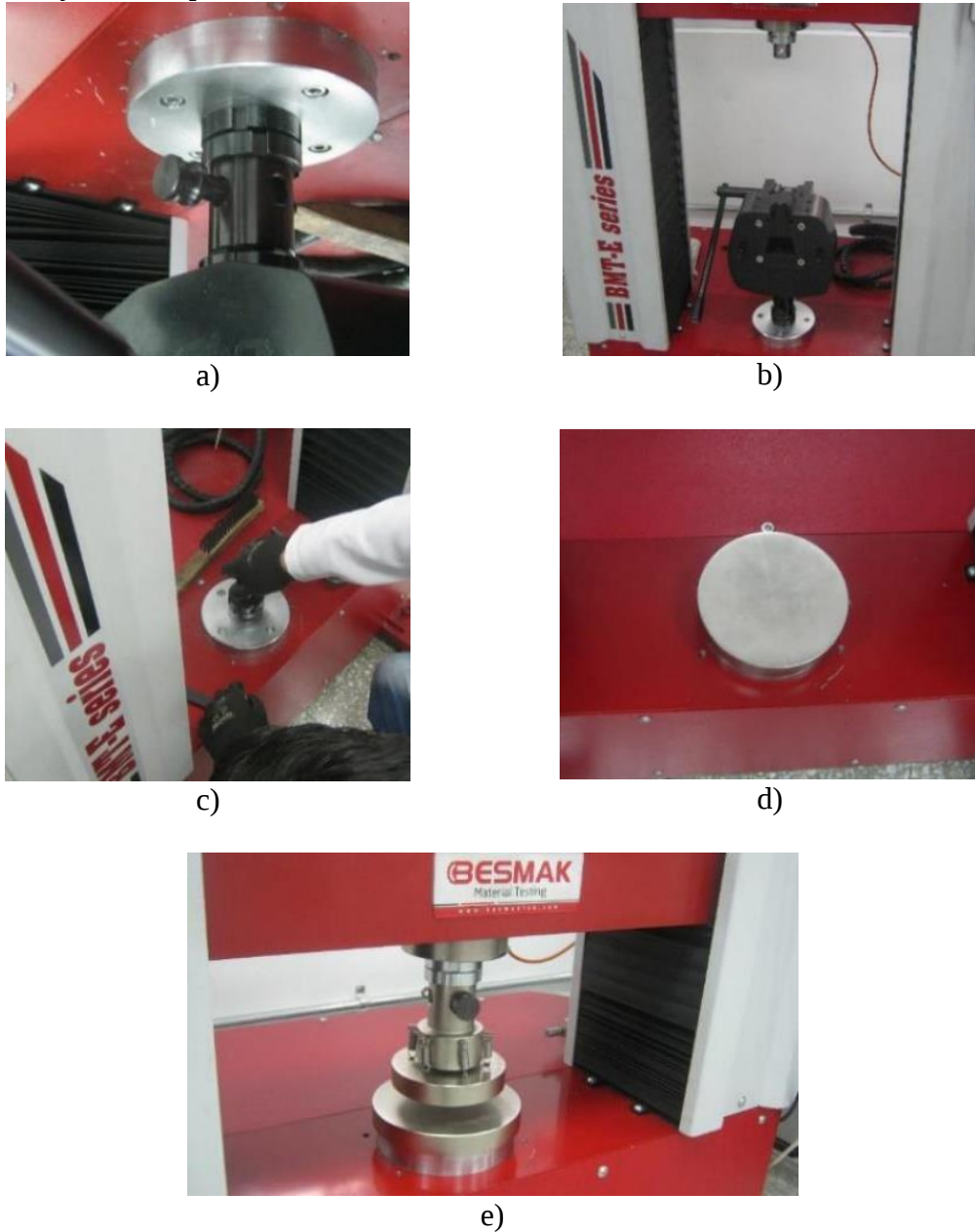
Las probetas están marcadas según el diseño experimental mediante letras A, B, C, D, E, F, G, H, I, J (ver tabla 3) y con respecto a su posición de impresión mediante números 1-2 y 3 (Ver figura 42). Por ejemplo, la probeta de la figura anterior se marcó como A3.

3.5 REALIZACIÓN DE ENSAYOS

Las pruebas se realizaron de manera estándar en la máquina de ensayos universales BESMAK© (Ver tabla 6). Estos obedecieron a la norma ASTM D695 que es el método de

ensayo estándar para las propiedades de los plásticos a compresión. Por otro lado, a diferencia de los ensayos de tensión, se realizó el cambio de las mordazas para colocar las placas correspondientes para el ensayo de compresión.

Figura 46. Reconfiguración de la máquina de ensayos universales BESMAK® para ensayo de compresión. a) Pin de sujeción de la prensa superior. b) Máquina de ensayos sin la prensa superior. c) Ajuste previo de la base inferior. d) Base para ensayo de compresión ensamblada. e) Máquina preparada para el ensayo de compresión.



Fuente: El autor.

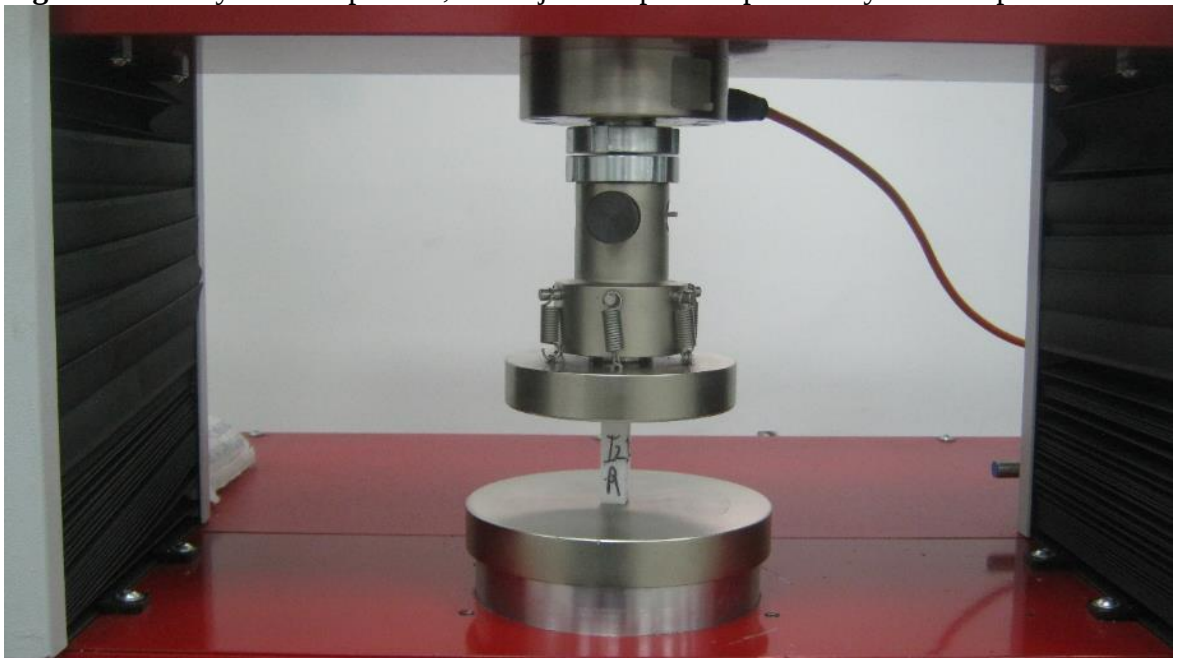
Luego, se organizaron y marcaron las probetas para realizar el ensayo de manera alfabética según el diseño de experimentos (Ver tabla 3) y según su posición, obteniendo un total de 30 ensayos de compresión. Sin embargo, es importante hacer notar que las probetas 1 y 2 se imprimieron en la misma posición y con la configuración de factores correspondientes.

Figura 47. Probetas para ensayo de compresión



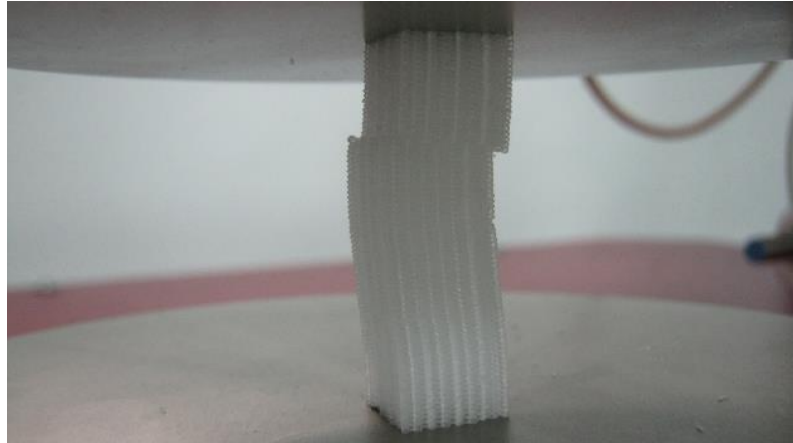
Fuente: El Autor

Figura 48. Ensayo de compresión, montaje de la probeta para ensayo de compresión.

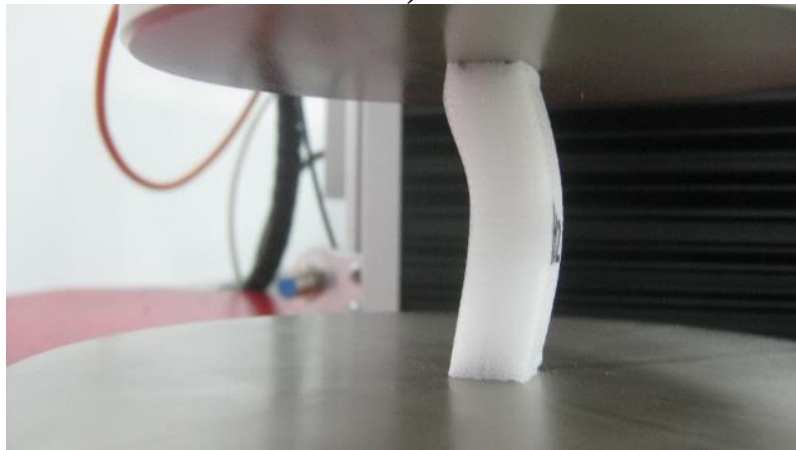


Fuente: El autor.

Figura 49. Ensayo de compresión, muestras de probetas de PMMA al someterse al ensayo de compresión. a) Modo de falla al realizar el ensayo de compresión en la probeta A3. b) Modo de falla al realizar el ensayo de compresión en la probeta H2. c) Modo de falla al realizar el ensayo de compresión en la probeta C3.



a)



b)



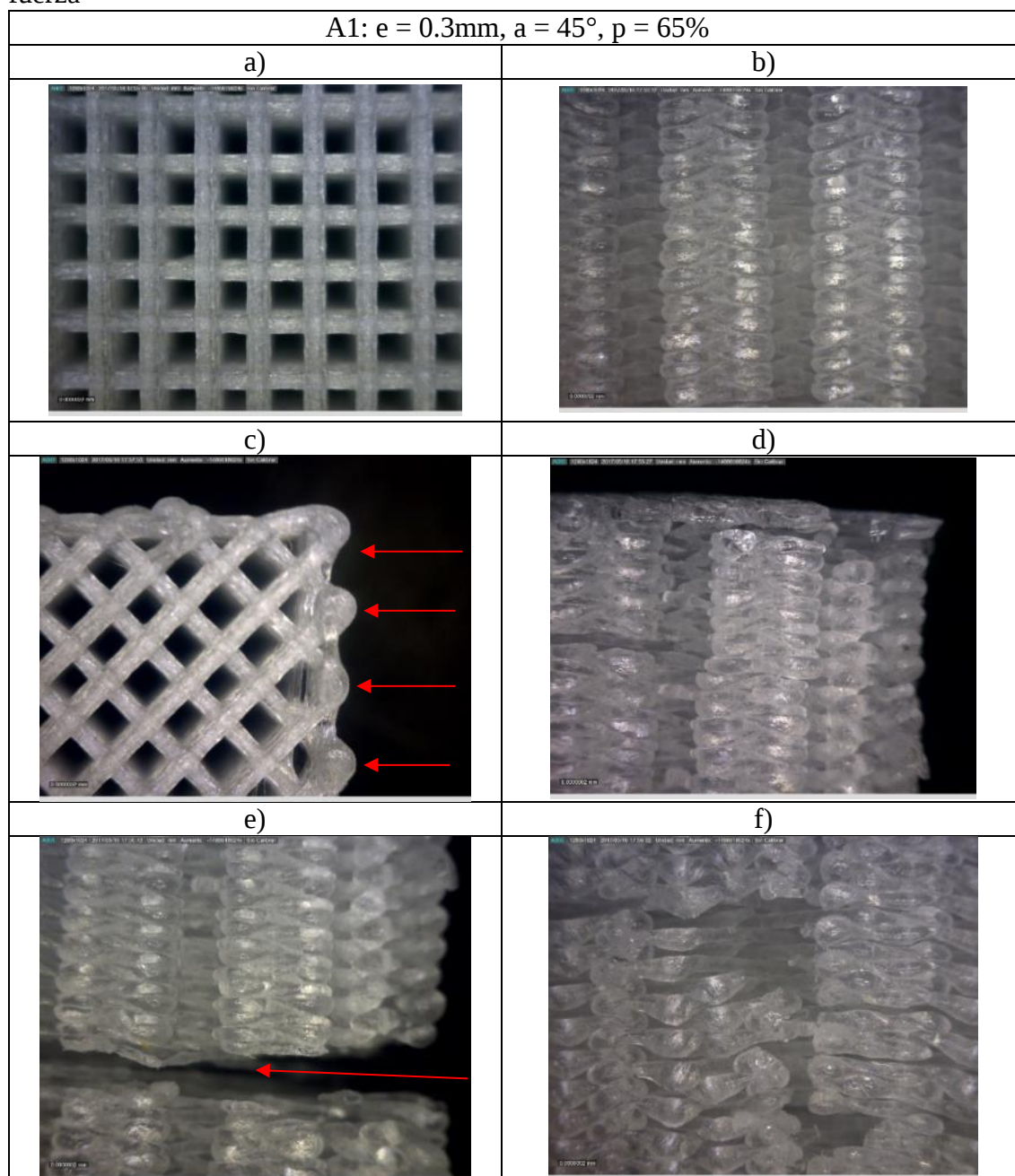
c)

Fuente: El Autor

3.6 ANÁLISIS MORFOLÓGICO

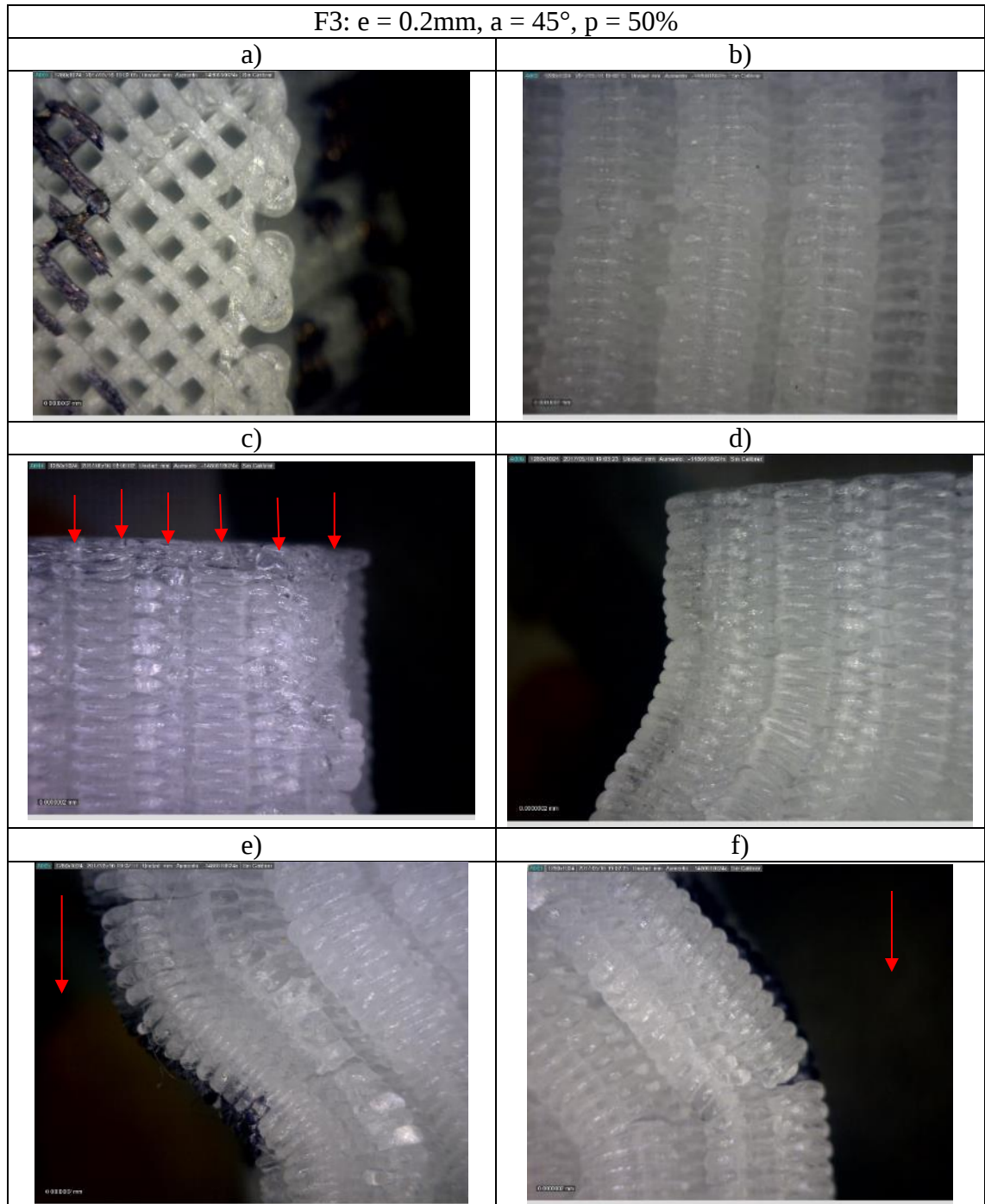
El análisis morfológico, se realizó en dos probetas principalmente A1 ($e = 0.3\text{mm}$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$) y F3 ($e = 0.2\text{mm}$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$), utilizando el microscopio digital AM4013MT (Ver figura 27 y tabla 8) para evidenciar diferencias microscópicas en su fabricación que puedan influir en los resultados obtenidos en los ensayos a tensión.

Figura 50. Detalles morfológicos de la probeta A1 sometida a compresión. Zoom 55x. a) Relleno. b) Relleno en vista superior. c) Esquina en cara ancha. d) Esquina de espesor. e) Zona de Falla 1. f) Zona de falla 2. Las flechas indican la dirección de aplicación de la fuerza



Fuente: El autor.

Figura 51. Detalles morfológicos de la probeta F3 sometida a compresión. Zoom 55x. a) Relleno. b) Relleno en vista superior. c) Esquina en cara ancha. d) Esquina de espesor. e) Zona de Falla 1. f) Zona de falla 2. Las flechas indican la dirección de aplicación de la fuerza.



Fuente: El autor.

En la figura 50 se muestra la configuración de la probeta A1 ($e = 0.3\text{mm}$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$) para compresión, que tiene los mismos parámetros de impresión que la probeta A1 de tensión, como se observa en la figura 29. En la figura 50 a) muestra el relleno en la cara de la probeta que se imprime contra la cama y la opuesta a esta misma, En la figura 50 b) se

observa la geometría del relleno generada por las capas de los filamentos en su parte superior y los costados. Por otro lado, en la figura 50 c) muestra la esquina de las caras correspondientes al relleno. Además, en la figura 50 d) se observa la influencia de la cama de impresión en la esquina de la probeta y en toda esa cara.

Luego, se observan dos tipos de falla que se presentaron en la probeta A1 en el ensayo de compresión. El primer tipo de falla se encuentra en la figura 50 e), en donde se muestra el desprendimiento y separación de las capas de la probeta en la dirección de aplicación de la fuerza durante el ensayo, esto puede deberse a una grieta generada esa capa específica en la que se generó la ruptura. Por otro lado, en la figura 50 f) se observa el segundo tipo de falla en el que se desprenden de distintas zonas de la probeta segmentos de filamentos, esto puede deberse a que la probeta al deformarse generó esfuerzos en toda la geometría de la misma y en los lugares en donde hubo mayor contracción en los filamentos durante la fabricación, soportó menos el esfuerzo.

En cuanto a la probeta F3 ($e = 0.2\text{mm}$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$) en la figura 51 a) se muestra el relleno dado por el diseño de experimentos para las probetas F, desde la vista superior debido a su posición de fabricación. También, se observa en la figura 51 b) el posicionamiento de los filamentos en los costados de la probeta. Además, se muestra en la figura 51 c) la influencia de la cama de impresión en las primeras capas impresas.

Por otro lado, en la figura 51 d), e) y f) se muestra el desarrollo de la falla a través de la probeta. Ahora bien, en la figura 51 d) se muestra el lugar en donde inicia la deformación de la probeta sin que esta falle, curvándose. Sin embargo, la probeta debido a la compresión genera otra curva opuesta a la inicial como se muestra en la figura 51 e), generando también grietas y desprendimiento de filamentos. Consecuentemente, en la zona opuesta a estas deformaciones ocurre algo similar en cuanto al desprendimiento del filamento y la generación de grietas entre capas. Así mismo, la compresión generada en un costado de la probeta genera tensión en el costado opuesto, como se muestra en la figura 51 f) generando ruptura por tensión de los filamentos. En la figura 52 se ejemplifican algunas de las incidencias en los filamentos debido al ensayo a compresión realizado (ampliación 200 aumentos).

Figura 52. Efectos de la compresión en los filamentos 200x. a) Efectos de la compresión b) Efectos de tensión como reacción a la compresión en los filamentos.

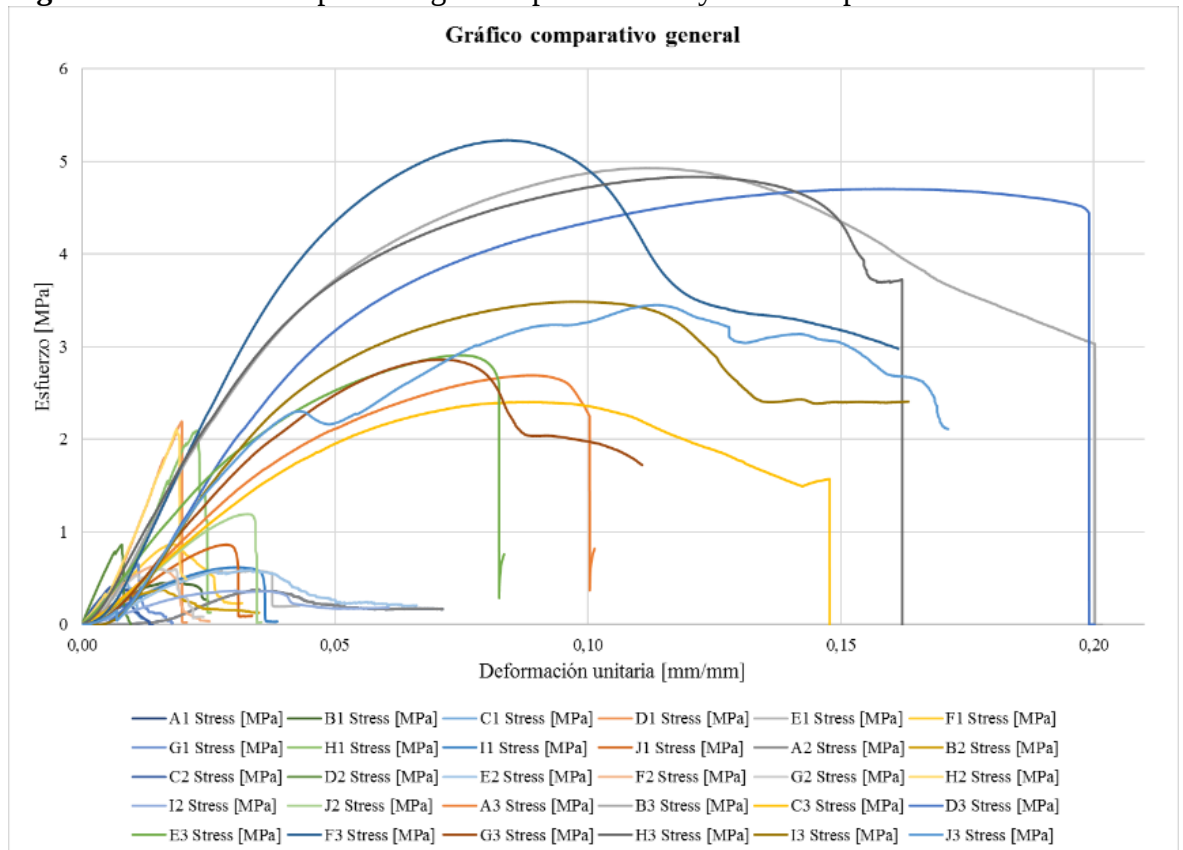


Fuente: El autor.

3.7 RESULTADOS

los resultados obtenidos se pueden observar gráficamente en el Anexo B. Estos, varían con respecto al tiempo que estuvo la probeta en la máquina sin sufrir una fractura que fragmentara la misma. No obstante, en algunos casos se detuvo el ensayo ya que el comportamiento de la gráfica demostraba que su comportamiento después de alcanzar el esfuerzo máximo sería constante. Por lo tanto, se esperó un tiempo prudente en cada ensayo para no seccionar ningún comportamiento no esperado que pudiera influir en el análisis de los resultados obtenidos.

Figura 53. Gráfico comparativo general para los ensayos de compresión.



Fuente: El autor.

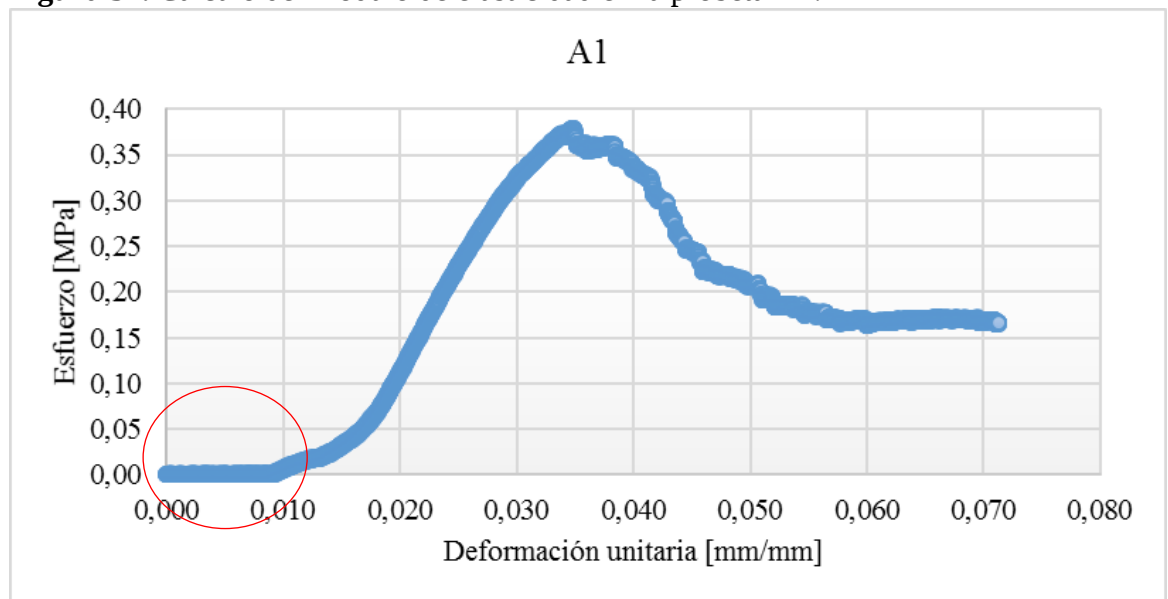
Como se observa en la figura 53, en los ensayos a compresión fue más notable la influencia de la posición de impresión en la capacidad de soportar esfuerzos a compresión. En esta, se observa que no es posible calcular el módulo elástico de todas las probetas (tensión y compresión) dentro de un mismo rango de valores ya que, si se determinara el módulo de elasticidad a 0.002 unidades de deformación, no habría coherencia entre los valores obtenidos para las probetas fabricadas en la posición 1 (que en el caso de compresión es la misma posición 2) en comparación a los fabricados en la posición 3, que son los que soportan mayores valores de esfuerzo máximo.

Por esto, el análisis de cómo se obtiene el módulo elástico en los resultados del ensayo de compresión es distinto al de tensión en cuanto al grupo de datos seleccionado para determinar la pendiente de la zona elástica, y así determinar el módulo de elasticidad en

determinada configuración. Por otro lado, es importante tener en cuenta la manera en que se realiza el ensayo de compresión, porque no hay una medida específica del centro de los platos, la alineación de los mismos o la distancia mínima justo antes de tocar la probeta, que en el caso de el PMMA se fracturaría si el plato superior baja demasiado rápido (31).

En la mayoría de los ensayos se dejó la menor distancia posible entre el plato superior y la probeta sin que se estrellaran, aunque es una medida de que se da visualmente y desde la perspectiva de la persona que observa que tan lejos o cerca está la probeta del plato. Sin embargo, en algunos casos la medida fue mayor a otros y el resultado es que el software registra los resultados como negativos, cero (0) o cercanos a cero (0), hasta que hace contacto con la probeta y comienza a generar datos reales de esfuerzo vs deformación (Ver figura 54).

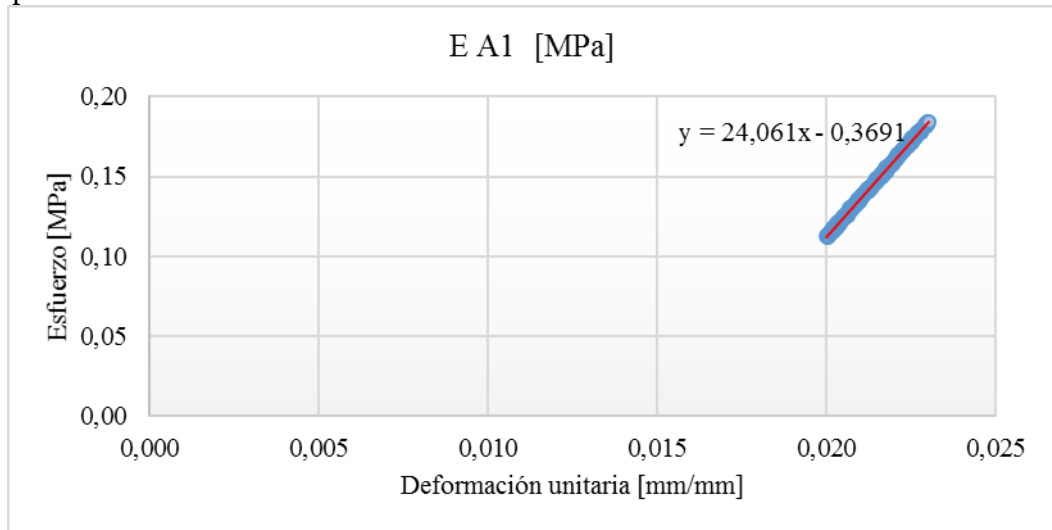
Figura 54. Cálculo del módulo de elasticidad en la probeta A1.



Fuente: El autor.

Así, como se puede observar en el cálculo del módulo de elasticidad en la probeta A1, la zona redondeada indica que aproximadamente entre 0 y 0,009 no hay esfuerzos ni deformaciones válidas para análisis, siendo ilógico tomar el módulo elástico desde 0 a 0,002 como se calcula generalmente (Ver figura 32). Por ende, específicamente en esta probeta se seleccionó el módulo elástico ente 0,02 y 0,023 (Ver figura 55). A su vez, en otros casos muy específicos también se varió el rango de datos seleccionado para calcular el módulo de elasticidad, pero sin superar 0,003 unidades de deformación, es decir de 0 a 0,003, 0,002 a 0,005, 0,004 a 0,007 o 0,005 a 0,008 unidades de deformación dependiendo el caso, ni tampoco se superó el 0,01 de deformación.

