

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN DEL
ÁCIDO POLILÁCTICO PLA PROCESADO POR MANUFACTURA ADITIVA FFF
CONSIDERANDO LA DEGRADACIÓN POR HUMEDAD Y TEMPERATURA

JAIRO ANDRÉS ROA SIERRA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2017

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN DEL
ÁCIDO POLILÁCTICO PLA PROCESADO POR MANUFACTURA ADITIVA FFF
CONSIDERANDO LA DEGRADACIÓN POR HUMEDAD Y TEMPERATURA

JAIRO ANDRÉS ROA SIERRA

Proyecto de Trabajo de Grado en la modalidad de Solución a un problema de
Ingeniería para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director
Ing. Marco Antonio Velasco Peña

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2017

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C

En primer lugar dedico este gran logro a Dios, creador de la vida y quien me ha brindado infinidad de bendiciones. A mis padres por cada uno de los esfuerzos que hicieron para hacer esto realidad, gracias a ellos soy quien soy hoy en día. A Martha Sierra Ladino por acompañarme, guiarme y cuidarme desde el lugar donde se encuentre. A mis hermanos por acompañarme en todos y cada uno de los momentos de mi vida, a mis demás familiares, amigos y a todos los que aportaron de alguna manera a mi formación como persona y como profesional.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece en primer lugar al Ingeniero Marco Antonio Velasco Peña por su tiempo, dedicación, disposición, paciencia, conocimiento y por el apoyo incondicional brindado durante la realización del presente trabajo.

A la Universidad Santo Tomas, Sede Bogotá, por formarme como ser humano y profesional, también por permitirme hacer uso de sus instalaciones, equipos, que permitieron llevar a cabo gran parte del proyecto.

Al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) por permitirme el acceso a sus equipos, e instalaciones, que hicieron posible la realización de los ensayos de tensión, requeridos para el completo desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS.....	3
1.1 Objetivo General.....	3
1.2 Objetivos Específicos.....	3
2. DISEÑO EXPERIMENTAL	4
2.1 FACTORES DE ENTRADA DEL EXPERIMENTO.....	5
2.1.1 Selección de factores y niveles de proceso a tener en cuenta en la manufactura de las estructuras.....	7
2.1.2 Selección de factores y niveles debidos a la degradación en el material.....	10
2.2 VARIABLES A MEDIR EN EL EXPERIMENTO	15
2.2.1 Resistencia a la tensión	15
2.2.2 Módulo de elasticidad	16
2.3 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.....	16
2.3.1 Diseño Factorial.....	16
2.3.2 Diseño factorial 2k.....	16
2.3.3 Diseño experimental aplicado al experimento	18
2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	24
3. FABRICACIÓN DE PROBETAS MEDIANTE FDM.....	25
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA NORMA ASTM D638	25
3.1.1 Descripción general.....	25
3.1.2 Máquinas e instrumentos para el ensayo.....	25
3.2 DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURA GEOMÉTRICA DE LAS PROBETAS Y MODELADO CAD DE PROBETAS.	26
3.3 GENERACIÓN DEL G-CODE PARA LA IMPRESIÓN DE LAS PROBETAS MEDIANTE TECNOLOGÍA FDM.....	28
3.4 IMPRESIÓN DE PROBETAS 3D.	34
3.4.1. Descripción y características impresora 3D.	34
≤ 300°C & ≤ 400°C.....	35
3.4.2 Selección de parámetros de la impresora para el correcto manejo de PLA.	37

3.4.3 Preparación de máquina para impresión.....	37
3.4.4 Impresión de probetas	37
3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	39
4. REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	41
4.1 MATERIALES Y EQUIPOS USADOS	41
4.1.1 UVTest Fluorescent/UV Instrument.....	41
4.2 REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE DEGRADACIÓN.....	44
4.2.1 Preparación de Probetas.....	44
4.2.2 Realización de Test.....	45
4.3 REALIZACIÓN ENSAYO A TENSIÓN DE PROBETAS	49
4.3.1 Descripción del Ensayo	49
4.3.2 Materiales y equipos usados	50
4.3.3 Preparación de Probetas.....	53
4.3.4 Elaboración del ensayo.....	53
4.3.5 Análisis Morfológico.....	61
4.3.6 Resultados	64
4.4 Conclusiones del capítulo.....	81
5. ANÁLISIS DE VARIANZA Y REGRESIÓN LINEAL.....	83
5.1 REGRESIÓN LINEAL DE DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE ENSAYO DE TENSIÓN.	83
5.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	94
CONCLUSIONES.	95
RECOMENDACIONES.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....	98
ANEXOS.....	102

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Pautas generales para diseñar un experimento.	5
Tabla 2. Niveles de espesor de capa.	8
Tabla 3. Niveles de porosidad.	8
Tabla 4. Niveles Ángulo de trama, impresión 3D.	10
Tabla 5. Tipos de degradación en materiales.	11
Tabla 6. Ciclos de exposición para probetas, ASTM D4329.	12
Tabla 7. Clasificación de regiones ultravioleta.	14
Tabla 8. Tiempo de exposición de probetas a ensayos medioambientales.	15
Tabla 9. Matrices factoriales experimentales. a) Matriz factorial 2 ² . b) Matriz factorial 2 ³ . c) Matriz factorial 2 ⁴ .	17
Tabla 10. Recopilación de factores del experimento.	18
Tabla 11. Recopilación factores y niveles de proceso.	19
Tabla 14. Geometría de probetas para ensayo a tensión Norma ASTM D638 (Medidas en milímetros y pulgadas)	26
Tabla 15. Descripción de las configuraciones en CURA.	32
Tabla 16. Consumos plan de impresión.	34
Tabla 17. Descripción y características Multoo 1.5 Pro High Speed Large Format Digital 3D printer.	35
Tabla 18. Descripción UVTest Fluorescent / UV instrument	41
Tabla 19. Normas parametrizadas en UVTest.	43
Tabla 20. Recopilación de parámetros de proceso y exposición ambiental para cada una de las probetas.	1
Tabla 21. Especificaciones Técnicas, máquina de ensayos destructivos.	51
Tabla 22. Calculo de área transversal, densidad, densidad lineal para probetas de ensayo a tracción.	55
Tabla 23. Visualización de primera y segunda zona de falla en probetas.	60
Tabla 24. Especificaciones técnicas del microscopio digital AM4013MT	62
Tabla 25. Resultados de ensayo de tensión en probetas sin exposición a ciclo de degradación	66
Tabla 26. Resultados de ensayo de tensión en probetas con exposición a ciclo A de degradación.	69
Tabla 27. Resultados de ensayo de tensión en probetas con exposición a ciclo B de degradación.	72
Tabla 28. Comparación de resultados obtenidos a partir del ensayo de tensión, entre probetas sin exposición a ciclo de degradación y probetas con exposición a ciclo de degradación.	75
Tabla 29. Modelos de regresión para datos obtenidos del ensayo de tensión.	83
Tabla 30. ANOVA probetas sin exposición a ciclo de degradación.	85
Tabla 31. ANOVA probetas con exposición a ciclo A de degradación.	88
Tabla 32. ANOVA probetas con exposición a ciclo B de degradación.	90
Tabla 33. Recopilación de contribuciones máximas (factores de proceso VS propiedades mecánicas).	93

Tabla 34. Relación de efectos entre factores de proceso y propiedades mecánicas.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variables de un experimento	4
Figura 2. Modelo FDM.	6
Figura 3. Contorno de filamentos para impresión de probetas.	7
Figura 4. Comparación entre contornos.	7
Figura 5. Espesor de capa de 0.1 mm	8
Figura 6. Espesor de capa de 0.3 mm	8
Figura 7. Impresión de probeta con porosidad del 35%.	9
Figura 8. Impresión de probeta con porosidad del 65%.	9
Figura 9. Ángulo de trama, impresión 3D.	9
Figura 10. Ángulos de impresión de probetas.	10
Figura 11. Transición de primer orden, Variación de volumen del material VS temperatura del material.	13
Figura 12. Transición de segundo orden, Variación de volumen del material VS temperatura del material.	13
Figura 13. Representación gráfica máquina universal de ensayos.	16
Figura 14. Creación de diseño factorial.	20
Figura 15. Parámetros de creación del diseño de experimentos.	20
Figura 16. Asignación de factores y niveles en el Minitab.	20
Figura 17. Diseño de experimentos, Minitab.	21
Figura 18. Geometría probeta.	27
Figura 19. Geometría de probetas, Autodesk Inventor. a) Vista Frontal. b) Vista Isométrica.	28
Figura 20. Selección máquina virtual, Cura.	29
Figura 21. Interfaz Cura.	29
Figura 22. Importación de probeta.	30
Figura 23. Ejes de rotación de la probeta.	30
Figura 24. Rotación de probeta.	31
Figura 25. Asignación de niveles, Cura.	31
Figura 26. Tiempo y materia prima necesaria para la impresión de las probetas.	33
Figura 27. Exportación del G-Code, Cura.	33
Figura 28. G-Code realizado en Cura.	33
Figura 29. Multoo 1.5 Pro High Speed Large Format Digital 3D printer.	35
Figura 30. Guía lineal eje Z.	36
Figura 31. Tablero de control cama de impresión.	36
Figura 32. Impresión de probetas	38
Figura 33. Impresión múltiple de probetas.	38
Figura 34. Capturas termo gráficas.	39
Figura 35. Distribución de probetas dentro de máquina de ensayo.	42
Figura 36. Pantalla Táctil UVTest.	42
Figura 37. "Chamber Diagram" UVTest.	43
Figura 38. Comparación de irradiancia entre tipos de luz UV.	43

Figura 39. Preparación ambiental de probetas.	44
Figura 40. Proceso de selección de ciclo de exposición.	47
Figura 41. Parámetros de ciclo de exposición.	47
Figura 42. Desarrollo de ciclo de exposición.	48
Figura 43. Deformación en el cuerpo de las probetas, post exposición a degradación UV.	48
Figura 44. Marcaciones ocasionadas en el cuerpo de las probetas.	49
Figura 45. Probetas con deformaciones Críticas (Ciclo B de degradación, Probetas 26, 38, 20).	49
Figura 46. Curva de esfuerzo VS deformación.	50
Figura 47. Máquina de ensayos universales, Tinius Olsen Model 50ST.	50
Figura 48. Unidad de Presión Neumática, Tinius Olsen Modelo 50T	51
Figura 49. Biblioteca Virtual, Software de adquisición de datos Horizon.	52
Figura 50. Ventana de Trabajo, Software de adquisición de datos HORIZON.	52
Figura 51. Organización de probetas para ensayos de tracción.	53
Figura 52. Designaciones para las velocidades de prueba.	54
Figura 53. Suministro de datos para ensayo de tracción, Software HORIZON.	54
Figura 54. Distancia de separación entre mordazas sujetadoras de especímenes, máquina universal de ensayos.	57
Figura 55. Sujeción de la probeta con mordazas neumáticas	57
Figura 56. Unidad de presión maquina universal de ensayos.	58
Figura 57. Ensayo de Tensión. a) Probeta 17 Ciclo de Exposición A. b) Probeta 26 Ciclo de Exposición B.	58
Figura 58. Fractura de probetas a) Probeta 17 Ciclo de Exposición A. b) Probeta 26 Ciclo de Exposición B.	59
Figura 59. Falla doble de probeta durante ensayo de tensión.	59
Figura 60. Microscopio digital AM4013MT	62
Figura 61. Detalles morfológicos de probeta 44. a) Vista de Ángulo de Trama y porosidad. b) Zona interna después de la falla.	62
Figura 62. Detalles morfológicos de probeta 26. a) Zona de falla vista superior. b) Zona de falla vista lateral	63
Figura 63. Detalles morfológicos de probeta 47. a) Zona interna de la probeta. b) Contorno de la probeta	63
Figura 64. Curvas Típicas de esfuerzo VS deformación para estructuras en PLA.	65
Figura 65. Cálculo del módulo elástico convencional.	65
Figura 66. Comparación gráfica de resultados de ensayo de tensión en probetas sin exposición a ciclo de degradación.	67
Figura 67. Comparación gráfica de resultados de ensayo de tensión en probetas con exposición a ciclo A de degradación.	70
Figura 68. Resultados de ensayo de tensión en probetas con exposición a ciclo B de degradación.	73
Figura 69. Comparación gráfica de Esfuerzo máximo entre probetas según tipo de configuración de impresión y ciclo de exposición a degradación.	78
Figura 70. Comparación gráfica de Porcentaje de Elongación entre probetas según tipo de configuración de impresión y ciclo de exposición a degradación.	79

Figura 71. Comparación gráfica de Módulo de Elasticidad entre probetas según tipo de configuración de impresión y ciclo de exposición a degradación.	80
Figura 72. Gráficos de respuestas observadas vs. Respuestas ajustadas (Representación gráfica del R^2). A) Modelo de regresión con explicación del 85.5% de la varianza. B) Modelo de regresión con explicación del 22.6 % de la varianza.	85
Figura 73. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Esfuerzo Máximo, para probetas sin exposición a ciclo de degradación.	86
Figura 74. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Porcentaje de Elongación, para probetas sin exposición a ciclo de degradación.	87
Figura 75. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Módulo de Elasticidad, para probetas sin exposición a ciclo de degradación.	87
Figura 76. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Esfuerzo Máximo, para probetas con exposición a ciclo A de degradación.	89
Figura 77. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Porcentaje de elongación, para probetas con exposición a ciclo A de degradación.	89
Figura 78. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Módulo de Elasticidad, para probetas con exposición a ciclo A de degradación.	90
Figura 79. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Esfuerzo Máximo, para probetas con exposición a ciclo B de degradación.	91
Figura 80. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Porcentaje de Elongación, para probetas con exposición a ciclo B de degradación.	92
Figura 81. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Módulo de Elasticidad, para probetas con exposición a ciclo B de degradación.	92

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1. Curvas de Esfuerzo VS Deformación para ensayos de tensión.	102
Anexo 2. Regresiones múltiples de los factores de proceso y ambientales vs propiedades mecánicas del PLA.	118
Anexo 3. Comparación de curvas Esfuerzo VS deformación entre probetas sin exposición a ciclo de degradación y probetas con exposición a ciclo de degradación.	

¡Error! Marcador no definido.

INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva es un proceso por el cual se crean objetos físicos, a partir de modelos computacionales, mediante la adición de material a través de capas superpuestas [1]. Este tipo de manufactura cuenta con ventajas frente a los procesos convencionales, tales como la exactitud en las piezas a crear, fabricación geometrías complejas, menor desperdicio de materia prima, entre otras. Según la Asociación Española de Rapid Manufacturing (ASERM), el mercado mundial de la manufactura aditiva ha aumentado en los últimos años, como fue el caso del año 2013 donde hubo un crecimiento del 34.9% [2], permitiendo incluso el desarrollo de sistemas de mercado innovadores como el denominado *producto a la medida* [3].

Entre los materiales que pueden utilizarse dentro de los procesos por adición de material fundido, el Ácido Poliláctico (PLA) cuenta con buenas propiedades que lo hacen interesante en diversas aplicaciones. Además, es un material biodegradable y tiene características favorables [4], que lo hacen interesante en la industria de “productos a la medida”.

Al implementar PLA en la elaboración de productos, los cambios en las propiedades de material por su degradación pueden causar la disminución de sus características mecánicas, por lo cual es importante conocer como es el comportamiento para tenerlo en cuenta al momento de diseñar productos donde el tiempo de servicio y las condiciones medioambientales son consideraciones importantes. El tema de la degradación provocada o In Vitro, ha sido estudiado por diferentes autores, quienes plantean distintos métodos de envejecimiento acelerado y técnicas de predicción de vida útil para materiales poliméricos. Por ejemplo, se ha concluido que por cambios drásticos de temperatura las propiedades con mayor afectación son la rigidez y la resistencia [5].

Por esta razón, se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de tener conocimiento acerca de las propiedades mecánicas como el esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y a la par conocer de qué manera podrían verse afectadas, al momento de que el material fuera expuesto a un proceso de degradación, por ejemplo, donde las condiciones ambientales cambiaran de una manera significativa. Posterior a esto se realizó un diseño factorial de experimentos 2^4 , con una réplica, garantizando la obtención de la información necesaria con la menor cantidad de datos posible. Con base en el diseño de experimentos se generaron los especímenes mediante la tecnología de manufactura aditiva FDM (Fused Deposition Modeling), partiendo de un archivo computacional CAD generado en Autodesk Inventor.

Para generar la degradación en las probetas, estas se sometieron a ciclos de exposición planteados en la norma ASTM D4329 “Práctica Estándar para la exposición UV de los plásticos”, los cuales tiene valores de temperatura, radiación y humedad predeterminados. Posterior a estos ensayos, se prosigue con la ejecución de los ensayos de tracción a cada una de las probetas, con el objetivo de comparar las propiedades mecánicas entre las probetas que no fueron expuestas, y las probetas expuestas a los ciclos de degradación. Lo anterior con el fin de elaborar un análisis estadístico completo, para conocer la influencia de los factores de proceso sobre las variables de respuesta (propiedades mecánicas).

El proyecto se limita al modelado CAD, fabricación de probetas, exposición a ciclos de degradación, y caracterización mecánica a partir de los resultados obtenidos del ensayo de tracción, esto con el fin de brindar información investigativa para el uso y aplicación futura del PLA cuando se encuentre sometido a degradación por la exposición a una condición ambiental específica.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Caracterizar las propiedades mecánicas a tensión de polímero ácido poliláctico PLA procesado por manufactura aditiva FFF considerando su degradación por humedad y temperatura.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer el diseño de experimentos a partir de las variables de estudio
- Fabricar las probetas por manufactura aditiva FFF de conformidad a la norma ASTM 638D.
- Realizar las pruebas de degradación por temperatura y humedad y los ensayos de tensión a las probetas para determinar las propiedades mecánicas a tensión.
- Hacer un análisis estadístico para determinar el efecto de los factores estudiados en las propiedades mecánicas a tensión.

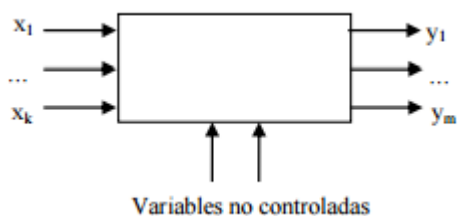
2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental puede ser considerado como parte del proceso científico y como una herramienta eficaz que permite el aprendizaje en cuanto a la forma en que funcionan los sistemas y procesos [6].

Por tanto, se puede definir como una metodología que está basada en herramientas matemáticas y estadísticas que le permite y le ayuda al experimentador a seleccionar una estrategia experimental óptima, garantizando una alta confiabilidad en los resultados obtenidos, partiendo de que cualquier problema experimental incluye dos aspectos: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos.

En un proceso investigativo, ingresan diversas variables que interactúan, para así generar algún tipo de resultado o variables de salida. Estas pueden estar acompañadas a su vez de variables no controladas, es decir, aquellos factores sobre los cuales no se puede incidir, pero que están presentes en el proceso [7]. Ver Figura 1.

Figura 1. Variables de un experimento



Fuente: Montgomery [8].

El diseño de experimentos puede verse como una combinación de recursos que, al interactuar entre ellos, son capaces de transformar alguna entrada en una salida que tiene una o más respuestas observables, que cumplen con ciertos objetivos y por consiguiente darán respuesta a los siguientes requerimientos del experimento:

- Determinar variables de entrada e influencia de estas sobre las variables de salida
- Determinar el mejor valor de las variables controlables
- Determinar la correcta combinación de las variables controlables
- Plantear la óptima combinación entre variables

La aplicación correcta y oportuna del diseño de experimentos puede generar grandes ventajas dentro de un proceso experimental. Algunas de estas son:

- Mejora en el rendimiento del proceso
- Reducción de variabilidad en resultados

- Disminución en el tiempo de desarrollo
- Minimización de costos

Es por esto que, para lograr un adecuado diseño de experimentos y cumplir con los objetivos anteriormente descritos, se plantea una serie de pautas a seguir como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Pautas generales para diseñar un experimento.

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 [9] .

El diseño de experimentos es un elemento clave a la hora de realizar cualquier tipo de investigación, y este caso no es la excepción, puesto que, mediante este, se logrará obtener el correcto número de ensayos para la obtención completa de la información requerida.