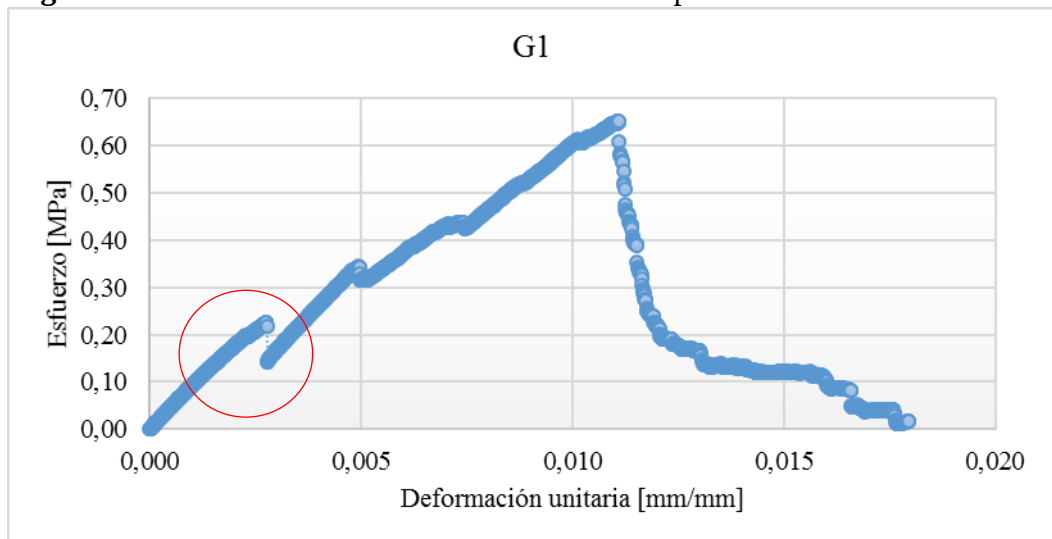
Figura 55. Zona seleccionada para determinación del módulo de elasticidad de la probeta A1.



Fuente: El autor.

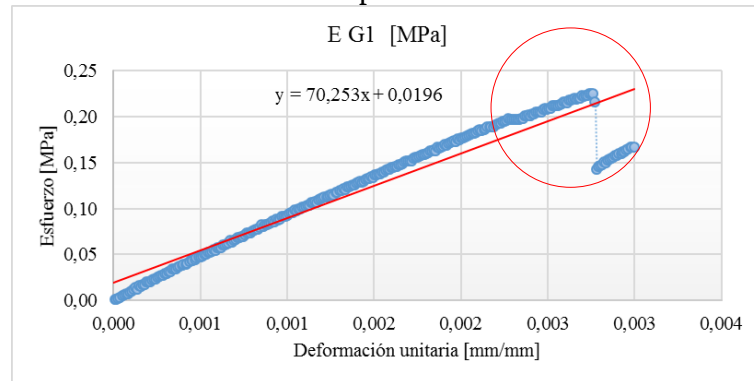
También, hay casos específicos como en la probeta G1 en la que se presentó una caída del esfuerzo y una recuperación inmediata como se observa en la zona redondeada de la figura 56, motivo por el cual se seleccionó el rango de datos de 0 a 0.003 como se muestra en la figura 57. Estos datos aun así alcanzan a ser afectados por la caída del esfuerzo, pero no disminuyen el valor del módulo elástico tanto como si se hubiesen tomado entre 0.005 y 0.008. Cabe resaltar, que el módulo de elasticidad en estos casos donde hay caídas y recuperaciones en el esfuerzo muy drásticas, varía demasiado de un rango de datos a otros, aunque no sea muy lejanos.

Figura 56. Cálculo del módulo de elasticidad en la probeta G1.



Fuente: El autor.

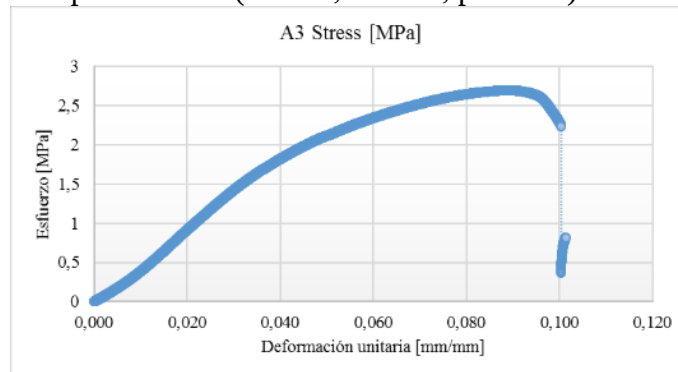
Figura 57. Zona seleccionada para determinación del módulo de elasticidad de la probeta G1.



Fuente: El autor.

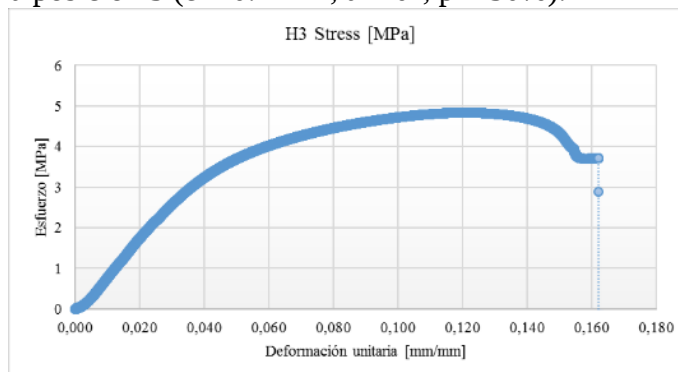
Ahora bien, en las probetas fabricadas en la posición 3 su comportamiento fue más homogéneo con respecto a las fabricadas en posición 1 y 2 como se muestra en las figuras 58 y 59 correspondientes a las probetas A3 y H3 respectivamente.

Figura 58. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta A3 con los niveles máximos para cada factor en la posición A3 ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



Fuente: El autor.

Figura 59. Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta H3 con los niveles mínimos para cada factor en la posición 3 ($e = 0.2$ mm, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



Fuente: El autor.

Igualmente, se obtuvieron las gráficas de esfuerzo vs deformación, se obtuvo el módulo de elasticidad, el porcentaje de elongación, y el esfuerzo máximo a la compresión (ver tabla 12).

Tabla 12. Resultados de ensayo a compresión en probetas de PMMA.

COMPRESIÓN							
Probeta	Parámetros de impresión				Propiedades mecánicas		
	Factor	Espesor	Angulo	Porosidad	Módulo de elasticidad [MPa]	Elongación [%]	Esfuerzo Máximo [MPa]
	Unidades	mm	grados	%			
	Posición [1,2,3]	(e)	(a)	(p)			
A	1	0,3	45	65%	24,061	3,49	0,379
	2	0,3	45	65%	24,061	3,49	0,379
	3	0,3	45	65%	36,417	8,93	2,691
B	1	0,3	45	50%	34,833	1,82	0,453
	2	0,3	45	50%	32,878	1,62	0,374
	3	0,3	45	50%	56,235	11,16	4,930
C	1	0,3	0	65%	72,921	0,90	0,438
	2	0,3	0	65%	67,462	0,75	0,466
	3	0,3	0	65%	34,991	9,04	2,401
D	1	0,3	0	50%	70,786	1,97	2,193
	2	0,3	0	50%	121,05	0,78	0,862
	3	0,3	0	50%	84,274	16,06	4,704
E	1	0,2	45	65%	25,619	3,44	0,584
	2	0,2	45	65%	13,887	3,35	0,591
	3	0,2	45	65%	61,034	7,50	2,909
F	1	0,2	45	50%	55,437	1,78	0,869
	2	0,2	45	50%	52,675	1,44	0,631
	3	0,2	45	50%	76,079	8,43	5,230
G	1	0,2	0	65%	70,253	1,11	0,652
	2	0,2	0	65%	45,065	1,60	0,600
	3	0,2	0	65%	47,964	7,12	2,862
H	1	0,2	0	50%	58,336	2,28	2,093
	2	0,2	0	50%	64,969	1,87	2,114
	3	0,2	0	50%	69,825	12,07	4,836
I	1	0,25	22,5	57,50%	27,064	3,10	0,617
	2	0,25	22,5	57,50%	12,98	3,05	0,366
	3	0,25	22,5	57,50%	24,495	9,76	3,486
J	1	0,25	67,5	57,50%	28,17	2,86	0,864
	2	0,25	67,5	57,50%	29,088	3,29	1,192
	3	0,25	67,5	57,50%	23,432	11,41	3,451

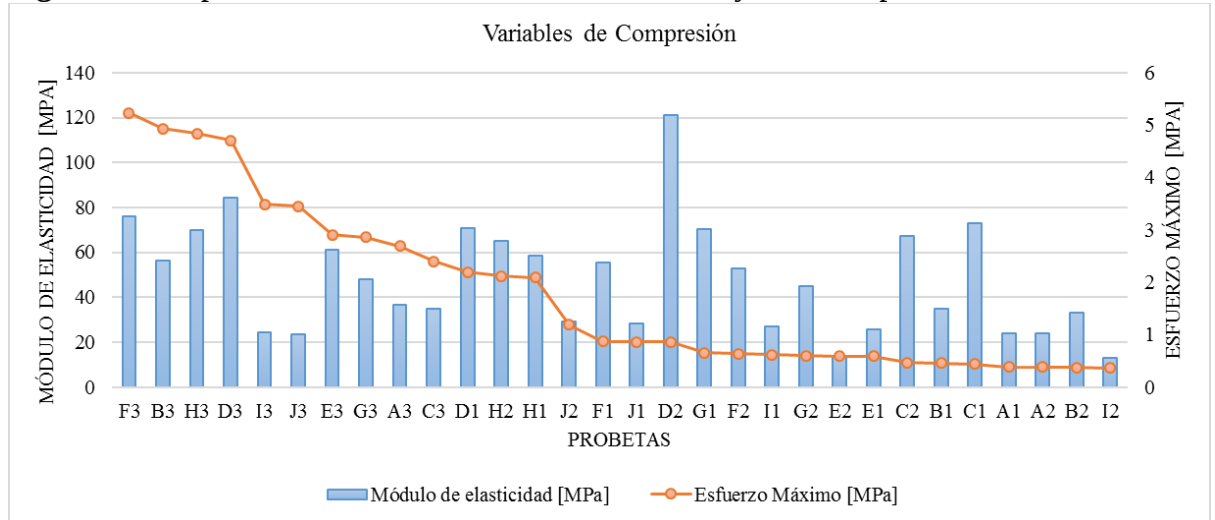
Fuente: El autor.

Con respecto al esfuerzo máximo en compresión, las probetas F3, B3, H3 y D3 diseñadas con una porosidad (p) del 50%, obtuvieron los valores más altos (5,23 MPa, 4,93 MPa, 4,84 MPa, 4,70 MPa; respectivamente). De estas, las probetas F3 y B3 tienen un ángulo de trama (a) de 45 ° y las probetas H3 y D3 un ángulo de trama de 0°-90°

Por otro lado, con respecto al módulo de elasticidad en compresión, las probetas D2, D3, F3 y C1, obtuvieron los valores más altos (121,05 MPa, 84,27 MPa, 76,08 MPa, 72,92 MPa; respectivamente). Las probetas D2, D3 y F3 tienen una porosidad (p) del 50%, y la probeta C1 una porosidad del 65%.

Cabe resaltar que las probetas F3 y D3 estuvieron entre los valores más altos en el módulo de elasticidad o el esfuerzo máximo para el ensayo de compresión.

Figura 60. Propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de compresión.



Fuente. Autor.

En cuanto a las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de compresión, se observa que las probetas que más soportaron esfuerzo fueron las que se fabricaron en la posición 3, de las cuales 10 de los 10 valores más altos de esfuerzo son de las probetas fabricadas en esta posición (F3, B3, H3, D3, I3, J3, E3, G3, A3 y C3; respectivamente). Estas, en su mayoría duplican y en algunos casos hasta catorce (14) veces el valor del esfuerzo máximo alcanzado por las probetas fabricadas en posición 1-2 (Ver figura 53 y 60). Los gráficos comparativos entre posiciones de fabricación se encuentran en el Anexo B.

3.8 CONCLUSIONES DE CAPÍTULO

- El desarrollo del diseño experimental y configuración de las probetas para la realización del ensayo de compresión, de la misma manera que en el ensayo de tensión, permitió determinar el comportamiento real del material mediante la fabricación por FFF y obtener la mayor cantidad de información con la menor cantidad de experimentos. Por tanto, también requieren verificaciones en la configuración del software de impresión Cura© debido a que es el inicio del proceso de fabricación.
- El tiempo de fabricación de cada probeta, es mucho menor que el de las probetas de tensión, pero también varían con respecto a cada cambio en los niveles de porosidad, espesor de capa y la posición de fabricación (Ver figuras 42 y 43), puesto que entre más pequeño el espesor de capa, entre más baja la porosidad, mayor es el tiempo de impresión. En el caso de las probetas de compresión, las probetas fabricadas en posición 3 (Ver figura 42) son las que tuvieron mayor duración. Por

ejemplo, la probeta A1 se fabricó en 16 minutos, mientras que la probeta A3 duró 20 minutos en fabricarse (ver tabla 11).

- Los problemas en cuanto a la contracción propia del material se presentan en mayor proporción en las que se fabricaron en la posición 1-2, debido a que entre más largo sea el filamento en una misma dirección, más aumenta la posibilidad de que se genere contracción y separación entre capas.
- Las probetas fabricadas en la posición 3 fueron las que más soportaron esfuerzo, esto puede deberse a la cantidad de capas y por ende mayor cantidad de filamentos. Independientemente de su diseño, todas las probetas en esta posición soportaron más esfuerzo que las fabricadas en la posición 1-2. Esto, puede deberse al modo de falla de las probetas ya que no se generaron grietas que atravesaran axialmente toda la probeta, sino que se rompían los filamentos debido a la creación de curvas en su geometría, flectando la probeta y debido a la compresión en una zona, en la zona opuesta se generaba tensión en los filamentos hasta la ruptura (Ver figura 51).
- Los resultados obtenidos en el ensayo a compresión superan hasta 16 veces más el esfuerzo máximo soportado en el ensayo de tensión, evidenciando que este material tiene gran capacidad para soportar la compresión cuando es fabricado mediante FFF, y que sus aplicaciones son recomendables cuando se trate de soportar grandes esfuerzos a compresión bajo determinadas configuraciones de diseño, pero principalmente la posición de fabricación.

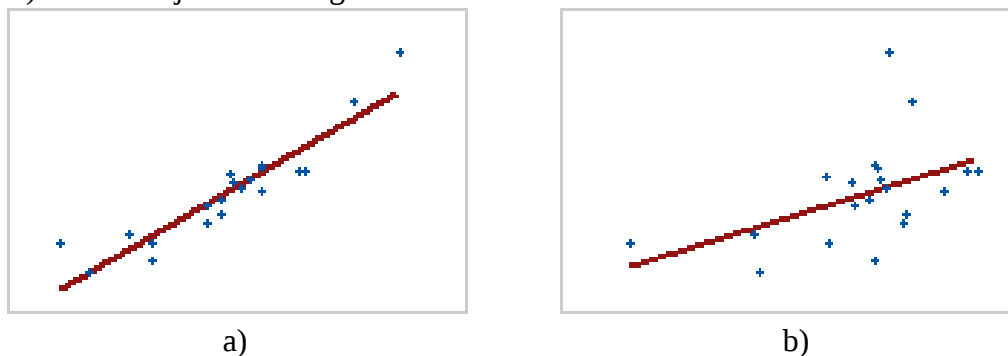
4 ANÁLISIS DE VARIANZA Y REGRESIÓN LINEAL

En el siguiente capítulo se realiza el análisis estadístico correspondiente de los datos obtenidos durante la experimentación.

Para el desarrollo del análisis de varianza es necesario tener en cuenta algunos conceptos pertinentes al estudio de los comportamientos y efectos entre los factores y sus niveles. El análisis de varianza ANOVA (*Analysis of Variance*) (32), evalúa “la importancia de unos o más factores al comparar las media de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores” (33). El software que se utilizará para el análisis de varianza será Minitab® 16. En este se obtendrá el valor de la suma de los cuadrados medios (SC), que representa la estimación de la varianza de la población (34), el coeficiente de correlación R^2 y la ecuación de predicción de la variable de respuesta mediante una regresión lineal. Los resultados obtenidos del análisis de varianza se encuentran en el Anexo C.

Los valores que representan R^2 , determinan el grado de ajuste del modelo, es decir que tan cercanos son los valores predichos por la regresión con respecto al conjunto de datos original (35), como se muestra en la figura 61 a). Sin embargo, hay ocasiones en que los resultados obtenidos por el modelo de regresión no se ajustan como se observa en la figura 61 b)

Figura 61. Representación gráfica de R^2 . a) Valores ajustados, R^2 tiende a 1. b) Valores lejanos a la regresión. R^2 tiende a 0.



Fuente: Minitab®, R-cuad (35).

Por lo tanto, teniendo en cuenta que el valor de R^2 se mide de 0 a 100%, lo que significa que entre mayor sea su valor el modelo es más ajustado, en este trabajo se toma un mínimo de 70% para determinar que los resultados del modelo son lo suficientemente ajustados. Además, para este análisis se tendrán en cuenta tres (3) variables de respuesta que son: módulo de elasticidad, porcentaje de elongación y esfuerzo máximo a partir de las variables de espesor, ángulo y porosidad.

4.1 REGRESIÓN LINEAL PARA DATOS OBTENIDOS EN TENSIÓN

El análisis de los resultados obtenidos para tensión se dividirá con respecto a la cantidad de datos analizados por el *software* y por la posición de fabricación de la probeta. Las ecuaciones de regresión para tensión se encuentran en la tabla 13.

Tabla 13. Modelos de regresión para tensión.

Modelo de regresión sin puntos centrales			
Posición	Propiedades mecánicas	Ecuación de Regresión	R²
1	Esfuerzo Máximo	0,750916 - 0,61695 Espesor - 0,00288128 Angulo -0,00642417 Porosidad	80,92%
	Porcentaje de elongación	1,31386 + 5,03178 Espesor + 0,025357 Angulo + 0,00473427 Porosidad	65,61%
	Módulo de Elasticidad	18,8818 - 21,9847 Espesor - 0,0891761 Angulo - 0,0993617 Porosidad	85,39%
2	Esfuerzo Máximo	0,697667 - 0,615 Espesor - 0,00421111 Angulo -0,00483333 Porosidad	92,17%
	Porcentaje de elongación	-7,05083 + 23,575 Espesor + 0,0186111 Angulo + 0,107167 Porosidad	60,88%
	Módulo de Elasticidad	12,7673 - 16,5145 Espesor - 0,00363 Angulo - 0,0955333 Porosidad	88,10%
Modelo de regresión con puntos centrales			
Posición	Propiedades mecánicas	Ecuación de Regresión	R²
1	Esfuerzo Máximo	0,73736 - 0,61695 Espesor - 0,0020765 Angulo - 0,00642417 Porosidad	68,73%
	Porcentaje de elongación	1,48086 + 5,03178 Espesor + 0,0196895 Angulo + 0,00473427 Porosidad	50,66%
	Módulo de Elasticidad	18,2767 - 21,9848 Espesor - 0,0603872 Angulo - 0,0993617 Porosidad	60,63%
2	Esfuerzo Máximo	0,678718 - 0,615 Espesor - 0,00303525 Angulo -0,00483333 Porosidad	72,79%
	Porcentaje de elongación	-6,75359 + 23,575 Espesor - 4,5977e-005 Angulo + 0,107167 Porosidad	50,13%
	Módulo de Elasticidad	12,6381 - 16,5145 Espesor + 0,00827425 Angulo -0,0955333 Porosidad	75,83%

Fuente: El autor.

A partir de la tabla anterior, se determinó que no todas las ecuaciones de regresión superaron el mínimo que se estableció de $R^2 = 70\%$ para suponer que los valores de parámetros de impresión son buenos predictores de las propiedades mecánicas. Es más, cuando se incluyen los puntos centrales se observa que el comportamiento de las propiedades mecánicas en función de los parámetros de impresión no es lineal pues el coeficiente de correlación disminuye. Aun así, ninguna ecuación tiene un coeficiente de correlación inferior al 50%.

Por otra parte, los análisis de varianza que se realizaron muestran los factores que más influyen en cada variable de salida, ya sea esfuerzo máximo, Porcentaje de elongación, o módulo de elasticidad (Ver tablas 14 a 17).

Tabla 14. Resultados del ANOVA para 8 datos con respecto al diseño factorial 2^3 en la para probetas fabricadas posición 1.

a) ANOVA Esfuerzo máximo vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	0,0598061	80,92%	0,0598061	0,0199354	5,65479	0,063749
Espesor	1	0,0076125	10,30%	0,0076125	0,0076125	2,15934	0,215642
Angulo	1	0,0336221	45,49%	0,0336221	0,0336221	9,53712	0,036638
Porosidad	1	0,0185715	25,13%	0,0185715	0,0185715	5,26791	0,083379
Error	4	0,0141016	19,08%	0,0141016	0,0035254		
Total	7	0,0739077	100,00%				

Fuente: El autor.

Tabla 14. (Continuación)

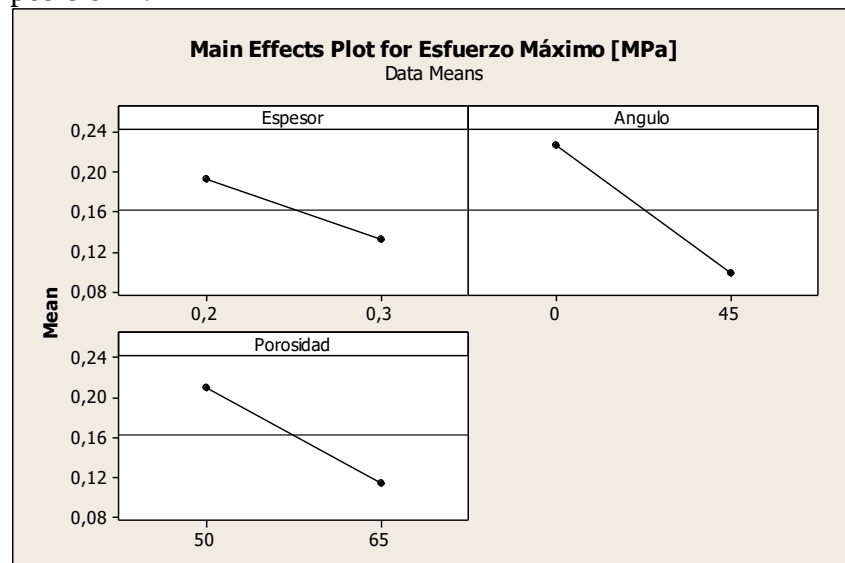
b) ANOVA Elongación vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	3,12051	65,61%	3,12051	1,04017	2,54392	0,194401
Espesor	1	0,50638	10,65%	0,50638	0,50638	1,23843	0,32814
Angulo	1	2,60405	54,75%	2,60405	2,60405	6,36866	0,065105
Porosidad	1	0,01009	0,21%	0,01009	0,01009	0,02467	0,882808
Error	4	1,63554	34,39%	1,63554	0,40888		
Total	7	4,75605	100,00%				

Fuente: El autor.

c) ANOVA Módulo de elasticidad vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	46,3165	85,39%	46,3165	15,4388	7,7955	0,037995
Espesor	1	9,6666	17,82%	9,6666	9,6666	4,8809	0,091699
Angulo	1	32,2071	59,38%	32,2071	32,2071	16,2623	0,015699
Porosidad	1	4,4427	8,19%	4,4427	4,4427	2,2433	0,208553
Error	4	7,9219	14,61%	7,9219	1,9805		
Total	7	54,2384	100,00%				

Fuente: El autor.

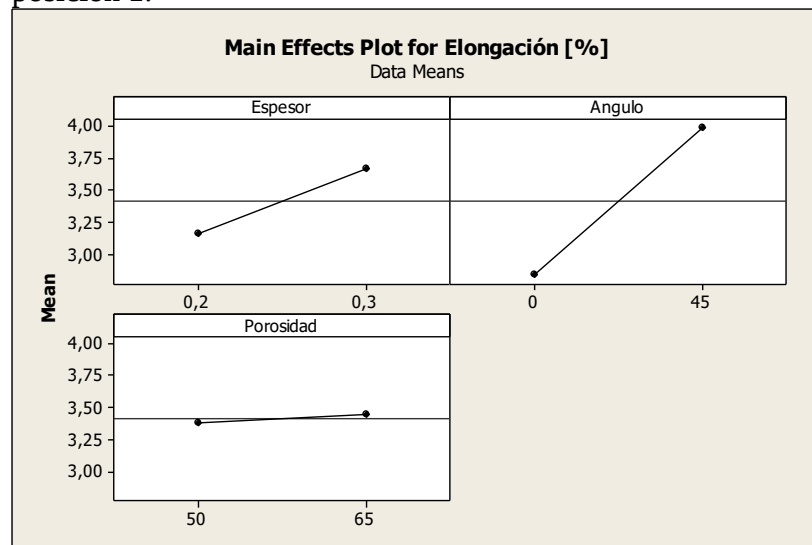
En la tabla 14 a), se observa que el factor que más influye con respecto al esfuerzo máximo obtenido es el ángulo con el 45, 49% de contribución. En la tabla 14 b) se muestra que el factor que más influye con respecto al porcentaje de elongación, también es el ángulo con el 54,75% de contribución. Finalmente, en la tabla 14 c) se observa que para el módulo de elasticidad, el factor que tiene la mayor contribución es el ángulo con el 59,38%.

Figura 62. Efectos principales para el esfuerzo máximo con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1.

Fuente: El autor

En la Figura 62, se observan los efectos de cada uno de los factores con respecto al esfuerzo máximo. En esta, se muestra que el esfuerzo máximo disminuye cuando aumenta el espesor. Por otra parte, el esfuerzo también disminuye cuando el ángulo es de 45° y cuando la porosidad es del 65%.

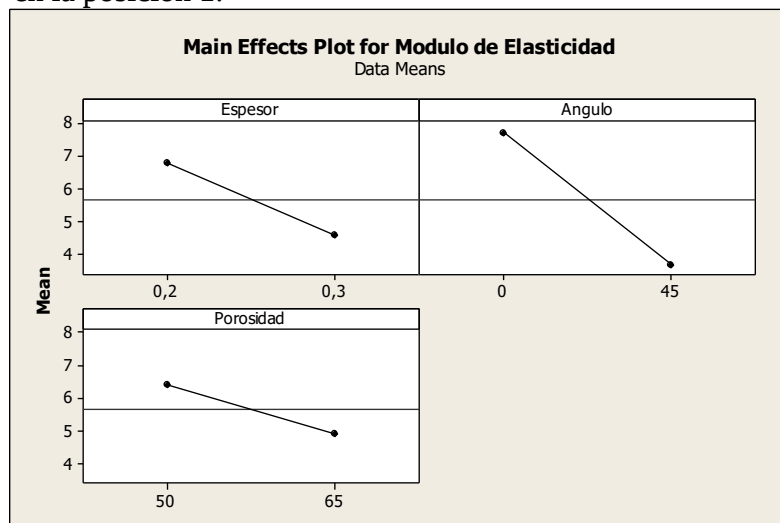
Figura 63. Efectos principales para el porcentaje de elongación con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1.



Fuente: El autor

En la figura 63, se observa que el porcentaje de elongación se ve afectado más por el ángulo de fabricación que por el espesor o la porosidad, siendo la porosidad con una influencia casi nula ya que su contribución es del 0.21% (ver tabla 14 b). Sin embargo, el espesor que más influye es el de 0.3mm.

Figura 64. Efectos principales para el módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1.



Fuente: El autor

En la figura 64, se observa el comportamiento de los efectos principales en cuanto al módulo de elasticidad, donde principalmente influye el ángulo ya que a menor ángulo es mayor el módulo de elasticidad. Por otra parte, entre mayor espesor o mayor porosidad, el valor del módulo es menor.

Tabla 15. Resultados del ANOVA para 8 datos más dos puntos centrales con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1.

a) ANOVA Esfuerzo máximo vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	0,0515053	68,73%	0,0515053	0,0171684	4,39587	0,058475
Espesor	1	0,0076125	10,16%	0,0076125	0,0076125	1,94915	0,212149
Angulo	1	0,0253213	33,79%	0,0253213	0,0253213	6,48336	0,043711
Porosidad	1	0,0185715	24,78%	0,0185715	0,0185715	4,75511	0,072
Error	6	0,0234335	31,27%	0,0234335	0,0039056		
Total	9	0,0749387	100,00%				

Fuente: El autor.

b) ANOVA Elongación vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	2,79309	50,66%	2,79309	0,93103	2,05339	0,207989
Espesor	1	0,50638	9,18%	0,50638	0,50638	1,11681	0,331288
Angulo	1	2,27663	41,29%	2,27663	2,27663	5,0211	0,066276
Porosidad	1	0,01009	0,18%	0,01009	0,01009	0,02224	0,886325
Error	6	2,72048	49,34%	2,72048	0,45341		
Total	9	5,51357	100,00%				

Fuente: El autor.

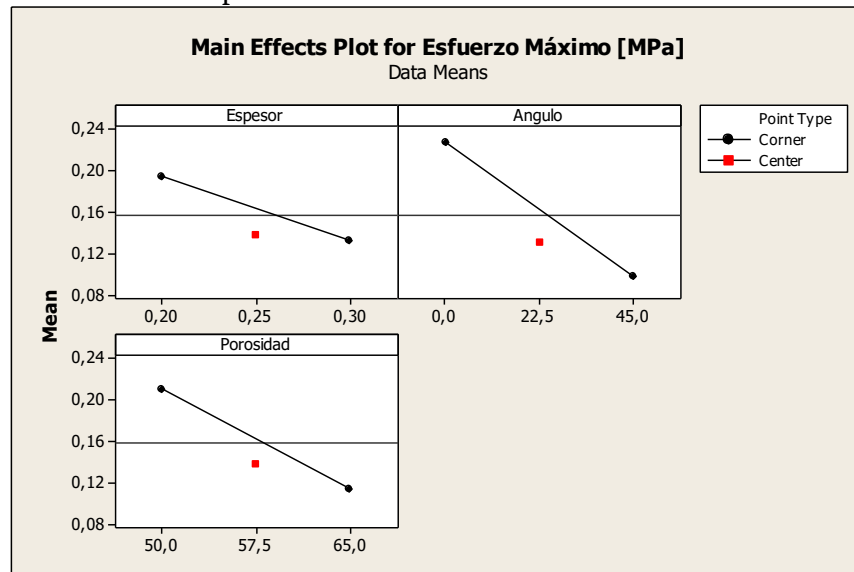
c) ANOVA Módulo de elasticidad vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	35,5241	60,63%	35,5241	11,8414	3,07987	0,111912
Espesor	1	9,6666	16,50%	9,6666	9,6666	2,51423	0,163917
Angulo	1	21,4147	36,55%	21,4147	21,4147	5,56986	0,05628
Porosidad	1	4,4427	7,58%	4,4427	4,4427	1,15553	0,32371
Error	6	23,0685	39,37%	23,0685	3,8448		
Total	9	58,5926	100,00%				

Fuente: El autor.

En la tabla 15, se muestran los valores obtenidos de la regresión cuando se colocan puntos centrales, los cuales representan un cambio significativo en R^2 y denotan que hay curvatura en el modelo. Aun así, se muestra que el valor que más contribuye en la regresión es el del ángulo, es decir que es el de mayor influencia en los resultados obtenidos. Por otra parte, en la tabla 15 a) se observa que el R^2 es muy cercano al 70% por lo que puede ser válido para su utilización como ecuación de regresión.

El factor con menor efecto en el porcentaje de elongación (ver tabla 15 b) es la porosidad con el 0.18% de contribución. Este comportamiento se presentó también cuando no se colocaron puntos centrales como se muestra en la tabla 14 b).

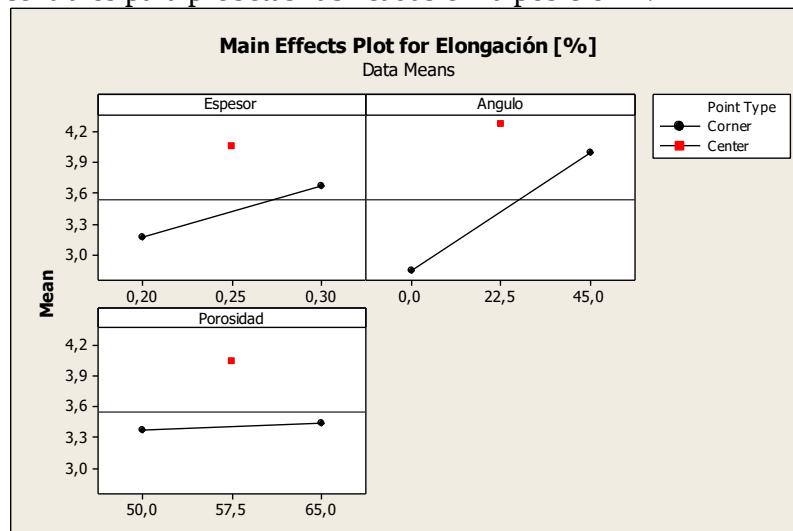
Figura 65. Efectos principales para el esfuerzo máximo con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 1.



Fuente: El autor

En la figura 65, se muestran los efectos de los factores principales en el esfuerzo máximo, pero también los puntos centrales. Por ende, se puede observar que no se encuentra ubicado sobre la línea lo que puede representar que hay curvatura en el modelo. También se muestra que el a mayor ángulo, espesor y porosidad es menor el esfuerzo máximo.

Figura 66. Efectos principales para el porcentaje de elongación con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 1.

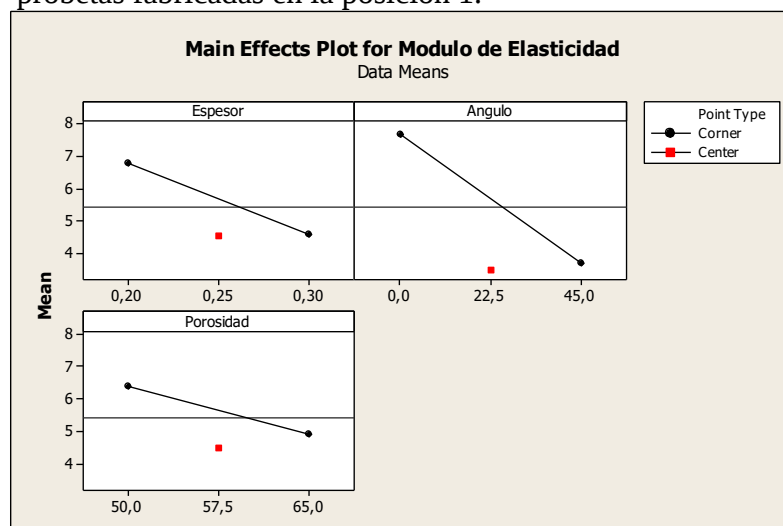


Fuente: El autor

En la figura 66, se observan de igual manera que los puntos centrales se encuentran alejados de la línea de regresión lo que reafirma la curvatura del modelo y también el valor obtenido

de R^2 para este análisis. Por otra parte, para el porcentaje de elongación aumenta entre mayor sea el espesor y el ángulo.

Figura 67. Efectos principales para el módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 1.



Fuente: El autor

En la figura 67, se muestra el comportamiento de los efectos principales en cuanto al módulo de elasticidad, donde principalmente influye el ángulo ya que a menor ángulo es mayor el módulo de elasticidad. Por otra parte, entre mayor espesor o mayor porosidad, el valor del módulo es menor. También, los puntos centrales se encuentran alejados del modelo de regresión.

Tabla 16. Resultados del ANOVA para 8 datos con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 2.

a) ANOVA Esfuerzo máximo vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	0,0898975	92,17%	0,0898975	0,0299658	15,7012	0,011183
Espesor	1	0,0075645	7,76%	0,0075645	0,0075645	3,9636	0,117333
Angulo	1	0,0718205	73,64%	0,0718205	0,0718205	37,6319	0,003579
Porosidad	1	0,0105125	10,78%	0,0105125	0,0105125	5,5083	0,078776
Error	4	0,007634	7,83%	0,007634	0,0019085		
Total	7	0,0975315	100,00%				

Fuente: El autor.

b) ANOVA Elongación vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	17,6865	60,88%	17,6865	5,8955	2,07529	0,246198
Espesor	1	11,1156	38,26%	11,1156	11,1156	3,91283	0,119062
Angulo	1	1,4028	4,83%	1,4028	1,4028	0,49381	0,520977
Porosidad	1	5,1681	17,79%	5,1681	5,1681	1,81924	0,248706
Error	4	11,3633	39,12%	11,3633	2,8408		
Total	7	29,0498	100,00%				

Fuente: El autor.

Tabla 16. (Continuación)

c) ANOVA Módulo de elasticidad vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	9,6149	88,10%	9,61492	3,20497	9,8713	0,025473
Espesor	1	5,4546	49,98%	5,45457	5,45457	16,8001	0,014868
Angulo	1	0,0534	0,49%	0,05337	0,05337	0,1644	0,705914
Porosidad	1	4,107	37,63%	4,10698	4,10698	12,6495	0,023658
Error	4	1,2987	11,90%	1,2987	0,32468		
Total	7	10,9136	100,00%				

Fuente: El autor.

En cuanto a la tabla 16, se observa que los valores de R^2 obtenidos de los ensayos a tensión en las probetas fabricadas en la posición 2, se ajustan mejor al modelo de regresión en comparación a las probetas fabricadas en posición 1 (ver tabla 14 y 15). Por otro lado, no hay un factor que influya de la misma manera en las tres variables de salida, pero para el porcentaje de elongación y el módulo de elasticidad, el factor que más influye es el espesor (38,26% y 49,98% de contribución, respectivamente).

Tabla 17. Resultados del ANOVA para 8 datos más dos puntos centrales con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 2.

a) ANOVA Esfuerzo máximo vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	0,0721788	72,79%	0,0721788	0,0240596	5,3509	0,039285
Espesor	1	0,0075645	7,63%	0,0075645	0,0075645	1,6824	0,242251
Angulo	1	0,0541018	54,56%	0,0541018	0,0541018	12,0324	0,013324
Porosidad	1	0,0105125	10,60%	0,0105125	0,0105125	2,338	0,177118
Error	6	0,0269781	27,21%	0,0269781	0,0044964		
Total	9	0,0991569	100,00%				

Fuente: El autor.

b) ANOVA Elongación vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	16,2837	50,13%	16,2837	5,4279	2,01022	0,214078
Espesor	1	11,1156	34,22%	11,1156	11,1156	4,11665	0,088792
Angulo	1	0	0,00%	0	0	0	0,998359
Porosidad	1	5,1681	15,91%	5,1681	5,1681	1,914	0,215793
Error	6	16,201	49,87%	16,201	2,7002		
Total	9	32,4847	100,00%				

Fuente: El autor.

c) ANOVA Módulo de elasticidad vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	9,9636	75,83%	9,9636	3,3212	6,2751	0,027932
Espesor	1	5,4546	41,51%	5,45457	5,45457	10,306	0,01836
Angulo	1	0,4021	3,06%	0,40205	0,40205	0,7596	0,416947
Porosidad	1	4,107	31,26%	4,10698	4,10698	7,7598	0,03176
Error	6	3,1756	24,17%	3,17558	0,52926		
Total	9	13,1392	100,00%				

Fuente: El autor.

En la tabla 17, se muestra que los resultados obtenidos con puntos centrales generan cambios significativos en el modelo ya que el valor del coeficiente de correlación disminuye por lo menos en un 10% en todas las variables de salida. Por otra parte, para el esfuerzo máximo el factor que más influye es el ángulo y en cuanto al porcentaje de elongación y el módulo de elasticidad el factor con más influencia es el espesor (34,22% y 41,51% de contribución, respectivamente).

Las gráficas correspondientes a los efectos principales para el esfuerzo máximo, porcentaje de elongación y módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2³ para probetas fabricadas en la posición 2 y también las que tienen puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 2 se encuentran en el Anexo D.

4.2 REGRESIÓN LINEAL PARA DATOS OBTENIDOS EN COMPRESIÓN

El análisis de los resultados obtenidos para tensión se dividirá con respecto a la cantidad de datos analizados por el *software* y por la posición de fabricación de la probeta. Las ecuaciones de regresión se encuentran en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 18. Modelos de regresión para compresión.

Modelo de regresión sin puntos centrales			
Posición	Propiedades mecánicas	Ecuación de Regresión	R²
1-2	Esfuerzo Máximo	4,62204 - 3,2375 Espesor - 0,0143278 Angulo -0,0458333 Porosidad	62,28%
	Porcentaje de elongación	-0,141667 - 2,5625 Espesor + 0,0254722 Angulo + 0,0380833 Porosidad	48,13%
	Módulo de Elasticidad	122,781 + 77,2638 Espesor - 0,853864 Angulo - 1,23029 Porosidad	69,70%
3	Esfuerzo Máximo	12,8639 - 2,7775 Espesor + 0,00531667 Angulo - 0,147283 Porosidad	99,61%
	Porcentaje de elongación	19,2783 + 25,175 Espesor - 0,0459444 Angulo - 0,252167 Porosidad	81,15%
	Módulo de Elasticidad	187,719 - 107,463 Espesor - 0,0404944 Angulo -1,76678 Porosidad	72,53%
Modelo de regresión con puntos centrales			
Posición	Propiedades mecánicas	Ecuación de Regresión	R²
1-2	Esfuerzo Máximo	4,50768 - 3,2375 Espesor - 0,00840881 Angulo -0,0458333 Porosidad	46,31%
	Porcentaje de elongación	-0,00511494 - 2,5625 Espesor + 0,0242759 Angulo + 0,0380833 Porosidad	49,89%
	Módulo de Elasticidad	117,619 + 77,2638 Espesor - 0,726425 Angulo - 1,23029 Porosidad	58,12%
3	Esfuerzo Máximo	12,876 - 2,7775 Espesor + 0,00137548 Angulo - 0,147283 Porosidad	96,67%
	Porcentaje de elongación	18,9482 + 25,175 Espesor - 0,0220153 Angulo - 0,252167 Porosidad	69,77%
	Módulo de Elasticidad	186,486 - 107,463 Espesor - 0,242813 Angulo - 1,76678 Porosidad	47,68%

Fuente: El autor.

De la tabla 18, se puede inferir que el modelo no es lineal ya que en la mitad de las regresiones el coeficiente correlación no se acercó al mínimo establecido. Sin embargo, se obtuvieron los coeficientes más altos de todos los modelos estudiados en el caso del esfuerzo máximo, cuando la probeta es fabricada en la posición 3. El modelo que menos se ajustó fue el del esfuerzo máximo cuando hay puntos centrales.

Para los ensayos de compresión se realizó el ANOVA para diseño factorial 2^3 con 2 pruebas por combinación para la posición de fabricación 1-2, lo que aumenta los puntos de análisis para cada regresión.

Tabla 19. Resultados del ANOVA para 16 datos con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1-2.

a) ANOVA Esfuerzo máximo vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	3,97269	62,28%	3,97269	1,32423	6,60355	0,006948
Espesor	1	0,41926	6,57%	0,41926	0,41926	2,09071	0,173805
Angulo	1	1,66281	26,07%	1,66281	1,66281	8,29195	0,013842
Porosidad	1	1,89063	29,64%	1,89062	1,89062	9,428	0,009708
Error	12	2,4064	37,72%	2,4064	0,20053		
Total	15	6,37909	100,00%				

Fuente: El autor.

b) ANOVA Elongación vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	6,8235	48,13%	6,82352	2,27451	3,7111	0,042514
Espesor	1	0,2627	1,85%	0,26266	0,26266	0,4285	0,525051
Angulo	1	5,2556	37,07%	5,25556	5,25556	8,5749	0,012644
Porosidad	1	1,3053	9,21%	1,30531	1,30531	2,1297	0,170143
Error	12	7,3548	51,87%	7,35477	0,6129		
Total	15	14,1783	100,00%				

Fuente: El autor.

c) ANOVA Módulo de elasticidad vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	7506,6	69,70%	7506,62	2502,21	9,2033	0,00195
Espesor	1	238,8	2,22%	238,79	238,79	0,8783	0,367154
Angulo	1	5905,6	54,84%	5905,58	5905,58	21,721	0,00055
Porosidad	1	1362,3	12,65%	1362,26	1362,26	5,0105	0,044926
Error	12	3262,6	30,30%	3262,59	271,88		
Total	15	10769,2	100,00%				

Fuente: El autor.

En la tabla 19, se observa que para las tres variables de respuesta la mayor contribución está dada por el ángulo (Esfuerzo máximo 27.07%, Porcentaje de elongación 37.07, Módulo de elasticidad 54.84%) y la menor contribución está dada por el espesor (Esfuerzo máximo 6.57%, Porcentaje de elongación 1.85%, Módulo de elasticidad 2.22%). Además, se puede decir que el módulo de elasticidad en este caso se ajusta al modelo de regresión.

Tabla 20. Resultados del ANOVA para 16 datos más dos puntos centrales con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1-2.

a) ANOVA Esfuerzo máximo vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	3,14035	46,31%	3,14035	1,04678	4,60021	0,016646
Espesor	1	0,41926	6,18%	0,41926	0,41926	1,84247	0,193501
Angulo	1	0,83047	12,25%	0,83047	0,83047	3,64958	0,074174
Porosidad	1	1,89062	27,88%	1,89063	1,89063	8,30857	0,010828
Error	16	3,64082	53,69%	3,64082	0,22755		
Total	19	6,78117	100,00%				

Fuente: El autor.

b) ANOVA Elongación vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	8,4895	46,89%	8,4895	2,82983	4,709	0,015333
Espesor	1	0,2627	1,45%	0,26266	0,26266	0,4371	0,517944
Angulo	1	6,9215	38,23%	6,92153	6,92153	11,5179	0,003708
Porosidad	1	1,3053	7,21%	1,30531	1,30531	2,1721	0,159935
Error	16	9,615	53,11%	9,615	0,60094		
Total	19	18,1045	100,00%				

Fuente: El autor.

c) ANOVA Módulo de elasticidad vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	7798,8	58,12%	7798,81	2599,6	7,4005	0,002503
Espesor	1	238,8	1,78%	238,79	238,79	0,6798	0,421784
Angulo	1	6197,8	46,19%	6197,76	6197,76	17,6438	0,000678
Porosidad	1	1362,3	10,15%	1362,26	1362,26	3,8781	0,066489
Error	16	5620,3	41,88%	5620,35	351,27		
Total	19	13419,2	100,00%				

Fuente: El autor.

En la tabla 20, se muestran los valores para probetas fabricadas en la posición 1-2 con puntos centrales, en donde el espesor es el factor de menor contribución en las variables de salida (Esfuerzo máximo 6.18%, Porcentaje de elongación 1.45%, Módulo de elasticidad 1.78%). Por otra parte, el ángulo es el que más influye en cuanto al porcentaje de elongación y el módulo de elasticidad (38.23% y 46.19% de contribución, respectivamente). En cuanto al esfuerzo máximo el factor que más influye es la porosidad con el 27,88%.

Tabla 21. Resultados del ANOVA para 8 datos con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.

a) ANOVA Esfuerzo máximo vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	10,0303	99,61%	10,0303	3,34345	338,959	0,0000287
Espesor	1	0,1543	1,53%	0,1543	0,15429	15,642	0,0167478
Angulo	1	0,1145	1,14%	0,1145	0,11448	11,606	0,0271078
Porosidad	1	9,7616	96,94%	9,7616	9,76157	989,628	0,0000061
Error	4	0,0395	0,39%	0,0395	0,00986		
Total	7	10,0698	100,00%				

Fuente: El autor.

b) ANOVA Elongación vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	49,8393	81,15%	49,8393	16,6131	5,73927	0,06229
Espesor	1	12,6756	20,64%	12,6756	12,6756	4,379	0,104523
Angulo	1	8,5491	13,92%	8,5491	8,5491	2,95343	0,160822
Porosidad	1	28,6146	46,59%	28,6146	28,6146	9,88539	0,03471
Error	4	11,5785	18,85%	11,5785	2,8946		
Total	7	61,4179	100,00%				

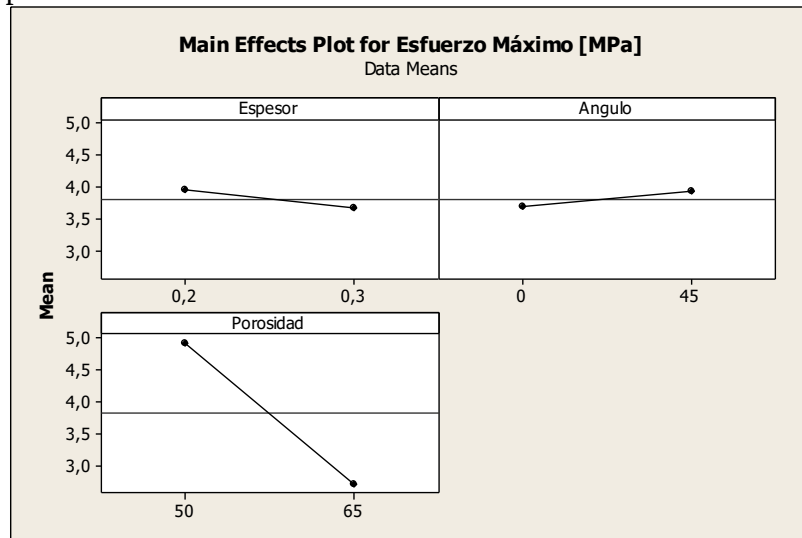
Fuente: El autor.

c) ANOVA Módulo de elasticidad vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	1642,29	72,53%	1642,29	547,43	3,52044	0,127779
Espesor	1	230,96	10,20%	230,96	230,96	1,48529	0,289907
Angulo	1	6,64	0,29%	6,64	6,64	0,04271	0,846369
Porosidad	1	1404,69	62,04%	1404,69	1404,69	9,03332	0,039724
Error	4	622	27,47%	622	155,5		
Total	7	2264,29	100,00%				

Fuente: El autor.

En la tabla 21, se observan los resultados del análisis de varianza, para las probetas fabricadas en la posición 3. En este análisis para el esfuerzo máximo obtenido, el coeficiente de correlación es el más alto, lo que genera mayor fiabilidad en las contribuciones de cada factor en las variables de salida. El factor que más contribuye en las tres variables de salida es la porosidad (Esfuerzo máximo 96.94%, Porcentaje de elongación 46.59%, Módulo de elasticidad 62.04%). Por otro lado, el factor que menos influye es el ángulo (Esfuerzo máximo 1.14%, Porcentaje de elongación 13.92%, Módulo de elasticidad 0.29%).

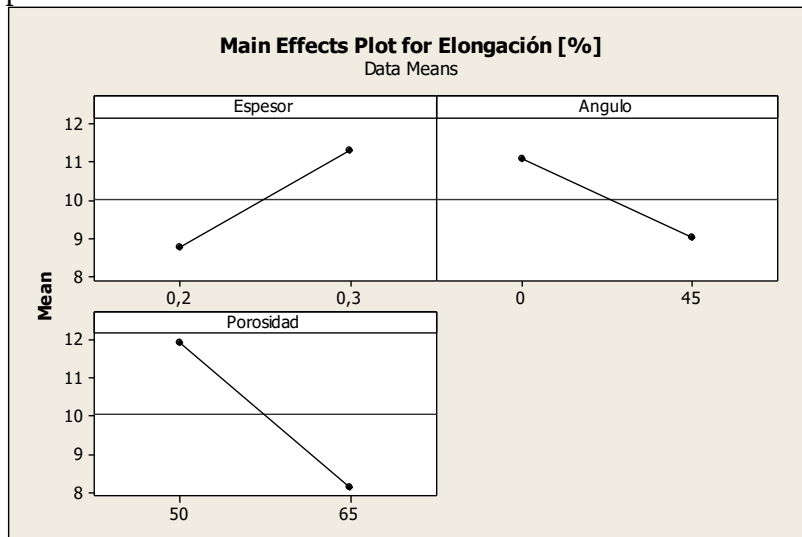
Figura 68. Efectos principales para el esfuerzo máximo con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.



Fuente: El autor.

En la figura 68, se observan los efectos de cada uno de los factores con respecto al esfuerzo máximo. Allí se muestra, que el factor de mayor es la porosidad, donde a menor porosidad es mayor el esfuerzo máximo y que los factores espesor y ángulo casi no tienen efecto sobre esta variable.

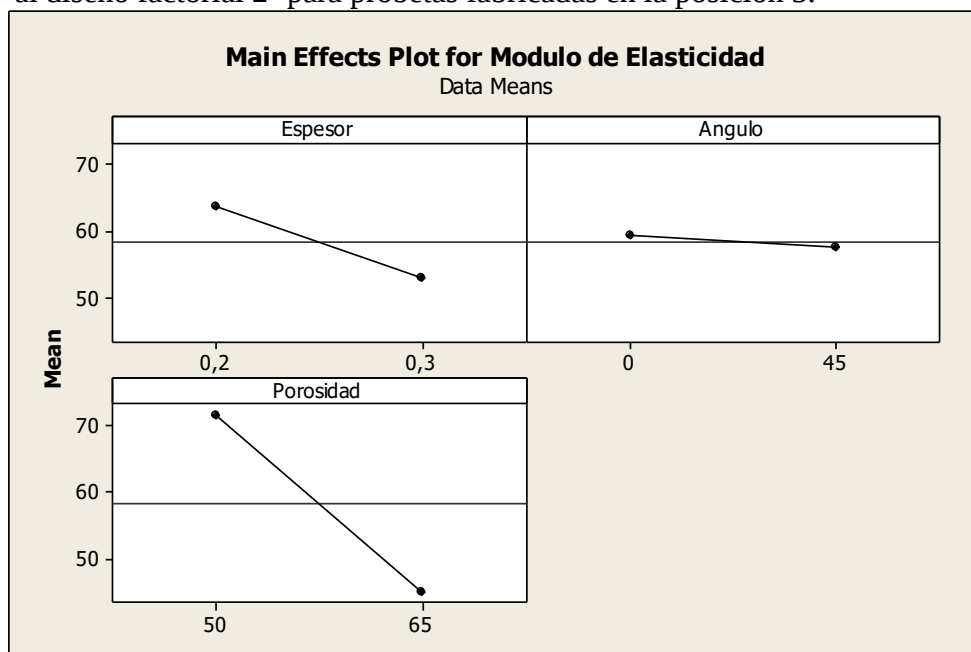
Figura 69. Efectos principales para el porcentaje de elongación con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.



Fuente: El autor.

En la figura 69, se muestran los efectos de cada uno de los factores con respecto al porcentaje de elongación. En esta se observa que a mayor espesor aumenta el porcentaje de elongación. También, se observa que al aumentar el ángulo y la porosidad disminuye el porcentaje de elongación.

Figura 70. Efectos principales para el módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.



Fuente: El autor.

En la figura 70, se observa los efectos de cada uno de los factores con respecto al módulo de elasticidad. En este caso, el factor que más influye es la porosidad y entre menor sea mayor es el módulo de elasticidad. También, la disminución en el espesor genera el aumento del módulo de elasticidad. Por otra parte, el ángulo no tiene un efecto relevante en esta variable.

Tabla 22. Resultados del ANOVA para 8 datos más dos puntos centrales con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 3.

a) ANOVA Esfuerzo máximo vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	9,927	96,67%	9,92697	3,30899	58,13	0,000079
Espesor	1	0,1543	1,50%	0,15429	0,15429	2,71	0,150793
Angulo	1	0,0111	0,11%	0,01111	0,01111	0,195	0,674117
Porosidad	1	9,7616	95,06%	9,76157	9,76157	171,484	0,000012
Error	6	0,3415	3,33%	0,34154	0,05692		
Total	9	10,2685	100,00%				

Fuente: El autor.

b) ANOVA Elongación vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	44,1365	69,77%	44,1365	14,7122	4,61677	0,053085
Espesor	1	12,6756	20,04%	12,6756	12,6756	3,97769	0,093145
Angulo	1	2,8463	4,50%	2,8463	2,8463	0,89317	0,381105
Porosidad	1	28,6146	45,24%	28,6146	28,6146	8,97944	0,024115
Error	6	19,1201	30,23%	19,1201	3,1867		
Total	9	63,2566	100,00%				

Fuente: El autor.

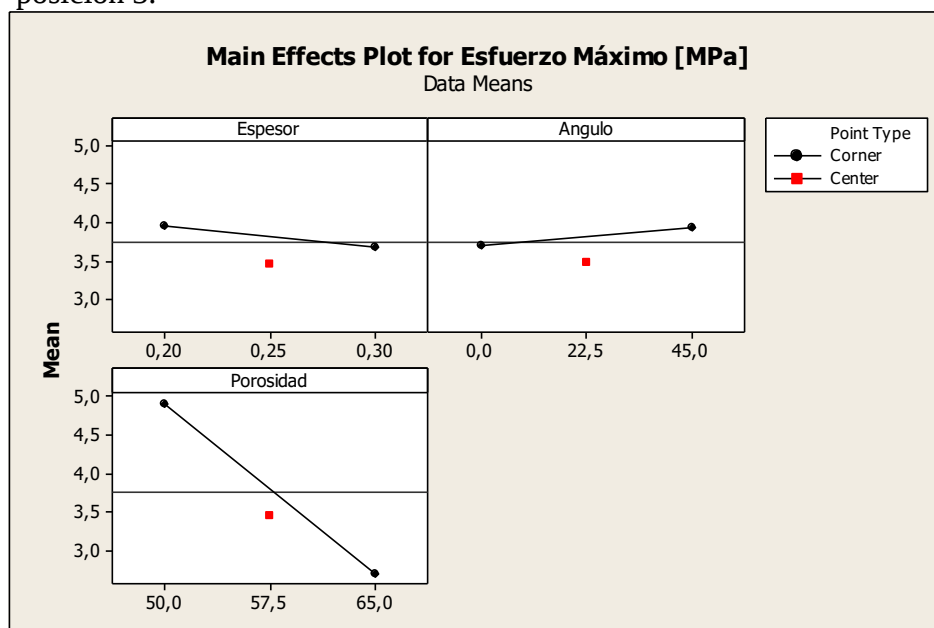
Tabla 22. (Continuación)

c) ANOVA Módulo de elasticidad vs Parámetros de impresión							
Fuente	GL	SC	Contribución	Adj SC	Adj MC	F	P
Regresión	3	1981,88	47,68%	1981,88	660,63	1,82231	0,243455
Espesor	1	230,96	5,56%	230,96	230,96	0,6371	0,455184
Angulo	1	346,23	8,33%	346,23	346,23	0,95507	0,366175
Porosidad	1	1404,69	33,79%	1404,69	1404,69	3,87477	0,096558
Error	6	2175,13	52,32%	2175,13	362,52		
Total	9	4157,01	100,00%				

Fuente: El autor.

En la tabla anterior, se evidencia también la influencia de los puntos centrales en los resultados de la regresión. Principalmente, se ve más afectado el módulo de elasticidad ya que su coeficiente de correlación se disminuyó en aproximadamente el 25%. También, se muestra que el factor con mayor contribución es la porosidad (Esfuerzo máximo 95.06%, Porcentaje de elongación 45.24%, Módulo de elasticidad 33.79%). Por otro lado, para el esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación el ángulo es el factor con menos influencia (Esfuerzo máximo 0.11%, Porcentaje de elongación 4.5% de contribución).

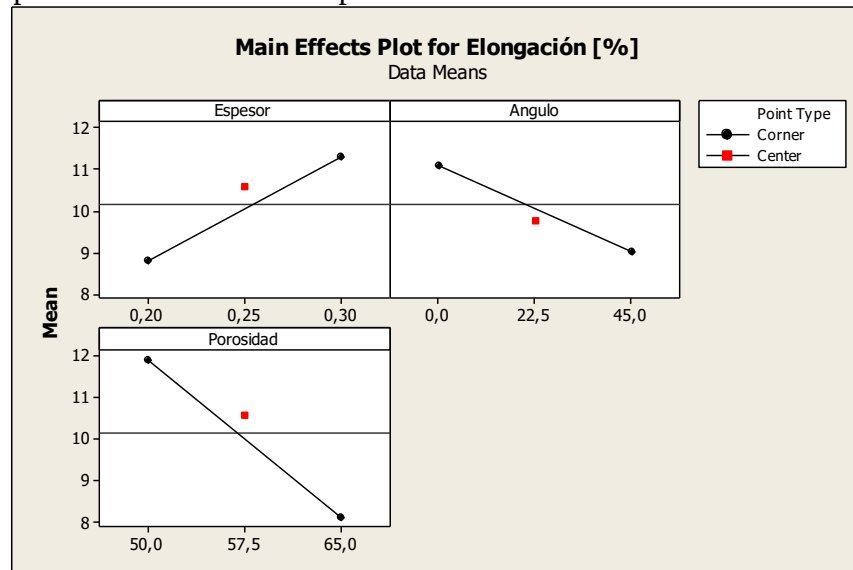
Figura 71. Efectos principales para el esfuerzo máximo con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 3.



Fuente: El autor.

En la figura 71, se observa que los puntos centrales se encuentran bastante cerca al modelo de regresión lo que ratifica el coeficiente de correlación para el esfuerzo máximo en esta posición. También, se muestra que el factor de mayor influencia es la porosidad, donde a menor porosidad mayor esfuerzo máximo. Por otro lado el espesor y el ángulo no tienen mucha influencia sobre esta variable.

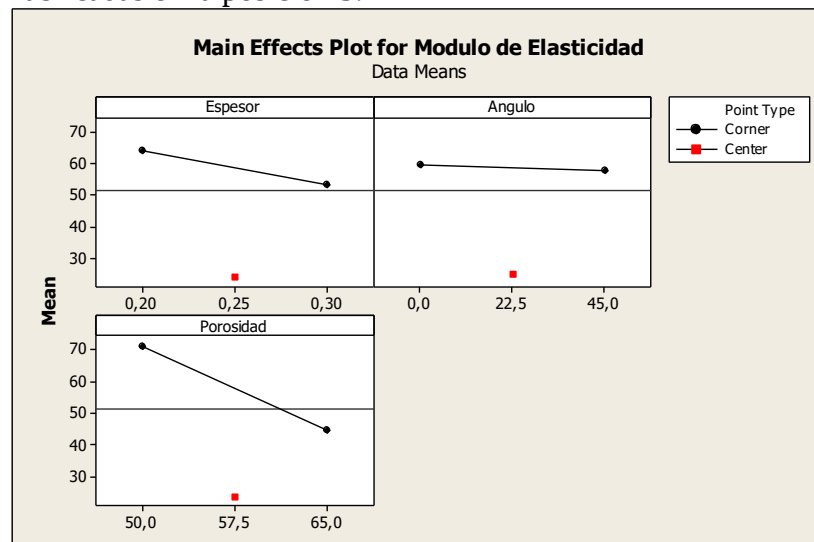
Figura 72. Efectos principales para el porcentaje de elongación con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 3.



Fuente: El autor.