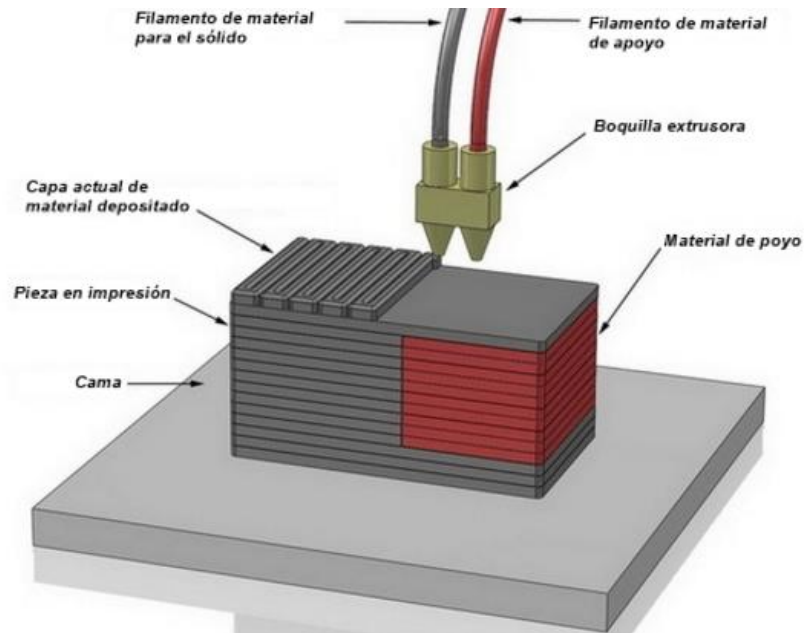
2.1 FACTORES DE ENTRADA DEL EXPERIMENTO

Las impresoras 3D que utilizan la tecnología de deposición de material fundido (FDM) crean piezas a través de capas sobrepuestas de abajo a arriba, calentando y extruyendo el filamento termoplástico a través de una boquilla que cuenta con resistencias eléctricas generadoras de calor. Estas mantienen el material a una temperatura adecuada para lograr una viscosidad que se encuentre en un rango definido, de tal manera que el material pueda fluir pero manejando cierto control en su deposición [10].

Dicha creación, parte desde un archivo CAD, el cual es generado en un software de modelado 3D que se post-procesado por un software computacional, con el fin de obtener el G-Code encargado de controlar la trayectoria que tendrá el material termoplástico, para que la impresora haga el proceso de impresión a semejanza del archivo, esto es, añadir el material sobre una lámina de trabajo hasta que quede la pieza disponible para su posterior empleo [11].

En la siguiente imagen, se puede apreciar una representación gráfica, del proceso de impresión, mostrando las partes que interactúan:

Figura 2. Modelo FDM.



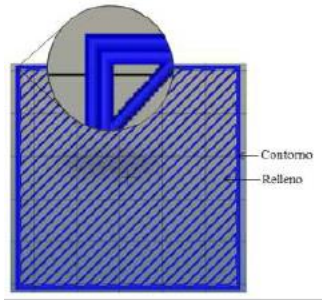
Fuente: Stratasys [11].

Los factores de proceso, pueden ser controlados mediante el software, de manera que los valores puedan ser cambiados de acuerdo al requerimiento.

Durante el proceso de impresión de las probetas, se tendrá en cuenta un factor adicional, que es el contorno de sus geometrías, el cual no se incluirá dentro del diseño de experimento, puesto que todas las probetas tendrán el mismo valor, y se considerará como una condición fija de impresión. El contorno, puede entenderse como el número de filamentos que deposita la impresora 3D sobre el exterior de la estructura de la probeta. Este parámetro es el recubrimiento que añade fuerza al objeto impreso, y es lo primero que se imprime. Para columnas o estructuras finas, los diseñadores de los software de corte para impresiones 3D, como Cura o Kisslicer, recomiendan utilizar 1 o 2 contornos en cada una de las geometrías a imprimir [12].

Para la impresión de las probetas, se manejarán contornos con 2 capas de material (Ver Figura 3), tanto en la parte superior e inferior, como en la silueta de la geometría.

Figura 3. Contorno de filamentos para impresión de probetas.



Fuente: Rodríguez, Restrepo [12].

A continuación (Ver Figura 4), y para mejor entendimiento por parte del lector, se podrá observar la comparación física entre dos probetas, una con contorno (Probeta izquierda) y la otra sin contorno (Probeta derecha).

Figura 4. Comparación entre contornos.



Fuente: Autor

2.1.1 Selección de factores y niveles de proceso a tener en cuenta en la manufactura de las estructuras

2.1.1.1 Espesor de capa

El espesor de capa es el factor que define el grosor que tendrá cada capa superpuesta extruida por la boquilla de la máquina, definiendo así la resolución en el eje Z (eje vertical). Éste tiene influencia sobre diversas características de la impresión, como es el número de capas del material y acabado superficial del elemento; considerando que las capas de espesor elevado son ideales para la fabricación de piezas de gran tamaño cuando el acabado superficial no es una prioridad, mientras que las capas delgadas nos garantizan un mejor acabado, pero se refleja un incremento en el tiempo de impresión. Para este experimento se

definieron 2 niveles de espesor de capa, con los cuales serán impresas las probetas [13].

Tabla 2. Niveles de espesor de capa.

	<i>Espesor de capa</i>
<i>Nivel mínimo</i>	<i>0.1 mm (Ver Figura 5)</i>
<i>Nivel Máximo</i>	<i>0.3 mm (Ver Figura 6)</i>

Fuente: Autor

Figura 5. Espesor de capa de 0.1 mm



Fuente: Stratasys [11].

Figura 6. Espesor de capa de 0.3 mm



Fuente: Stratasys [11].

2.1.1.2 Porosidad

La porosidad, describe el nivel de volumen vacío dentro de un elemento, con respecto al volumen total que este ocupa. Dicha porosidad está definida por el espacio existente entre los filamentos que comprenden la geometría y su porcentaje es inversamente proporcional al porcentaje de relleno de la pieza [14].

Para este experimento, se tendrán en cuenta los siguientes niveles en cuanto al factor relacionado con la porosidad:

Tabla 3. Niveles de porosidad.

	<i>Porosidad</i>
<i>Nivel mínimo</i>	<i>35% (Ver Figura 7)</i>
<i>Nivel Máximo</i>	<i>65% (Ver Figura 8)</i>

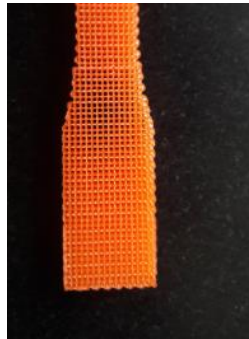
Fuente: Autor

Figura 7. Impresión de probeta con porosidad del 35%.



Fuente: Autor.

Figura 8. Impresión de probeta con porosidad del 65%.

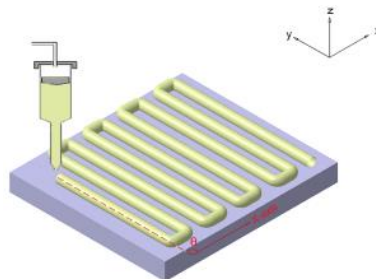


Fuente: Autor.

2.1.1.3 Ángulo de trama

El ángulo de trama es el ángulo con el cual la boquilla extrusora deposita sobre la lámina de impresión los filamentos de cada una de las capas sobrepuestas durante el proceso de impresión, teniendo en cuenta los ejes de trabajo de la impresora 3D.

Figura 9. Ángulo de trama, impresión 3D.



Fuente: Stratasy [11].

Por lo general, se emplean ángulos de impresión que van de 0 a 90° y de 45 a 135°, que garantizarán diversidad en la impresión de las probetas: estos niveles serán implementados para el experimento [12].

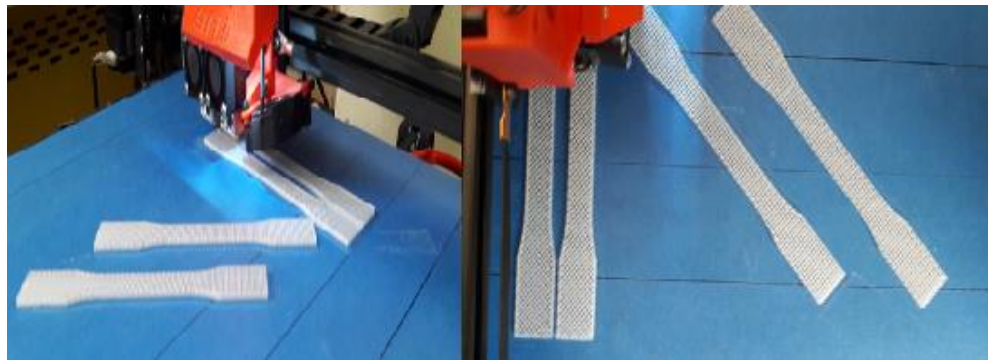
Tabla 4. Niveles Ángulo de trama, impresión 3D.

<i>Nivel</i>	<i>Ángulo de Trama</i>
<i>Mínimo</i>	0-90°
<i>Máximo</i>	45-135°

Fuente: Autor

En la Figura 10, se puede observar el proceso de impresión para los ángulos anteriormente mencionados.

Figura 10. Ángulos de impresión de probetas.



Fuente: Autor.

2.1.2 Selección de factores y niveles debidos a la degradación en el material.

Cuando se habla de polímeros biodegradables, uno de los primeros en ser estudiado es el ácido láctico pues en la industria tiene gran aceptación debido a que considera un gran agente para la producción de polímeros biodegradables como es el PLA [15]. Este tipo de biopolímeros se usan con gran frecuencia para diversas aplicaciones (todo tipo de desechables, empaques para comidas, bolsas plásticas, contenedores de líquidos, entre otros) [16].

El PLA, es un poliéster alifático de gran popularidad industrial por su ventajas, y material líder en aplicaciones médicas [17], que se ve afectado como cualquier otro material polimérico por procesos de degradación, aspecto que genera interés investigativo por estudiar su comportamiento frente a diversas condiciones medioambientales que fomentan su degradación.

El termino degradación, se asocia frecuentemente al desgaste de una pieza, lo cual no es del todo incorrecto, pues la degradación mediante distintos agentes

ambientales logra modificar la estabilidad del elemento [17], generando un proceso erosivo, que puede ocasionar algún tipo de falla.

Sin embargo, la degradación puede considerarse como cualquier cambio no deseado en las propiedades, que ocurre cuando el material de estudio ha sido puesto en servicio. En el caso específico de los polímeros, las alteraciones que producen la degradación pueden ser físicas, químicas o mecánicas. Comúnmente los agentes que producen cambios en los polímeros son: el calor en diversas formas, las sustancias químicas, y la energía mecánica, sin embargo pueden presentarse en la práctica, casos donde el material de estudio se encuentra expuesto a distintos agentes degradantes simultáneamente [18].

Existen distintos tipos y modos de degradación de materiales como se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5. Tipos de degradación en materiales.

Tipo de Degradación	Descripción
Tipo Natural	Radica en someter y exponer el producto polimérico a la influencia de elementos naturales.
Tipo Acelerado	Es cuando el material es expuesto a condiciones ambientales contrarias a las condiciones en las que fue diseñado, provocando repercusiones en sus propiedades mecánicas, por ende, en su vida útil.
Tipo Artificial	Para la degradación artificial, el material de estudio es sometido a distintas condiciones de exposición, las cuales son controladas, manteniéndose constantes o haciéndolas variables por ciclos definidos. Se puede realizar en equipos o simuladores de condiciones ambientales.
Tipo Físico	Este tipo de degradación, es un conjunto de todos los fenómenos donde no se modifica la estructura química del polímero.

Fuente: Autor

Al implementar PLA en la elaboración de productos y someterlos a un envejecimiento prematuro mediante un proceso de degradación, los cambios en las propiedades del material deben conllevar a la disminución de sus características

mecánicas; por lo cual, es importante conocer como es el comportamiento de dicho material para tenerlo en cuenta al momento de diseñar productos; donde el tiempo de servicio y las condiciones medioambientales son consideraciones importantes.

Generalmente, tres factores causantes de la degradación de piezas obtenidas a partir de PLA, son la temperatura, humedad y radiación, y se tendrán en cuenta en el experimento ya que facilitan el ambiente necesario para la degradación del material en el que están manufacturadas las probetas [16].

La exposición de las probetas se realizará en el equipo UVTest Fluorescent / UV Instrument (Atlas Material Testing Solutions, Estados Unidos), en el cual se pueden hacer ensayos según la norma ASTM D4329 “Práctica Estándar para la exposición UV de los plásticos”, y el ensayo ASTM G154 “Práctica estándar para el funcionamiento de aparatos de luz fluorescente para la exposición UV de materiales no metálicos”, planteando una exposición a radiación ultravioleta UVA 340 nm y 2 ciclos de exposición para las probetas [19] , Ver Tabla 6.

Tabla 6. Ciclos de exposición para probetas, ASTM D4329.

Ciclos de Exposición	Descripción del ciclo
Ciclo A	8 Horas de exposición UV con panel negro sin aislamiento, temperatura controlada a $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$. 4 horas de condensación con panel negro sin aislamiento, temperatura controlada a $50 \pm 3^{\circ}\text{C}$
Ciclo B	8 Horas de exposición UV con panel negro sin aislamiento, temperatura controlada a $70 \pm 3^{\circ}\text{C}$. 4 horas de condensación con panel negro sin aislamiento, temperatura controlada a $50 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Fuente: Autor.

2.1.2.1 Temperatura

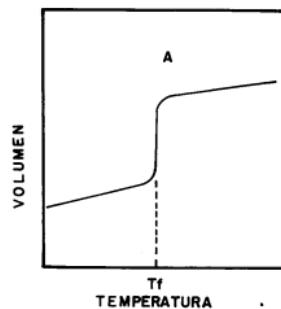
Los polímeros pueden comportarse como materiales estables por debajo de ciertas temperaturas específicas; si las temperaturas se elevan demasiado, inicia un proceso de ruptura de los enlaces covalentes, descomponiendo el material en pedazos pequeños también conocidos como radicales libres [20].

La estabilidad térmica de un polímero puede depender de dos mecanismos. El primero se considera irreversible y consiste en el ablandamiento que sufre el material al momento de incrementar la temperatura de exposición; el segundo es

la descomposición de la sustancia debido al calor constante al que es expuesto, este, al igual que el primer mecanismo, depende de la temperatura y tiempo de exposición [18].

Cuando se somete un plástico a un cambio significativo de temperatura, pueden observarse dos tipos de transiciones, Transición de primer y segundo Orden. La transición de primer orden ocurre cuando las propiedades del material cambian abruptamente; en este punto, las curvas de volumen del material VS temperatura cambian de una manera significativa.

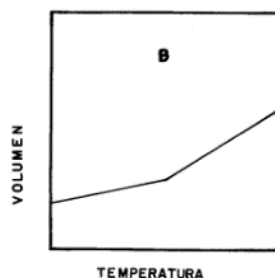
Figura 11. Transición de primer orden, Variación de volumen del material VS temperatura del material.



Fuente: Beatriz Posada Bustamante [18].

Por el contrario, en la transición de segundo orden, las propiedades del material cambian de una manera más gradual, sufriendo menor variación en su volumen.

Figura 12. Transición de segundo orden, Variación de volumen del material VS temperatura del material.



Fuente: Beatriz Posada Bustamante [18].

De acuerdo a lo planteado en la Tabla 6, los niveles que se tendrán en cuenta para el factor temperatura serán de 60°C y 70°C respectivamente, así se garantizando

una considerable influencia de temperatura en las propiedades mecánicas del material.

2.1.2.2 Radiación

La radiación puede alterar las sustancias orgánicas de distintas maneras, para el caso específico de los polímeros, encontramos que los tipos de radiación que causan más afectación son: la Radiación de alta energía donde el material al ser expuesto a una elevada energía produce cambios químicos en su estructura, y la radiación por luz ultravioleta donde la energía electromagnética es emitida a longitudes de onda menores que la visible por el ojo humano [18].

Los experimentos de degradación por luz ultravioleta pueden realizarse teniendo en cuenta tres regiones de luz [21].

Tabla 7. Clasificación de regiones ultravioleta.

Región	Longitud de Onda Λ, nm
Ultravioleta A (UVA)	400-315
Ultravioleta B (UVB)	315-290
Ultravioleta C (UVC)	290-200

Fuente: Autor.

De acuerdo a lo planteado por la norma ASTM D4329, se manejará para la radiación de las probetas luz ultravioleta A (UVA), con una longitud de onda de 340 nm.

2.1.2.3 Humedad

El hecho de que un material interactúe con un medio acuoso, provoca que el agua penetre en la matriz polimérica causando alteraciones en su estructura interna. La degradación causada por el contacto de humedad con el material de estudio se conoce como degradación hidrolítica y, si no es controlada, puede generar desgaste en el material hasta el punto de reducir sus propiedades mecánicas, ocasionando algún tipo de falla [22].

Partiendo de los ciclos de exposición planteados, Ver Tabla 6, se observa que tanto el ciclo A como el ciclo B, cuentan con 4 horas de condensación (alcanzando punto de rocío, humedad del 100%) [23], posteriores a las horas de exposición a luz ultravioleta, incrementando la humedad presente en el proceso de preparación de las probetas.

2.1.2.4 Tiempo

Como en todo análisis experimental, el tiempo es una variable de gran importancia que no se puede despreciar, pues de ella dependen la mayoría de variables que puedan influir en el experimento.

En este experimento los factores de degradación ambiental, son los que dependerán del factor tiempo, por esta razón, y con base en la norma ASTM D4329, la cual plantea los tipos de ciclos de exposición se definirán los niveles que se muestran a continuación [19]:

Tabla 8. Tiempo de exposición de probetas a ensayos medioambientales.

Ciclos de Exposición	Descripción del ciclo
Ciclo A	8 Horas de exposición 4 horas de condensación
Ciclo B	8 Horas de exposición UV 4 horas de condensación

Fuente: Autor

Independientemente del ciclo de exposición de las probetas, se necesita de 12 horas para generar una correcta influencia de los factores ambientales sobre el material.

2.2 VARIABLES A MEDIR EN EL EXPERIMENTO

2.2.1 Resistencia a la tensión

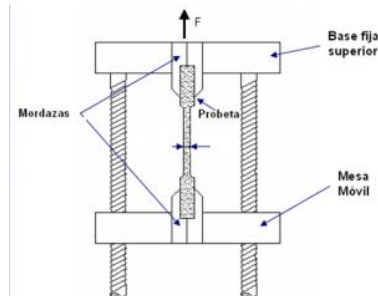
Al momento que un material se encuentre en servicio cumpliendo con su objetivo de diseño, está sometido a distintas fuerzas o cargas. Por esta razón, es muy importante conocer las características mecánicas del material y saber cuáles son sus límites, con el fin de que al entrar en interacción con distintos esfuerzos, éstos no sean excesivos y ocasionen la falla del mismo [24].

La resistencia a la tensión de un material, es la capacidad que tiene el mismo de exponerse y soportar una carga de tensión antes de que su sección transversal se contraiga de manera significativa.

La tensión de rotura se obtiene generalmente mediante el ensayo de tracción, registrando la tensión en función de la deformación. Esta se encuentra en el punto más alto de la curva tensión-deformación y es considerada como una propiedad intensiva, lo que la hace dependiente de factores interactuantes con el material (Preparación, defectos superficiales, condiciones ambientales) [25].

El ensayo de tracción consiste en alargar una probeta (sujeta por mordazas en sus extremos) hasta lograr la fractura de la misma. Este procedimiento se hace por medio de una fuerza a tensión, que es aplicada gradualmente para poder conocer ciertas propiedades mecánicas del material en general, como resistencia, rigidez, ductilidad. En la siguiente imagen, se puede apreciar un esquema del dispositivo utilizado para realizar este tipo de ensayos [26].

Figura 13. Representación gráfica máquina universal de ensayos.



Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería [24].

2.2.2 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad identificado con la letra E, también conocido como módulo de Young, puede entenderse como un principio característico en los materiales, que proporciona una relación entre las fuerzas de tensión aplicadas en el ensayo de tracción y el aumento de la deformación relativa en el material.

Este módulo indica la rigidez que posee un material, y se interpreta gráficamente como la pendiente en la zona elástica en la gráfica de tensión-deformación. Esta se obtiene a partir del ensayo de tracción realizado al material. Cabe resaltar que cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad [27].

2.3 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

2.3.1 Diseño Factorial

El diseño factorial consta de dos o más factores, cada uno con cierto número de niveles o valores, que brinda unidades experimentales capaces de cubrir todas las posibles combinaciones entre los factores y los niveles, permitiendo el estudio del efecto de cada factor sobre las variables respuesta.

2.3.2 Diseño factorial 2k

Los diseños factoriales son muy comunes al momento de diseñar experimentos que contienen diversos factores. El diseño 2^k es de gran utilidad en las etapas iniciales

de un trabajo experimental, ya que logra brindar un mínimo número de corridas con las que se pueden abarcar todos los factores del diseño, conociendo simultáneamente, qué efecto tienen k factores sobre algunas variables de respuesta.