En la figura 72 se muestra que, aunque el coeficiente de correlación es cercano al mínimo establecido, los puntos centrales se encuentran cerca del modelo de regresión. Por otra parte, todos los factores influyen de manera significativa para el porcentaje de elongación, pero la porosidad es la más influyente. Por tanto, a menor porosidad y menor ángulo mayor porcentaje de elongación. A mayor espesor aumenta el valor de la variable.

Figura 73. Efectos principales para el módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 con puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 3.



Fuente: El autor.

En la figura 73, se observa que los puntos centrales están bastante alejados del modelo, lo que efectivamente se ve representado en el valor del coeficiente de correlación. También,

se muestra que el factor más influyente sigue siendo la porosidad y que a menor espesor, ángulo y porosidad es mayor el módulo de elasticidad.

Las gráficas correspondientes a los efectos principales para el esfuerzo máximo, porcentaje de elongación y módulo de elasticidad con respecto al diseño factorial 2^3 para probetas fabricadas en la posición 1-2 y también las que tienen puntos centrales para probetas fabricadas en la posición 1-2 se encuentran en el Anexo D.

4.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- La regresión lineal para los datos obtenidos en el ensayo de tensión, obtuvieron sus mejores resultados para esfuerzo máximo y módulo de elasticidad en las probetas fabricadas en posición 2, en ambos casos tomando puntos centrales y sin tomarlos. Esto puede deberse a que entre menor sea el ángulo de fabricación (tienda a cero grados) mayor es el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad.
- En cuanto al porcentaje de elongación para los datos obtenidos en el ensayo de tensión, en todos los casos tuvo el menor coeficiente de correlación independientemente de la posición o los puntos centrales incluidos en el modelo. Este, disminuye al aumentar el ángulo de fabricación.
- La regresión lineal para los datos obtenidos en el ensayo de compresión, obtuvieron sus mejores resultados para el esfuerzo máximo en las probetas fabricadas en posición 3 en ambos casos tomando puntos centrales y sin tomarlos. Esto puede deberse a que entre menor sea la porosidad (cuando tiende al 50%) mayor es el esfuerzo máximo.
- En cuanto al porcentaje de elongación para los datos obtenidos en el ensayo de compresión, se ve afectado por todos los factores y principalmente por la porosidad. También se observó que, a menor espesor disminuye el porcentaje de elongación en todos los casos.
- Además, se puede evidenciar que mientras más interacciones se consideren mejor es el ajuste representado por el coeficiente de correlación (Ver figura 68 y 71).

5 CONCLUSIONES

- El diseño de experimentos realizado basándose la metodología del diseño factorial, permitió reducir costos, tiempos y evidenciar las conexiones existentes entre factores que de manera empírica difícilmente se pueden observar. Por otro lado, tanto para los ensayos de tensión como de compresión facilitó el análisis de varianza posterior.
- También, el correcto desarrollo y verificación de cada uno de los pasos de fabricación fue sumamente importante para la obtención de una probeta con las características de diseño y morfológicas establecidas por el investigador y por la norma con respecto a la que se realizaron los estudios.
- A partir de los resultados obtenidos del ensayo de tensión, en cuanto al porcentaje de elongación se encuentran dentro del rango conocido para la fabricación mediante moldeo por inyección. Sin embargo, el esfuerzo último a la tracción y el módulo de elasticidad se encuentran muy alejados de los obtenidos en moldeo por inyección como punto de referencia (ver tabla 9).
- En cuanto a los resultados del ensayo a compresión el porcentaje de elongación también se encuentra en el rango conocido, pero la diferencia en cuanto al esfuerzo último a la tracción y el módulo de elasticidad es muy alta a pesar de que el esfuerzo último de una probeta de compresión supera varias veces a una sometida a tensión.
- Las configuraciones que obtuvieron los mejores resultados de los ensayos fueron las probetas D ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$), F ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$) y H ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$). De lo cual se puede deducir que la baja porosidad es un factor común importante para obtener valores de esfuerzo altos. Estas configuraciones estuvieron en los primeros 5 resultados del módulo de elasticidad y esfuerzo máximo.
- En cuanto a los resultados de la regresión lineal, se puede deducir que para el ensayo de tensión la predicción de los valores de esfuerzo máximo son las más confiables ya que independientemente de su posición o modelo (con o sin puntos centrales), el coeficiente de correlación supera el mínimo establecido o se aproxima lo suficiente.
- En cuanto a los resultados de ANOVA, se puede deducir que para el ensayo de tensión en las probetas fabricadas en la posición 1 el factor que más influye en sus variables de salida es el ángulo. A menor ángulo mayor esfuerzo máximo y módulo de elasticidad.
- En cuanto a los resultados de ANOVA, se puede deducir que para el ensayo de tensión en las probetas fabricadas en la posición 2 el factor que más influye en esfuerzo máximo es el ángulo. A menor ángulo mayor esfuerzo máximo.

- En cuanto a los resultados de la regresión lineal, se puede deducir que para el ensayo de compresión la predicción del esfuerzo máximo para la posición 3 es la más confiable de todos los modelos estudiados.
- También es correcto afirmar que con respecto los resultados de ANOVA, para las probetas de fabricadas en la posición 3 en compresión el factor que más influye es la porosidad independientemente del modelo (con o sin puntos centrales), a menor porosidad mayor esfuerzo máximo.
- En cuanto a los resultados de ANOVA, se puede deducir que para el ensayo de compresión en las probetas de fabricadas en la posición 1-2 el factor que más influye en el esfuerzo máximo es el ángulo. A menor ángulo mayor esfuerzo máximo independientemente del modelo (con o sin puntos centrales).
- A partir de los resultados obtenidos, se puede inferir que el tipo de impresora en la que se fabrican las probetas en materiales como el PMMA tiene incidencia directa en los resultados obtenidos ya que este material tiende a contraerse muy fácil debido a factores externos, como corrientes de aire o cambios drásticos en la temperatura ambiente. Debido a esto, hubo contracciones que no pudieron evitarse como por ejemplo en las esquinas de las probetas. Por otra parte, al no ser sellada la impresora, se desperdició gran cantidad de material hasta obtener una probeta que cumpliera con los requerimientos morfológicos de cada norma, ya que se generaba separación entre capas o nudos entre lo que ya estaba fabricado y el material saliente.

6 RECOMENDACIONES

- Se sugiere para futuras investigaciones, reducir la velocidad de fabricación mediante FFF para disminuir la contracción del PMMA.
- Se recomienda para futuras investigaciones imprimir el material sobre el vidrio de la cama de impresión y no sobre la cinta.
- Se recomienda realizar estudios de la influencia de los contornos en el esfuerzo máximo, porcentaje de elongación y módulo de elasticidad.
- Se sugiere realizar estudios con valores diferentes para el *Bottom/Top thickness*, que evidencien su influencia sobre el comportamiento mecánico de *scaffolds*.
- Se recomienda para futuras investigaciones modificar los patrones de impresión con el fin de determinar la influencia de los mismos en las propiedades mecánicas del PMMA.
- Se sugiere para futuras investigaciones, fabricar las probetas de PMMA en una impresora 3D sellada, para evitar la incidencia de factores externos como las corrientes de aire, la humedad del ambiente o los cambios de temperatura ambiente repentinos.
- Se recomienda realizar estudios que evidencien la influencia de la transferencia de calor de la cama de impresión hacia el material mientras se está imprimiendo.
- Se sugiere realizar la caracterización de las propiedades mecánicas del PMMA a tensión y compresión cuando es fabricado mediante FFF, en investigaciones de tipo *in-vivo* o *in-vitro*, para comparar con los resultados obtenidos en este estudio.
- Se recomienda diseñar el soporte en donde se apoyará la probeta cuando es fabricada en la posición 2, con el fin de disminuir los residuos de filamentos debido a la fabricación del mismo.
- Para futuras investigaciones, se propone realizar la caracterización mecánica a tensión y compresión con dos materiales (uno de ellos PMMA) en la misma probeta fabricada mediante FFF. Los materiales propuestos pueden ser PLA o ABS que ya han sido caracterizados (36).
- Para futuras investigaciones, se propone realizar un análisis de varianza avanzado con regresiones no lineales, para comparar con los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

1. ARANGO OSPINA, Marcela. *Implantes personalizados de Polimetilmetacrilato (PMMA) para aplicaciones en Craneoplastia* [online]. Universidad Nacional de Colombia, 2014. Available from: <http://www.bdigital.unal.edu.co/44387/1/1088264066.2014.pdf>
2. CAMPILLO FERNÁNDEZ, Alberto J. *Polímeros bioestables para fabricación de implantes protésicos : caracterización físico-química y respuesta biológica in vitro* [online]. Universidad Politécnica de Valencia, 2014. Available from: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/44232/Campillo - Polímeros bioestables para fabricación de implantes protésicos%253A caracterización físico....pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/44232/Campillo%20-%20Pol%C3%ADmeros%20bioestables%20para%20fabricaci%C3%B3n%20de%20implantes%20prot%C3%A9sicos%253A%20caracterizaci%C3%B3n%20f%C3%ADsico....pdf?sequence=1)
3. TANGO RAINUSSO, Pablo Martín. *Metodología para la aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) en la industria*. Universidad de Navarra, 2008.
4. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, Isidro Jesús. Diseño de experimentos y su aplicación en la industria. *Boletín Científico - Ingenio y Conciencia No. 1* [online]. 2014. [Accessed 7 May 2017]. Available from: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/sahagun/n1/e1.html#nota2>
5. MONTGOMERY, Douglas C. *DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS*. LIMUSA WILEY, 2004. ISBN 968-18-6156-6.
6. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, Isidro Jesús. *Diseño experimentales de bloques incompletos y aplicaciones en la industria*. 2006.
7. UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Materiales poliméricos de mayor interés industrial. . 2015. Vol. 1, p. 1–292.
8. STRATASYS LTD. Material para simulación de plásticos transparentes | Stratasys. [online]. [Accessed 25 February 2017]. Available from: <http://www.stratasys.com/es/materiales/polyjet/transparentes>
9. INBIB. Ingeniería de Tejidos y Medicina Regenerativa. *Nih* [online]. 2013. Available from: [https://www.nibib.nih.gov/sites/default/files/Ingeniería de Tejidos y Medicina Regenerativa_0.pdf](https://www.nibib.nih.gov/sites/default/files/Ingenier%C3%ADa%20de%20Tejidos%20y%20Medicina%20Regenerativa_0.pdf)
10. PLAZAS BONILLA, Clara Eugenia and PERILLA, Jairo Ernesto. Pasado, presente y futuro cercano de los materiales para uso de implantes óseos biodegradables. . 2011. Vol. 31, no. February, p. 124–133.
11. SOLER VARELA, Roberto, DE LIMA MORENO, J. Javier and CABRERA DIAZ, Carlos. Implante craneano individual de gran volumen en polimetilmetacrilato de metilo a partir de un prototipo rápido. Reporte de un caso. *Odontoestomatología* [online]. 2011. Vol. XIII No 17, p. 1–11. Available from: <http://www.scielo.edu.uy/pdf/ode/v13n17/v13n17a05.pdf>
12. CASTRO ESPINOSA, Homero Alberto. *Manufactura aditiva como una herramienta para el desarrollo de moldes para PMMA*. Universidad Nacional Autónoma de México , 2014.
13. ESPALIN, David, ARCAUTE, Karina, RODRIGUEZ, David, MEDINA, Francisco, POSNER, Matthew and WICKER, Ryan. Fused deposition modeling of patient-specific polymethylmethacrylate implants. *Rapid Prototyping Journal*. 2010. Vol. 16, no. 3, p. 164–173. DOI 10.1108/13552541011034825.
14. VELASCO, Marco A, NARVÁEZ-TOVAR, Carlos A and GARZÓN-ALVARADO, Diego A. Design , Materials , and Mechanobiology of Biodegradable Scaffolds for Bone Tissue Engineering. . 2015. Vol. 2015.

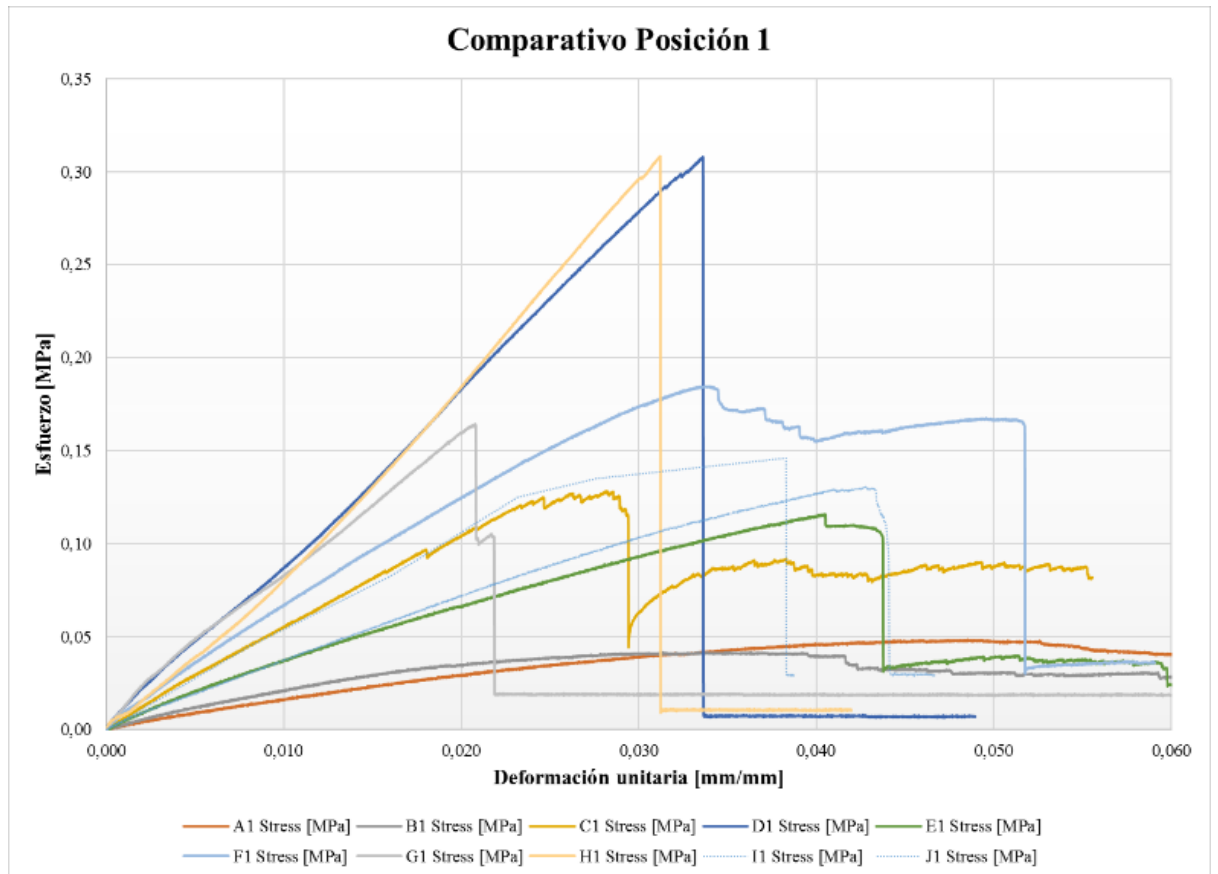
15. SALDARRIAGA. Design and Manufacturing of a Custom Skull Implant. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2011. Vol. 4, no. 1, p. 169–174. DOI 10.3844/ajeassp.2011.169.174.
16. ROSENZWEIG, Derek, CARELLI, Eric, STEFFEN, Thomas, JARZEM, Peter and HAGLUND, Lisbet. 3D-Printed ABS and PLA Scaffolds for Cartilage and Nucleus Pulposus Tissue Regeneration. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 2015. Vol. 16, no. 7, p. 15118–15135. DOI 10.3390/ijms160715118. Available from: <http://www.mdpi.com/1422-0067/16/7/15118/>
17. WU, Wenzheng, GENG, Peng, LI, Guiwei, ZHAO, Di, ZHANG, Haibo and ZHAO, Ji. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*. 2015. Vol. 8, no. 9, p. 5834–5846. DOI 10.3390/ma8095271.
18. ASADI-EYDIVAND, Mitra, SOLATI-HASHJIN, Mehran, FARZAD, Arghavan and ABU OSMAN, Noor Azuan. Effect of technical parameters on porous structure and strength of 3D printed calcium sulfate prototypes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2016. Vol. 37, p. 57–67. DOI 10.1016/j.rcim.2015.06.005. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.06.005>
19. FOMBUENA BORRÀS, Vicent, FENOLLAR GIMENO, Octavio Ángel and MONTAÑES MOÑOZ, Néstor. Propiedades mecánicas de los plásticos (II). Ensayo de tracción. In : VALENCIA, Editorial de la Universidad Politécnica de (ed.), *Caracterización de materiales poliméricos*. Valencia, 2016. p. 77–96. ISBN 978-84-9048-504-0.
20. ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1. *ASTM International*. 2003. No. January, p. 1–16. DOI 10.1520/D0638-10.1.
21. URETA POSADAS, Samuel. Slicers - Programas laminadores para impresión 3D FFF. [online]. 2015. [Accessed 30 March 2017]. Available from: <http://www.dima3d.com/evolucion-historica-de-los-programas-laminadores-para-impresion-3d-fff/>
22. CHRISTOPHER BARNATT. 3D Printing. *Explaining the future* [online]. 2012. Available from: <http://www.explainingthefuture.com/3dprinting.html>
23. ZONA MAKER. Manual de CURA. [online]. 2016. [Accessed 4 April 2017]. Available from: <https://www.zonamaker.com/impresion-3d/software-imp3d/manual-de-cura>
24. voxel3d – Authorized Rhinoceros Training Center. [online]. 2017. [Accessed 6 April 2017]. Available from: <http://voxel3d.net/>
25. BESMAK©. Servo Electromechanical Universal Testing Machines. [online]. 2015. [Accessed 17 April 2017]. Available from: http://www.besmaklab.com/Products/7/Servo_Electromechanical_Universal_Machine/1
26. ANMO ELECTRONICS CORPORATION©. Dino-Lite Digital Microscope. [online]. 2016. [Accessed 24 May 2017]. Available from: http://www.dino-lite.com/products_detail.php?index_m1_id=9&index_m2_id=35&index_id=92AM4013MT Specification
27. ACKERMANN, Jochen, JUDA, Monika and HIRSCH, Doris. Polymethyl

- Methacrylate (PMMA). *Kunststoffe International*. 2014. Vol. 2014, no. 10, p. 59–64. DOI 10.1007/978-94-009-7358-9.
28. NÚÑEZ, Carlos, ROCA, Antoni and JORBA, Jordi. Comportamiento Mecánico de los Materiales Volumen 2 : Ensayos mecánicos . Ensayos no destructivos. . 2011. P. 21.
 29. ROYLANCE, David. Stress-Strain Curves. *Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology*. 2001. No. August, p. 2001. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004. applicability for this approach.
 30. CONSHOHOCKEN, West. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics 1. *Annual Book of ASTM Standards*. 2011. Vol. 8, no. April 2003, p. 1–7. DOI 10.1520/D0695-10.2.
 31. © ILLINOIS TOOL WORKS INC. Ensayo de compresión con platos con asentamiento esférico - Instron. *30 Septiembre* [online]. 2016. [Accessed 22 May 2017]. Available from: <http://www.instron.com.ar/es-ar/testing-solutions/by-material/composites/compression/seated-platens>
 32. STEPHENS, Larry J. *Theory and Problems of Beginning Statistics*. Nebraska : McGraw-Hill, 1998. ISBN 0070612595.
 33. MINITAB INC. ¿Qué es ANOVA? *Soporte de Minitab® 17* [online]. 2016. [Accessed 4 June 2017]. Available from: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>
 34. MINITAB INC. Explicación de los cuadrados medios. *Soporte Minitab® 17* [online]. 2016. [Accessed 4 June 2017]. Available from: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/anova-statistics/understanding-mean-squares/>
 35. MINITAB INC. R-cuadrado. *Soporte Minitab® 17* [online]. 2016. [Accessed 4 June 2017]. Available from: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/regression-and-correlation/goodness-of-fit-statistics/r-squared/>
 36. RODRÍGUEZ SUAREZ, JHONATAN. RESTREPO ARDILA, DEIVI GONZALO. Elaboración Y Caracterización De Componentes Plásticos Porosos, Mediante Impresión 3D Para Aplicaciones De Regeneración Ósea. . 2015. P. 140.

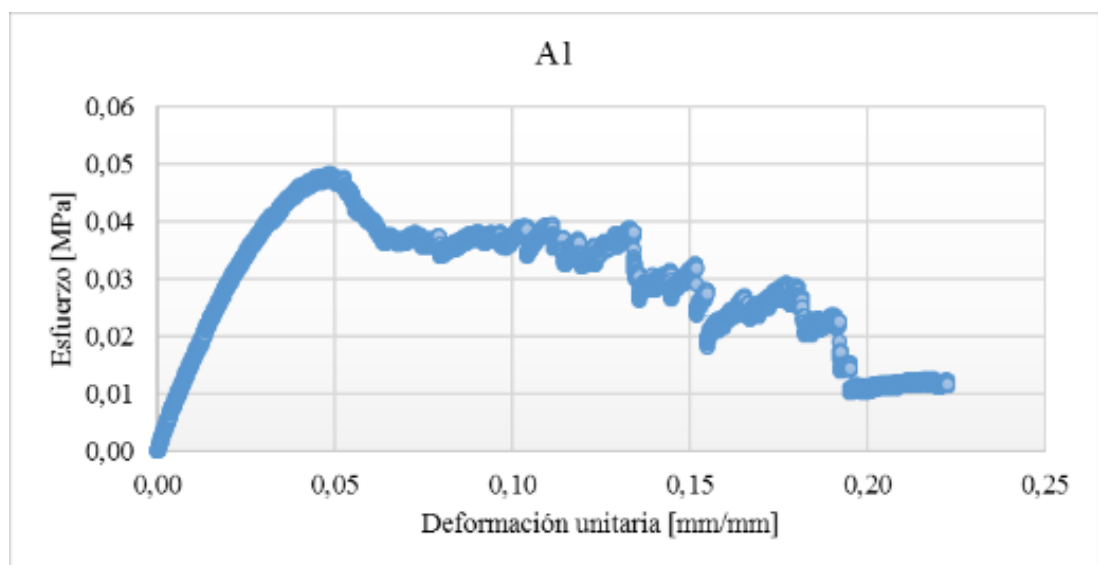
ANEXOS

Anexo A. Curvas de Esfuerzo vs Deformación para ensayos de tensión.

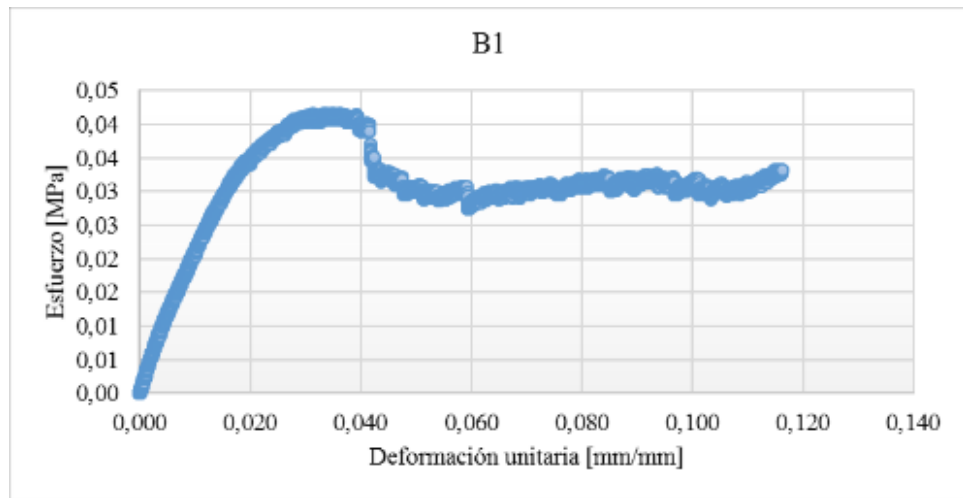
Gráfico comparativo de esfuerzo vs deformación en la Posición 1



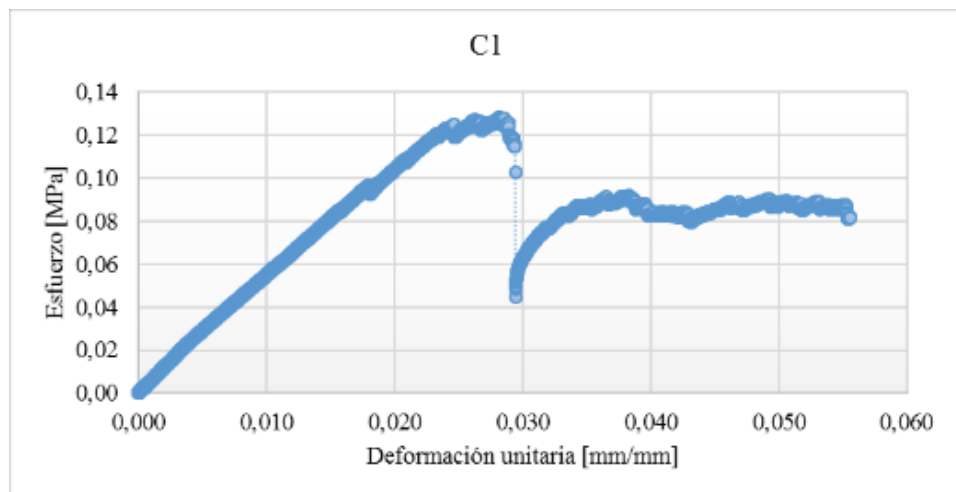
Probeta A1. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



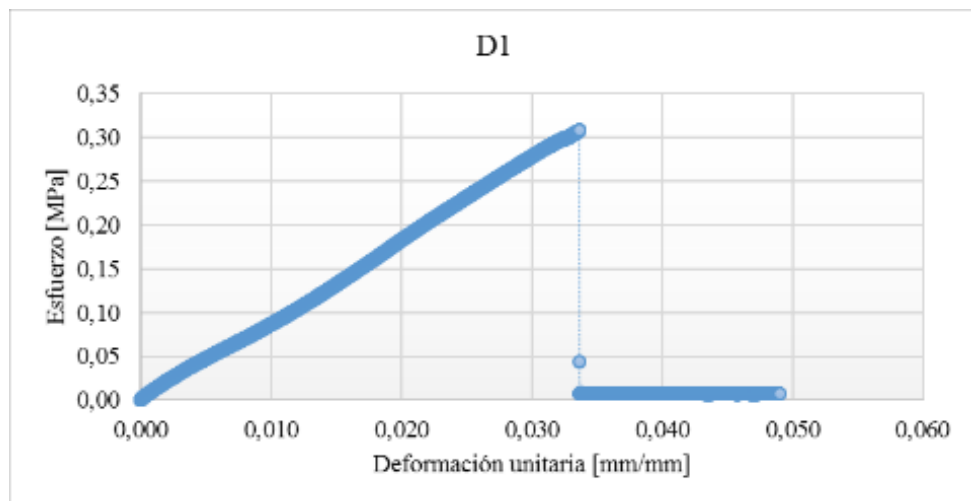
Probeta B1. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



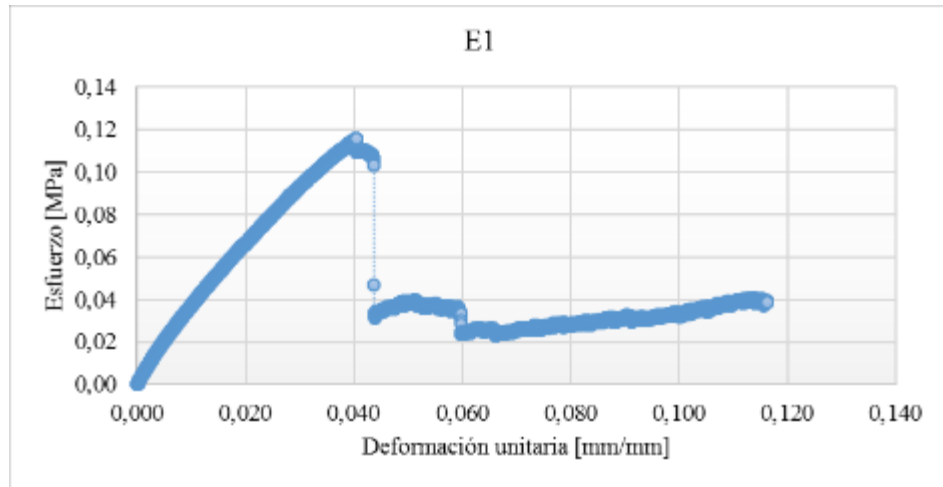
Probeta C1. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



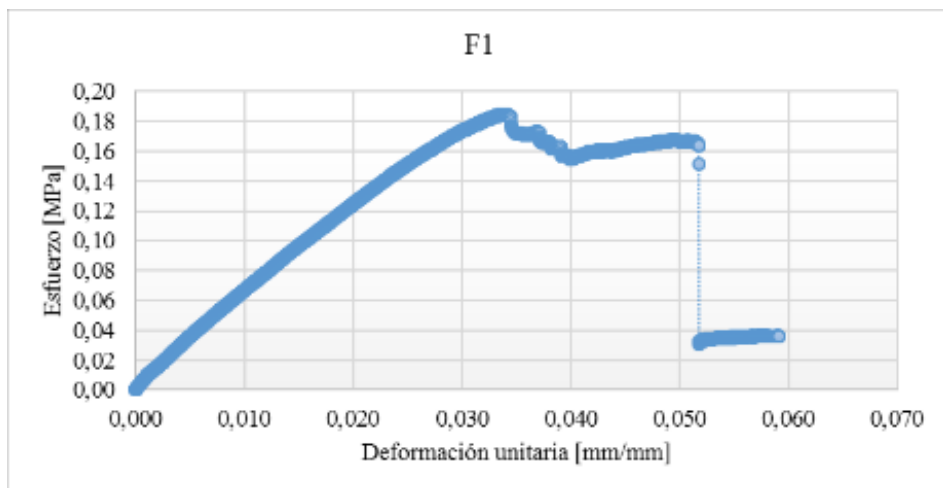
Probeta D1. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



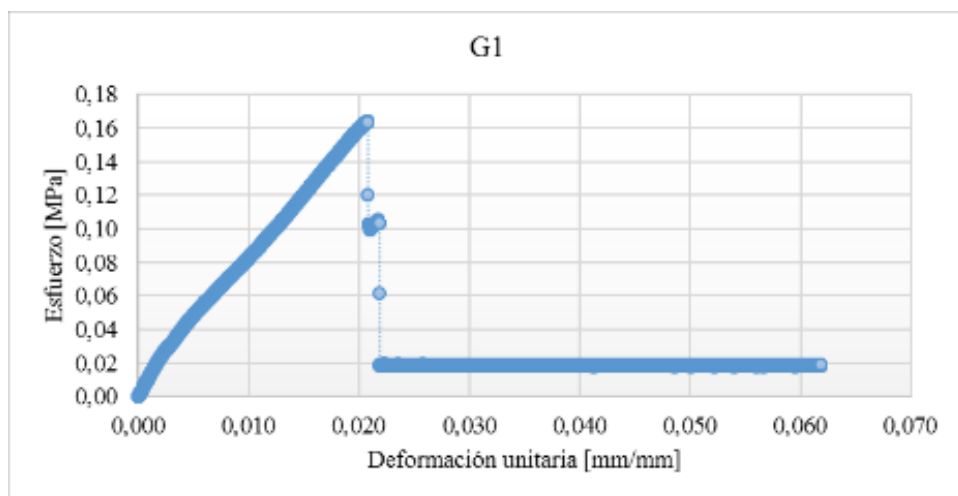
Probeta E1. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



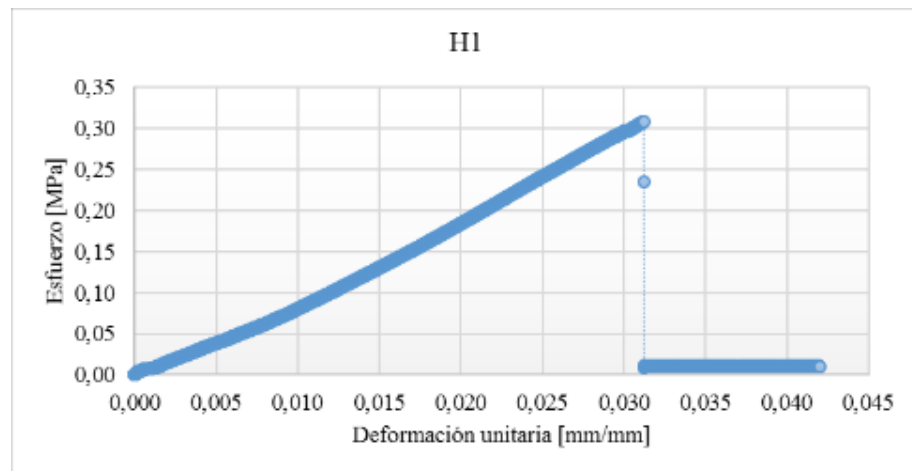
Probeta F1. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



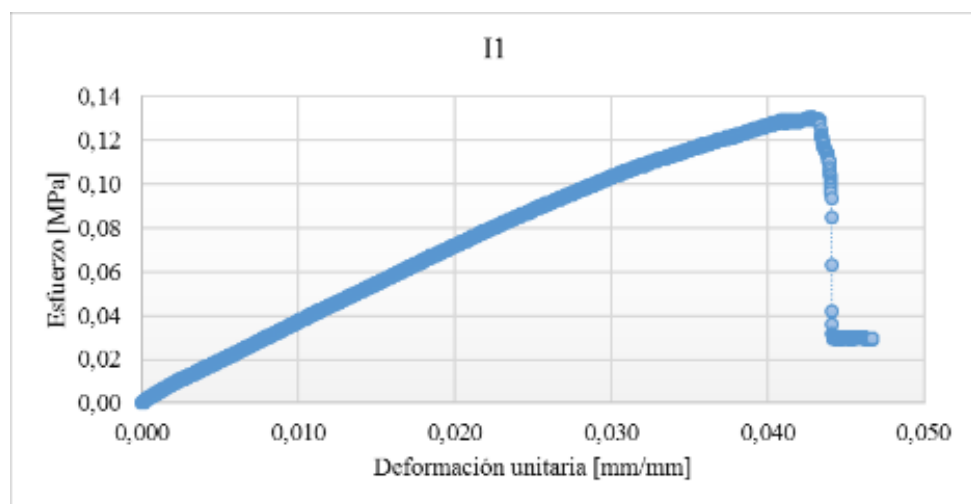
Probeta G1. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta H1. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



Probeta I1. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 22.5^\circ$, $p = 57.5\%$).