Una réplica de este tipo de diseño sería de la siguiente manera:

$$2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$$

Los experimentos que arroja el diseño factorial, son planeados de tal manera que los factores varíen simultáneamente, pero a la vez, evitando que cambien siempre en la misma dirección; anulando así, redundancias experimentales. Esto permite obtener los resultados buscados con el menor número de experimentos, optimizando así el factor tiempo y el factor costo. El objetivo de todo esto, es analizar los resultados experimentales en casos donde se quiere estudiar el efecto de diversos factores y sus interacciones entre sí [28].

Como ejemplo común encontramos el diseño experimental 2^2 , donde se cuenta con dos factores cada uno con dos niveles; de esta manera, saldrían 4 observaciones a realizar. No importa la cantidad de factores o niveles, este tipo de diseño siempre brindará la opción más rápida y precisa para dar respuesta a la incidencia de los factores sobre las variables de salida.

En la tabla que se muestra a continuación, se podrá ver las matrices factoriales para experimentos de tipo 2^2 , 2^3 , 2^4 . La matriz (2^k) comprende 2 filas y k columnas, correspondientes al número de factores y niveles de estudio. Existe un orden estándar para la construcción de las matrices, donde cada columna empieza por el signo -, y se alternan los signos - y + con frecuencia 2^0 para x_1 , 2^1 para x_2 , 2^2 para x_3 , y así sucesivamente hasta x_k , donde los signos se alternan con una frecuencia de 2^{k-1} [28].

Tabla 9. Matrices factoriales experimentales. a) Matriz factorial 2^2 . b) Matriz factorial 2^3 . c) Matriz factorial 2^4 .

a)

	X_1	X_2
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

Fuente: Autor.

Tabla 9. (Continuación).

b)

	X ₁	X ₂	X ₃
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fuente: Autor.

c)

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

Fuente: Autor.

2.3.3 Diseño experimental aplicado al experimento

Es importante conocer que el número de factores y el número de niveles son directamente proporcionales con respecto al número de experimentos que se realizaran, por esto, es aconsejable ser muy preciso con respecto a los factores y niveles a seleccionar.

Entrando un poco en contexto, lo que se quiere generar es un diseño de experimentos que sea capaz de demostrar con un número adecuado de probetas, los efectos que tienen diferentes factores (de proceso y medioambientales) sobre las propiedades mecánicas del PLA, sometido a ensayo a tensión. Teniendo en cuenta lo anterior, definimos los siguientes factores:

Tabla 10. Recopilación de factores del experimento.

FACTORES DEL EXPERIMENTO	
1. Factores de proceso	<i>Espesor</i>
	<i>Porosidad</i>
	<i>Ángulo de Trama</i>
2. Factores de Exposición ambiental	<i>Ciclo de exposición</i>

Fuente: Autor

Se plantea un diseño de experimentos de 2 niveles por cada factor, lo que nos da un diseño 2^4 .

Número de experimentos: $2^4: 2 \times 2 \times 2 \times 2: 16$

En algunos diseños experimentales, suelen hacerse réplicas. Estas son repeticiones del experimento básico, que le permiten al investigador obtener una estimación del error experimental, además le ayuda a calcular con precisión el efecto de un factor [8] . Por esta razón se realizarán dos réplicas, obteniendo así un total de 32 probetas.

Cabe aclarar que aparte, de las 32 probetas planteadas en el diseño de experimentos, se imprimirán 16 probetas más, las cuales no serán sometidas a degradación por exposición ambiental, y servirán como punto de comparación al momento de obtener los valores de las propiedades mecánicas.

Las probetas serán enumeradas numéricamente de la probeta 1 a la probeta 48, con el fin de generar una correcta identificación al ciclo de exposición al que serán expuestas y a los parámetros de impresión con los que fueron diseñadas.

2.3.3.1 Uso de Software Minitab para creación diseño experimental

Partiendo de que se conocen los factores de proceso y de exposición ambiental, y también los niveles que tiene cada uno, se procede a realizar el diseño experimental, mediante el software Minitab; este es un programa que permite ejecutar distintas funciones estadísticas, como la de hacer las combinaciones correspondientes entre factores y niveles para así arrojar el diseño de experimentos final.

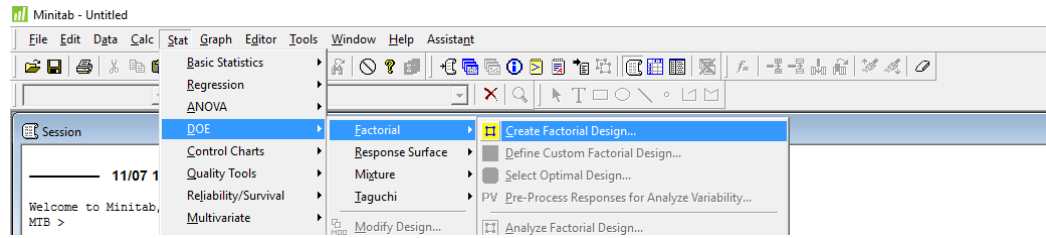
Tabla 11. Recopilación factores y niveles de proceso.

Factores de Proceso	
Factor	Niveles
Espesor	0,1 y 0,3
Porosidad	35% y 65%
Ángulo	0° y 45°
Factor de exposición ambiental	
Factor	Niveles
Ciclo de exposición	Ciclo A, Ciclo B

Fuente: Autor.

El primer paso para la generación del diseño, es asignar en el Minitab la creación de un diseño factorial, Ver Figura 14.

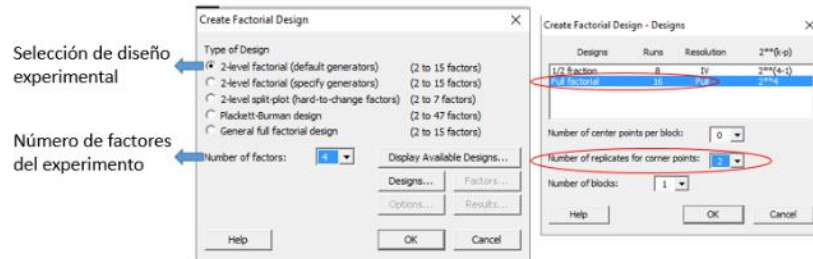
Figura 14. Creación de diseño factorial.



Fuente: Autor

En la Figura 15 se podrán apreciar los parámetros de diseño que se le asignaron al diseño de experimentos.

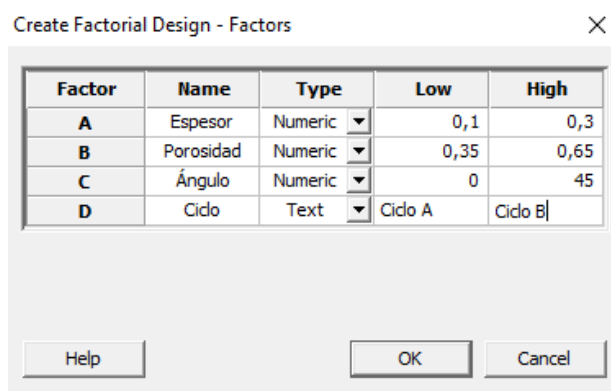
Figura 15. Parámetros de creación del diseño de experimentos.



Fuente: Autor

Se procede a hacer la asignación de cada uno de los factores y sus respectivos niveles, anteriormente descritos, como se aprecia en la Figura 16.

Figura 16. Asignación de factores y niveles en el Minitab.



Fuente: Autor.

Después de aginar todos los parámetros de diseño, se encontrará generado el diseño de experimentos como se muestra a continuación:

Figura 17. Diseño de experimentos, Minitab.

```

Welcome to Minitab, press F1 for help.
MTB > Name C1 "StdOrder" C2 "RunOrder" C3 "PtType" C4 "Blocks" C5 "Espesor" C6 &
CONTI> "Porosidad" C7 "Ángulo" C8 "Ciclo"
MTB > FDesign 2 2 2 2;
SUBC> Replicates 2;
SUBC> Randomize;
SUBC> SOrder 'StdOrder' 'RunOrder';
SUBC> PtType 'PtType';
SUBC> Brief 2;
SUBC> XMatrix 'Blocks' 'Espesor' 'Porosidad' 'Ángulo' 'Ciclo';
SUBC> Levels 0,1 0,3 0,35 0,65 0 45 "Ciclo A" "Ciclo B".

Multilevel Factorial Design

Factors:      4      Replicates:    2
Base runs:   16      Total runs:   32
Base blocks: 1      Total blocks:  1

Number of levels: 2; 2; 2; 2

MTB > Save "E:\tesis jairo\Diseño experimentos\diseño 2 replicas.MPJ";
SUBC> Project;
SUBC> Replace.
    
```

Fuente: Autor.

En la Tabla , se evidencia la configuración que tendrá cada una de las probetas, de acuerdo al diseño de experimentos realizado anteriormente.

Tabla 12. Diseño experimental.

Diseño Experimental				
Probeta	Espesor	Porosidad	Ángulo	Ciclo de exposición
1	0,3	0,35	0	Sin exposición
2	0,3	0,35	0	Ciclo A
3	0,3	0,35	0	Ciclo A
4	0,1	0,35	45	Sin exposición
5	0,1	0,35	45	Ciclo A
6	0,1	0,35	45	Ciclo A
7	0,1	0,35	0	Sin exposición
8	0,1	0,35	0	Ciclo B
9	0,1	0,35	0	Ciclo B
10	0,1	0,35	0	Sin exposición
11	0,1	0,35	0	Ciclo A
12	0,1	0,35	0	Ciclo A
13	0,3	0,35	45	Sin exposición
14	0,3	0,35	45	Ciclo A
15	0,3	0,35	45	Ciclo A
16	0,3	0,65	45	Sin exposición
17	0,3	0,65	45	Ciclo A

18	0,3	0,65	45	Ciclo A
19	0,1	0,65	45	Sin exposición
20	0,1	0,65	45	Ciclo B
21	0,1	0,65	45	Ciclo B
22	0,1	0,65	45	Sin exposición
23	0,1	0,65	45	Ciclo A
24	0,1	0,65	45	Ciclo A
25	0,1	0,65	0	Sin exposición
26	0,1	0,65	0	Ciclo B
27	0,1	0,65	0	Ciclo B
28	0,1	0,65	0	Sin exposición
29	0,1	0,65	0	Ciclo A
30	0,1	0,65	0	Ciclo A
31	0,3	0,35	0	Sin exposición
32	0,3	0,35	0	Ciclo B
33	0,3	0,35	0	Ciclo B
34	0,3	0,35	45	Sin exposición
35	0,3	0,35	45	Ciclo B
36	0,3	0,35	45	Ciclo B
37	0,1	0,35	45	Sin exposición
38	0,1	0,35	45	Ciclo B
39	0,1	0,35	45	Ciclo B
40	0,3	0,65	0	Sin exposición
41	0,3	0,65	0	Ciclo B
42	0,3	0,65	0	Ciclo B
43	0,3	0,65	0	Sin exposición
44	0,3	0,65	0	Ciclo A
45	0,3	0,65	0	Ciclo A
46	0,3	0,65	45	Sin exposición
47	0,3	0,65	45	Ciclo B
48	0,3	0,65	45	Ciclo B

Fuente: Autor.

Con el fin facilitar el análisis de resultados que se puede apreciar más adelante, se realizó una clasificación de las probetas según sus parámetros de impresión obteniendo 8 tipos de configuración, que se ven registrados en la siguiente tabla.

Tabla 13. Configuración de probetas según parámetros de impresión.

Tipo de Configuración	de Espesor (mm)	Porosidad (%)	Ángulo de Impresión (°)
1	0.1	35%	0
2	0.3	35%	0
3	0.1	65%	0

4	0.3	65%	0
5	0.1	35%	45
6	0.3	35%	45
7	0.1	65%	45
8	0.3	65%	45

Fuente: Autor

Agrupando las probetas dentro de los 8 tipos de configuración anteriormente planteados y tomando como referencia el ciclo de exposición, se puede apreciar la siguiente tabla donde se muestra la configuración experimental final acorde al diseño de experimentos.

Diseño de Experimentos							
Ciclo de Exposición	Tipo de Configuración	de Probeta	Espesor (mm)	Porosidad (%)	Ángulo (°)		
Probetas sin ciclo de exposición	1	7	0.1	35%	0		
		10	0.1	35%	0		
	2	1	0.3	35%	0		
		31	0.3	35%	0		
	3	25	0.1	65%	0		
		28	0.1	65%	0		
	4	40	0.3	65%	0		
		43	0.3	65%	0		
	5	4	0.1	35%	45		
		37	0.1	35%	45		
	6	13	0.3	35%	45		
		34	0.3	35%	45		
	7	19	0.1	65%	45		
		22	0.1	65%	45		
	8	16	0.3	65%	45		
		46	0.3	65%	45		
Probetas Ciclo A de exposición	1	11	0.1	35%	0		
		12	0.1	35%	0		
	2	2	0.3	35%	0		
		3	0.3	35%	0		
	3	29	0.1	65%	0		
		30	0.1	65%	0		
	4	44	0.3	65%	0		
		45	0.3	65%	0		
	5	5	0.1	35%	45		
		6	0.1	35%	45		
	6	14	0.3	35%	45		
		15	0.3	35%	45		

	7	23	0.1	65%	45
		24	0.1	65%	45
	8	17	0.3	65%	45
		18	0.3	65%	45
Probetas Ciclo B de exposición	1	8	0.1	35%	0
		9	0.1	35%	0
	2	32	0.3	35%	0
		33	0.3	35%	0
	3	26	0.1	65%	0
		27	0.1	65%	0
	4	41	0.3	65%	0
		42	0.3	65%	0
	5	38	0.1	35%	45
		39	0.1	35%	45
	6	35	0.3	35%	45
		36	0.3	35%	45
	7	20	0.1	65%	45
		21	0.1	65%	45
	8	47	0.3	65%	45
		48	0.3	65%	45

Fuente: Autor

2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- El diseño de experimentos es útil para el investigador, estableciendo de la manera más práctica y concisa un procedimiento a seguir, en el cual se logra obtener la mayor cantidad de información con el menor número de ensayos posibles, haciendo combinaciones lógicas entre cada uno de los factores que intervienen en el proyecto.
- El diseño factorial es de gran ayuda cuando el proyecto cuenta con una gran variedad de factores, lo que ocasiona un gran número de réplicas. Esta metodología logra reducir sustancialmente el tamaño de la muestra de una manera estratégica para no obviar ninguna información importante. Al reducir el tamaño de la muestra, se ve influenciado de manera directa los factores costo y tiempo del proyecto, haciendo la tarea más sencilla para el experimentador.
- Los factores y niveles del experimento, fueron seleccionados con base en una revisión bibliográfica de trabajos investigativos similares, con esto se logra obtener una confiabilidad en los resultados obtenidos a partir de los ensayos correspondientes.

3. FABRICACIÓN DE PROBETAS MEDIANTE FDM

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA NORMA ASTM D638

3.1.1 Descripción general

Esta norma es la descripción de un método de ensayo que determina la resistencia a la tracción de probetas estandarizadas fabricadas con plásticos no reforzados, y con espesores máximos de 14 mm. Dicha norma aporta al desarrollo e investigación del diseño en ingeniería; puesto que, proporciona datos de utilidad en el área de resistencia de materiales. Sin embargo, es bueno considerar que, debido al alto grado de sensibilidad a la tasa de esfuerzo y condiciones ambientales, los datos obtenidos no se pueden considerar válidos al momento de someter el material a entornos muy distintos de las condiciones a las que se realizó el ensayo.

Es de común conocimiento, que las propiedades de tracción de algún material, varían según diversos factores ya sean de proceso o del medio externo. Estos tienen que ser controlados cuidadosamente con valores determinados, para lograr obtener resultados comparativos precisos y certeros [29].

3.1.2 Máquinas e instrumentos para el ensayo

Para el ensayo de tensión a las probetas, necesitamos conocer y tener acceso a ciertos elementos y/o máquinas, que nos permitirán realizar el ensayo de una manera adecuada.

3.1.2.1 Máquina universal de ensayos

Esta máquina tiene bastante similitud con una prensa, al punto que también funciona bajo principios hidráulicos, cuenta con facultades para someter materiales a distintos ensayos como son el de tracción y compresión, midiendo así las propiedades mecánicas del material. Para lograr esto, la máquina cuenta con un sistema de aplicación de cargas controladas sobre el elemento (probeta con dimensiones preestablecidas), arrojando de forma gráfica la deformación que sufre el material con la aplicación de las cargas, hasta el momento de su ruptura [30].

Cuenta con dos miembros, uno fijo y uno móvil, que, acompañado de unas empuñaduras o mordazas sujetan la probeta, para que, al momento de realizar el ensayo, esta permanezca estática.

La máquina también cuenta con un mecanismo de accionamiento, el cual imparte una velocidad uniforme y controlada, del miembro que genera el movimiento, a la vez que un indicador de carga muestra la magnitud de la fuerza de tracción total que está soportando la probeta.

3.1.2.2 Extensómetro

Es un instrumento que se encarga de mostrar la distancia que hay entre los dos puntos designados dentro de la probeta, con el fin de medir la deformación longitudinal y el esfuerzo al que está sometido la probeta [29]. Teniendo como principio el efecto piezorresistivo, que es la propiedad de algunos materiales de cambiar su resistencia al momento de interactuar con algún tipo de esfuerzo, deformándose en la dirección de las fuerzas aplicadas [31].

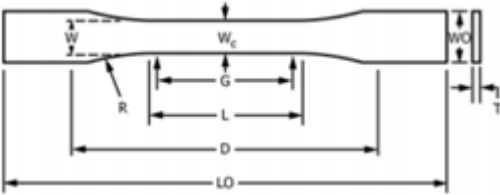
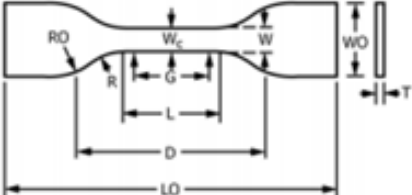
3.1.2.3 Micrómetro

Mediante su principio de medición, será el encargado de medir las dimensiones de las probetas, y que estas se ajusten a lo determinado según la norma.

3.2 DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURA GEOMÉTRICA DE LAS PROBETAS Y MODELADO CAD DE PROBETAS.

Para la fabricación de las probetas que permitirán cumplir con los objetivos del trabajo, nos remitimos a la norma ASTM D638 que suministra las características geométricas que se requieren para el ensayo a tensión, siendo enfáticos en la sección de probetas plásticas rígidas y semirrígidas Tipo I [29].

Tabla 12. Geometría de probetas para ensayo a tensión Norma ASTM D638 (Medidas en milímetros y pulgadas)

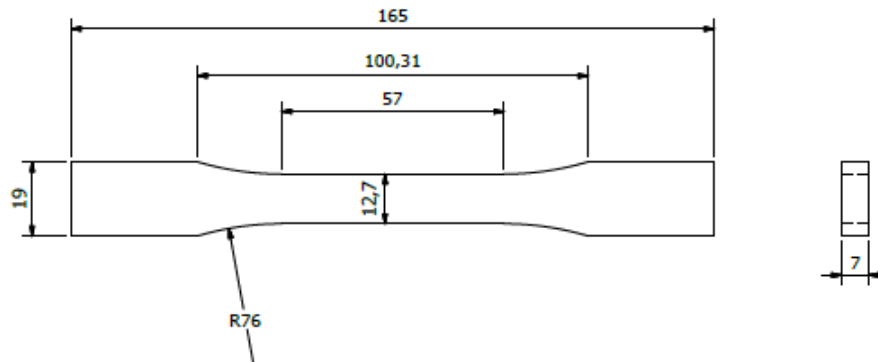
Geometría de probetas para ensayo a tensión norma ASTM D638						
Probetas tipo 1,2,3,5			Probetas tipo 4			
						
Fuente: ASTM D638 [32].			Fuente: ASTM D638 [32]			
Dimensiones	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tolerancias
Espesor	7 (0,28)	7 (0,28)	7 a 14 (0,28 a 0,55)	4 (0,16)	4 (0,16)	
W - Ancho de la sección estrecha	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (0.02)

L – Largo de la sección estrecha	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (0.02)
WO – Ancho total	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	-	+ 6.4 (0.25)
WO – Ancho total	-	-	-	-	9.53 (0.375)	+ 3.18 (0.125)
LO – Largo total	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	No Max
G – Longitud calibrada	50 (2)	50 (2)	50 (2)	-	7.62 (0.300)	± 0.25 (0.01)
G – Longitud calibrada	-	-	-	25 (1)	-	± 0.13 (0.005)
D – Distancia entre los hombros	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5)	25.4 (1)	± 5 (0.2)
R – Radio de filete	76 (3)	76 (3)	76 (3)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (0.04)
RO – Radio exterior	-	-	-	25 (1)	-	± 1 (0.04)

Fuente: Autor

Obteniendo así la geometría adecuada para las probetas (Ver Figura 18).