Probeta J1. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 67.5^\circ$, $p = 57.5\%$).

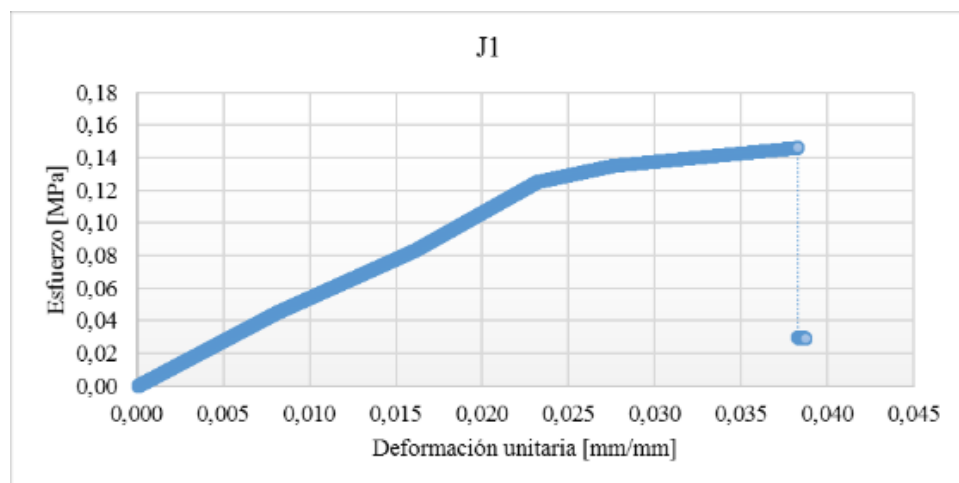
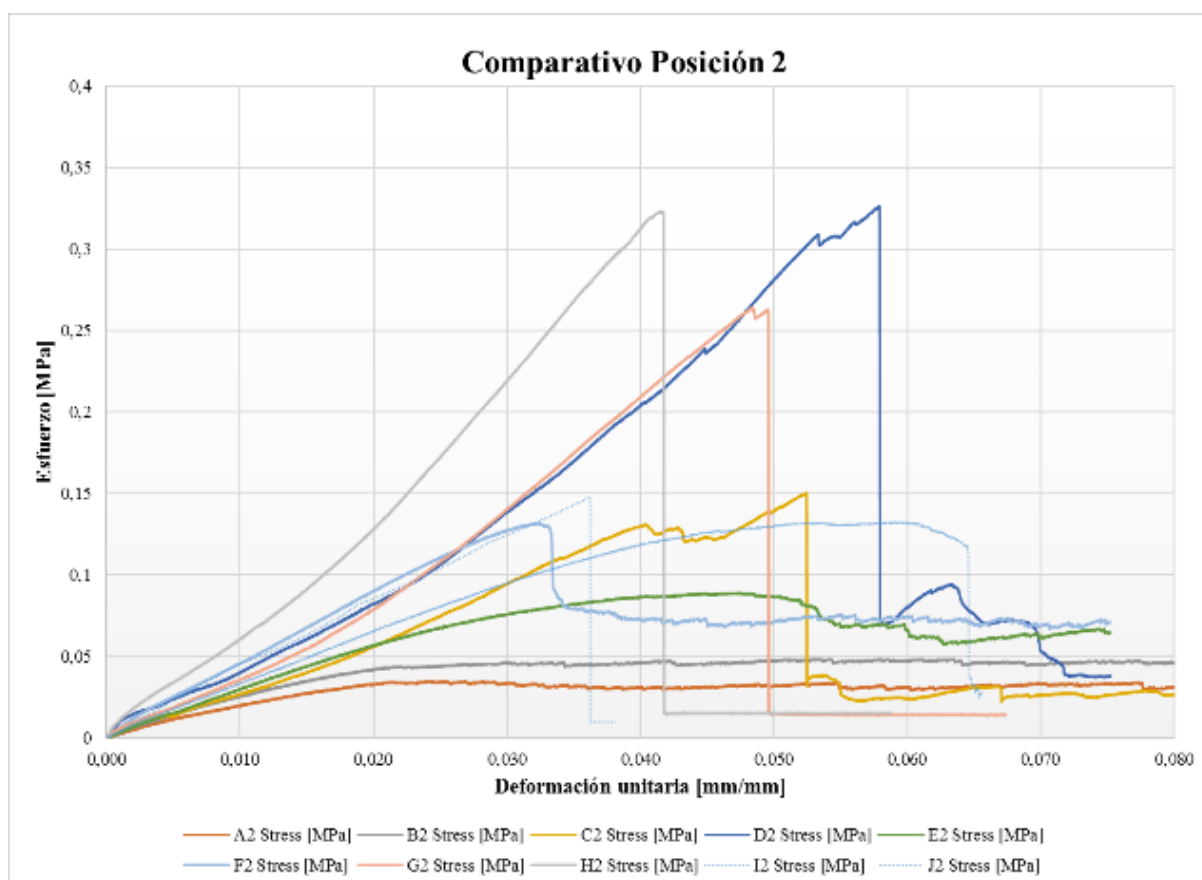
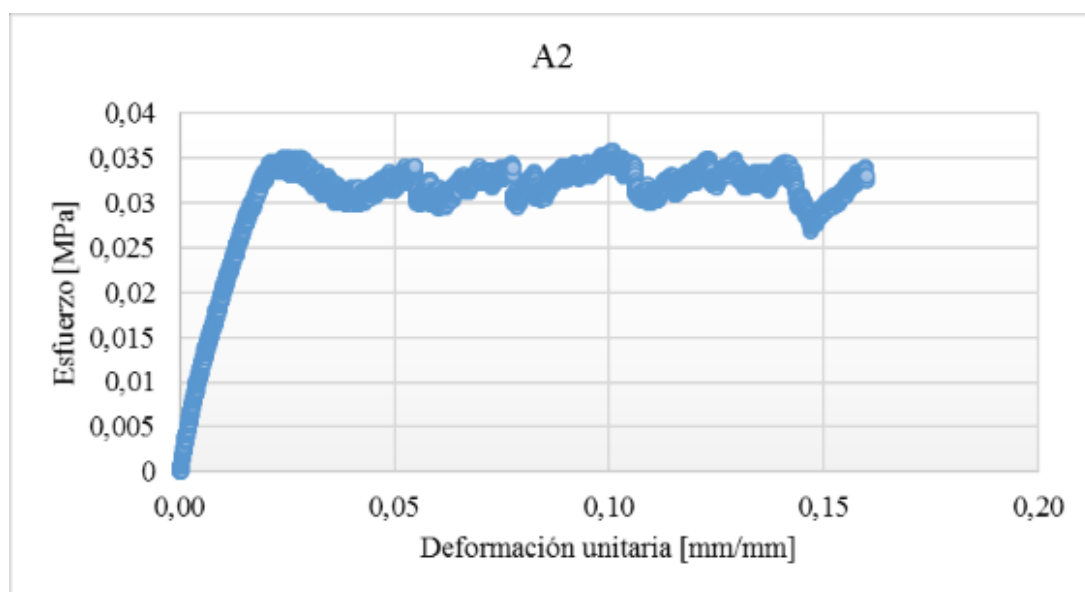


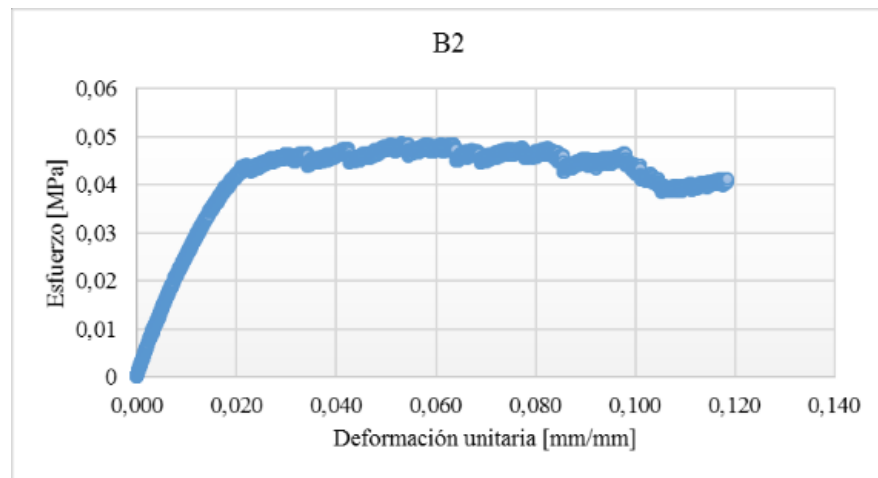
Gráfico comparativo de esfuerzo vs deformación en la Posición 2



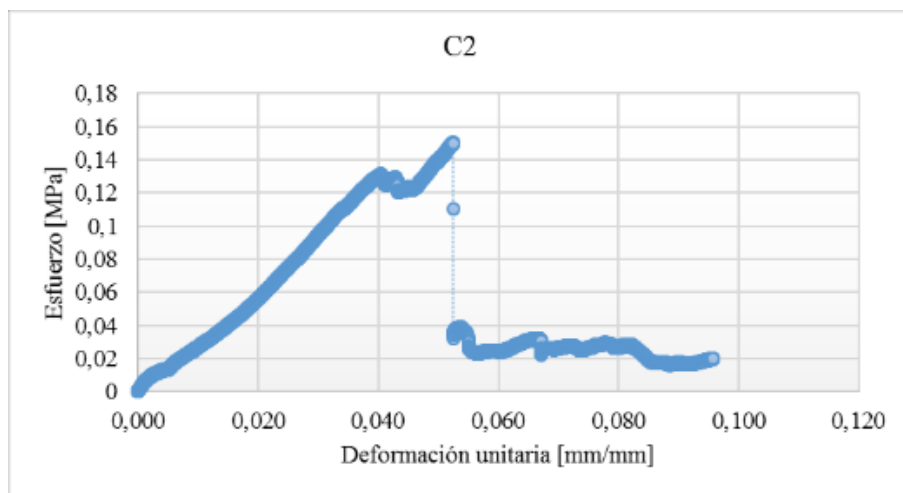
Probeta A2. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



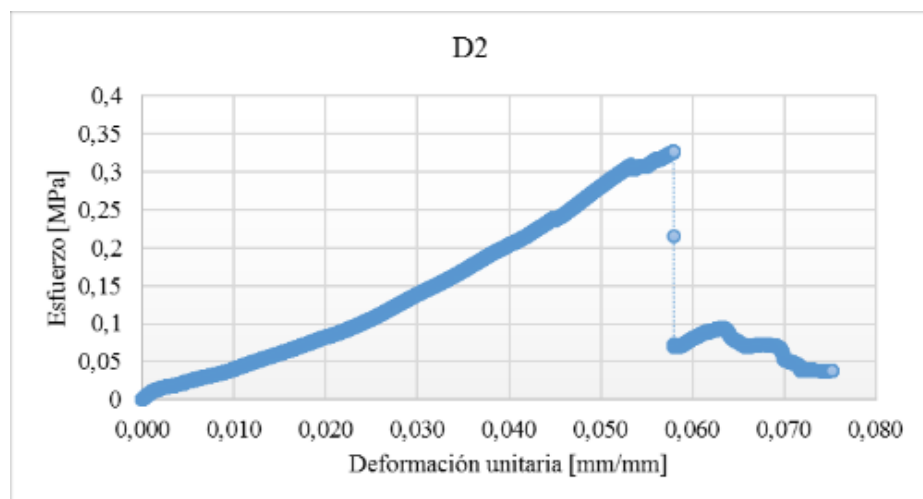
Probeta B2. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



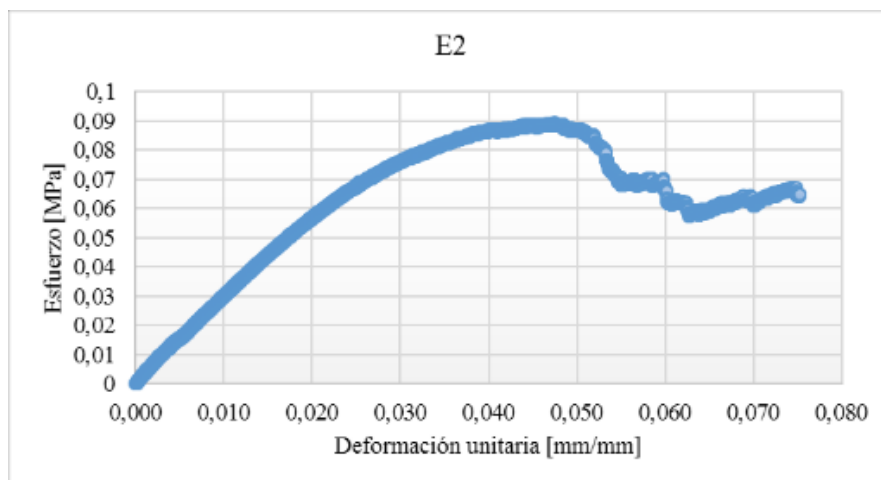
Probeta C2. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



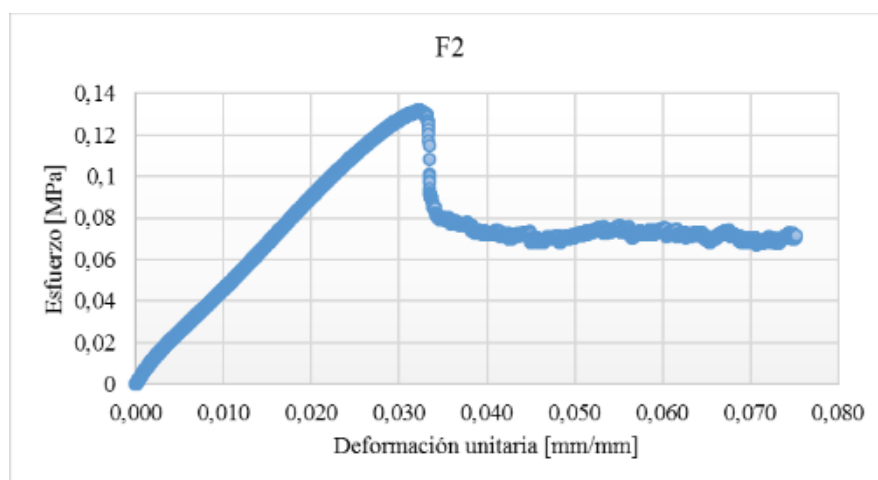
Probeta D2. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



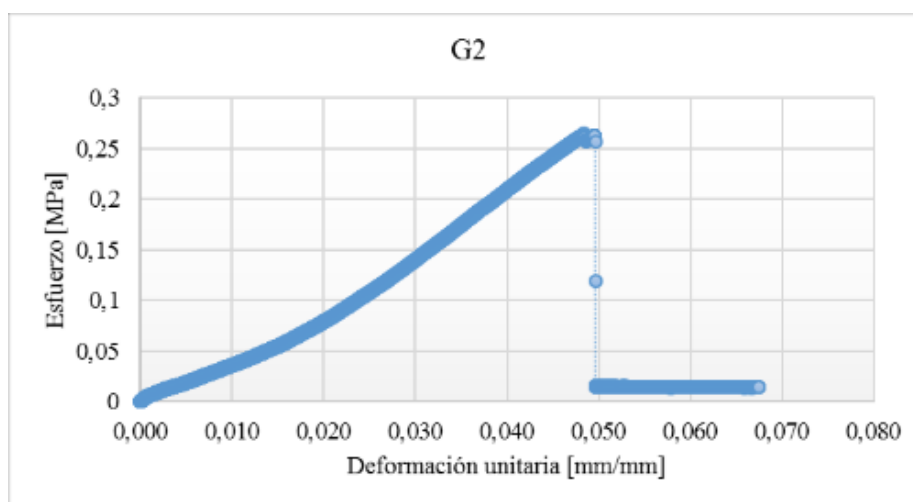
Probeta E2. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



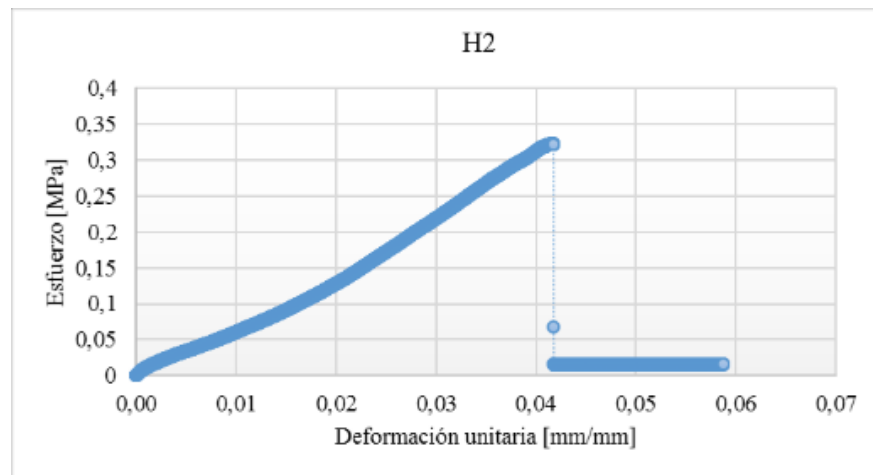
Probeta F2. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



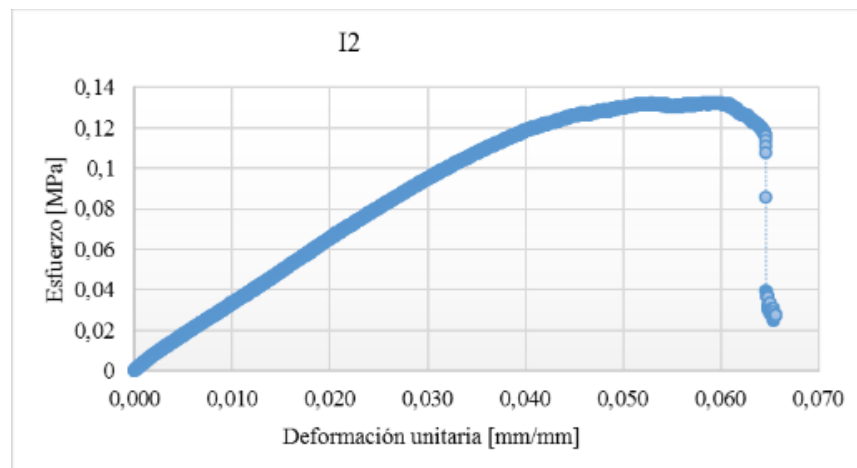
Probeta G2. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



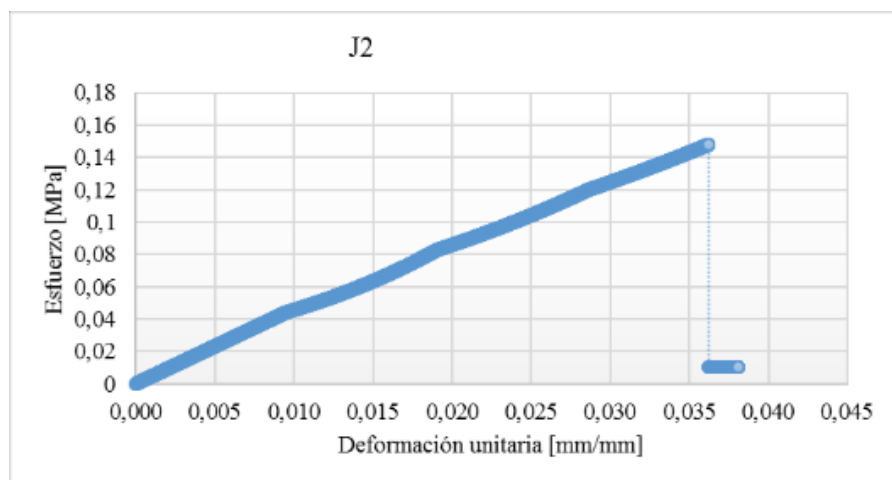
Probeta H2. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



Probeta I2. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 22.5^\circ$, $p = 57.5\%$).

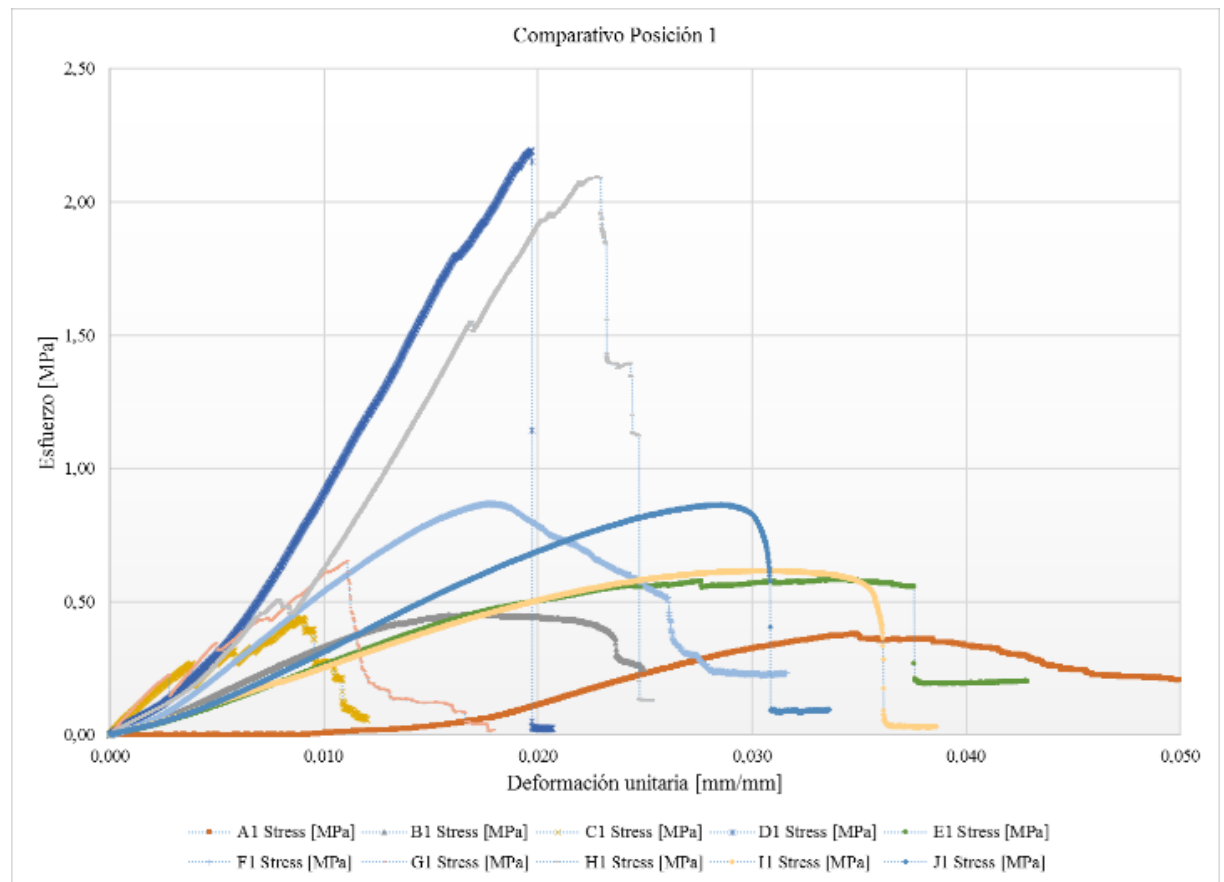


Probeta J2. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 67.5^\circ$, $p = 57.5\%$).

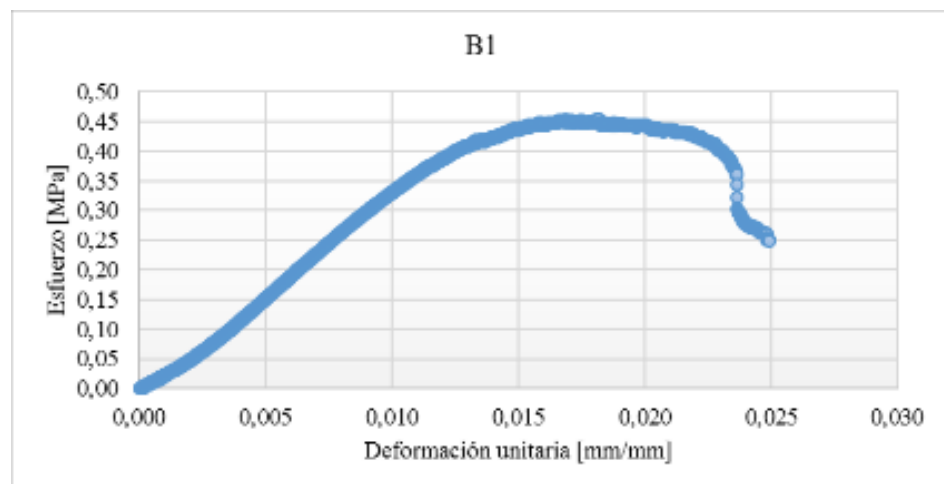


Anexo B. Curvas de Esfuerzo vs Deformación para ensayos de compresión.

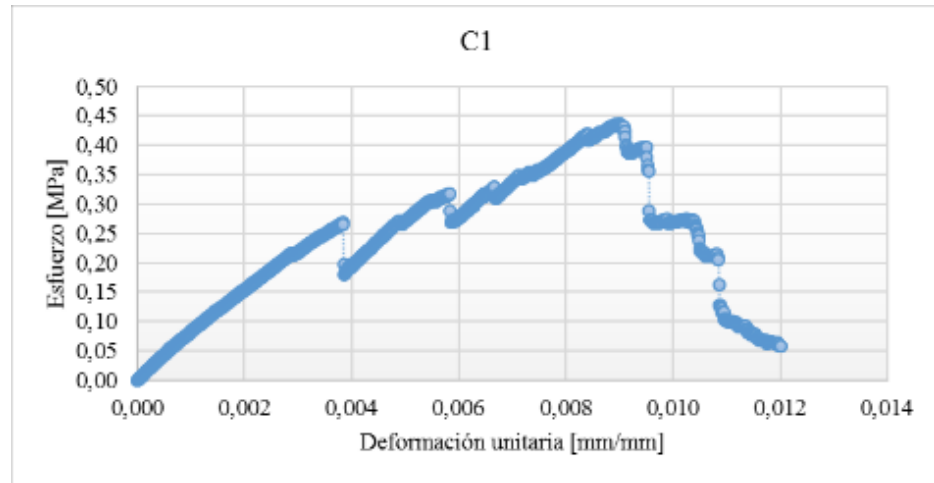
Gráfico comparativo de esfuerzo vs deformación en la Posición 1



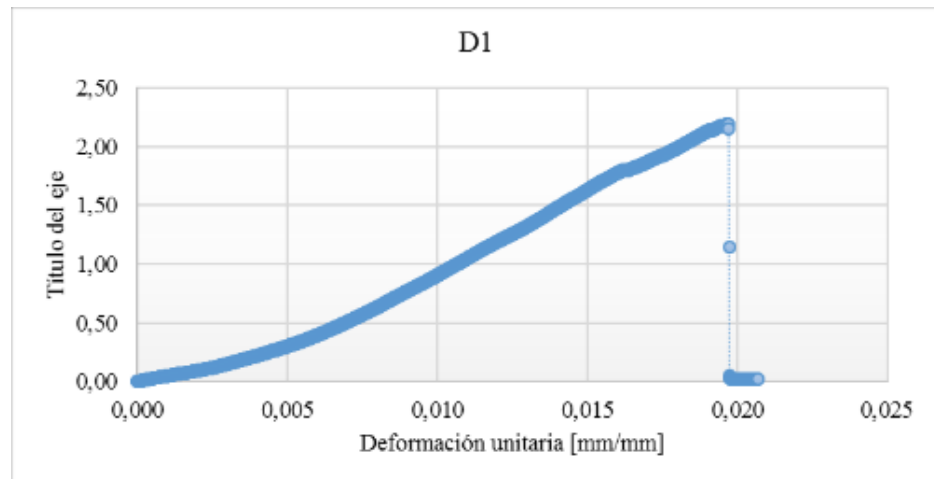
Probeta B1. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $\alpha = 45^\circ$, $p = 50\%$).



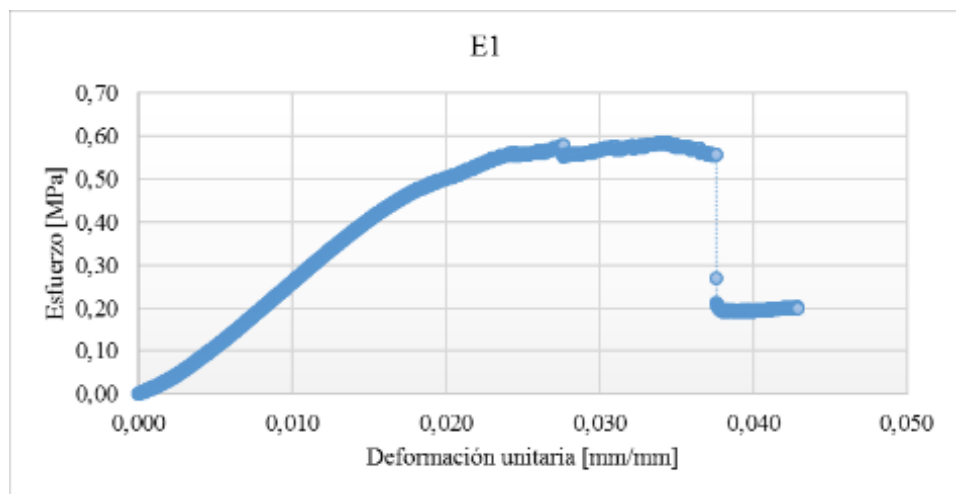
Probeta C1. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



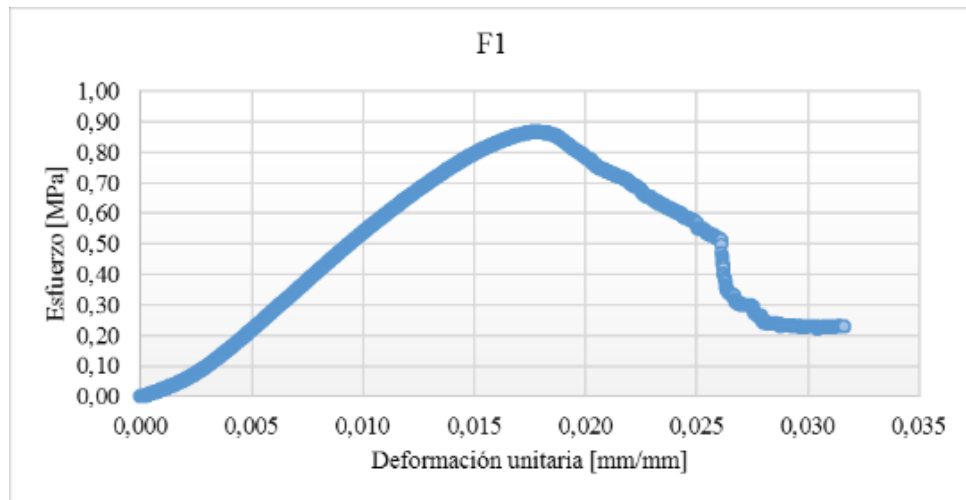
Probeta D1. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



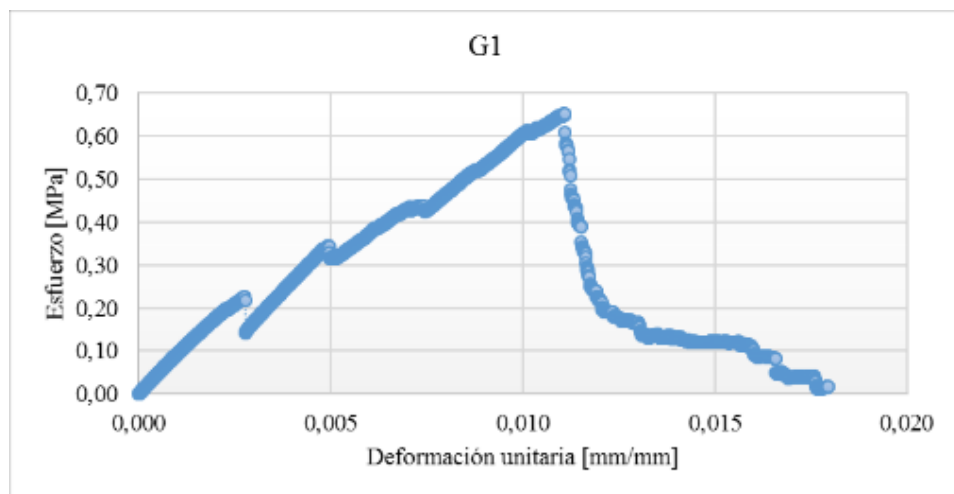
Probeta E1. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



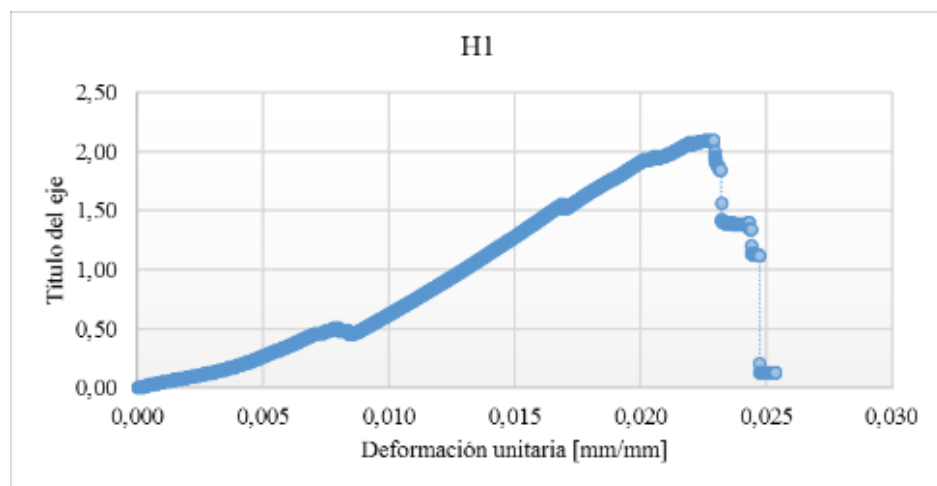
Probeta F1. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



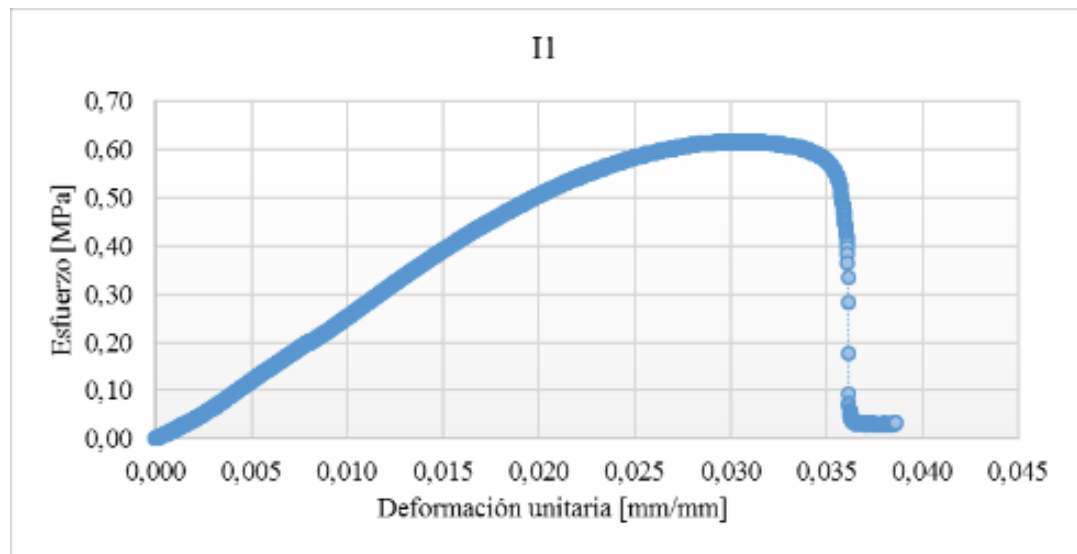
Probeta G1. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta H1. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



Probeta I1. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 22.5^\circ$, $p = 57.5\%$).



Probeta J1. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 67.5^\circ$, $p = 57.5\%$).

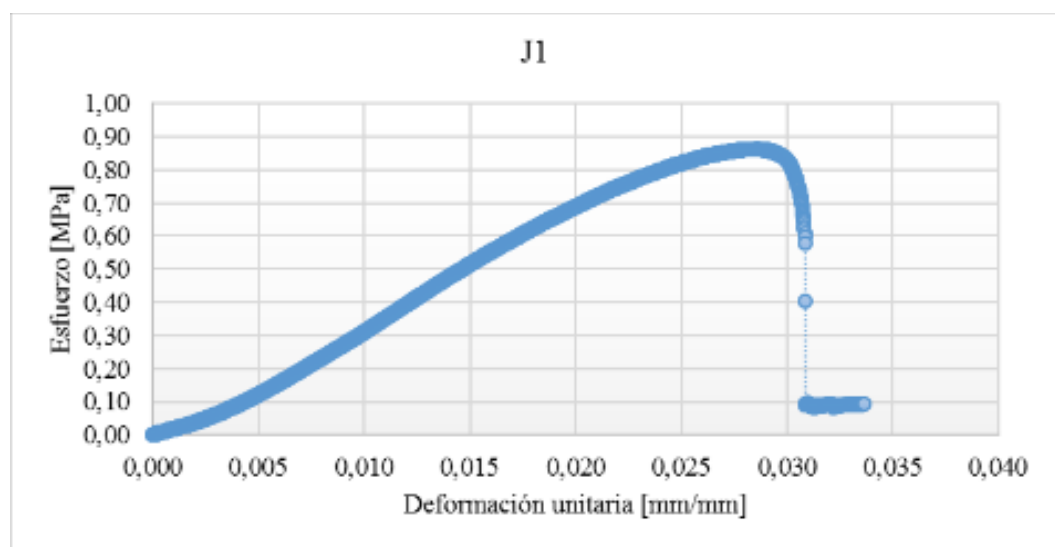
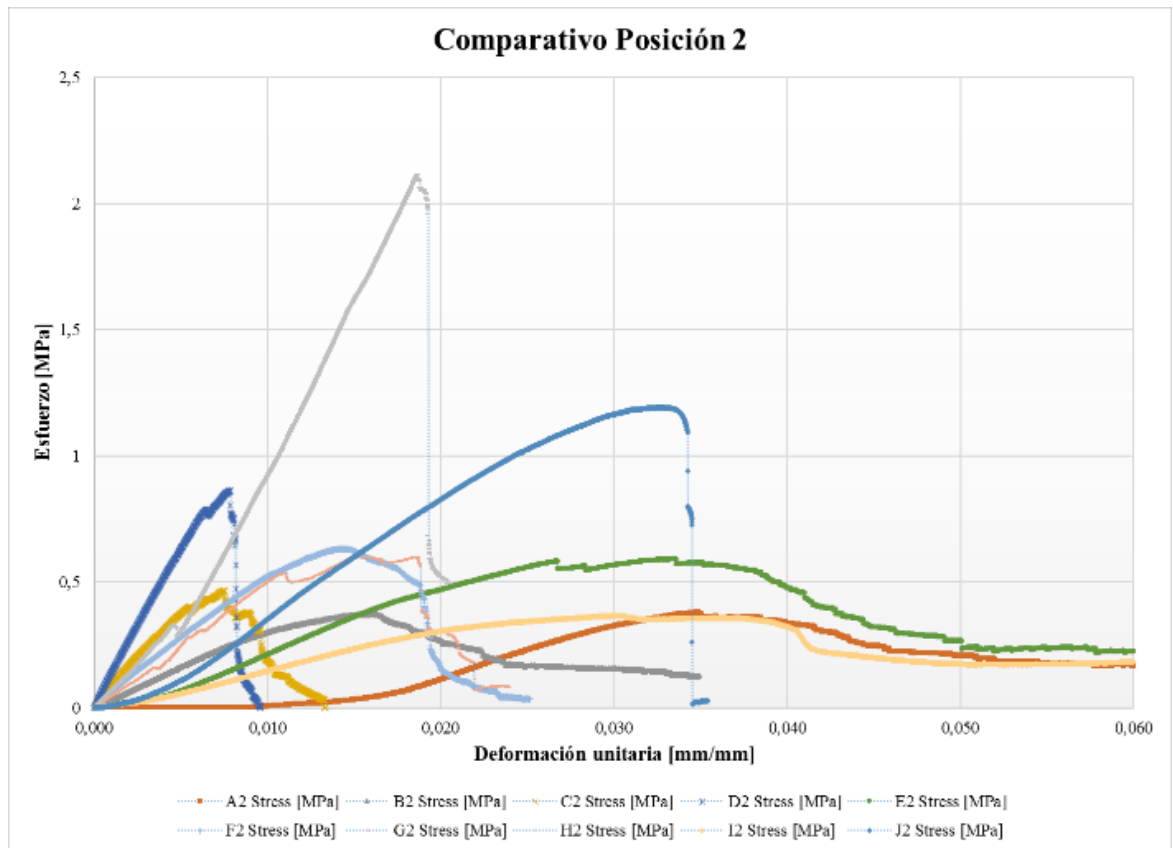
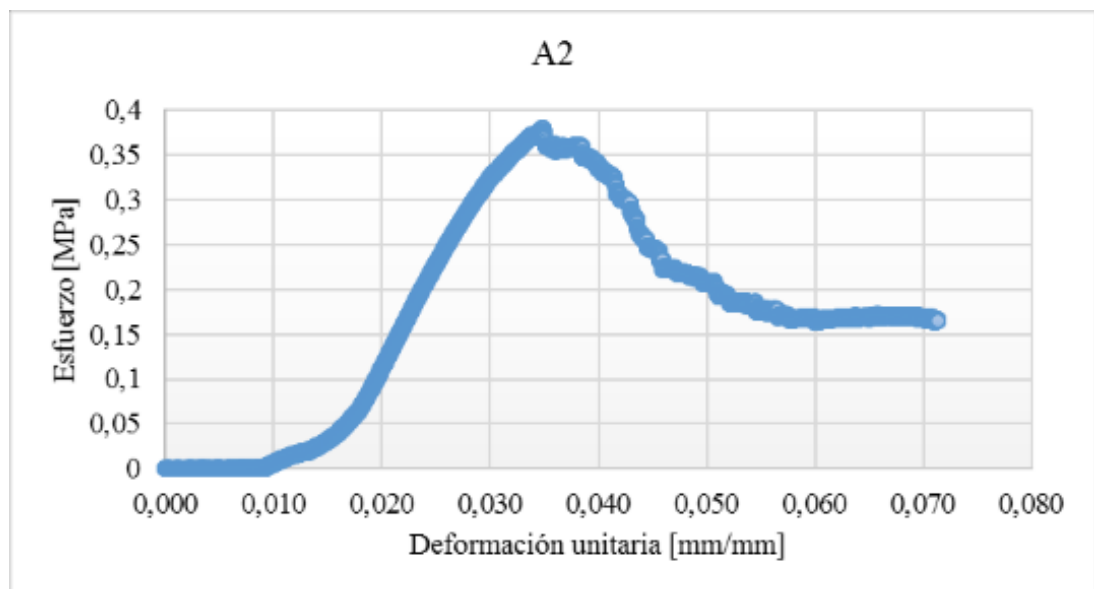


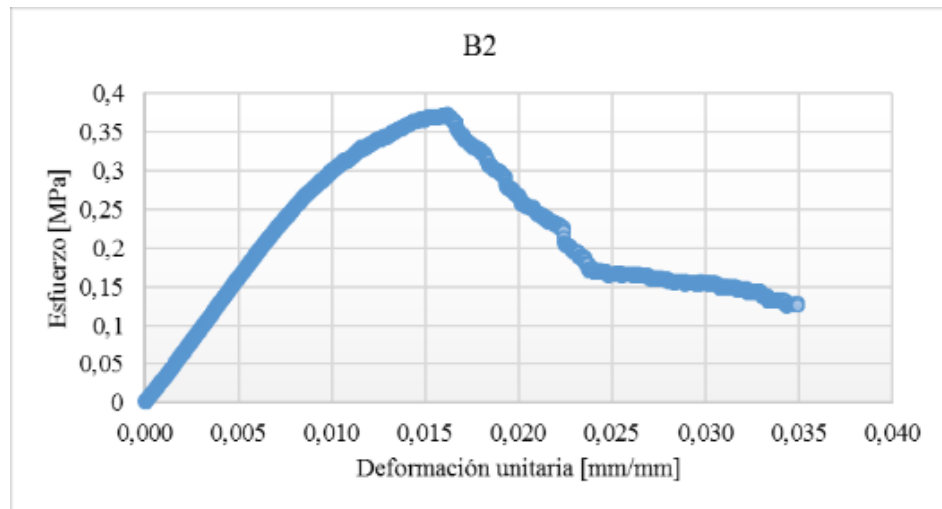
Gráfico comparativo de esfuerzo vs deformación en la Posición 2



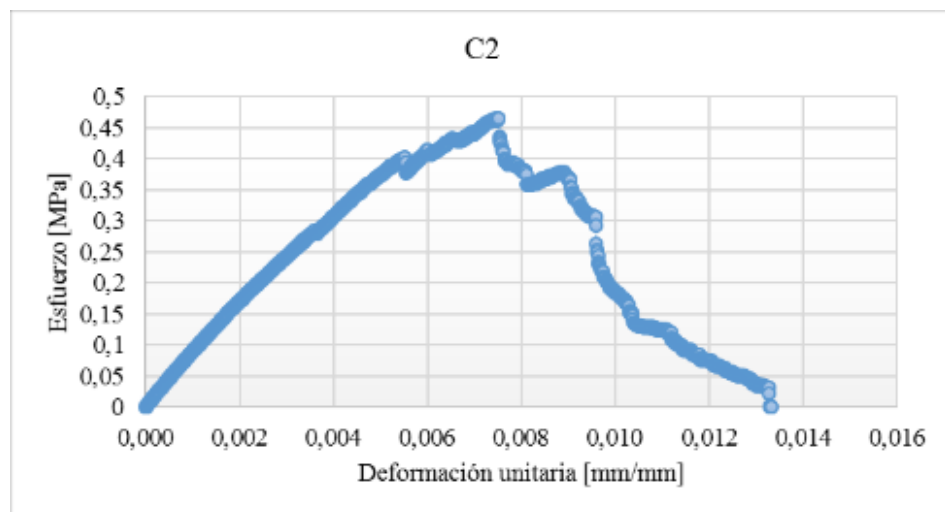
Probeta A2. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



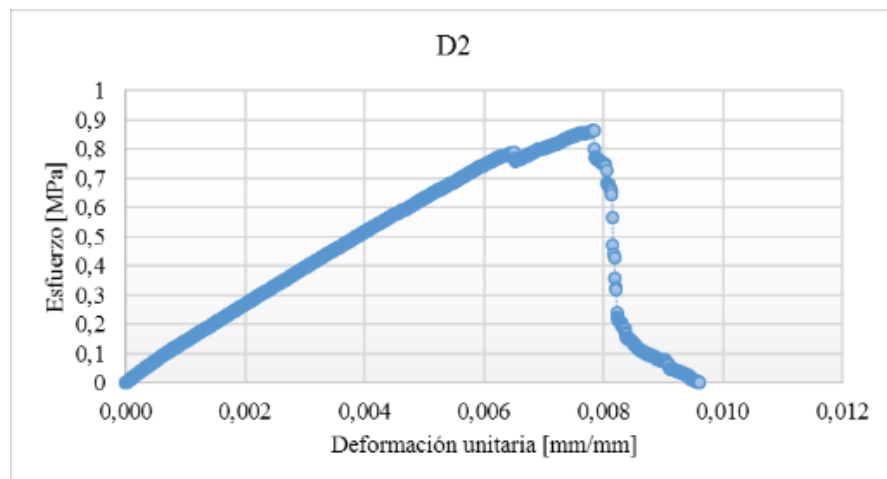
Probeta B2. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



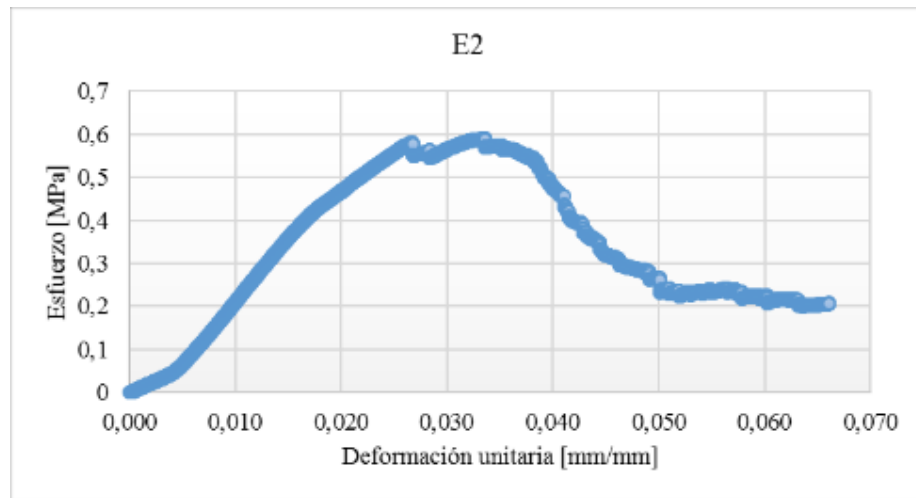
Probeta C2. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



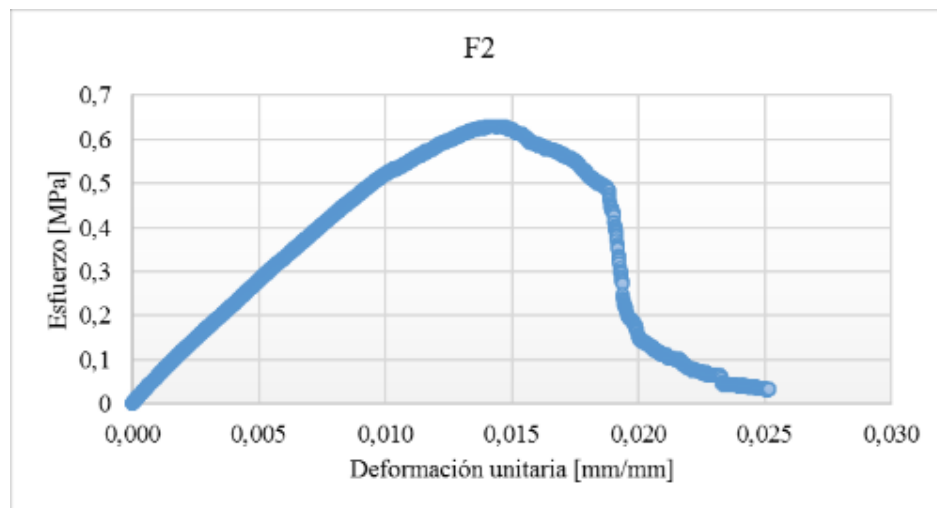
Probeta D2. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



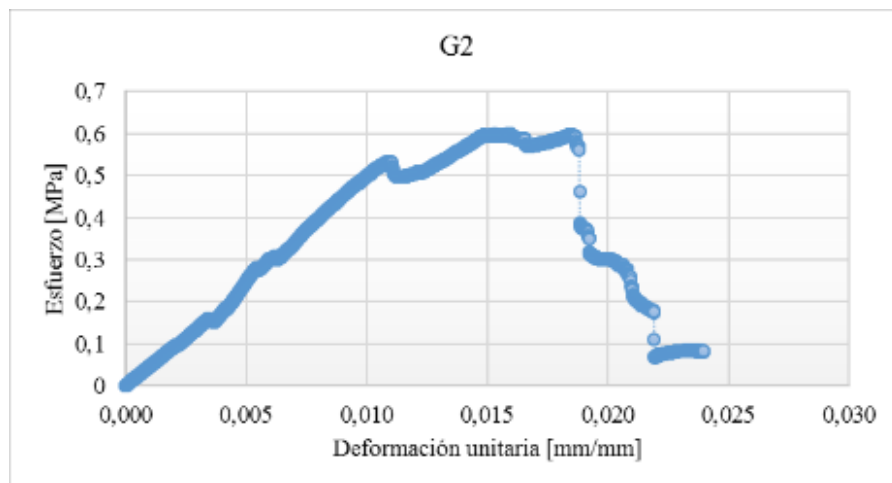
Probeta E2. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



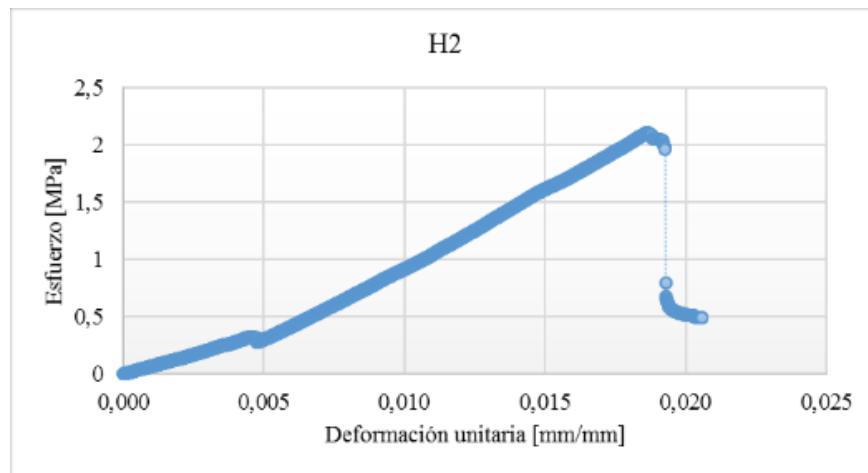
Probeta F2. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



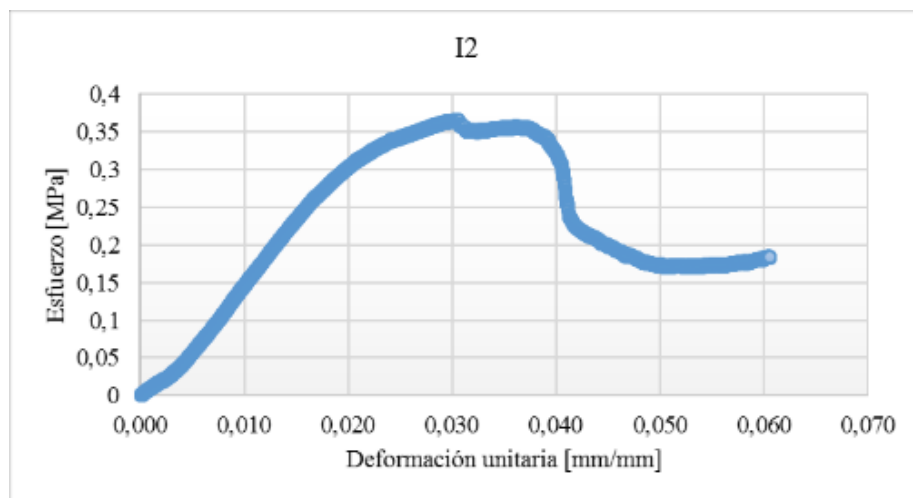
Probeta G2. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta H2. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



Probeta I2. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 22.5^\circ$, $p = 57.5\%$).



Probeta J2. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 67.5^\circ$, $p = 57.5\%$).

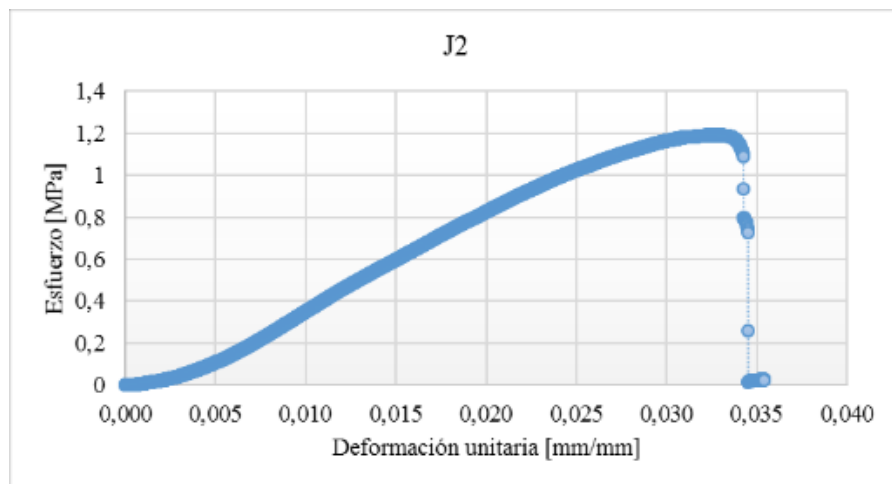
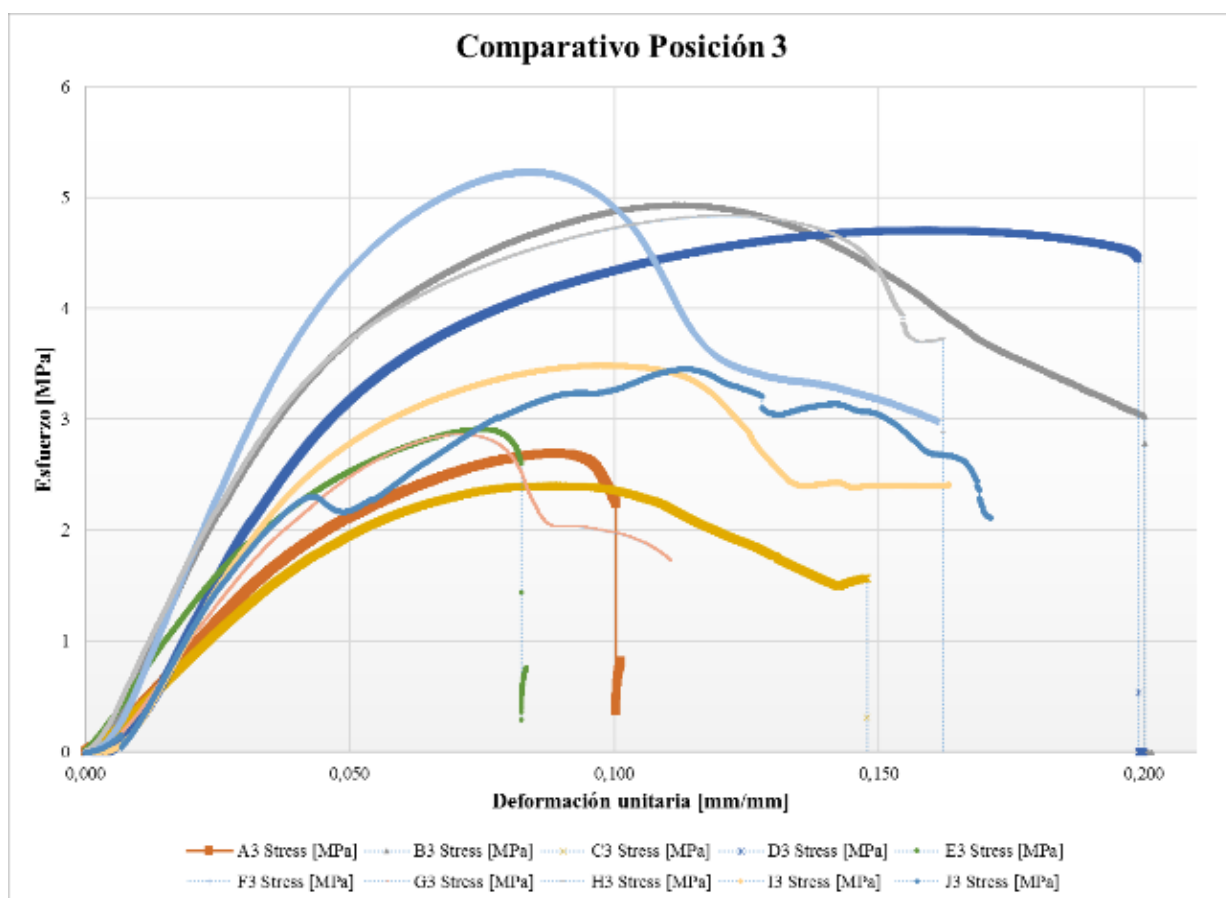
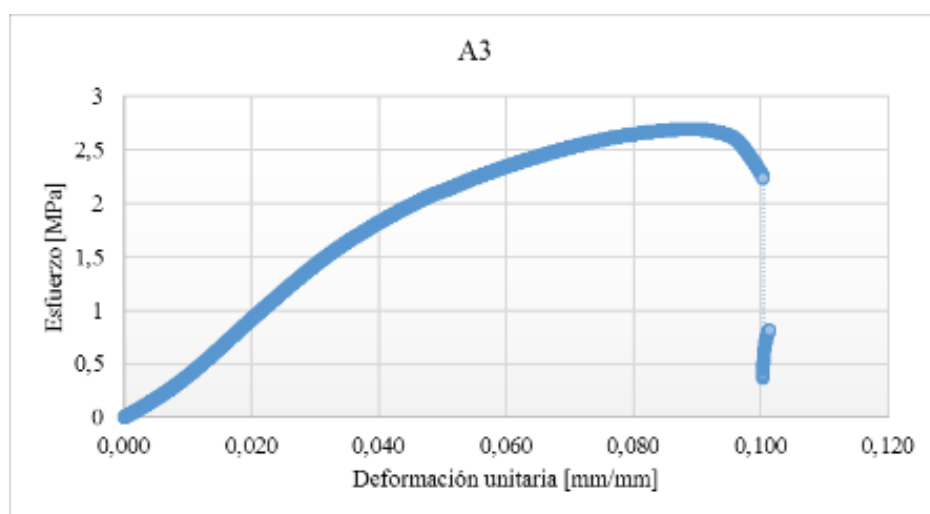