Figura 18. Geometría probeta.

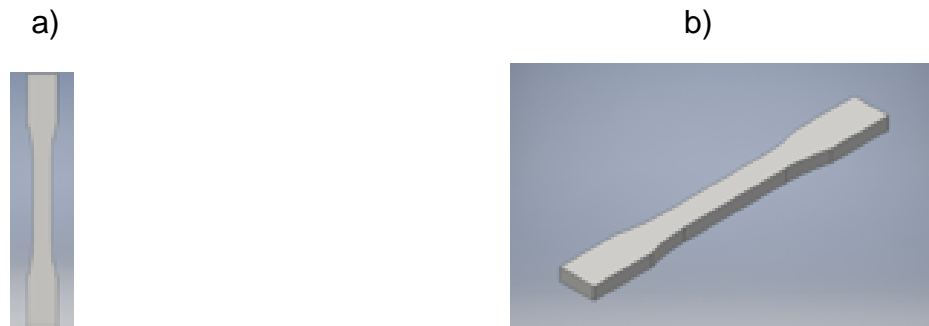


Fuente: Autor

3.3 GENERACIÓN DEL G-CODE PARA LA IMPRESIÓN DE LAS PROBETAS MEDIANTE TECNOLOGÍA FDM

El proceso para la creación de las probetas inicia, cuando se genera el archivo CAD conforme a la geometría planteada por la norma ASTM D638 anteriormente descrita. Para la elaboración de estos archivos se usó el Software CAD Autodesk Inventor 2016. Ver Figura 19.

Figura 19. Geometría de probetas, Autodesk Inventor. a) Vista Frontal. b) Vista Isométrica.



Fuente: Autor

Se debe generar un archivo de exportación de la probeta en formato .STL, este generará la conexión necesaria entre el software CAD y el software laminador, que se encargara de generar el G-Code con el que trabajara la impresora 3D, definiendo la forma de operación y los factores que influyen al momento de hacer la manufactura aditiva.

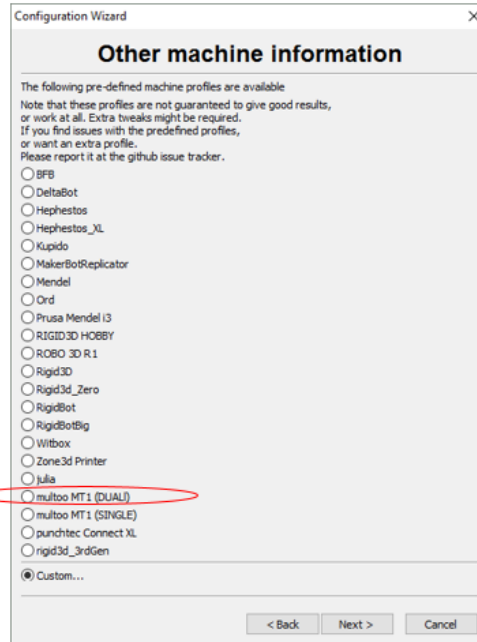
Este tipo de programas tiene la capacidad de tomar un archivo CAD con un sólido 3D, y separarlo en capas, creando un G-Code que permite manufacturar mediante la extrusión del filamento en capas sobrepuestas, de manera que al final de la ejecución del G-Code se genere el Sólido correspondiente al CAD 3D.

Para este caso se utilizó el Software Cura 15.04.06, por la accesibilidad y fácil manejo con el que cuenta, que junto con la máquina virtual de la máquina de impresión 3D Multoo 1.5 Pro High Speed Large Format Digital 3D Printer, permite parametrizar cada uno de los factores del proceso de acuerdo a los requerimientos que deben tener cada una de las probetas. A continuación, se presentará el proceso para la generación del G-Code en el software Cura.

- Lo primero es seleccionar la máquina 3D con la que se harán las respectivas impresiones, en este caso es la Multoo MT1 (DUAL) que cuenta con dos

cabezales y boquillas de impresión, pero que por el tipo de impresión que se hace, solo se utilizara una boquilla. Ver Figura 20.

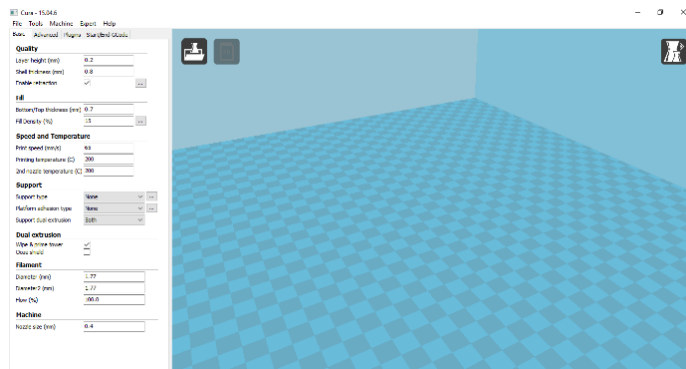
Figura 20. Selección máquina virtual, Cura.



Fuente: Autor

- Después de seleccionar la máquina a utilizar, aparecerá la siguiente interfaz, donde en la parte izquierda se puede observar la ventana que permitirá definir los niveles para cada uno de los factores de proceso, y en la parte central, se podrá apreciar la interfaz donde se debe insertar el archivo con la geometría de la probeta.

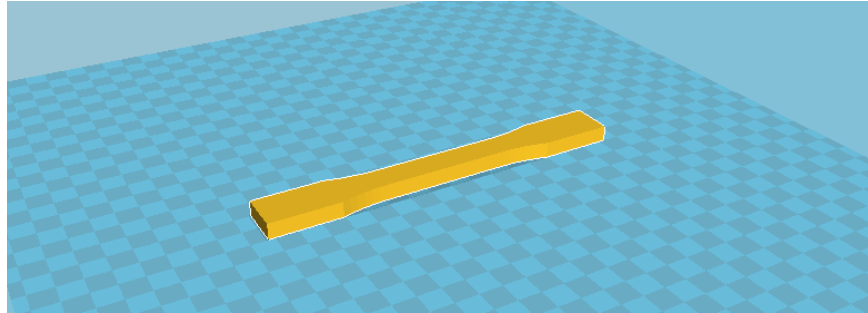
Figura 21. Interfaz Cura.



Fuente: Autor

- Para la correcta importación del archivo que contiene la probeta, será necesario arrastrarlo hasta el espacio correspondiente para esta

Figura 22. Importación de probeta.

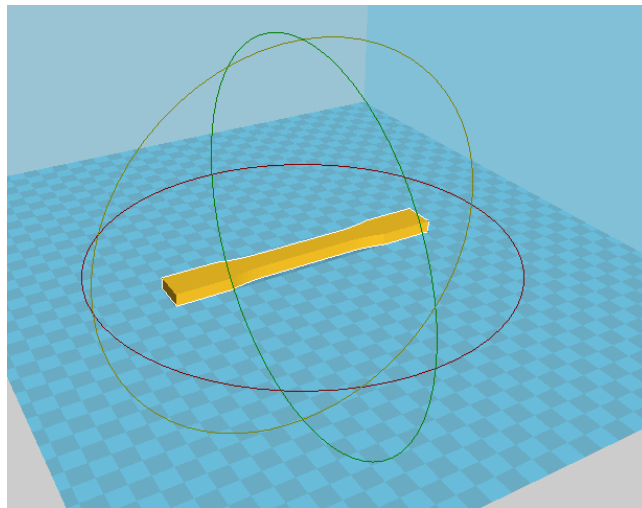


Fuente: Autor.

La ubicación de la probeta sobre el plano, será determinada por la manera de cómo fue creada la pieza en el archivo CAD.

- El Software Cura, cuenta con ejes de rotación sobre la pieza, para ajustarla a la ubicación adecuada, permitiendo modificar factores como el ángulo de Trama. Ver Figura 23.

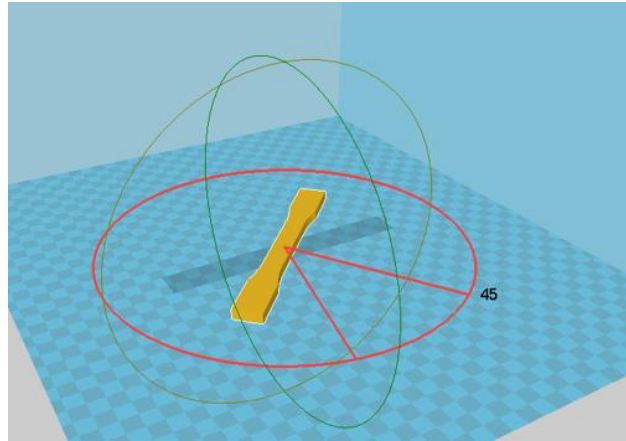
Figura 23. Ejes de rotación de la probeta.



Fuente: Autor

Después de la importación la probeta por Default se ubica de manera horizontal, que corresponde a un ángulo de impresión de 45° , por el movimiento que maneja el cabezal y cama de impresión; si se desea imprimir con otro ángulo, se deberá rotar mediante los ejes anteriormente descritos. Ver Figura 24.

Figura 24. Rotación de probeta.



Fuente: Autor.

- En el área de los factores de proceso, se pueden digitar el valor de los niveles que se desea que tengan, con respecto a los requerimientos de cada una de las probetas

Figura 25. Asignación de niveles, Cura.

Espesor de filamento	←	Quality	Layer height (mm)	0.3
Espesor de contorno	←		Shell thickness (mm)	0.6
			Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>
				...
Espesor cara superior e inferior	←	Fill	Bottom/Top thickness (mm)	0.6
Porcentaje de Relleno	←		Fill Density (%)	65
				...
Velocidad de impresión	←	Speed and Temperature	Print speed (mm/s)	50
Temperatura de impresión	←		Printing temperature (C)	205
Temperatura de impresión segunda boquilla	←		2nd nozzle temperature (C)	0
		Support	Support type	None
			Platform adhesion type	None
			Support dual extrusion	Both
		Dual extrusion	Wipe & prime tower	<input checked="" type="checkbox"/>
			Ooze shield	<input type="checkbox"/>
		Filament	Diameter (mm)	1.75
Diámetro de filamento	←		Diameter 2 (mm)	1.75
			Flow (%)	100.0
		Machine	Nozzle size (mm)	0.4

Fuente: Autor.

En la Tabla 1315, se podrá observar la descripción de cada una de las configuraciones disponibles en la ventana que se muestra en la Figura 25.

Tabla 13. Descripción de las configuraciones en CURA.

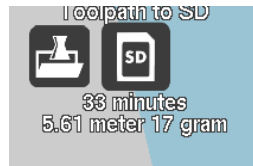
Configuración	Descripción
Quality (Calidad)	Layer Height (mm): Espesor de capa o Espesor que tendrá el filamento, indica la altura de la capa a la que se va a realizar la impresión.
	Shell thickness (mm): Espesor de los contornos laterales. Determina la anchura del borde del objeto.
	Enable Retraction: Permite que en los desplazamientos el extrusor retraiga un poco el material para evitar goteo, disminuyendo la posibilidad de aparición de defectos en la impresión.
Fill (Relleno)	Bottom/Top thickness: Espesor capa superior e inferior, indica el grosor que tendrán las capas superior e inferior de la pieza.
	Fill Density (%): Porcentaje de Relleno, indica el relleno que tendrá la figura. Repercute directamente en el tiempo y coste de impresión.
Speed and Temperature (Velocidad y Temperatura)	Print Speed (mm/s): Velocidad de la impresión, Este parámetro es inversamente proporcional a la calidad de la impresión, por lo que hay que ajustar el valor en función de la calidad que se desee obtener.
	Printing Temperature (°C): Temperatura de impresión, Fija la temperatura de la boquilla encargada de la impresión, depende del material de uso.
Filament (Filamento)	Diameter (mm): Establece el diámetro del filamento a usar.

Fuente: Zona Maker [33].

- Después de definir la correcta ubicación de la probeta en el plano y los factores de impresión, el programa cura arrojará el dato del tiempo y materia prima en gramos, que gastará para la impresión de cada una de las probetas.

Esto le permitirá establecer un eficiente programa de impresión para las probetas. Ver Figura 26

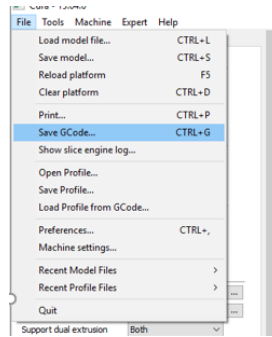
Figura 26. Tiempo y materia prima necesaria para la impresión de las probetas.



Fuente: Autor.

- Finalmente se podrá hacer la respectiva exportación del G-Code correspondiente a cada una de las probetas.

Figura 27. Exportación del G-Code, Cura.



Fuente: Autor.

Visualizándolo con un editor de texto, el G-Code esta esquematizado de la siguiente manera, y maneja operaciones y comandos en lenguaje CNC. Ver Figura 28.

Figura 28. G-Code realizado en Cura.

```
M109 S205.000000
;Sliced at: Fri 07-07-2017 12:23:40
;Basic settings: Layer height: 0.3 Walls: 0.6 Fill: 65
;Print time: 33 minutes
;Filament used: 5.605m 16.0g
;Filament cost: None
;M190 S70 ;Uncomment to add your own bed temperature line
;M109 S205 ;Uncomment to add your own temperature line
G21 ;metric values
G90 ;absolute positioning
M82 ;set extruder to absolute mode
M107 ;start with the fan off
G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops
G28 Z0 ;move Z to min endstops
G1 Z15.0 F7200 ;move the platform down 15mm
G92 E0 ;zero the extruded length
G1 F200 E3 ;extrude 3mm of feed stock
G92 E0 ;zero the extruded length again
G1 F7200
;Put printing message on LCD screen
M117 Printing...

;Layer count: 23
;LAYER:0
M107
G0 F7200 X123.382 Y129.856 Z0.300
;TYPE:SKIRT
G1 F1200 X149.139 Y155.612 E5.45178
G1 X151.174 Y159.075 F6.04920
```

Fuente: Autor

Después de hacer el anterior procedimiento con cada una de las probetas, se obtuvieron los siguientes datos correspondientes al consumo de tiempo y materia prima para el plan de impresión propuesto de las 48 probetas. Ver Tabla 16.

Tabla 14. Consumos plan de impresión.

Consumos Plan de Impresión						
Tipo de Configuración	de Espesor (mm)	Porosidad (%)	Ángulo (°)	Tiempo de Impresión (Minutos)	Material requerido (Gramos)	
1	0.1	35%	0	336	32	
2	0.3	35%	0	66	32	
3	0.1	65%	0	216	20	
4	0.3	65%	0	48	22	
5	0.1	35%	45	242	32	
6	0.3	35%	45	68	32	
7	0.1	65%	45	202	20	
8	0.3	65%	45	50	22	
Cantidades Totales por réplica				1324	211	
Cantidades Totales				3972	633	
				minutos,	gramos (48	
				equivalente	probetas)	
				a 66.2		
				horas de		
				trabajo de		
				impresión		
				(48		
				probetas)		

Fuente: Autor.

3.4 IMPRESIÓN DE PROBETAS 3D.

3.4.1. Descripción y características impresora 3D.

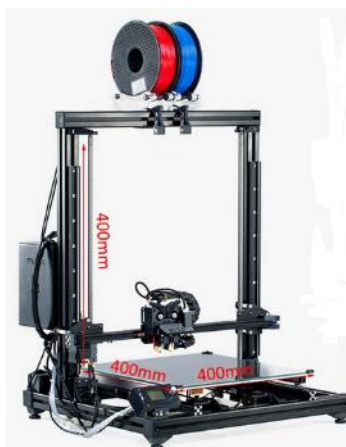
Para la impresión de las probetas 3D, se dispuso de la máquina Multoo 1.5 Pro High Speed Large Format Digital 3D Printer (Ver Figura 29), adquirida por la Universidad Santo Tomas, y que se encuentra disponible en el laboratorio de Metrología de la misma. Esta máquina cuenta con las siguientes características.

Tabla 15. Descripción y características Multoo 1.5 Pro High Speed Large Format Digital 3D printer.

Fabricante	Multoo
Distribuidor Autorizado	Voxel C&T (voxel3d.net)
Nombre	Multoo
Modelo	MT 1.5 Pro
Tecnología	FDM (Fused deposition modeling)
Área disponible para impresión	400*400*400 mm (L*W*H)
Área Cama de impresión	400*400
Color	Negro
Kit de extrusión	Single+Dual+laser engraving
Temperatura de boquilla	≤ 300°C & ≤ 400°C
Diámetro de la boquilla	0.4 mm (0.5/0.6/0.8 opcional)
Espesor de capa	0.05 – 0.3 mm
Temperatura cama de impresión	≤ 100°C
Grabador de energía	500 mW, 405nm
Velocidad de impresión	1-180 mm/s
Precisión de posición	Z: 2.5 μm, XY: 11 μm
Conexión	SD Card / USB cable
Idioma	Ingles
Software	Cura / Makerbot Desktop / Simplify 3D / Slic3r
Tamaño máquina	610*530*710 mm (L*W*H)
Peso	25 Kg
Garantía	12 Meses
Filamentos Compatibles	PLA, ABS, PVA, HIPS, PETG, Wood

Fuente: 3D Printers Online Store [34].

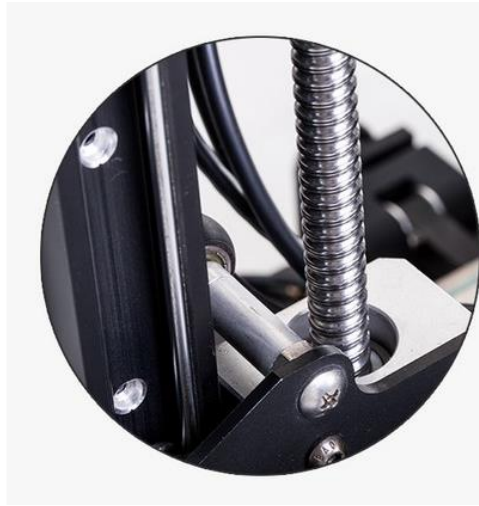
Figura 29. Multoo 1.5 Pro High Speed Large Format Digital 3D printer.



Fuente: 3D Printers Online Store [34].

El eje Z utiliza una guía lineal que está asegurada para garantizar que el eje se mueva sin ningún tipo de oscilación, utilizando un tornillo de bola para hacer el movimiento más preciso. El eje X utiliza perfiles en aluminio con ranura en V y poleas de alta precisión para garantizar un movimiento suave y constante.

Figura 30. Guía lineal eje Z.



Fuente: 3D Printers Online Store [34].

La cama de impresión, cuenta con la característica de ser independiente de la fuente de alimentación de la impresora, esto facilita la configuración al momento de imprimir. La cama cuenta con un panel de control, en el que se puede controlar y manejar la temperatura de acuerdo a los requerimientos.

Figura 31. Tablero de control cama de impresión.



Fuente: 3D Printers Online Store [34].

3.4.2 Selección de parámetros de la impresora para el correcto manejo de PLA.

El PLA es un material comúnmente utilizado para la impresión 3D por FDM por ser un material termoplástico. Esto significa que logra fácilmente un estado suave y moldeable cuando se calienta y luego volver a un sólido cuando se enfría, sin presentar, por lo general ninguna anomalía en la impresión, siempre y cuando se haga bajo los parámetros correctos [35].

Por recomendaciones del material, se recomienda utilizar una temperatura de boquilla de 205°C a una velocidad de 50 mm/s, y que la cama de impresión se encuentre a 50°C aproximadamente [36].

3.4.3 Preparación de máquina para impresión.

El proceso de impresión lleva consigo una preparación previa, que ayuda a que la impresión tenga un buen desarrollo, son procedimientos que lo mejoraran y harán del mismo un asunto más óptimo, a continuación se presentan los aspectos a tener en cuenta en la preparación de la impresión:

- Verificar el correcto encendido de la cama de impresión y la impresora
- Establecer la temperatura que debe tener la cama de impresión, y esperar que se estabilice
- Verificar que los ejes de la impresora, se encuentren en Home.
- Asegurar que el material es suficiente para el respectivo programa de impresión
- Si la impresora tiene más de una boquilla, verificar la altura de la misma, para evitar que levante lo impreso por la boquilla impresora.
- Verificar que la memoria contenga los G-Code correspondientes al programa de impresión.
- Verificar el estado de la cinta adhesiva que contiene la cama de impresión.