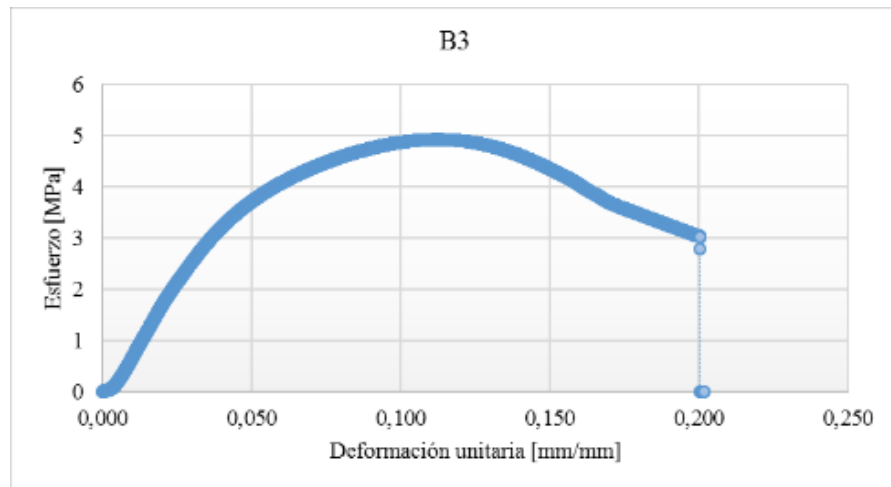
Gráfico comparativo de esfuerzo vs deformación en la Posición 3



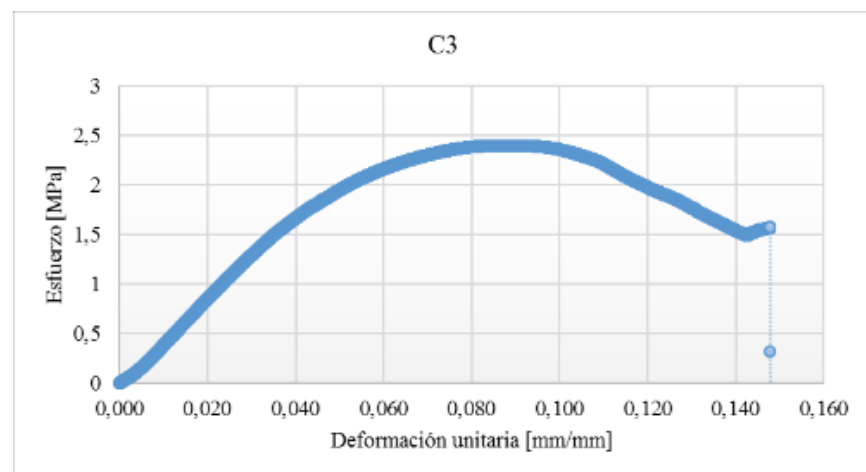
Probeta A3. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



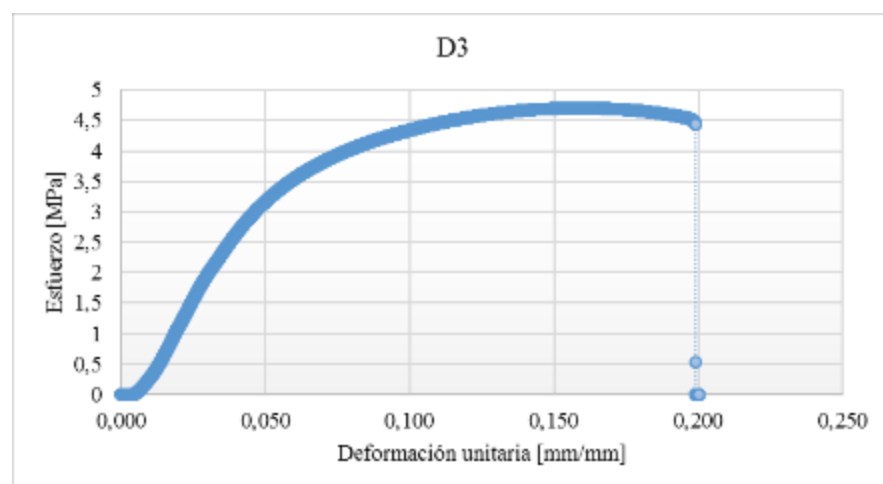
Probeta B3. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



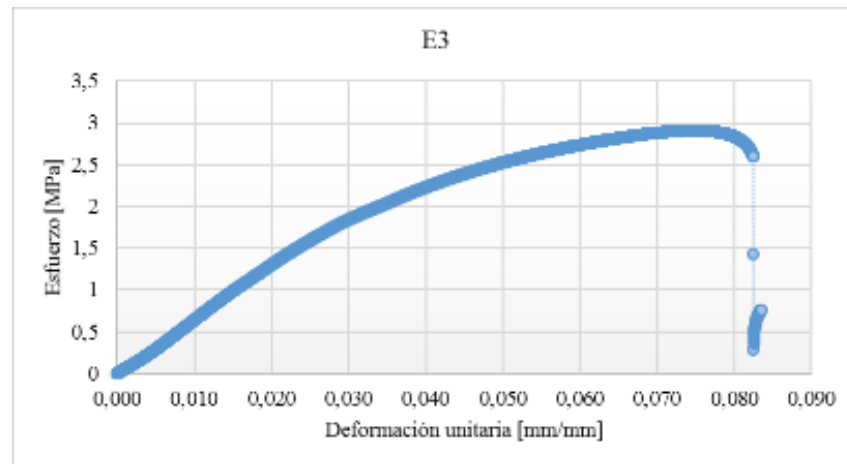
Probeta C3. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



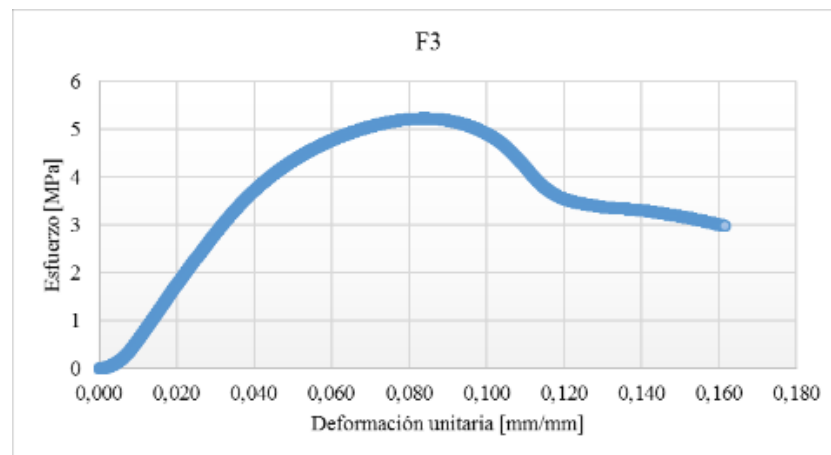
Probeta D3. Parámetros de impresión: ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



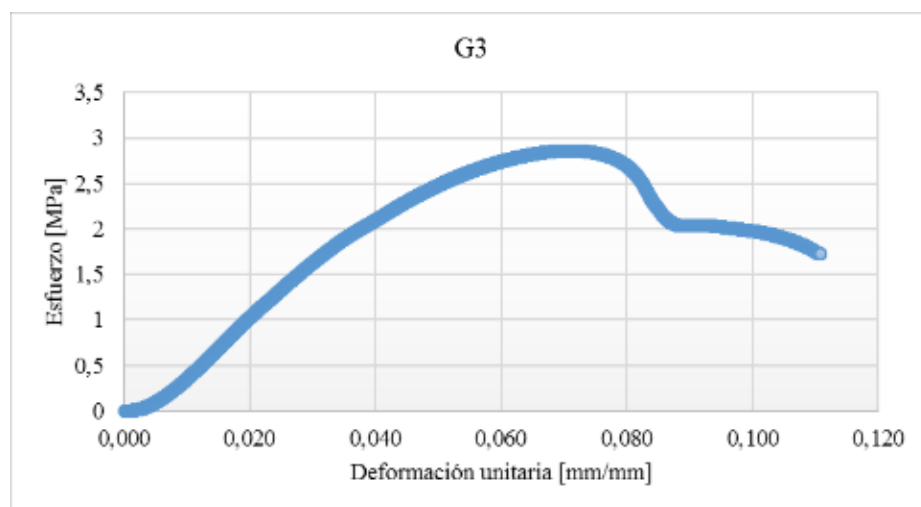
Probeta E3. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



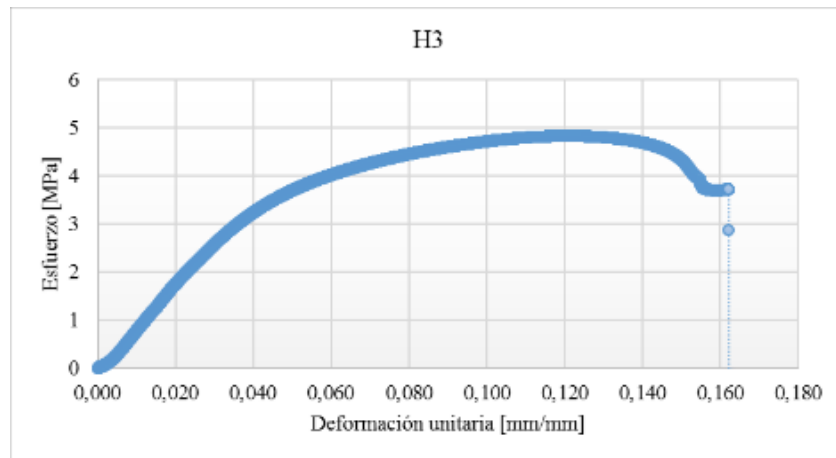
Probeta F3. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 45^\circ$, $p = 50\%$).



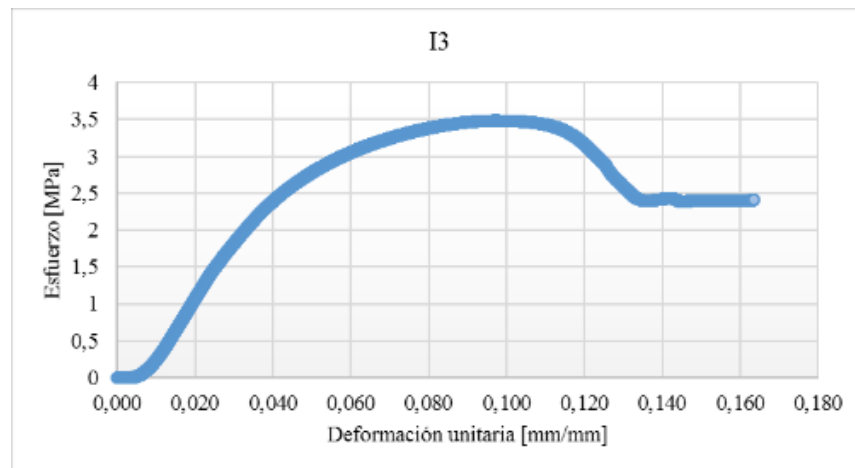
Probeta G3. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



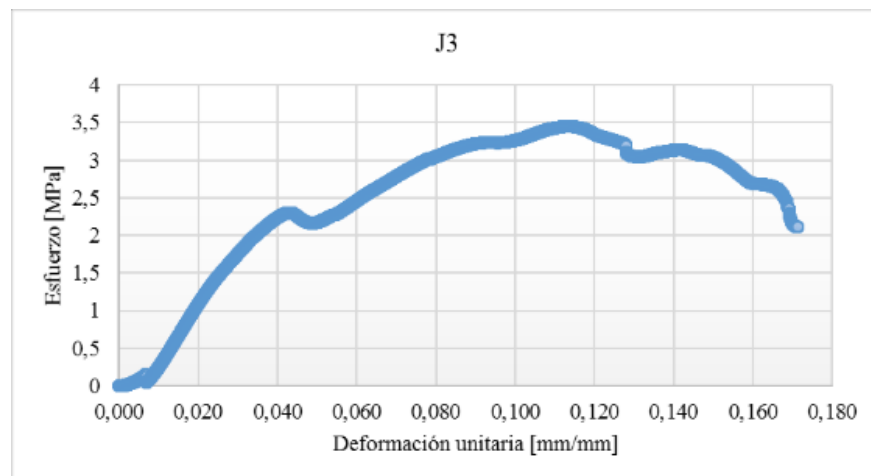
Probeta H3. Parámetros de impresión: ($e = 0.2$, $a = 0^\circ$, $p = 50\%$).



Probeta I3. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 22.5^\circ$, $p = 57.5\%$).



Probeta J3. Parámetros de impresión: ($e = 0.25$, $a = 67.5^\circ$, $p = 57.5\%$).



Anexo C. Regresiones múltiples de los parámetros de impresión vs propiedades mecánicas del PMMA.

Tensión

Posición 1

8 datos

General Regression Analysis: Modulo de Elasticidad versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Modulo de Elasticidad = 18,8818 - 21,9847 Espesor - 0,0891761 Angulo - 0,0993617 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	18,8818	4,60816	4,09748	0,015
Espesor	-21,9847	9,95107	-2,20928	0,092
Angulo	-0,0892	0,02211	-4,03266	0,016
Porosidad	-0,0994	0,06634	-1,49775	0,209

Summary of Model

S = 1,40729 R-Sq = 85,39% R-Sq(adj) = 74,44%
PRESS = 31,6876 R-Sq(pred) = 41,58%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	46,3165	46,3165	15,4388	7,7955	0,037995
Espesor	1	9,6666	9,6666	9,6666	4,8809	0,091699
Angulo	1	32,2071	32,2071	32,2071	16,2623	0,015699
Porosidad	1	4,4427	4,4427	4,4427	2,2433	0,208553
Error	4	7,9219	7,9219	1,9805		
Total	7	54,2384				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Elongación [%]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Elongación [%] versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Elongación [%] = 1,31386 + 5,03178 Espesor + 0,025357 Angulo + 0,00473427 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,31386	2,09384	0,62749	0,564
Espesor	5,03178	4,52153	1,11285	0,328
Angulo	0,02536	0,01005	2,52362	0,065
Porosidad	0,00473	0,03014	0,15706	0,883

Summary of Model

S = 0,639441 R-Sq = 65,61% R-Sq(adj) = 39,82%
 PRESS = 6,54216 R-Sq(pred) = -37,55%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	3,12051	3,12051	1,04017	2,54392	0,194401
Espesor	1	0,50638	0,50638	0,50638	1,23843	0,328140
Angulo	1	2,60405	2,60405	2,60405	6,36866	0,065105
Porosidad	1	0,01009	0,01009	0,01009	0,02467	0,882808
Error	4	1,63554	1,63554	0,40888		
Total	7	4,75605				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo [MPa]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Esfuerzo Máximo versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Esfuerzo Máximo [MPa] = 0,750916 - 0,61695 Espesor - 0,00288128 Angulo - 0,00642417 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,750916	0,194422	3,86229	0,018
Espesor	-0,616950	0,419845	-1,46947	0,216
Angulo	-0,002881	0,000933	-3,08822	0,037

Porosidad -0,006424 0,002799 -2,29519 0,083

Summary of Model

S = 0,0593750 R-Sq = 80,92% R-Sq(adj) = 66,61%
PRESS = 0,0564063 R-Sq(pred) = 23,68%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,0598061	0,0598061	0,0199354	5,65479	0,063749
Espesor	1	0,0076125	0,0076125	0,0076125	2,15934	0,215642
Angulo	1	0,0336221	0,0336221	0,0336221	9,53712	0,036638
Porosidad	1	0,0185715	0,0185715	0,0185715	5,26791	0,083379
Error	4	0,0141016	0,0141016	0,0035254		
Total	7	0,0739077				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

Tensión

Posición 1

8 datos + 2 puntos centrales

General Regression Analysis: Modulo de Elasti versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Modulo de Elasticidad = 18,2767 - 21,9848 Espesor - 0,0603872 Angulo - 0,0993617 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	18,2767	6,4129	2,85001	0,029
Espesor	-21,9848	13,8650	-1,58563	0,164
Angulo	-0,0604	0,0256	-2,36005	0,056
Porosidad	-0,0994	0,0924	-1,07496	0,324

Summary of Model

S = 1,96081 R-Sq = 60,63% R-Sq(adj) = 40,94%
PRESS = 60,4493 R-Sq(pred) = -3,17%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	35,5241	35,5241	11,8414	3,07987	0,111912
Espesor	1	9,6666	9,6666	9,6666	2,51423	0,163917
Angulo	1	21,4147	21,4147	21,4147	5,56986	0,056280
Porosidad	1	4,4427	4,4427	4,4427	1,15553	0,323710
Error	6	23,0685	23,0685	3,8448		

Total 9 58,5926

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Elongación [%]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Elongación [%] versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Elongación [%] = 1,48086 + 5,03178 Espesor + 0,0196895 Angulo + 0,00473427 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,48086	2,20224	0,67243	0,526
Espesor	5,03178	4,76137	1,05679	0,331
Angulo	0,01969	0,00879	2,24078	0,066
Porosidad	0,00473	0,03174	0,14915	0,886

Summary of Model

S = 0,673359 R-Sq = 50,66% R-Sq(adj) = 25,99%
PRESS = 7,27542 R-Sq(pred) = -31,95%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	2,79309	2,79309	0,93103	2,05339	0,207989
Espesor	1	0,50638	0,50638	0,50638	1,11681	0,331288
Angulo	1	2,27663	2,27663	2,27663	5,02110	0,066276
Porosidad	1	0,01009	0,01009	0,01009	0,02224	0,886325
Error	6	2,72048	2,72048	0,45341		
Total	9	5,51357				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo [MPa]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
```

```
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Esfuerzo Máximo versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Esfuerzo Máximo [MPa] = 0,73736 - 0,61695 Espesor - 0,0020765 Angulo - 0,00642417 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,737360	0,204390	3,60761	0,011
Espesor	-0,616950	0,441904	-1,39612	0,212
Angulo	-0,002076	0,000816	-2,54624	0,044
Porosidad	-0,006424	0,002946	-2,18062	0,072

Summary of Model

S = 0,0624946 R-Sq = 68,73% R-Sq(adj) = 53,09%
PRESS = 0,0686781 R-Sq(pred) = 8,35%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,0515053	0,0515053	0,0171684	4,39587	0,058475
Espesor	1	0,0076125	0,0076125	0,0076125	1,94915	0,212149
Angulo	1	0,0253213	0,0253213	0,0253213	6,48336	0,043711
Porosidad	1	0,0185715	0,0185715	0,0185715	4,75511	0,072000
Error	6	0,0234335	0,0234335	0,0039056		
Total	9	0,0749387				

Tensión

Posición 2

8 datos

General Regression Analysis: Modulo de Elasti versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Modulo de Elasticidad = 12,7673 - 16,5145 Espesor - 0,00363 Angulo - 0,0955333 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12,7673	1,86581	6,84279	0,002
Espesor	-16,5145	4,02912	-4,09879	0,015
Angulo	-0,0036	0,00895	-0,40542	0,706
Porosidad	-0,0955	0,02686	-3,55661	0,024

Summary of Model

S = 0,569803 R-Sq = 88,10% R-Sq(adj) = 79,18%
 PRESS = 5,19481 R-Sq(pred) = 52,40%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	9,6149	9,61492	3,20497	9,8713	0,025473
Espesor	1	5,4546	5,45457	5,45457	16,8001	0,014868
Angulo	1	0,0534	0,05337	0,05337	0,1644	0,705914
Porosidad	1	4,1070	4,10698	4,10698	12,6495	0,023658
Error	4	1,2987	1,29870	0,32468		
Total	7	10,9136				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Elongación [%]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Elongación [%] versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Elongación [%] = -7,05083 + 23,575 Espesor + 0,0186111 Angulo + 0,107167 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-7,0508	5,5190	-1,27755	0,271
Espesor	23,5750	11,9181	1,97809	0,119
Angulo	0,0186	0,0265	0,70271	0,521
Porosidad	0,1072	0,0795	1,34879	0,249

Summary of Model

S = 1,68547 R-Sq = 60,88% R-Sq(adj) = 31,55%
 PRESS = 45,453 R-Sq(pred) = -56,47%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	17,6865	17,6865	5,8955	2,07529	0,246198
Espesor	1	11,1156	11,1156	11,1156	3,91283	0,119062
Angulo	1	1,4028	1,4028	1,4028	0,49381	0,520977
Porosidad	1	5,1681	5,1681	5,1681	1,81924	0,248706
Error	4	11,3633	11,3633	2,8408		

Total 7 29,0498

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo [MPa]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Esfuerzo Máximo versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Esfuerzo Máximo [MPa] = 0,697667 - 0,615 Espesor - 0,00421111 Angulo - 0,00483333 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,697667	0,143050	4,87708	0,008
Espesor	-0,615000	0,308909	-1,99088	0,117
Angulo	-0,004211	0,000686	-6,13449	0,004
Porosidad	-0,004833	0,002059	-2,34697	0,079

Summary of Model

S = 0,0436864 R-Sq = 92,17% R-Sq(adj) = 86,30%
PRESS = 0,030536 R-Sq(pred) = 68,69%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,0898975	0,0898975	0,0299658	15,7012	0,011183
Espesor	1	0,0075645	0,0075645	0,0075645	3,9636	0,117333
Angulo	1	0,0718205	0,0718205	0,0718205	37,6319	0,003579
Porosidad	1	0,0105125	0,0105125	0,0105125	5,5083	0,078776
Error	4	0,0076340	0,0076340	0,0019085		
Total	7	0,0975315				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

Tensión

8 datos + 2 puntos centrales

General Regression Analysis: Modulo de Elasti versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Modulo de Elasticidad = 12,6381 - 16,5145 Espesor + 0,00827425 Angulo - 0,0955333 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12,6381	2,37932	5,31163	0,002
Espesor	-16,5145	5,14423	-3,21029	0,018
Angulo	0,0083	0,00949	0,87157	0,417
Porosidad	-0,0955	0,03429	-2,78564	0,032

Summary of Model

S = 0,727504 R-Sq = 75,83% R-Sq(adj) = 63,75%
 PRESS = 9,21920 R-Sq(pred) = 29,83%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	9,9636	9,96360	3,32120	6,2751	0,027932
Espesor	1	5,4546	5,45457	5,45457	10,3060	0,018360
Angulo	1	0,4021	0,40205	0,40205	0,7596	0,416947
Porosidad	1	4,1070	4,10698	4,10698	7,7598	0,031760
Error	6	3,1756	3,17558	0,52926		
Total	9	13,1392				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Elongación [%]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Elongación [%] versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Elongación [%] = -6,75359 + 23,575 Espesor - 4,5977e-005 Angulo + 0,107167 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-6,7536	5,3742	-1,25667	0,256

Espesor	23,5750	11,6193	2,02895	0,089
Angulo	-0,0000	0,0214	-0,00214	0,998
Porosidad	0,1072	0,0775	1,38348	0,216

Summary of Model

S = 1,64322 R-Sq = 50,13% R-Sq(adj) = 25,19%
PRESS = 48,2291 R-Sq(pred) = -48,47%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	16,2837	16,2837	5,4279	2,01022	0,214078
Espesor	1	11,1156	11,1156	11,1156	4,11665	0,088792
Angulo	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00000	0,998359
Porosidad	1	5,1681	5,1681	5,1681	1,91400	0,215793
Error	6	16,2010	16,2010	2,7002		
Total	9	32,4847				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Elongación [%]	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
8	10,08	7,28267	1,04596	2,79733	2,20726 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo [MPa]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Esfuerzo Máximo versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Esfuerzo Máximo [MPa] = 0,678718 - 0,615 Espesor - 0,00303525 Angulo - 0,00483333 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,678718	0,219305	3,09486	0,021
Espesor	-0,615000	0,474149	-1,29706	0,242
Angulo	-0,003035	0,000875	-3,46877	0,013
Porosidad	-0,004833	0,003161	-1,52905	0,177

Summary of Model

S = 0,0670548 R-Sq = 72,79% R-Sq(adj) = 59,19%
PRESS = 0,0757419 R-Sq(pred) = 23,61%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,0721788	0,0721788	0,0240596	5,3509	0,039285
Espesor	1	0,0075645	0,0075645	0,0075645	1,6824	0,242251
Angulo	1	0,0541018	0,0541018	0,0541018	12,0324	0,013324
Porosidad	1	0,0105125	0,0105125	0,0105125	2,3380	0,177118
Error	6	0,0269781	0,0269781	0,0044964		
Total	9	0,0991569				

Compresión

Posición 1-2

16 datos

General Regression Analysis: Modulo de Elasti versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Modulo de Elasticidad = 122,781 + 77,2638 Espesor - 0,853864 Angulo - 1,23029 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	122,781	38,1785	3,21598	0,007
Espesor	77,264	82,4444	0,93716	0,367
Angulo	-0,854	0,1832	-4,66058	0,001
Porosidad	-1,230	0,5496	-2,23840	0,045

Summary of Model

S = 16,4889 R-Sq = 69,70% R-Sq(adj) = 62,13%
PRESS = 5800,17 R-Sq(pred) = 46,14%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	7506,6	7506,62	2502,21	9,2033	0,001950
Espesor	1	238,8	238,79	238,79	0,8783	0,367154
Angulo	1	5905,6	5905,58	5905,58	21,7210	0,000550
Porosidad	1	1362,3	1362,26	1362,26	5,0105	0,044926
Error	12	3262,6	3262,59	271,88		
Lack-of-Fit	4	1570,7	1570,70	392,67	1,8567	0,211579
Pure Error	8	1691,9	1691,90	211,49		
Total	15	10769,2				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Modulo de Elasticidad	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
10	121,05	84,4456	8,24444	36,6044	2,56337 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

MTB > GReg 'Elongación [%]' = Espesor-Porosidad;

```

SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.

```

General Regression Analysis: Elongación [%] versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Elongación [%] = -0,141667 - 2,5625 Espesor + 0,0254722 Angulo + 0,0380833 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,14167	1,81268	-0,07815	0,939
Espesor	-2,56250	3,91439	-0,65464	0,525
Angulo	0,02547	0,00870	2,92830	0,013
Porosidad	0,03808	0,02610	1,45936	0,170

Summary of Model

S = 0,782878 R-Sq = 48,13% R-Sq(adj) = 35,16%
PRESS = 13,0752 R-Sq(pred) = 7,78%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	6,8235	6,82352	2,27451	3,7111	0,042514
Espesor	1	0,2627	0,26266	0,26266	0,4285	0,525051
Angulo	1	5,2556	5,25556	5,25556	8,5749	0,012644
Porosidad	1	1,3053	1,30531	1,30531	2,1297	0,170143
Error	12	7,3548	7,35477	0,61290		
Lack-of-Fit	4	6,3495	6,34952	1,58738	12,6327	0,001554
Pure Error	8	1,0052	1,00525	0,12566		
Total	15	14,1783				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```

MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo [MPa]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.

```

General Regression Analysis: Esfuerzo Máximo versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

$$\text{Esfuerzo Máximo [MPa]} = 4,62204 - 3,2375 \text{ Espesor} - 0,0143278 \text{ Angulo} - 0,0458333 \text{ Porosidad}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,62204	1,03686	4,45773	0,001
Espesor	-3,23750	2,23905	-1,44593	0,174
Angulo	-0,01433	0,00498	-2,87958	0,014
Porosidad	-0,04583	0,01493	-3,07050	0,010

Summary of Model

S = 0,447809 R-Sq = 62,28% R-Sq(adj) = 52,85%
 PRESS = 4,27804 R-Sq(pred) = 32,94%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	3,97269	3,97269	1,32423	6,60355	0,006948
Espesor	1	0,41926	0,41926	0,41926	2,09071	0,173805
Angulo	1	1,66281	1,66281	1,66281	8,29195	0,013842
Porosidad	1	1,89063	1,89062	1,89062	9,42800	0,009708
Error	12	2,40640	2,40640	0,20053		
Lack-of-Fit	4	1,48718	1,48718	0,37180	3,23578	0,073923
Pure Error	8	0,91921	0,91921	0,11490		
Total	15	6,37909				

Compresión

Posición 1-2

16 datos + dos puntos centrales

General Regression Analysis: Modulo de Elasti versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

$$\text{Modulo de Elasticidad} = 117,619 + 77,2638 \text{ Espesor} - 0,726425 \text{ Angulo} - 1,23029 \text{ Porosidad}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	117,619	43,3436	2,71365	0,015
Espesor	77,264	93,7112	0,82449	0,422
Angulo	-0,726	0,1729	-4,20045	0,001
Porosidad	-1,230	0,6247	-1,96928	0,066

Summary of Model

S = 18,7422 R-Sq = 58,12% R-Sq(adj) = 50,26%
 PRESS = 8336,16 R-Sq(pred) = 37,88%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	7798,8	7798,81	2599,60	7,4005	0,002503
Espesor	1	238,8	238,79	238,79	0,6798	0,421784
Angulo	1	6197,8	6197,76	6197,76	17,6438	0,000678
Porosidad	1	1362,3	1362,26	1362,26	3,8781	0,066489
Error	16	5620,3	5620,35	351,27		
Lack-of-Fit	6	3828,9	3828,85	638,14	3,5621	0,037406
Pure Error	10	1791,5	1791,50	179,15		
Total	19	13419,2				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Modulo de Elasticidad	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
10	121,05	79,2836	9,12555	41,7664	2,55131	R
18	12,98	49,8487	4,26254	-36,8687	-2,02008	R

R denotes an observation with a large standardized residual.