Después de verificar los pasos anteriormente descritos, se procede a seleccionar el G-Code para dar inicio a la impresión, es recomendable estar pendiente de la impresión en su totalidad, pues pueden presentarse problemas durante el proceso. Al finalizar la impresión se deberá utilizar una herramienta muy delgada para poder despegarla e iniciar con la siguiente impresión, se recomienda hacerlo cuando la temperatura de la cama de impresión haya disminuido en más o menos 10 centígrados.

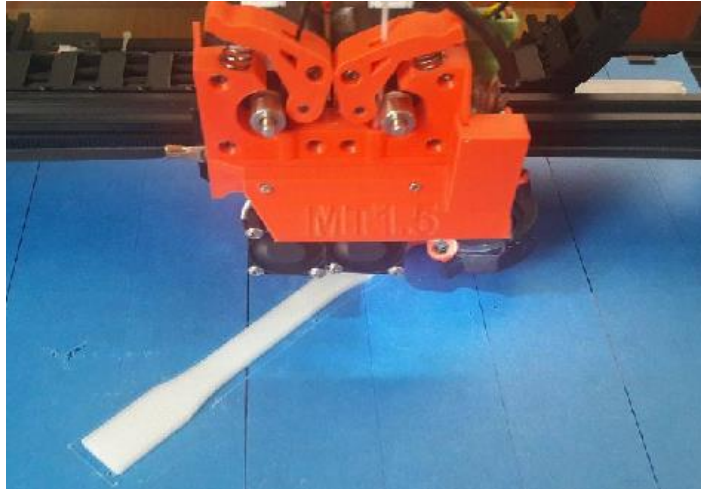
3.4.4 Impresión de probetas

Al verificar la los parámetros descritos en el punto anterior (Ver Tabla), se realizó la impresión de las probetas ascendentemente de acuerdo al tiempo de impresión,

teniendo en cuenta que se necesitaban 3 especímenes de cada una de las configuraciones (Ciclo de exposición A y B, Probeta de muestra).

Para las primeras configuraciones de las probetas, se seleccionó imprimir una por una, así se podría tener más apreciación del proceso como se observa en la Figura 32.

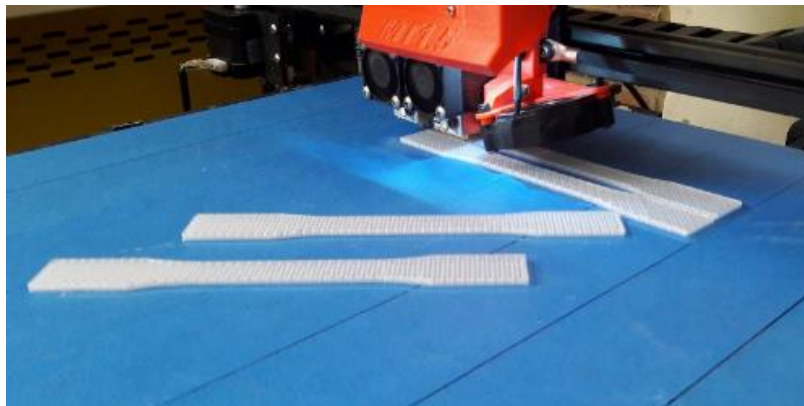
Figura 32. Impresión de probetas



Fuente: Autor

Con las últimas configuraciones de las probetas, se replanteó la manera de impresión (Imprimiendo varias probetas en un solo ciclo), Ver Figura 33, para observar y analizar el comportamiento que tendría la máquina al imprimir de esta manera, adicional a esto, poder identificar si realmente había un ahorro en el tiempo de impresión, concluyendo que si se presenta un ahorro de tiempo, pero no es significativo.

Figura 33. Impresión múltiple de probetas.

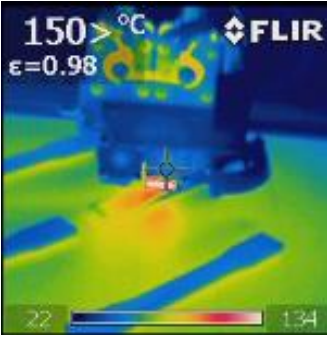
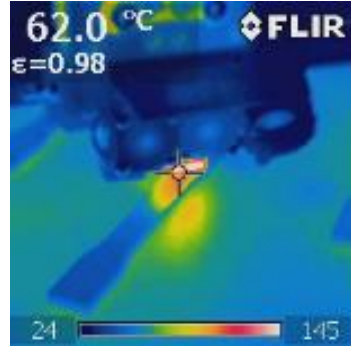
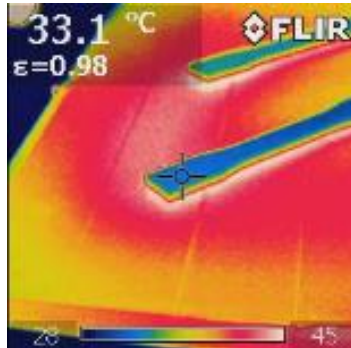
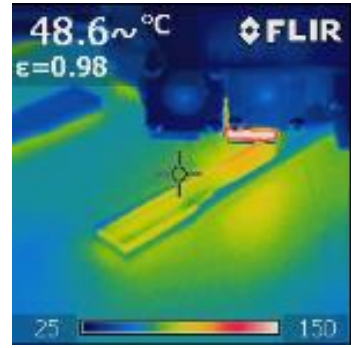


Fuente: Autor.

3.4.4.1 Termografías del proceso de impresión.

Durante el proceso de impresión de las probetas, se tomaron algunas termografías de algunos puntos específicos. En la Figura 34, se pueden ver las temperaturas de puntos como A) Boquilla de impresión $T = 150^{\circ}\text{C}$, B) Cuerpo de probeta post-impresión $T = 62.0^{\circ}\text{C}$, C) Probeta impresa $T = 33.1^{\circ}\text{C}$, D) Temperatura cama de impresión $T = 48.6^{\circ}\text{C}$.

Figura 34. Capturas termo gráficas.

A) Boquilla de impresión	B) Cuerpo de probeta post-impresión
	
C) Probeta impresa	D) Temperatura cama de impresión
	

Fuente: Autor

3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Los factores y niveles de impresión son de importancia relevante para la manufactura de las probetas, pues estos definen el proceso de impresión. Por esta razón es indispensable tenerlos bien definidos al momento de elaborar el diseño de experimentos, obteniendo realmente el número de ensayos necesarios.

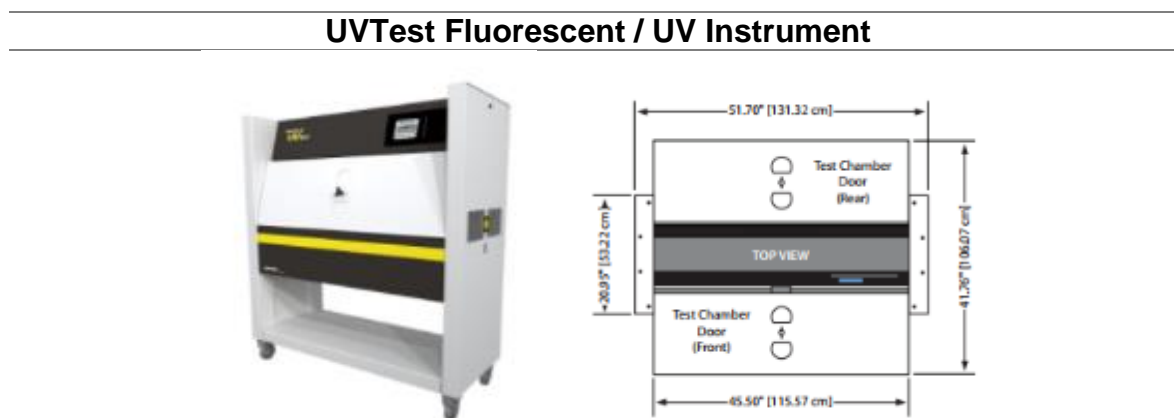
- Es importante manejar niveles apropiados para cada uno de los factores, pues al momento de generar el G-Code de impresión en el software Cura, estos son de gran influencia sobre parámetros como tiempo y costo de impresión.
- La impresión 3D por FDM (Fused deposition modeling), es una apropiada tecnología cuando se quieren generar productos donde tenga que existir igualdad entre lo que se desea crear y lo creado, es decir generar productos a la medida. Esto, gracias a la capacidad de esta tecnología para la manufactura de cualquier elemento que pueda ser generado en un software CAD.
- Se evidencio porque el PLA (Ácido Poliláctico) es un material comúnmente utilizado en la tecnología FDM, pues durante el proceso de impresión no requiere de parámetros con valores complicados de obtener, y presenta un proceso de impresión limpio, donde el material registra un buen comportamiento, dando como resultado elementos sin defectos notorios y con la estructura requerida.
- El parámetro de contorno en la impresión de las probetas, no se consideró un factor de proceso, pues todas las probetas fueron impresas con el mismo valor (2 capas). El hecho de que las probetas tengan contorno en su geometría, incrementa el costo y tiempo de impresión, pero es recomendable cuando se desean generar estructuras con geometrías uniformes y mejor acabado.
- Al momento de la generación del G-Code, el software Cura permite visualizar el tiempo de impresión de cada una de las probetas, donde se presentaron casos de incluso (3) horas de impresión para una probeta, esto debido a que manejaba niveles bajos de espesores de capa y porosidad. Cuando se presentan estos casos puede hacerse una impresión múltiple de probetas, adoptando la ubicación sobre la cama de impresión generada por el software cura. Es importante conocer cómo se comporta el material durante el proceso, pues existen materiales como el PMMA (Polimetilmetacrilato), que no presentan una impresión muy uniforme, impidiendo este tipo de acomodación para el proceso de impresión.

4. REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.1 MATERIALES Y EQUIPOS USADOS

4.1.1 UVTest Fluorescent/UV Instrument.

Tabla 16. Descripción UVTest Fluorescent / UV instrument



Fuente: Atlas, Material Testing Solutions [37].

Casa de Fabricación: ATLAS MATERIAL TESTING SOLUTIONS

8 Lámparas fluorescentes UV 40 W (UVA 340, UVB 313, UVA 351)

Control de temperatura del panel negro (BPT)

Puerta de seguridad y apagado por sobret temperatura

Conformidad CE y certificado UL & CSA

Pantalla Táctil

Calibrador de irradiancia de mano

Control de irradiancia (340 nm, 313 nm, 351 nm)

Compatibilidad con normas ASTM, DIN, EN, ISO, prEN, SAE

Rango de Irradiancia:

- Mínimo: 0.35 W/m² (UVA, UVB)
- Máximo: 1.55 W/m² (UVA), 1.23 W/m² (UVB)

Rango Temperatura panel:

- Fase UV 35-80°C (95-176 °F)
- Fase de Condensación 35-60°C (95-140°F)

Fuente: Autor.

El equipo anteriormente descrito, cuenta con dos áreas de exposición, que tienen una capacidad de 24 especímenes simultáneamente, esto permitió hacer la degradación de las probetas de una manera rápida ya que cada ciclo de exposición (Ciclo A y Ciclo B) contaba con 16 probetas.

Figura 35. Distribución de probetas dentro de máquina de ensayo.

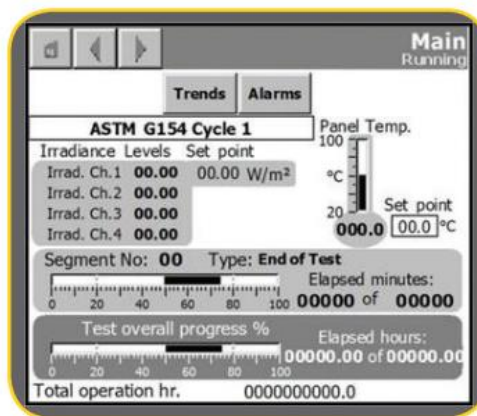


Fuente: Autor.

El control de la UVTest, esta comandado por una pantalla táctil (Ver Figura 36), que permite el acceso a toda la información contenida en la máquina, permitiendo el acceso a diversas tareas como:

- Pruebas preprogramadas para un funcionamiento sin errores
- Mensajes de alarma y calendario de mantenimiento
- Visualización de parámetros críticos
- Diversidad de idiomas

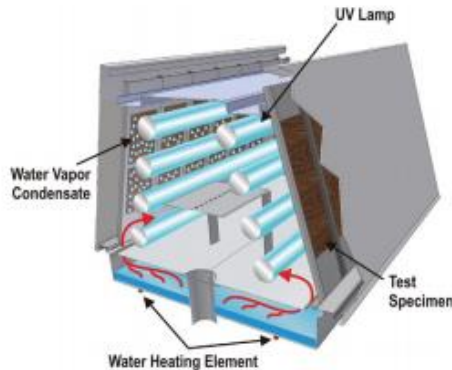
Figura 36. Pantalla Táctil UVTest.



Fuente: Atlas, Material Testing Solutions [37].

El proceso de condensación en la UVTest, se genera a través de un “Chamber Diagram” (Figura 37). Consiste en un deposito caliente en el fondo de la cámara de ensayo, que produce vapor de agua, el cual se eleva a la parte superior, donde los especímenes estarán expuestos a la radiación UV y una humedad relativa uniforme de 100% [37].

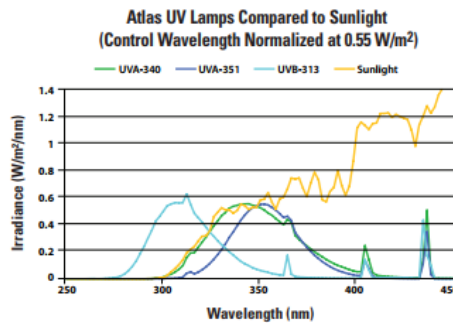
Figura 37. “Chamber Diagram” UVTest.



Fuente: Atlas, Material Testing Solutions [37].

Para la generación de irradiancia la UVTest, cuenta con tres tipos de lámparas fluorescentes UVA 340 nm, UVA 351 nm, y UVB 313 nm, en la Figura 38 se puede apreciar un comparativo entre la irradiancia generada por distintos tipos de luz UV y la luz solar.

Figura 38. Comparación de irradiancia entre tipos de luz UV.



Fuente: Atlas, Material Testing Solutions [37].

Los ciclos de exposición que maneja la UVTest, están dados de acuerdo a diferentes normas (Ver Tabla 17. Normas parametrizadas en UVTest., con las que viene configurada la máquina. Al momento de hacer algún tipo de ensayo, solamente se debe seleccionar que norma se utilizara como referencia, para que la máquina haga la búsqueda correspondiente en su biblioteca virtual.

Tabla 17. Normas parametrizadas en UVTest.

UVTest Standards		
ASTM	D4329	Plásticos
	D4587	Revestimientos
	D4799	Cubiertas

UVTest Standards		
	D5208	Plásticos Fotodegradables
	G151	Materiales no metálicos
	G154	Pruebas Generales
EN	927-6	Revestimientos de madera
	1297	Techos
	1898	FIBC
	12224	Textiles Técnicos
	13523-10	Revestimientos de bobinas
ISO	4892-1	Plásticos
	4892-3	Revestimientos
	11507	Revestimientos
	11895	FIBC
	11997-2	Pruebas cíclicas UV / Corrosión
SAE	J2020	Exterior Automotriz
prEN	1062-4	Revestimientos exteriores de mampostería.

Fuente: Autor.

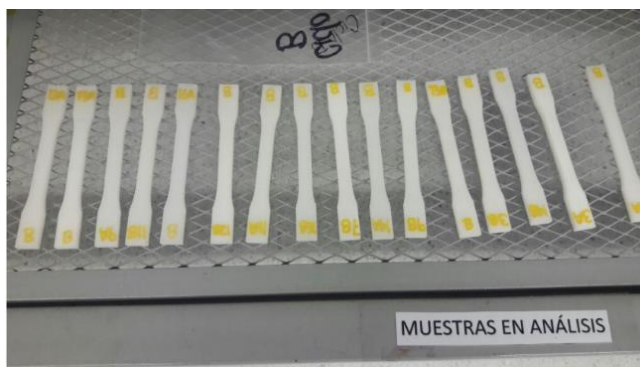
4.2 REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE DEGRADACIÓN

4.2.1 Preparación de Probetas

Para la realización del test de exposición, las probetas requieren de una preparación previa a condiciones ambientales específicas. Tal preparación se realizó durante un periodo de tiempo de 48 horas aproximadamente.

Las condiciones ambientales de preparación para las probetas fueron de temperatura 20°C y humedad relativa del 66%, esto se hizo con el fin de que las probetas alcanzaran un ambiente equilibrado, antes de ser expuestas al test.

Figura 39. Preparación ambiental de probetas.



Fuente: Autor.

4.2.2 Realización de Test

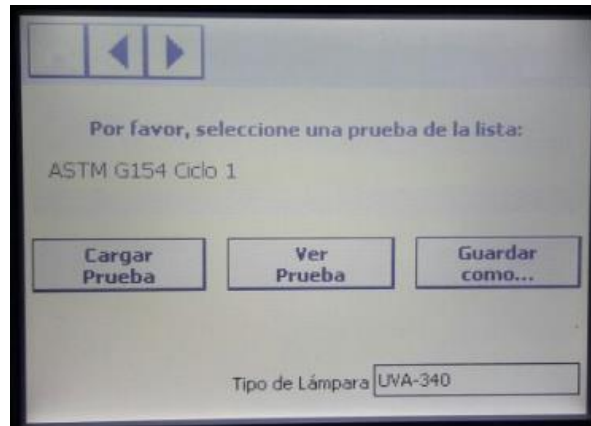
Como se mencionó anteriormente, la exposición de condiciones ambientales para las probetas se realizará en dos ciclos como es estipulado por la norma ASTM D4369 (Ver Tabla 6), estos ciclos ya se encuentran parametrizados en la máquina de ensayos UVTest. Mediante el panel táctil que se encuentra en la parte frontal del dispositivo, se selecciona el ciclo a trabajar, verificando que todos sus parámetros se encuentren a conformidad según la norma. A continuación se puede apreciar una recopilación de información acerca de la configuración de proceso y variables de ciclo de exposición de cada una de las probetas (Ver Tabla 18).

Tabla 18. Recopilación de parámetros de proceso y exposición ambiental para cada una de las probetas.

Ciclo de Exposición	Tipo de Configuración	Probeta	Espesor (mm)	Porosidad (%)	Ángulo (°)	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Irradiancia (W/m ²)	
Probetas sin ciclo de exposición	1	7	0.1	35%	0	60%	20	0	
		10	0.1	35%	0	60%	20	0	
	2	1	0.3	35%	0	60%	20	0	
		31	0.3	35%	0	60%	20	0	
	3	25	0.1	65%	0	60%	20	0	
		28	0.1	65%	0	60%	20	0	
	4	40	0.3	65%	0	60%	20	0	
		43	0.3	65%	0	60%	20	0	
	5	4	0.1	35%	45	60%	20	0	
		37	0.1	35%	45	60%	20	0	
	6	13	0.3	35%	45	60%	20	0	
		34	0.3	35%	45	60%	20	0	
	7	19	0.1	65%	45	60%	20	0	
		22	0.1	65%	45	60%	20	0	
	8	16	0.3	65%	45	60%	20	0	
		46	0.3	65%	45	60%	20	0	
	Probetas Ciclo A de exposición	1	11	0.1	35%	0	100%	60	0.77
			12	0.1	35%	0	100%	60	0.77
		2	2	0.3	35%	0	100%	60	0.77
			3	0.3	35%	0	100%	60	0.77
		3	29	0.1	65%	0	100%	60	0.77
			30	0.1	65%	0	100%	60	0.77
		4	44	0.3	65%	0	100%	60	0.77
			45	0.3	65%	0	100%	60	0.77
5		5	0.1	35%	45	100%	60	0.77	
		6	0.1	35%	45	100%	60	0.77	
6		14	0.3	35%	45	100%	60	0.77	
		15	0.3	35%	45	100%	60	0.77	
7		23	0.1	65%	45	100%	60	0.77	
		24	0.1	65%	45	100%	60	0.77	
8		17	0.3	65%	45	100%	60	0.77	
		18	0.3	65%	45	100%	60	0.77	
Probetas Ciclo B de exposición		1	8	0.1	35%	0	100%	70	0.77
			9	0.1	35%	0	100%	70	0.77
		2	32	0.3	35%	0	100%	70	0.77
			33	0.3	35%	0	100%	70	0.77
		3	26	0.1	65%	0	100%	70	0.77
			27	0.1	65%	0	100%	70	0.77
		4	41	0.3	65%	0	100%	70	0.77
			42	0.3	65%	0	100%	70	0.77
	5	38	0.1	35%	45	100%	70	0.77	
		39	0.1	35%	45	100%	70	0.77	
	6	35	0.3	35%	45	100%	70	0.77	
		36	0.3	35%	45	100%	70	0.77	
	7	20	0.1	65%	45	100%	70	0.77	
		21	0.1	65%	45	100%	70	0.77	
	8	47	0.3	65%	45	100%	70	0.77	
		48	0.3	65%	45	100%	70	0.77	

Las probetas fueron marcadas de manera que se identificaran cual sería el ciclo de exposición de cada una, obteniendo dos grupos de 16 probetas, que fueron expuestas al ciclo A y ciclo B respectivamente. En la Figura 40, se puede observar el proceso para la selección del programa que se quiera emplear durante el proceso.

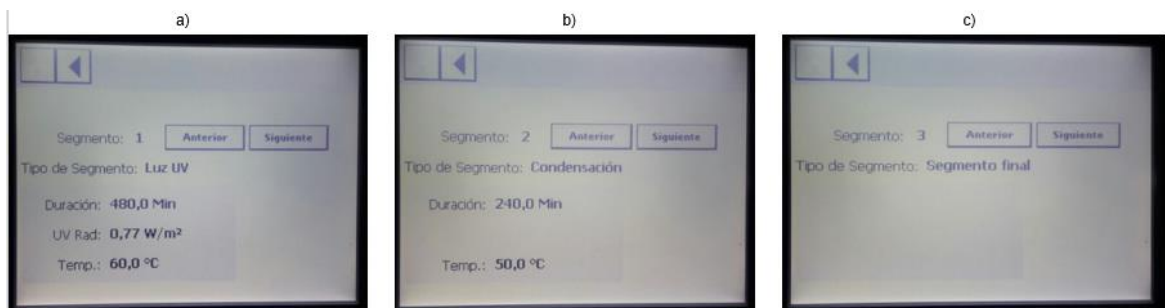
Figura 40. Proceso de selección de ciclo de exposición.



Fuente: Autor

Posterior a eso, la máquina presenta todos los parámetros del ciclo seleccionado, arrojando valores cuantitativos de los distintos factores de exposición.

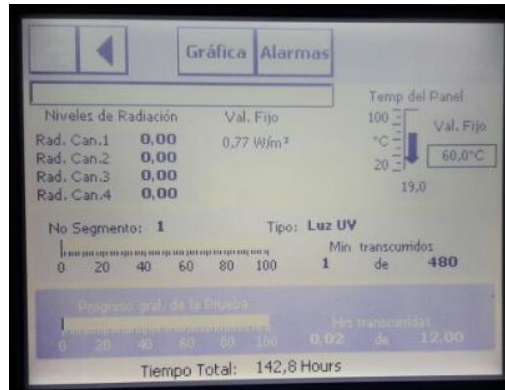
Figura 41. Parámetros de ciclo de exposición.



Fuente: Autor

Al momento de iniciar el ciclo de exposición, el panel táctil, muestra el desarrollo del ciclo a través del tiempo, permitiendo apreciar los valores que toman los factores como radiación y temperatura.

Figura 42. Desarrollo de ciclo de exposición.



Fuente: Autor.

Como se mencionó en la Tabla 6, los ciclos de exposición tienen una duración de 12 horas (Exposición UV y condensación), primero se realizó el ciclo de exposición A y luego el ciclo de exposición B.

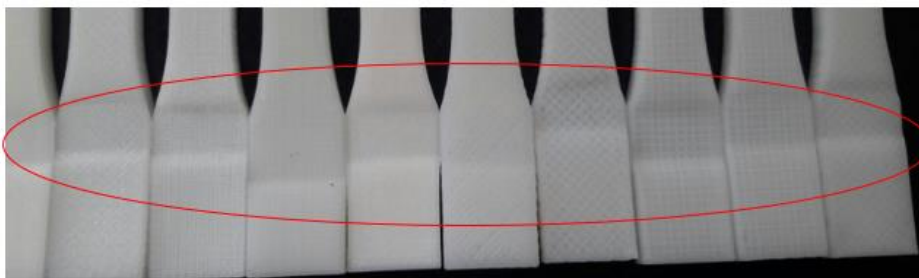
Al momento de desmontar las probetas de la máquina de exposición, se evidenció una pequeña deformación en el cuerpo de las probetas (Ver Figura 43), ocasionada por el cambio en las condiciones ambientales de exposición, algunas de ellas, presentaron ciertas huellas o marcas, que dejó el soporte sobre el cual estaban montadas.

Figura 43. Deformación en el cuerpo de las probetas, post exposición a degradación UV.



Fuente: Autor

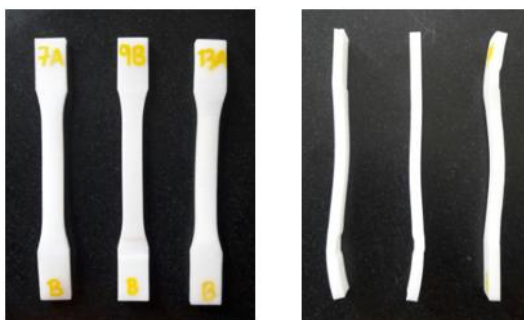
Figura 44. Marcaciones ocasionadas en el cuerpo de las probetas.



Fuente: Autor

Las mayores deformaciones se presentaron en las probetas que fueron expuestas al ciclo B de degradación, ciclo que en la etapa de exposición UV superaba al ciclo A por 10°C, presentando casos críticos de deformaciones en las probetas 26, 38, 20 (Ver Figura 45).

Figura 45. Probetas con deformaciones Críticas (Ciclo B de degradación, Probetas 26, 38, 20).



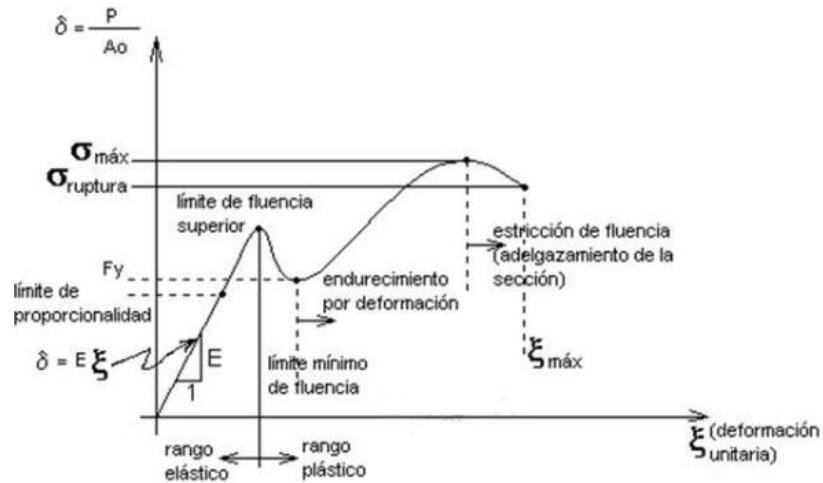
Fuente: Autor.

4.3 REALIZACIÓN ENSAYO A TENSIÓN DE PROBETAS

4.3.1 Descripción del Ensayo

El ensayo de tensión tiene como objetivo deformar una probeta, a una velocidad constante, aplicando una fuerza determinada, con el fin de que la probeta se rompa o llegue hasta un nivel de alargamiento previamente elegido [38]. A partir de este ensayo se obtiene el diagrama que compara el esfuerzo presente en la probeta a medida que se va generando el alargamiento de la misma. En la Figura 46, se pueden observar las distintas áreas que se presentan durante un ensayo de este tipo en el diagrama esfuerzo vs deformación.

Figura 46. Curva de esfuerzo VS deformación.



Fuente: Universidad Técnica Ciudad Real [39].

4.3.2 Materiales y equipos usados

Para la realización del ensayo de tracción a las probetas, se dispuso de la máquina de ensayos universales Tinius Olsen Model 50 ST (Tinius Olsen, Estados Unidos) (Ver Figura 47), la cual está diseñada para pruebas de tensión, compresión, flexión y resistencia al corte en materiales y ensamblajes con una fuerza máxima de 50kN/11000 lbf, permitiendo la aplicación de estas pruebas en distintos tipos de materias primas como metales, polímeros, textiles cauchos, adhesivos [40].

Figura 47. Máquina de ensayos universales, Tinius Olsen Model 50ST.



Fuente: Tinius Olsen [40].

Tabla 19. Especificaciones Técnicas, máquina de ensayos destructivos.

Nombre	Tinius Olsen Model 50 ST
Fabricante	Tinius Olsen
País de fabricación	Estados Unidos
Capacidad	50 kN, 5000 kg, 11000 lbf
Distancia entre columnas	410 mm, 16 in
Altura	1655 mm, 65 in
Ancho	729 mm, 29 in
Peso	163 kg, 359 lb
Voltaje	110/240 V
Frecuencia	50/60 Hz
Potencia	2000 W
Temperatura de operación	10 a 40 °C

Fuente: Tinius Olsen [41].

La Tinius Olsen Model 50 ST, cuenta con una unidad de presión neumática (Ver Figura 48), que es la encargada del suministro de aire local a las mordazas neumáticas, garantizando una correcta sujeción del espécimen, sin importar la geometría del mismo.

Figura 48. Unidad de Presión Neumática, Tinius Olsen Modelo 50T



Fuente: Autor

Esta máquina trabaja de la mano con el software de adquisición de datos HORIZON, dicho software es una interfaz de trabajo entre el usuario y la máquina de ensayos, que permite programar el tipo de ensayo que se realizara, ya sea de manera manual, o mediante una biblioteca virtual incorporada (Ver Figura 49), que contiene programas y normas estandarizadas y compatibles con la máquina, como en este caso la norma ASTM D638. El software contiene dichas normas precargadas y disponibles para el uso al momento de que el usuario proceda a realizar el ensayo.

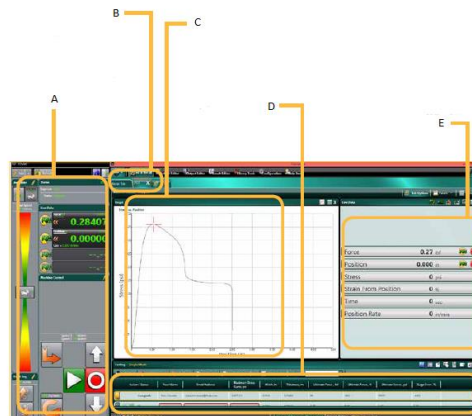
Figura 49. Biblioteca Virtual, Software de adquisición de datos Horizon.



Fuente: Horizon Data Materials Testing [42].

Horizon cuenta con una ventana de trabajo completa que muestra e indica, todos los datos generados mientras se realiza algún tipo de ensayo.

Figura 50. Ventana de Trabajo, Software de adquisición de datos HORIZON.



Fuente: Horizon Data Materials Testing [42].

A. Control de la Máquina

Desde esta parte se tiene el control completo de la máquina, además de poder observar la fuerza que se está empleando durante el ensayo

B. Área de prueba

Esta parte resalta las diferentes pestañas e indica las diferentes máquinas que estén conectadas con el software Horizon

C. Ventana de Gráfico

Es el área donde se muestran los gráficos generados por los ensayos realizados.

D. Ventana de resultados

Aquí se muestran los resultados de la prueba seleccionada.

E. Ventana de datos en Vivo

En esta parte se puede observar la variación de los datos que interactúan durante la realización del ensayo.

4.3.3 Preparación de Probetas

Para el ensayo de tracción se estableció un orden específico, empezando por las probetas sin exposición a degradación y terminando por las probetas expuestas al ciclo B de degradación.

Figura 51. Organización de probetas para ensayos de tracción.



Fuente: Autor.

Las probetas disponían cada una de bolsas plásticas para evitar roces con el exterior y otros elementos en las zonas donde se presentara la fractura.

4.3.4 Elaboración del ensayo

Para el desarrollo del ensayo es de gran importancia partir de alguna norma estandarizada, en este caso fue la norma ASTM D638, la cual existía dentro de la biblioteca virtual del programa controlador de la máquina de ensayos, y fue precargada para con sus especificaciones.

La norma se precargo con una velocidad de ensayo se 5mm/min, que es la establecida por la norma ASTM D638 para este tipo de probetas.

Figura 52. 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
		500 (20) ± 10 %	15
Nonrigid	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
	III	50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
		IV	50 (2) ± 10 %
500 (20) ± 10 %	15		

Fuente: ASTM D638 [32].

Al momento de empezar a ejecutar el ensayo, el programa solicita algunos datos (Densidad, Densidad Lineal, Área Transversal) de las probetas, para calcular la fuerza necesaria para lograr la fractura del elemento.

Estos datos fueron calculados y pueden observarse en la Tabla 20.

Figura 53. Suministro de datos para ensayo de tracción, Software HORIZON.



Fuente: Autor

Tabla 20. Calculo de área transversal, densidad, densidad lineal para probetas de ensayo a tracción.

	Probeta	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Densidad Lineal (g/m)	Área (mm ²)
Probetas sin exposición a ciclos de degradación.	7	15	13,44	0,896	79,654	88,9
	10	15	13,9	0,926	82,380	88,9
	13	15	14,26	0,950	84,514	88,9
	34	15	14,3	0,953	84,751	88,9
	19	15	13,01	0,867	77,105	88,9
	22	15	8,96	0,597	53,102	88,9
	16	15	8,81	0,587	52,213	88,9
	46	15	8,45	0,563	50,080	88,9
	1	15	9,13	0,608	54,110	88,9
	31	15	9,05	0,603	53,636	88,9
	25	15	13,55	0,903	80,306	88,9
	28	15	13,01	0,867	77,105	88,9
	40	15	14,02	0,934	83,091	88,9
	43	15	9,23	0,615	54,703	88,9
	4	15	9,43	0,628	55,888	88,9
	Probetas expuestas a ciclo A de degradación.	37	15	9,05	0,603	53,636
11		15	13,71	0,914	81,254	88,9
12		15	13,66	0,910	80,958	88,9
2		15	14,38	0,958	85,225	88,9
3		15	14,24	0,949	84,395	88,9
29		15	14,38	0,958	85,225	88,9
30		15	14,13	0,942	83,743	88,9
44		15	14,13	0,942	83,743	88,9
45		15	14,45	0,963	85,640	88,9
5		15	9,87	0,658	58,496	88,9
6		15	9,58	0,638	56,777	88,9
14		15	9,06	0,604	53,695	88,9
15		15	9,13	0,608	54,110	88,9
23		15	8,91	0,594	52,806	88,9
24		15	9,14	0,609	54,169	88,9
Probetas expuestas a ciclo B de degradación.		17	15	9,96	0,664	59,029
	18	15	9,86	0,657	58,436	88,9
	8	15	14,06	0,937	83,328	88,9
	9	15	14,27	0,951	84,573	88,9
	32	15	8,98	0,598	53,221	88,9
	33	15	8,96	0,597	53,102	88,9
	26	15	8,71	0,580	51,621	88,9

Probeta	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Densidad Lineal (g/m)	Área (mm ²)
27	15	9,12	0,608	54,051	88,9
41	15	14,27	0,951	84,573	88,9
42	15	13,82	0,921	81,906	88,9
38	15	14,22	0,948	84,277	88,9
39	15	13,97	0,931	82,795	88,9
35	15	14,22	0,948	84,277	88,9
36	15	14,38	0,958	85,225	88,9
20	15	9,93	0,662	58,815	88,9
21	15	9,87	0,658	58,496	88,9
47	15	9,92	0,661	58,792	88,9
48	15	9,81	0,654	58,140	88,9

Fuente: Autor.

Después de obtener los datos anteriormente descritos, se procede a hacer el ensayo de tracción con cada una de las probetas, mediante el siguiente procedimiento.

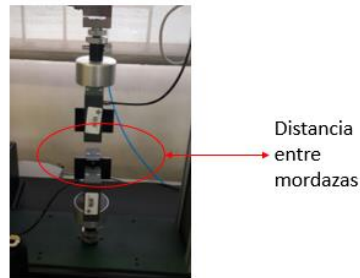
➤ Conexiones.

Se deberá verificar que exista conexión entre la maquina universal de ensayos y el software de adquisición de datos.

➤ Fijación de Mordazas.

Es de gran importancia, saber cuál es la distancia entre mordazas adecuada para el tipo de probetas a las que se les hará el ensayo, y se debe tener claro que este parámetro es constante por lo que debe permanecer estático para todas las probetas. La distancia entre mordazas puede fijarse mediante el programa Horizon, que permite mediante un control ampliar o reducir esta distancia según sea el requerimiento.

Figura 54. Distancia de separación entre mordazas sujetadoras de especímenes, máquina universal de ensayos.



Fuente: Autor.

➤ Sujeción de la probeta.

La máquina universal de ensayos, mediante la unidad de presión logra ajustar las mordazas neumáticas para la correcta sujeción de la probeta. Se debe ubicar la probeta en la zona de las mordazas (Ver Figura 55) y mediante el obturador de pie, hacer la sujeción. Para lograr un mejor agarre, la unidad de presión cuenta adicionalmente con un obturador, que genera una presión adicional de 80 PSI (Ver Figura 56), sobre la probeta, evitando así deslizamientos al momento de hacer el ensayo.

Figura 55. Sujeción de la probeta con mordazas neumáticas



Fuente: Autor

Figura 56. Unidad de presión maquina universal de ensayos.



Fuente: Autor

➤ Realización del ensayo.

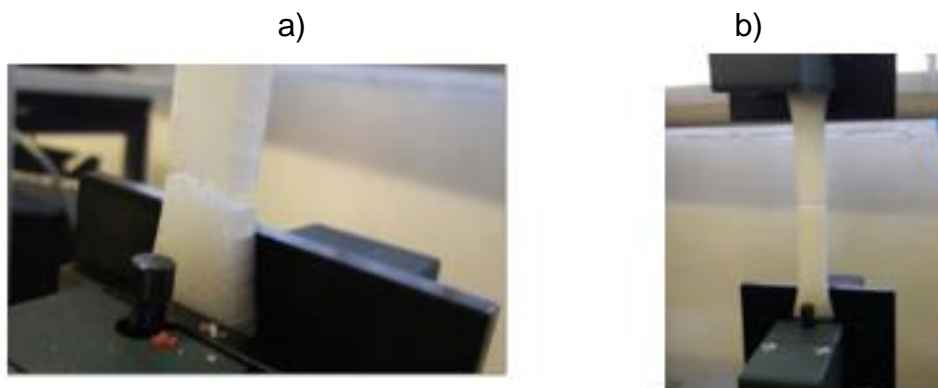
Después de verificar los pasos anteriormente mencionados, se somete el espécimen al ensayo, durante la elongación de la probeta, en la ventana del programa Horizon, se empezara a visualizar las curvas de fuerza VS posición y Esfuerzo VS deformación, las cuales pueden ser exportadas como PDF para su posterior análisis (Ver Anexo 1).

Durante el ensayo se tensionaron un total de 48 probetas (16 probetas sin exposición a ciclo de degradación, 16 probetas con exposición a ciclo A de degradación y 16 probetas con exposición a ciclo B de degradación), presentándose fallas en distintas áreas de las probetas, y presentándose fallas a distintos ángulos.

Los ensayos se realizaron con una longitud de 120 mm entre mordazas, y bajo los parámetros pertinentes a la norma ASTM D638

En la Figura 57 se puede encontrar unos de los ensayos de tensión realizados.

Figura 57. Ensayo de Tensión. a) Probeta 17 Ciclo de Exposición A. b) Probeta 26 Ciclo de Exposición B.



Fuente: Autor.

En la Figura 58, se puede encontrar una imagen detallada de la manera y lugar de fractura de las probetas anteriormente mencionadas.

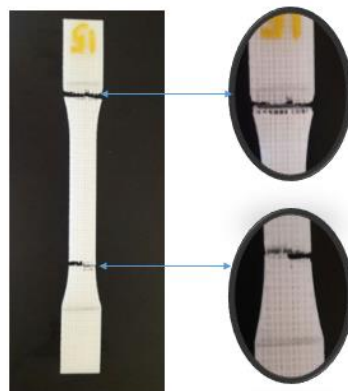
Figura 58. Fractura de probetas a) Probeta 17 Ciclo de Exposición A. b) Probeta 26 Ciclo de Exposición B.



Fuente: Autor.

Durante la realización de los ensayos, ocurrió un caso particular con la probeta 15 que no fue expuesta a ningún ciclo de exposición. La fractura se produjo simultáneamente en dos partes del cuerpo de la probeta, ocasionando una falla doble como se ve en la Figura 59.

Figura 59. Falla doble de probeta durante ensayo de tensión.







Fuente: Autor.