```
MTB > GReg 'Elongación [%]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Elongación [%] versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Elongación [%] = -0,00511494 - 2,5625 Espesor + 0,0242759 Angulo + 0,0380833 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,00511	1,79274	-0,00285	0,998
Espesor	-2,56250	3,87601	-0,66112	0,518
Angulo	0,02428	0,00715	3,39380	0,004
Porosidad	0,03808	0,02584	1,47381	0,160

Summary of Model

S = 0,775202 R-Sq = 46,89% R-Sq(adj) = 36,93%
PRESS = 14,8399 R-Sq(pred) = 18,03%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	8,4895	8,48950	2,82983	4,7090	0,015333
Espesor	1	0,2627	0,26266	0,26266	0,4371	0,517944
Angulo	1	6,9215	6,92153	6,92153	11,5179	0,003708
Porosidad	1	1,3053	1,30531	1,30531	2,1721	0,159935

Error	16	9,6150	9,61500	0,60094		
Lack-of-Fit	6	8,5160	8,51605	1,41934	12,9154	0,000335
Pure Error	10	1,0989	1,09895	0,10989		
Total	19	18,1045				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo [MPa]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Esfuerzo Máximo versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Esfuerzo Máximo [MPa] = 4,50768 - 3,2375 Espesor - 0,00840881 Angulo - 0,0458333 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,50768	1,10317	4,08611	0,001
Espesor	-3,23750	2,38512	-1,35738	0,194
Angulo	-0,00841	0,00440	-1,91039	0,074
Porosidad	-0,04583	0,01590	-2,88246	0,011

Summary of Model

S = 0,477023 R-Sq = 46,31% R-Sq(adj) = 36,24%
PRESS = 5,80338 R-Sq(pred) = 14,42%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	3,14035	3,14035	1,04678	4,60021	0,016646
Espesor	1	0,41926	0,41926	0,41926	1,84247	0,193501
Angulo	1	0,83047	0,83047	0,83047	3,64958	0,074174
Porosidad	1	1,89062	1,89063	1,89063	8,30857	0,010828
Error	16	3,64082	3,64082	0,22755		
Lack-of-Fit	6	2,63632	2,63632	0,43939	4,37416	0,019960
Pure Error	10	1,00450	1,00450	0,10045		
Total	19	6,78117				

Compresión

Posición 3

8 datos

General Regression Analysis: Modulo de Elasti versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Modulo de Elasticidad = 187,719 - 107,463 Espesor - 0,0404944 Angulo - 1,76678 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	187,719	40,8327	4,59727	0,010
Espesor	-107,463	88,1761	-1,21873	0,290
Angulo	-0,040	0,1959	-0,20666	0,846
Porosidad	-1,767	0,5878	-3,00555	0,040

Summary of Model

S = 12,4700 R-Sq = 72,53% R-Sq(adj) = 51,93%
PRESS = 2488,01 R-Sq(pred) = -9,88%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	1642,29	1642,29	547,43	3,52044	0,127779
Espesor	1	230,96	230,96	230,96	1,48529	0,289907
Angulo	1	6,64	6,64	6,64	0,04271	0,846369
Porosidad	1	1404,69	1404,69	1404,69	9,03332	0,039724
Error	4	622,00	622,00	155,50		
Total	7	2264,29				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Elongación [%]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Elongación [%] versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Elongación [%] = 19,2783 + 25,175 Espesor - 0,0459444 Angulo - 0,252167 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	19,2783	5,5711	3,46043	0,026
Espesor	25,1750	12,0305	2,09261	0,105

Angulo	-0,0459	0,0267	-1,71855	0,161
Porosidad	-0,2522	0,0802	-3,14410	0,035

Summary of Model

S = 1,70136 R-Sq = 81,15% R-Sq(adj) = 67,01%
PRESS = 46,3142 R-Sq(pred) = 24,59%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	49,8393	49,8393	16,6131	5,73927	0,062290
Espesor	1	12,6756	12,6756	12,6756	4,37900	0,104523
Angulo	1	8,5491	8,5491	8,5491	2,95343	0,160822
Porosidad	1	28,6146	28,6146	28,6146	9,88539	0,034710
Error	4	11,5785	11,5785	2,8946		
Total	7	61,4179				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo [MPa]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Esfuerzo Máximo versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Esfuerzo Máximo [MPa] = 12,8639 - 2,7775 Espesor + 0,00531667 Angulo - 0,147283 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12,8639	0,325212	39,5555	0,000
Espesor	-2,7775	0,702278	-3,9550	0,017
Angulo	0,0053	0,001561	3,4068	0,027
Porosidad	-0,1473	0,004682	-31,4584	0,000

Summary of Model

S = 0,0993170 R-Sq = 99,61% R-Sq(adj) = 99,31%
PRESS = 0,157822 R-Sq(pred) = 98,43%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	10,0303	10,0303	3,34345	338,959	0,0000287

Espesor	1	0,1543	0,1543	0,15429	15,642	0,0167478
Angulo	1	0,1145	0,1145	0,11448	11,606	0,0271078
Porosidad	1	9,7616	9,7616	9,76157	989,628	0,0000061
Error	4	0,0395	0,0395	0,00986		
Total	7	10,0698				

Compresión

Posición 3

8 datos + dos puntos centrales

General Regression Analysis: Modulo de Elasti versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

Modulo de Elasticidad = 186,486 - 107,463 Espesor - 0,242813 Angulo - 1,76678 Porosidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	186,486	62,271	2,99476	0,024
Espesor	-107,463	134,633	-0,79819	0,455
Angulo	-0,243	0,248	-0,97727	0,366
Porosidad	-1,767	0,898	-1,96844	0,097

Summary of Model

S = 19,0400 R-Sq = 47,68% R-Sq(adj) = 21,51%
PRESS = 5146,70 R-Sq(pred) = -23,81%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	1981,88	1981,88	660,63	1,82231	0,243455
Espesor	1	230,96	230,96	230,96	0,63710	0,455184
Angulo	1	346,23	346,23	346,23	0,95507	0,366175
Porosidad	1	1404,69	1404,69	1404,69	3,87477	0,096558
Error	6	2175,13	2175,13	362,52		
Total	9	4157,01				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Elongación [%]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Elongación [%] versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

$$\text{Elongación [\%]} = 18,9482 + 25,175 \text{ Espesor} - 0,0220153 \text{ Angulo} - 0,252167 \text{ Porosidad}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	18,9482	5,8383	3,24550	0,018
Espesor	25,1750	12,6228	1,99441	0,093
Angulo	-0,0220	0,0233	-0,94508	0,381
Porosidad	-0,2522	0,0842	-2,99657	0,024

Summary of Model

S = 1,78513 R-Sq = 69,77% R-Sq(adj) = 54,66%
PRESS = 57,7677 R-Sq(pred) = 8,68%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	44,1365	44,1365	14,7122	4,61677	0,053085
Espesor	1	12,6756	12,6756	12,6756	3,97769	0,093145
Angulo	1	2,8463	2,8463	2,8463	0,89317	0,381105
Porosidad	1	28,6146	28,6146	28,6146	8,97944	0,024115
Error	6	19,1201	19,1201	3,1867		
Total	9	63,2566				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo [MPa]' = Espesor-Porosidad;
SUBC> Constant;
SUBC> Confidence 95,0;
SUBC> Tolerance 1,0E-12;
SUBC> Coding -1;
SUBC> TEquation;
SUBC> TCoef;
SUBC> TSummary;
SUBC> TANOVA;
SUBC> TDiag 0.
```

General Regression Analysis: Esfuerzo Máximo versus Espesor; Angulo; Porosidad

Regression Equation

$$\text{Esfuerzo Máximo [MPa]} = 12,876 - 2,7775 \text{ Espesor} + 0,00137548 \text{ Angulo} - 0,147283 \text{ Porosidad}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12,8760	0,78031	16,5012	0,000
Espesor	-2,7775	1,68707	-1,6463	0,151

Angulo	0,0014	0,00311	0,4418	0,674
Porosidad	-0,1473	0,01125	-13,0952	0,000

Summary of Model

S = 0,238588 R-Sq = 96,67% R-Sq(adj) = 95,01%
PRESS = 0,857197 R-Sq(pred) = 91,65%

Analysis of Variance

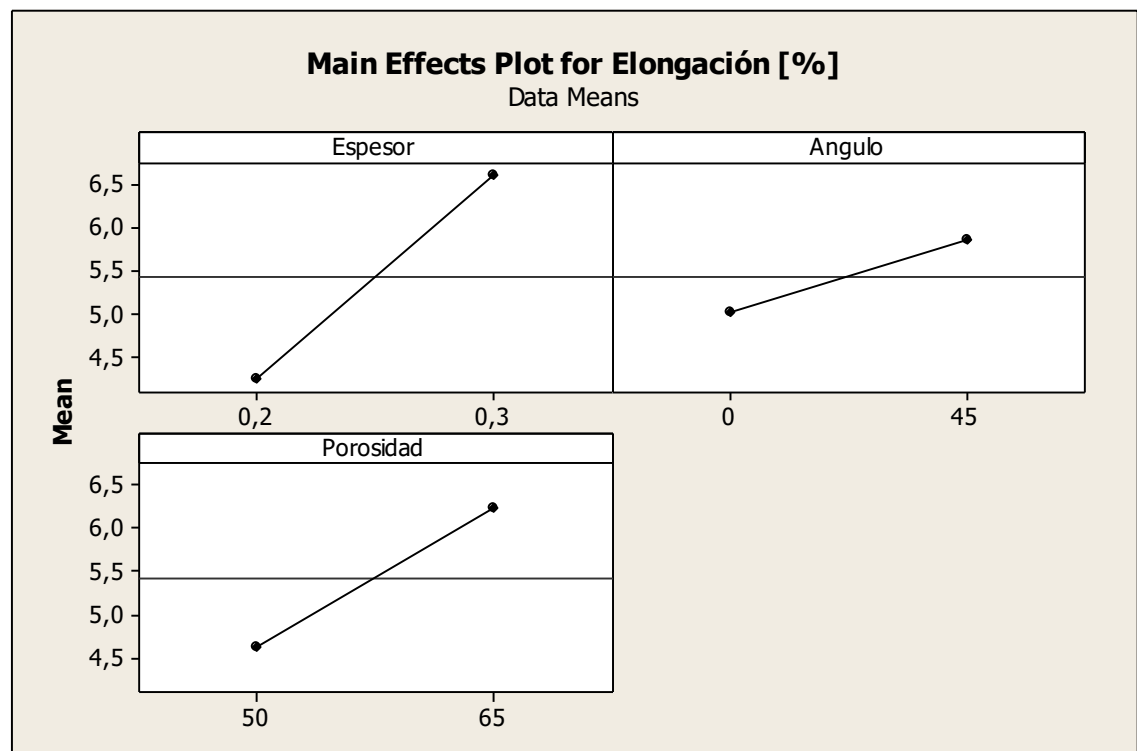
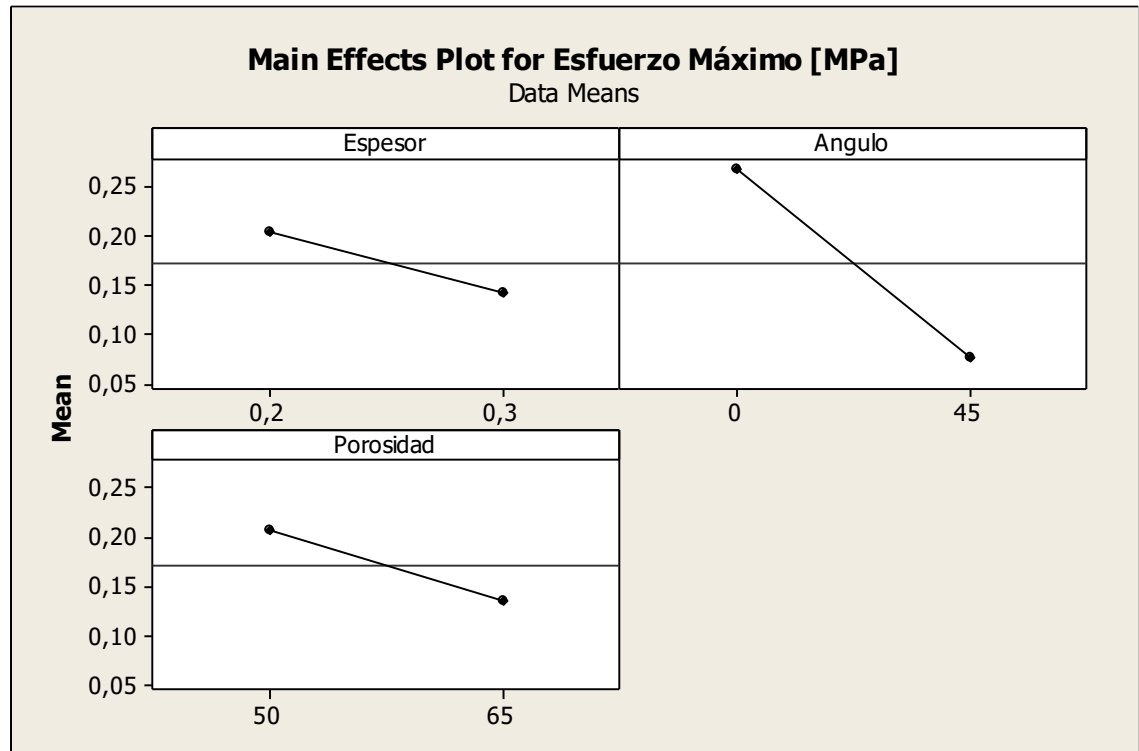
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	9,9270	9,92697	3,30899	58,130	0,000079
Espesor	1	0,1543	0,15429	0,15429	2,710	0,150793
Angulo	1	0,0111	0,01111	0,01111	0,195	0,674117
Porosidad	1	9,7616	9,76157	9,76157	171,484	0,000012
Error	6	0,3415	0,34154	0,05692		
Total	9	10,2685				

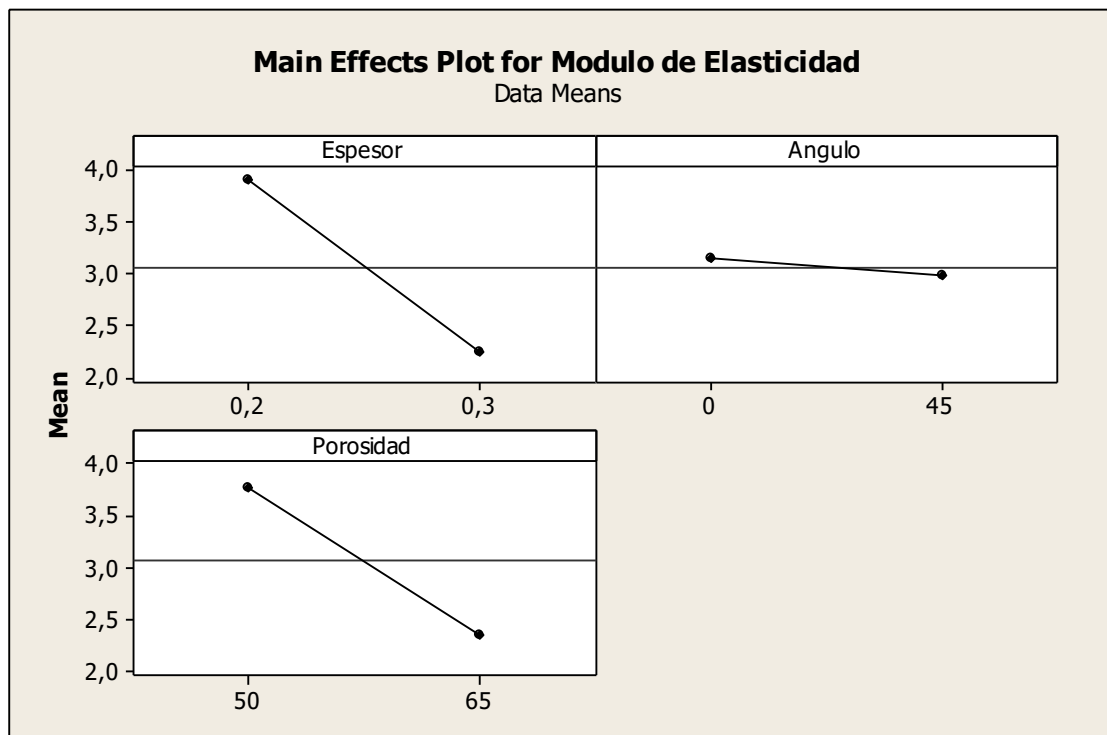
Anexo D. Gráficas de regresiones para cada ANOVA.

Gráficas de regresiones para cada ANOVA. Tensión.

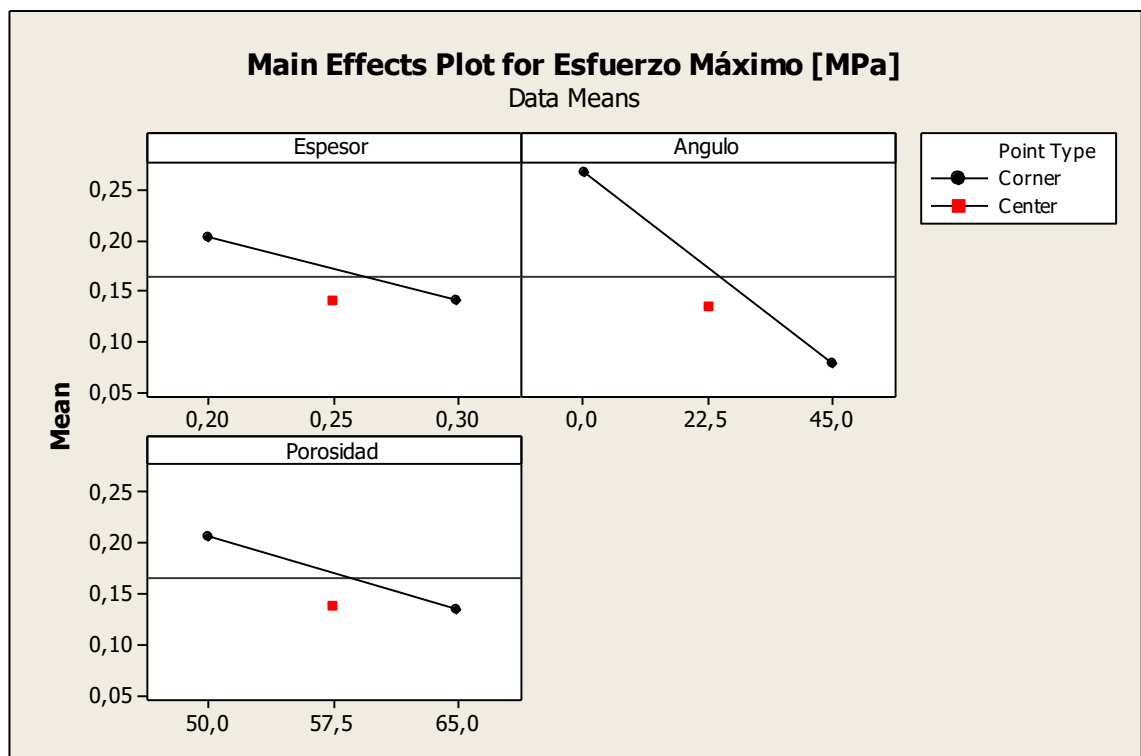
Posición 2

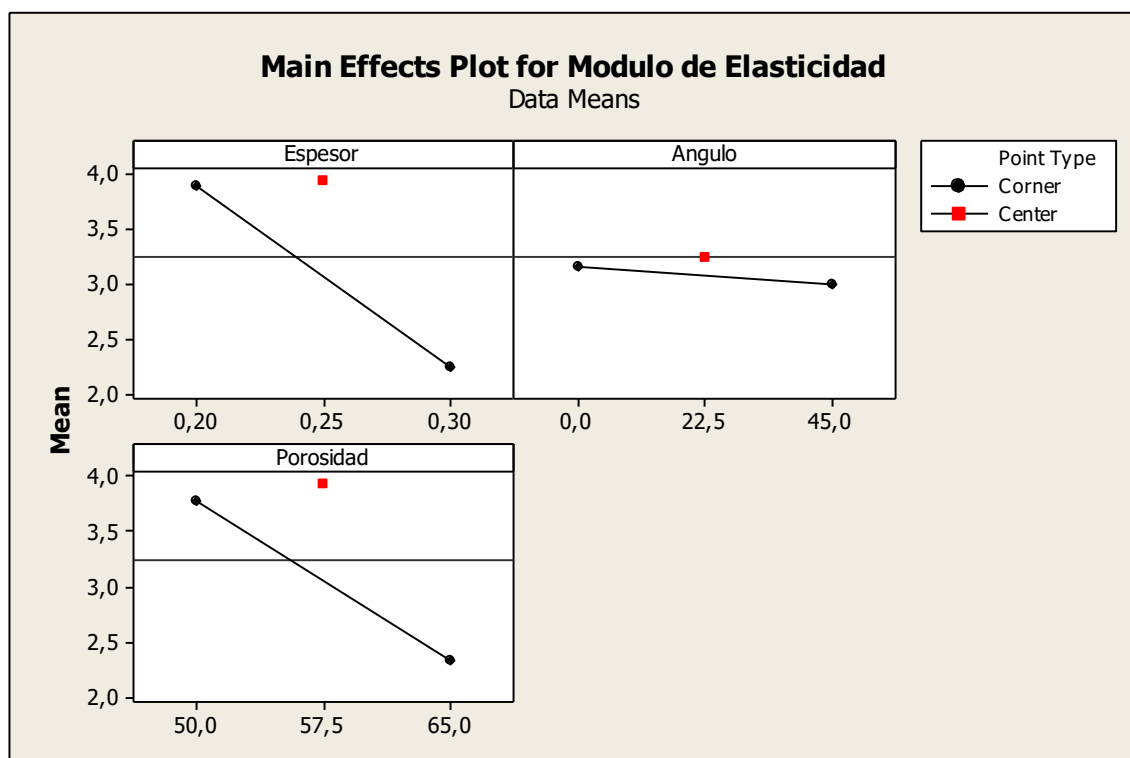
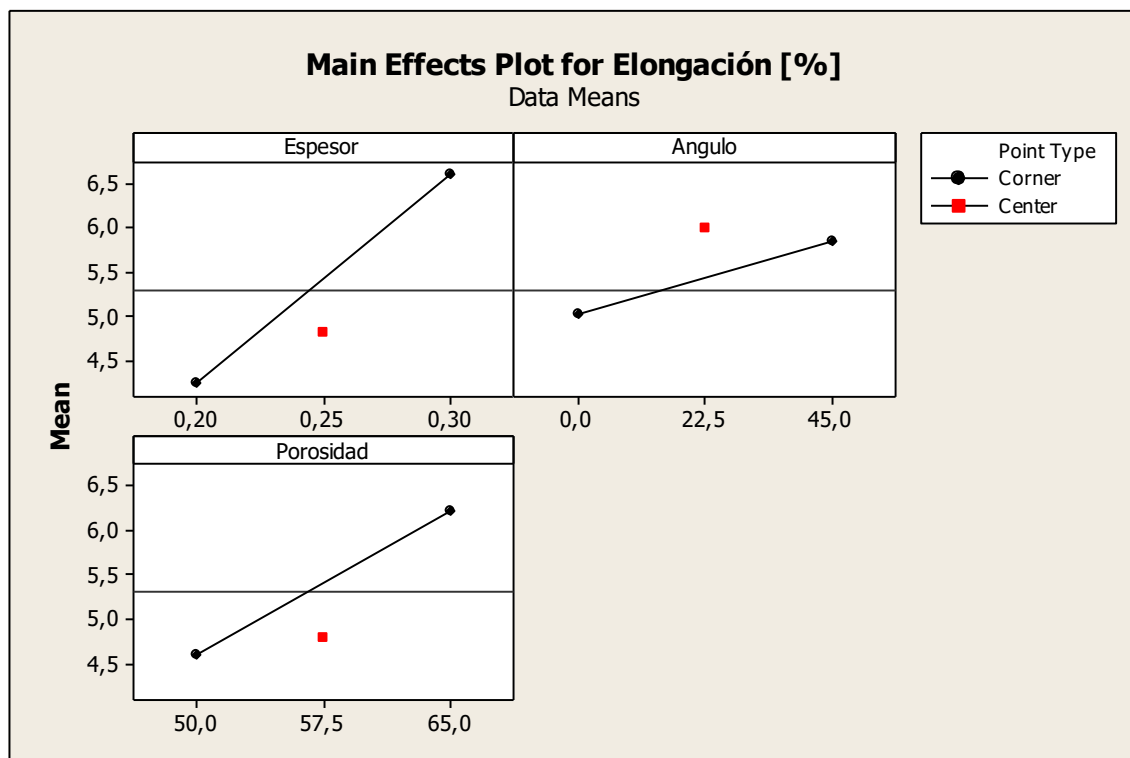
8 datos





8 datos + dos puntos centrales

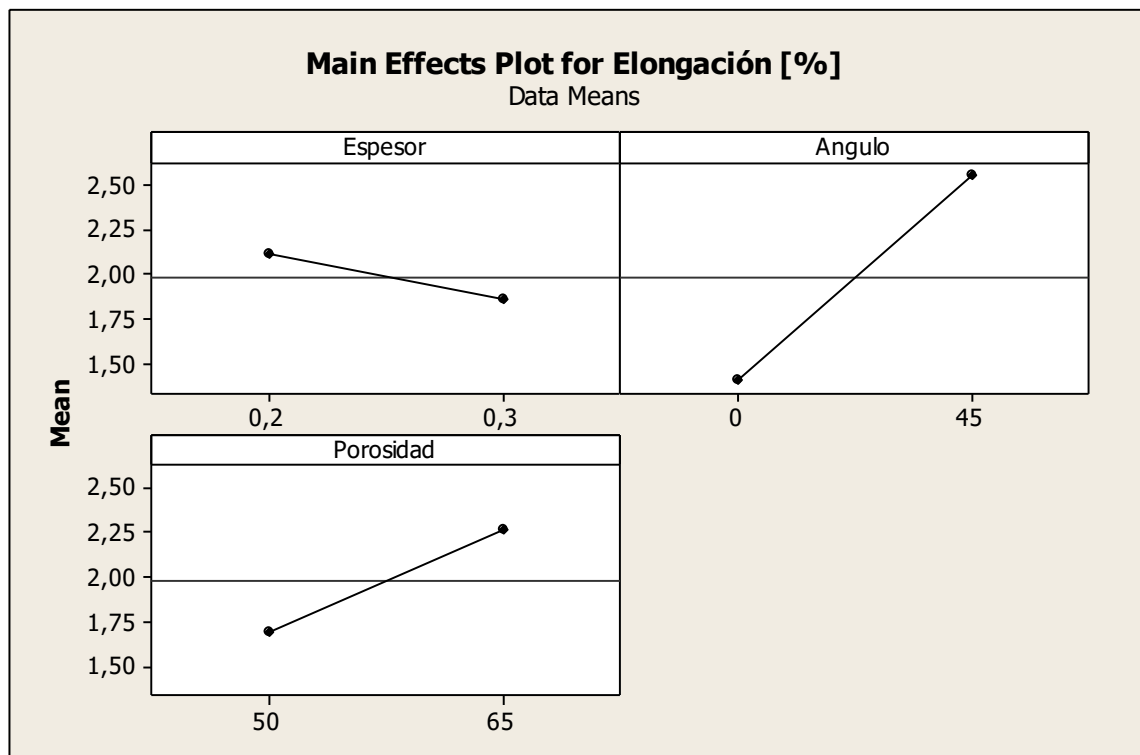
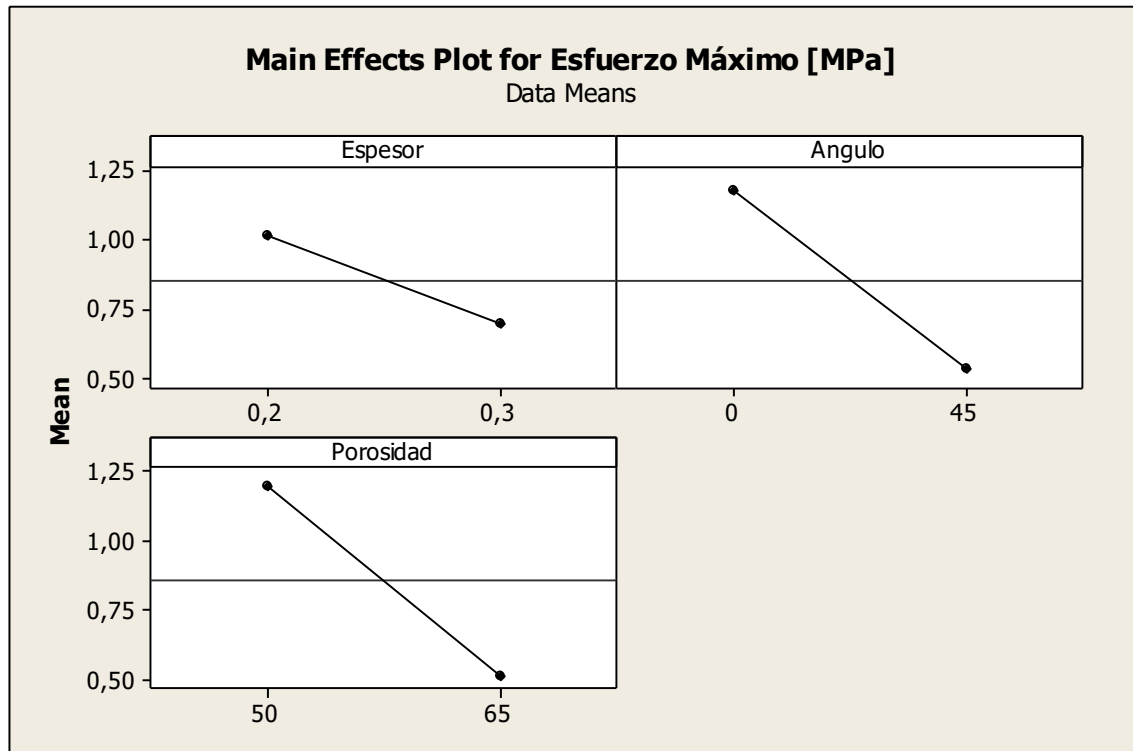


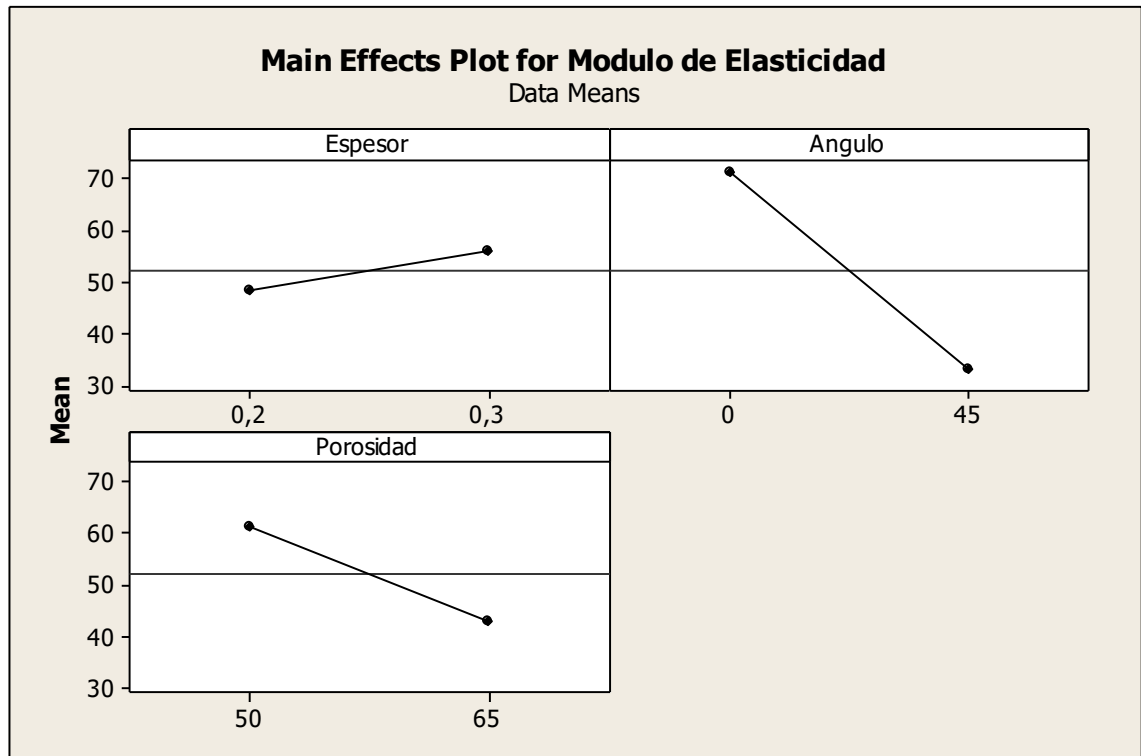


Gráficas de regresiones para cada ANOVA. Compresión.

Posición 1-2

16 datos





16 datos + dos puntos centrales