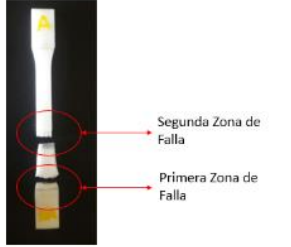
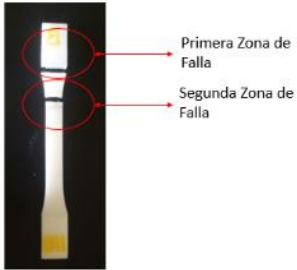
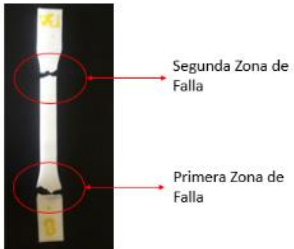
También se presentaron casos donde debido a las deformaciones ocasionadas por los ciclos de degradación, las probetas tenían en su estructura concentradores de

esfuerzos, los cuales generaron fallas no esperadas, es decir fallas en la zona de sujeción de las probetas.

Por esta razón se tomó la determinación, de volver a hacer el ensayo a las probetas, con el fin de lograr fractura en el área transversal correcta, en la Tabla 21, se puede apreciar con detalle las zonas de falla de las probetas.

Tabla 21. Visualización de primera y segunda zona de falla en probetas.

Probeta	Ciclo de degradación	Imagen
38	B	
2	A	
41	B	
42	B	

Probeta	Ciclo de degradación	Imagen
29	A	
32	B	
37	B	

Fuente: Autor.

4.3.5 Análisis Morfológico

Para el análisis morfológico, se tomó un específico grupo de probetas que contarán con variedad en los parámetros de proceso y ciclo de degradación, esto para lograr observar de una manera detallada como es la estructura de la probeta, y que influencia tiene la fractura sobre el área transversal de cada una.

Para dicho análisis, se utilizó el microscopio digital AM4013MT disponible en el laboratorio de Metrología de la Universidad Santo Tomas (Ver Tabla 22 y Figura 60. Microscopio digital AM4013MT Figura 60).

Figura 60. Microscopio digital AM4013MT



Fuente: Autor.

Tabla 22. Especificaciones técnicas del microscopio digital AM4013MT

Fabricante	AnMo Electronics Corporation
País	China
Modelo	AM4013MT Dino-Lite Premier
Resolución	1.3 Mega Pixeles (SXGA)
Rango de Aumento	20x, 50x, 200x
Cuadros por segundo	Hasta 30fps
Formatos de Guardado	Imagen: DinoCapture2.0, BMP, GIF, PNG, MNG, TIF, TGA, PCX Video: DinoCapture2.0, WMV, FLV, SWF
Iluminación	8 luces LED blancas
Sistema Operativo Compatible	Windows 10, 8, 7, Vista, XP MAC OS 10.4 o superior
Peso	140 gramos
Dimensiones	10.5 cm x 3.2 cm

Fuente: AnMo Electronics Corporation [43].

Figura 61. Detalles morfológicos de probeta 44. a) Vista de Ángulo de Trama y porosidad. b) Zona interna después de la falla.

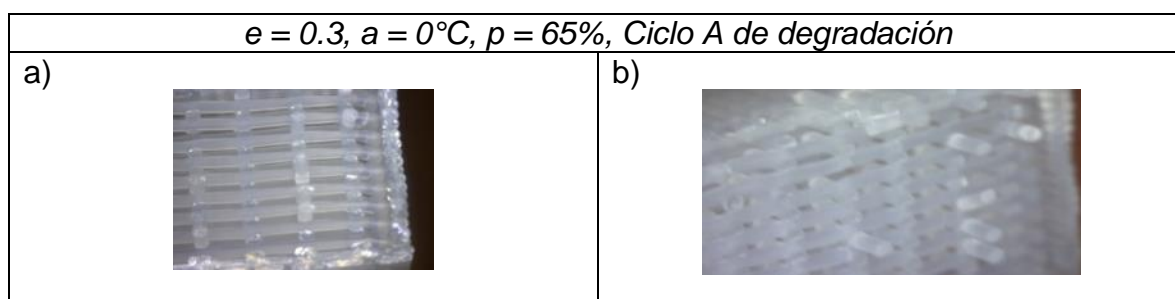


Figura 62. Detalles morfológicos de probeta 26. a) Zona de falla vista superior. b) Zona de falla vista lateral

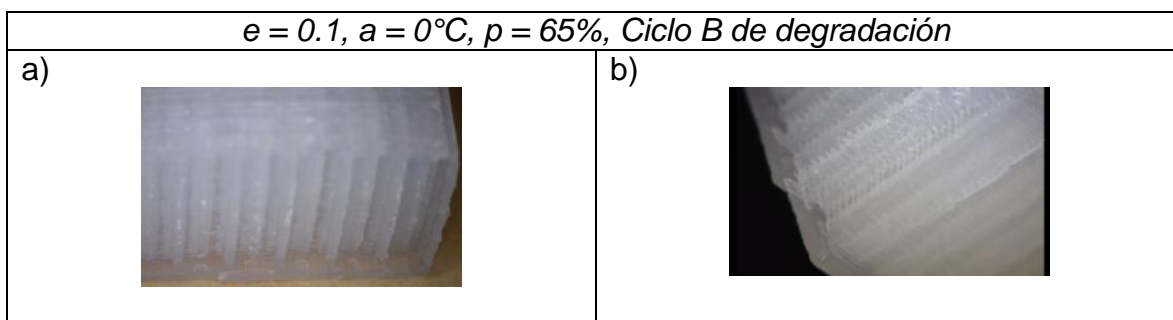
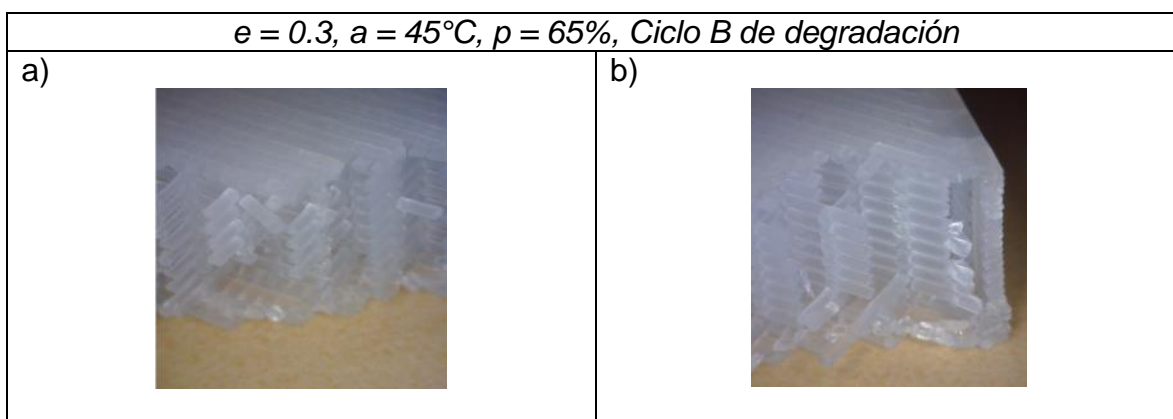


Figura 63. Detalles morfológicos de probeta 47. a) Zona interna de la probeta. b) Contorno de la probeta



Fuente: Autor.

En las figuras anteriormente expuestas, se logra tener un acercamiento a la estructura de las probetas y la zona de falla de cada una de ellas.

En la mayoría de las figuras se puede apreciar de qué manera fue el rompimiento de los filamentos de impresión, tanto en el interior de la probeta como en el contorno. En la Figura 61, se puede ver de manera clara la estructura de la probeta 44 ($e = 0.3, a = 0^\circ\text{C}, p = 65\%$, *Ciclo A de degradación*), donde se evidencia el ángulo de impresión (0 a 90°) con el cual fue depositado el material, así mismo se ve que la fractura de la probeta ocasionó el rompimiento de los filamentos que estaban en dirección a la fuerza aplicada, no se evidencia ningún tipo de aplastamiento en el material, también se aprecia que el rompimiento en el área del contorno se hace de manera uniforme.

En la Figura 62, se aprecia la probeta 26 ($e = 0.1, a = 0^\circ\text{C}, p = 65\%$, *Ciclo B de degradación*) con estructura parecida a la presentada en la probeta 15 de la Figura 61, con la diferencia de tener un espesor de filamento de menor calibre. Esto hace que los filamentos sean más finos y presenta una fractura como la que se ve en la

figura b. Tanto en la figura a como en la b, se aprecia que el contorno tubo una fractura uniforme, y que la falla ocurrió principalmente desde el interior de la probeta ya que el material depositado en el contorno fracturó unos milímetros más abajo.

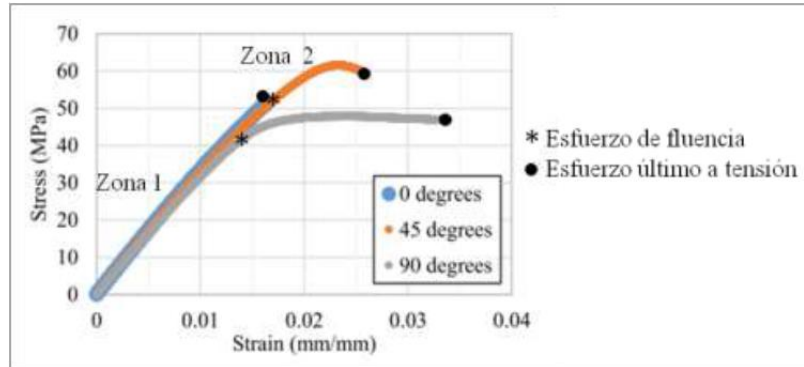
A diferencia de las anteriores ilustraciones, en la Figura 63 probeta 47 ($e = 0.3$, $a = 45^\circ\text{C}$, $p = 65\%$, *Ciclo B de degradación*), se aprecia el ángulo de impresión de 45° , vemos que gracias a esto, la zona de falla luce totalmente distinta, presentando fractura de los filamentos presentes en ambas direcciones. Así mismo, el contorno se ve afectado de diferente manera, pues ya no se visualiza una falla uniforme, si no que por el contrario, presenta una falla irregular.

4.3.6 Resultados

Los resultados obtenidos se pueden observar gráficamente en el Anexo 1. Con los resultados obtenidos en este ensayo, se generaron las curvas de esfuerzo VS deformación, para cada una de las 48 probetas. Mediante estas gráficas se observó que todas las probetas que fueron expuestas al ensayo de tensión, presentaron un comportamiento mecánico, similar a las curvas esfuerzo VS deformación para estructuras en PLA.

La Figura 64, hace referencia a la gráfica Esfuerzo vs. Deformación de probetas fabricada en PLA, con ángulos de impresión de $0,45$ y 90° , gráficas en las que se pueden identificar claramente 2 zonas: La Zona 1 corresponde a la pendiente "Modulo de Elasticidad", zona que se encuentra entre el punto 0 de la gráfica, y el punto donde se ubica el esfuerzo de fluencia; cuando el material se encuentra en esta zona cuenta con la capacidad de recuperar su forma original una vez sea retirada la carga a la que se encuentra expuesto. Al momento de que el material alcance su esfuerzo de fluencia, se da inicio a la Zona 2 de la gráfica, región en la cual el material tiene un comportamiento plástico, esto significa que presenta una deformación rápida como respuesta al aumento del variable esfuerzo. Por último, se encuentra dentro de la gráfica el punto llamado esfuerzo último a tensión, que es donde el material no es capaz de soportar el esfuerzo generado por la aplicación de la carga, produciendo la rotura.

Figura 64. Curvas Típicas de esfuerzo VS deformación para estructuras en PLA.

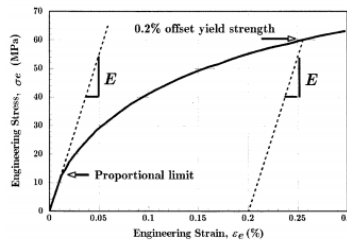


Fuente: Rodríguez, Restrepo [12].

Según el diseño de experimentos, existe una variedad en los factores de proceso y de exposición en las probetas, por ende existe una variedad en los resultados de las propiedades mecánicas encontradas a partir del ensayo de tensión, en las tablas 24, 25 y 26 están registrados los resultados obtenidos a partir del ensayo a tensión (Esfuerzo máximo, Porcentaje de Elongación, Módulo de Elasticidad) por cada uno de los ciclos de degradación, así mismo se podrá encontrar un comparativo entre probetas en las figuras 66, 67 y 68.

El módulo de elasticidad está definido como la pendiente de la recta en la zona de proporcionalidad directa entre tensión y deformación [44], el cual fue determinado con un rango de datos específico que comprende entre el 0% y el 0,2% de los datos obtenidos en el eje correspondiente a la deformación (eje X), como se puede ver en la Figura 65.

Figura 65. Cálculo del módulo elástico convencional.



Fuente: Roylance [45].

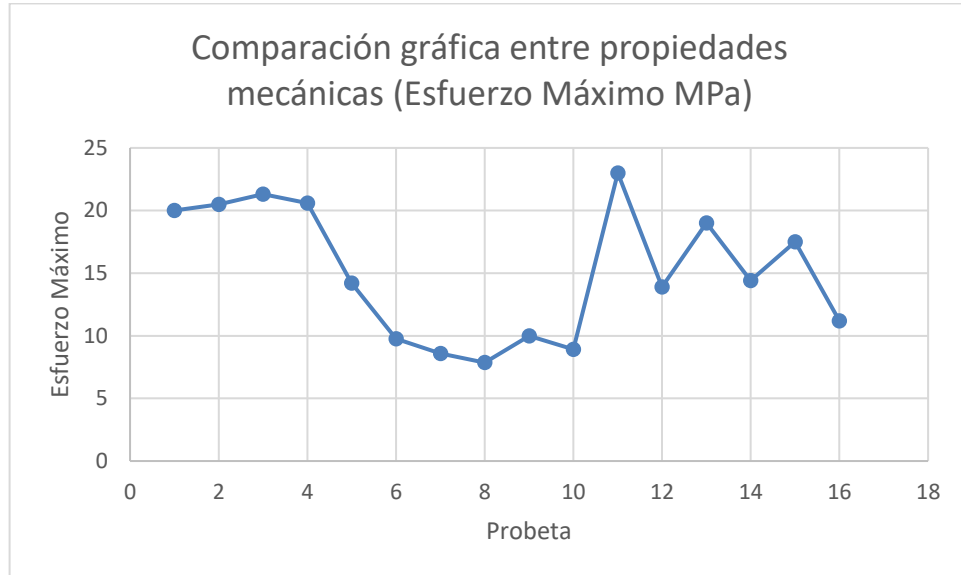
Tabla 23. Resultados de ensayo de tensión en probetas sin exposición a ciclo de degradación

Probetas sin exposición a ciclo de degradación.							
Tipo de Configuración	Probeta	Espesor (mm)	Porosidad (%)	Ángulo (%)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Porcentaje de Elongación (%)	Módulo de Elasticidad (GPa)
1	7	0,1	0,35	0	21,30	2,4320	1,15461
	10	0,1	0,35	0	20,60	2,5390	1,25467
6	13	0,3	0,35	45	14,20	2,4540	0,80342
	34	0,3	0,35	45	13,90	2,2860	0,82637
7	19	0,1	0,65	45	8,59	1,8980	0,56330
	22	0,1	0,65	45	7,86	1,9630	0,48399
8	16	0,3	0,65	45	9,76	2,3250	0,74016
	46	0,3	0,65	45	11,20	2,3500	0,61070
2	1	0,3	0,35	0	20,00	1,9630	1,25414
	31	0,3	0,35	0	23,00	2,3760	1,26645
3	25	0,1	0,65	0	10,00	2,3660	0,69541
	28	0,1	0,65	0	8,92	1,7050	0,64833
4	40	0,3	0,65	0	14,40	1,9110	0,92286
	43	0,3	0,65	0	17,50	2,3370	0,87231
5	4	0,1	0,35	45	20,50	3,3080	0,86052
	37	0,1	0,35	45	19,00	2,4900	1,03706

Fuente: Autor.

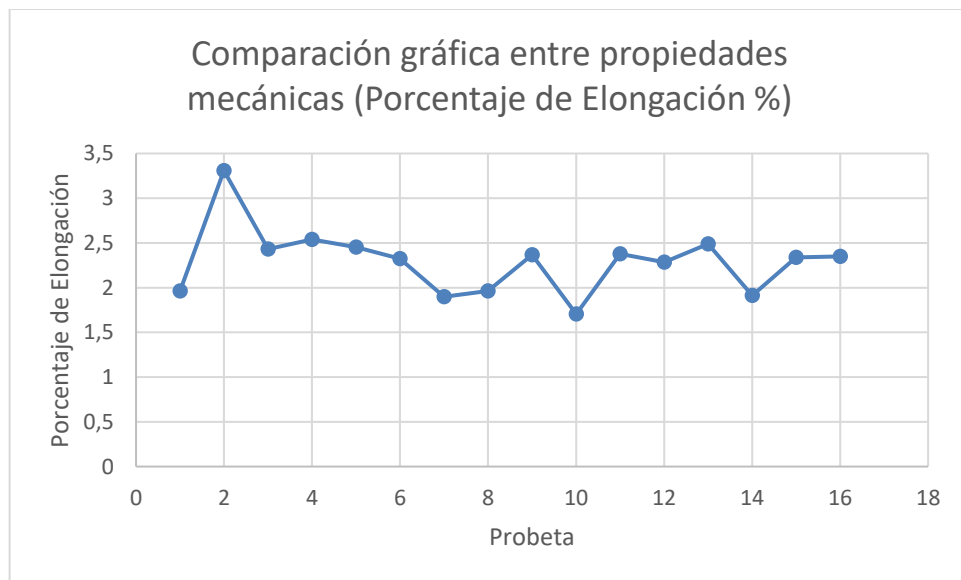
Figura 66. Comparación gráfica de resultados de ensayo de tensión en probetas sin exposición a ciclo de degradación.

a). Esfuerzo Máximo



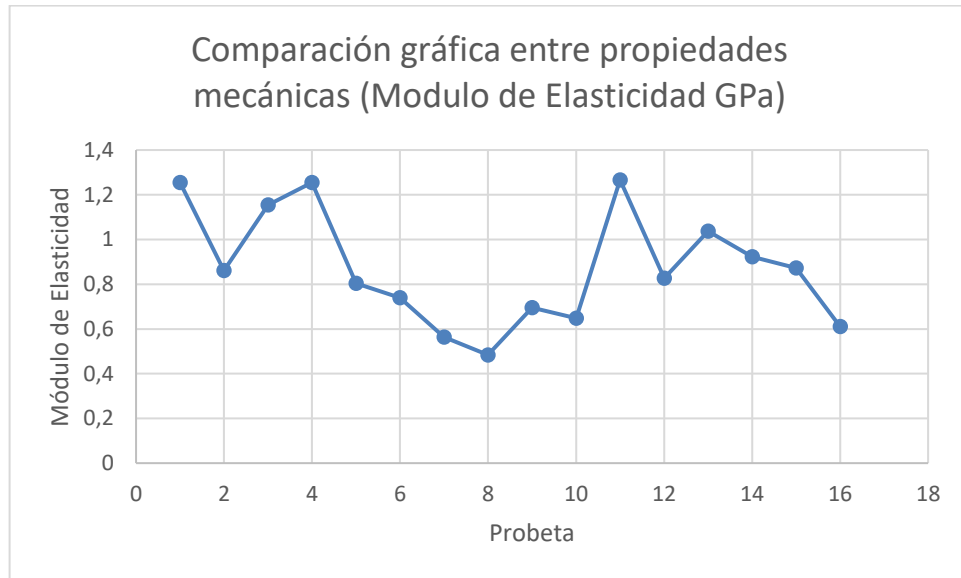
Fuente: Autor.

b). Porcentaje de Elongación



Fuente: Autor.

C. Módulo de Elasticidad



Fuente: Autor.

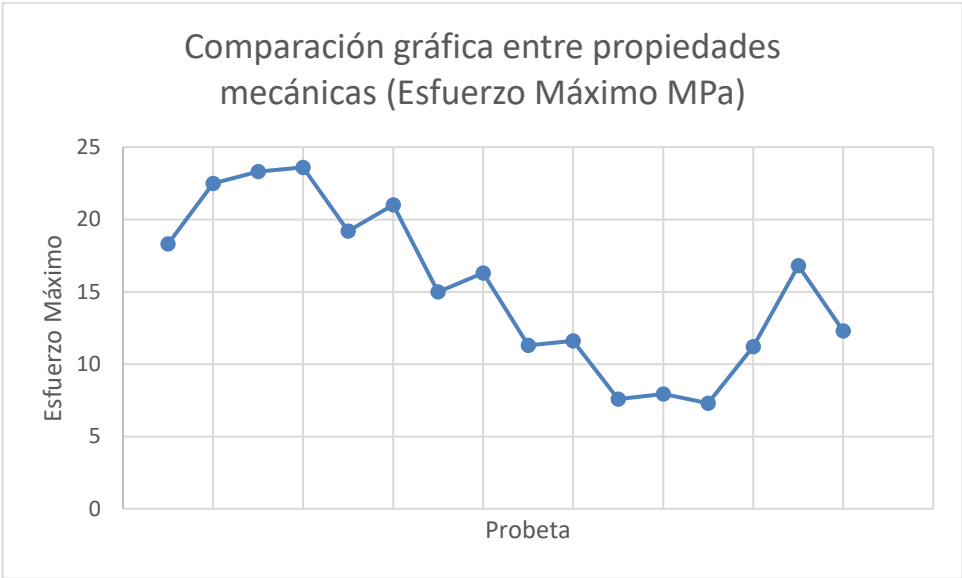
Tabla 24. Resultados de ensayo de tensión en probetas con exposición a ciclo A de degradación.

Probetas sin exposición a ciclo de degradación.							
Tipo de Configuración	Probeta	Espesor (mm)	Porosidad (%)	Ángulo (%)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Porcentaje de Elongación (%)	Módulo de Elasticidad (GPa)
1	11	0,1	0,35	0	19,20	1,9370	1,24948
	12	0,1	0,35	0	21,00	2,1570	1,29105
2	2	0,3	0,35	0	18,30	1,8910	0,84472
	3	0,3	0,35	0	22,50	2,1310	0,85380
3	29	0,1	0,65	0	7,30	1,8470	0,73837
	30	0,1	0,65	0	11,20	1,7950	0,73733
4	44	0,3	0,65	0	16,80	2,2470	0,73476
	45	0,3	0,65	0	12,30	1,4980	0,78645
5	5	0,1	0,35	45	23,30	1,3430	1,75265
	6	0,1	0,35	45	23,60	1,4720	1,72702
6	14	0,3	0,35	45	15,00	2,5310	0,78084
	15	0,3	0,35	45	16,30	1,3560	1,63456
7	23	0,1	0,65	45	7,58	1,4070	0,52545
	24	0,1	0,65	45	7,93	1,4850	0,67116
8	17	0,3	0,65	45	11,30	2,4070	0,54342
	18	0,3	0,65	45	11,60	2,2860	0,69309

Fuente: Autor

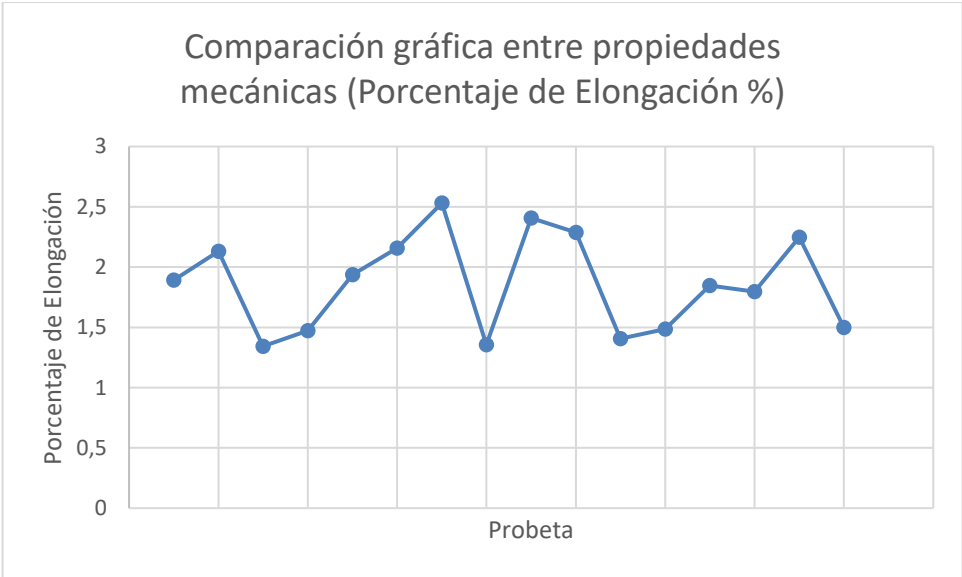
Figura 67. Comparación gráfica de resultados de ensayo de tensión en probetas con exposición a ciclo A de degradación.

a). Esfuerzo Máximo



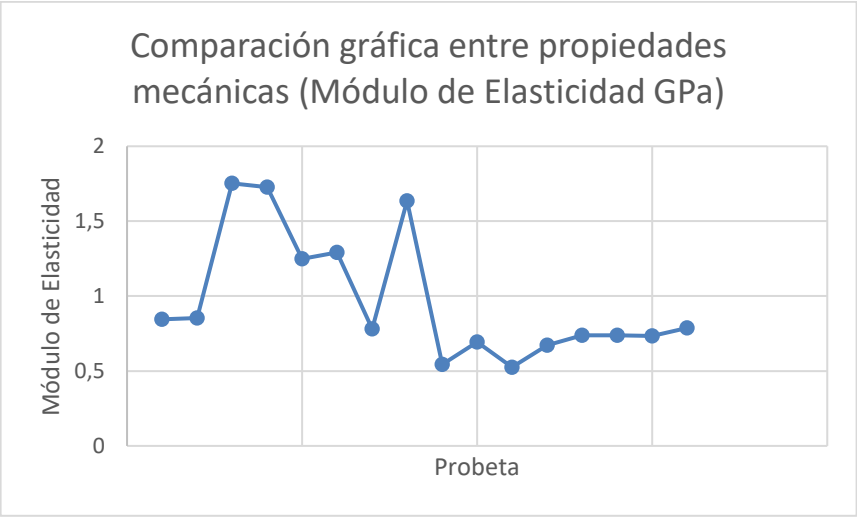
Fuente: Autor.

b). Porcentaje de Elongación



Fuente: Autor.

C. Módulo de Elasticidad



Fuente: Autor.

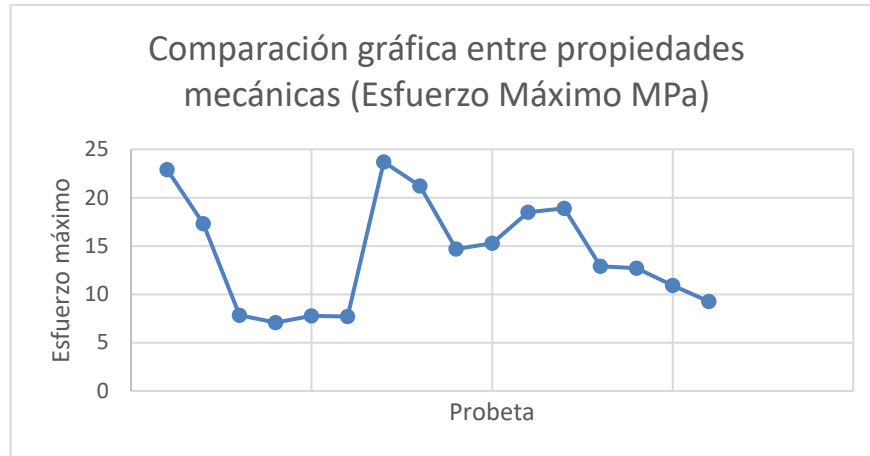
Tabla 25. Resultados de ensayo de tensión en probetas con exposición a ciclo B de degradación.

Probetas sin exposición a ciclo de degradación.							
Tipo de Configuración	Probeta	Espesor (mm)	Porosidad (%)	Ángulo (%)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Porcentaje de Elongación (%)	Módulo de Elasticidad (GPa)
1	8	0,1	0,35	0	22,90	2,2600	1,37742
	9	0,1	0,35	0	17,30	1,6530	1,29159
2	32	0,3	0,35	0	23,70	2,3250	1,25658
	33	0,3	0,35	0	21,20	2,3120	0,90187
3	26	0,1	0,65	0	7,78	1,5500	0,64752
	27	0,1	0,65	0	7,69	1,4460	0,60786
4	41	0,3	0,65	0	12,90	1,8050	1,26764
	42	0,3	0,65	0	12,70	0,7230	2,23945
5	38	0,1	0,35	45	18,50	1,2780	1,57977
	39	0,1	0,35	45	18,90	2,0560	1,07196
6	35	0,3	0,35	45	14,70	2,1490	0,92875
	36	0,3	0,35	45	15,30	2,2990	0,72847
7	20	0,1	0,65	45	7,84	1,7560	0,59553
	21	0,1	0,65	45	7,08	2,3840	0,37519
8	47	0,3	0,65	45	10,90	1,8600	0,75022
	48	0,3	0,65	45	9,26	1,6270	0,77987

Fuente: Autor

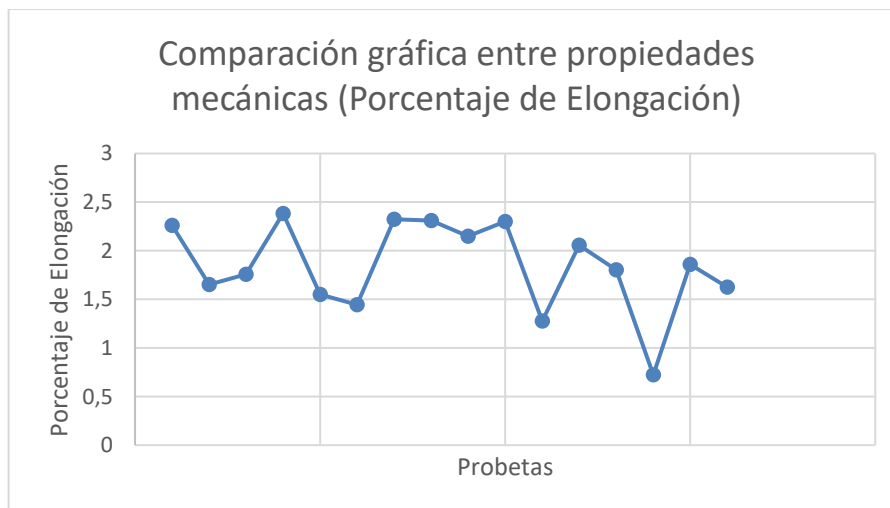
Figura 68. Resultados de ensayo de tensión en probetas con exposición a ciclo B de degradación.

a). Esfuerzo Máximo



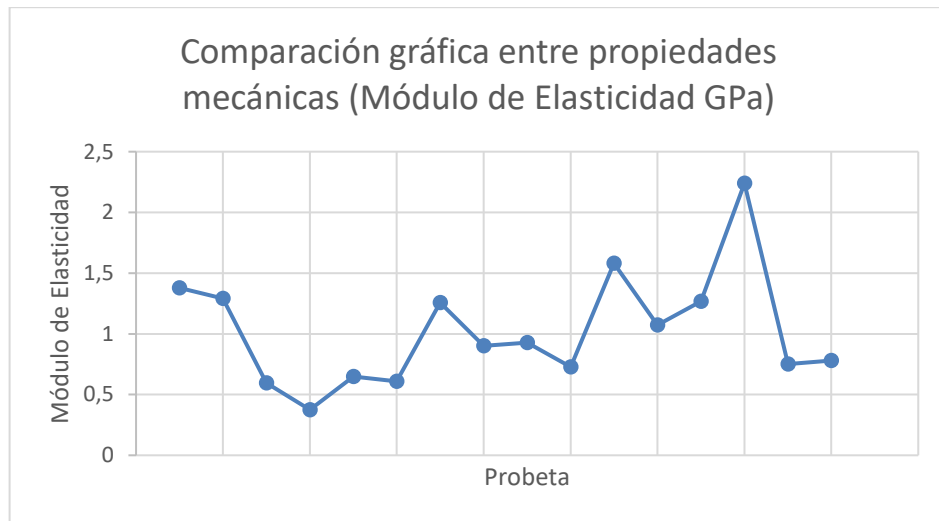
Fuente: Autor.

b). Porcentaje de elongación



Fuente: Autor.

C. Módulo de Elasticidad



Fuente: Autor.

Para lograr comprender la influencia de los factores de exposición a degradación y el tipo de configuración de impresión, sobre los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas a partir del ensayo de tensión, se hizo una comparación de los resultados (Ver Tabla 26). Allí se logra apreciar la diferencia numérica entre los valores de las propiedades mecánicas.

Tabla 26. Comparación de resultados obtenidos a partir del ensayo de tensión, entre probetas sin exposición a ciclo de degradación y probetas con exposición a ciclo de degradación.

Propiedades mecánicas de las probetas de acuerdo a ciclo de exposición y tipo de configuración de impresión												
Ciclo de Exposición	Tipo de Configuración	Probeta	Espesor	Porosidad	Ángulo	Humedad	Temperatura	Irradiancia	Esfuerzo Máximo	Porcentaje de Elongación	Módulo de Elasticidad	
Probetas sin ciclo de exposición	1	7	0.1	35%	0	60%	20	0	21,30	2,4320	1,15461	
		10	0.1	35%	0	60%	20	0	20,60	2,5390	1,25467	
	2	1	0.3	35%	0	60%	20	0	20,00	1,9630	1,25414	
		31	0.3	35%	0	60%	20	0	23,00	2,3760	1,26645	
	3	25	0.1	65%	0	60%	20	0	10,00	2,3660	0,69541	
		28	0.1	65%	0	60%	20	0	8,92	1,7050	0,64833	
	4	40	0.3	65%	0	60%	20	0	14,40	1,9110	0,92286	
		43	0.3	65%	0	60%	20	0	17,50	2,3370	0,87231	
	5	4	0.1	35%	45	60%	20	0	20,50	3,3080	0,86052	
		37	0.1	35%	45	60%	20	0	19,00	2,4900	1,03706	
	6	13	0.3	35%	45	60%	20	0	14,20	2,4540	0,80342	
		34	0.3	35%	45	60%	20	0	13,90	2,2860	0,82637	
	7	19	0.1	65%	45	60%	20	0	8,59	1,8980	0,56330	
		22	0.1	65%	45	60%	20	0	7,86	1,9630	0,48399	
	8	16	0.3	65%	45	60%	20	0	9,76	2,3250	0,74016	
		46	0.3	65%	45	60%	20	0	11,20	2,3500	0,61070	
Probetas Ciclo A de exposición	1	11	0.1	35%	0	100%	60	0.77	19,20	1,9370	1,24948	
		12	0.1	35%	0	100%	60	0.77	21,00	2,1570	1,29105	
	2	2	0.3	35%	0	100%	60	0.77	18,30	1,8910	0,84472	
		3	0.3	35%	0	100%	60	0.77	22,50	2,1310	0,85380	
	3	29	0.1	65%	0	100%	60	0.77	7,30	1,8470	0,73837	
		30	0.1	65%	0	100%	60	0.77	11,20	1,7950	0,73733	
	4	44	0.3	65%	0	100%	60	0.77	16,80	2,2470	0,73476	

	45	0.3	65%	0	100%	60	0.77			
5	5	0.1	35%	45	100%	60	0.77	12,30	1,4980	0,78645
	6	0.1	35%	45	100%	60	0.77	23,30	1,3430	1,75265
6	14	0.3	35%	45	100%	60	0.77	23,60	1,4720	1,72702
	15	0.3	35%	45	100%	60	0.77	15,00	2,5310	0,78084
7	23	0.1	65%	45	100%	60	0.77	16,30	1,3560	1,63456
	24	0.1	65%	45	100%	60	0.77	7,58	1,4070	0,52545
8	17	0.3	65%	45	100%	60	0.77	7,93	1,4850	0,67116
	18	0.3	65%	45	100%	60	0.77	11,30	2,4070	0,54342
1	8	0.1	35%	0	100%	70	0.77	11,60	2,2860	0,69309
	9	0.1	35%	0	100%	70	0.77	22,90	2,2600	1,37742
2	32	0.3	35%	0	100%	70	0.77	17,30	1,6530	1,29159
	33	0.3	35%	0	100%	70	0.77	23,70	2,3250	1,25658
3	26	0.1	65%	0	100%	70	0.77	21,20	2,3120	0,90187
	27	0.1	65%	0	100%	70	0.77	7,78	1,5500	0,64752
4	41	0.3	65%	0	100%	70	0.77	7,69	1,4460	0,60786
	42	0.3	65%	0	100%	70	0.77	12,90	1,8050	1,26764
5	38	0.1	35%	45	100%	70	0.77	12,70	0,7230	2,23945
	39	0.1	35%	45	100%	70	0.77	18,50	1,2780	1,57977
6	35	0.3	35%	45	100%	70	0.77	18,90	2,0560	1,07196
	36	0.3	35%	45	100%	70	0.77	14,70	2,1490	0,92875
7	20	0.1	65%	45	100%	70	0.77	15,30	2,2990	0,72847
	21	0.1	65%	45	100%	70	0.77	7,84	1,7560	0,59553
8	47	0.3	65%	45	100%	70	0.77	7,08	2,3840	0,37519
	48	0.3	65%	45	100%	70	0.77	10,90	1,8600	0,75022
								9,26	1,6270	0,77987

Fuente: Autor.

En las siguientes gráficas se podrá apreciar una comparación gráfica entre las propiedades mecánicas de estudio, para cada uno de los ciclos de exposición donde por practicidad de uso de Microsoft Excel se llamaran de la siguiente manera:

- Sin ciclo de exposición a degradación: Ciclo 0
- Ciclo A de exposición a degradación: Ciclo 1
- Ciclo B de exposición a degradación: Ciclo 2

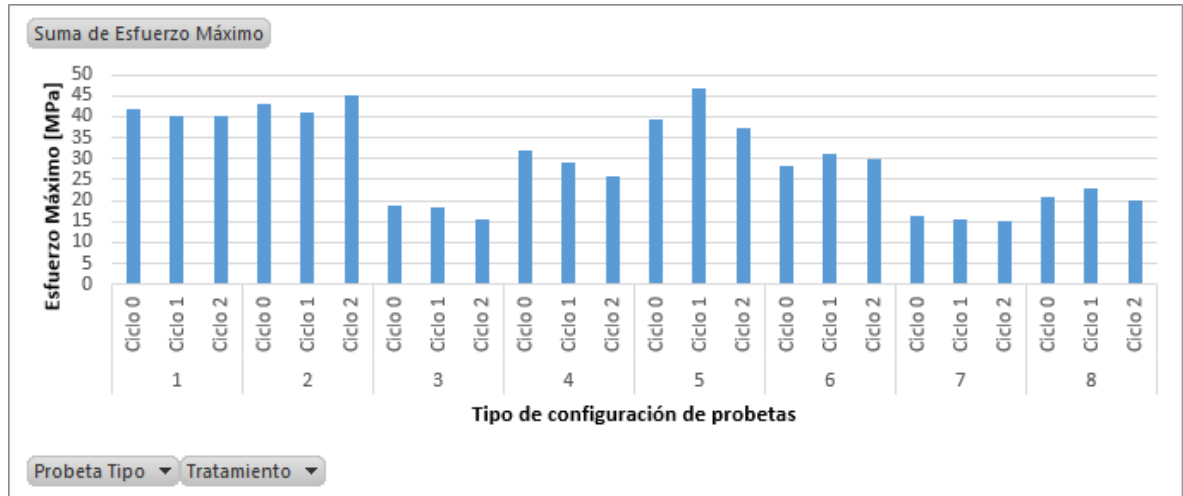
A su vez, se podrán ver las gráficas organizadas de acuerdo al tipo de configuración (Retomando la Tabla 13).

Tipo de Configuración	Espesor (mm)	Porosidad (%)	Ángulo de Impresión (°)
1	0.1	35%	0
2	0.3	35%	0
3	0.1	65%	0
4	0.3	65%	0
5	0.1	35%	45
6	0.3	35%	45
7	0.1	65%	45
8	0.3	65%	45

Fuente: Autor

En la Figura 69, Figura 70, Figura 71, se puede apreciar la comparación gráfica del valor de esfuerzo máximo, porcentaje de elongación y Módulo de Elasticidad de cada uno de los tipos de configuración de probetas (1-8). Cada tipo de configuración cuenta con tres probetas que fueron expuestas a un ciclo de exposición diferente (Ciclo 0, Ciclo 1, Ciclo 2), así se podrá ver gráficamente la variación en el valor de la propiedad mecánica con respecto al ciclo al que fueron expuestas las probetas, es decir la variación de las propiedades mecánicas bajo la influencia de los factores de exposición ambiental (Humedad, Temperatura, Irradiancia)

Figura 69. Comparación gráfica de Esfuerzo máximo entre probetas según tipo de configuración de impresión y ciclo de exposición a degradación.



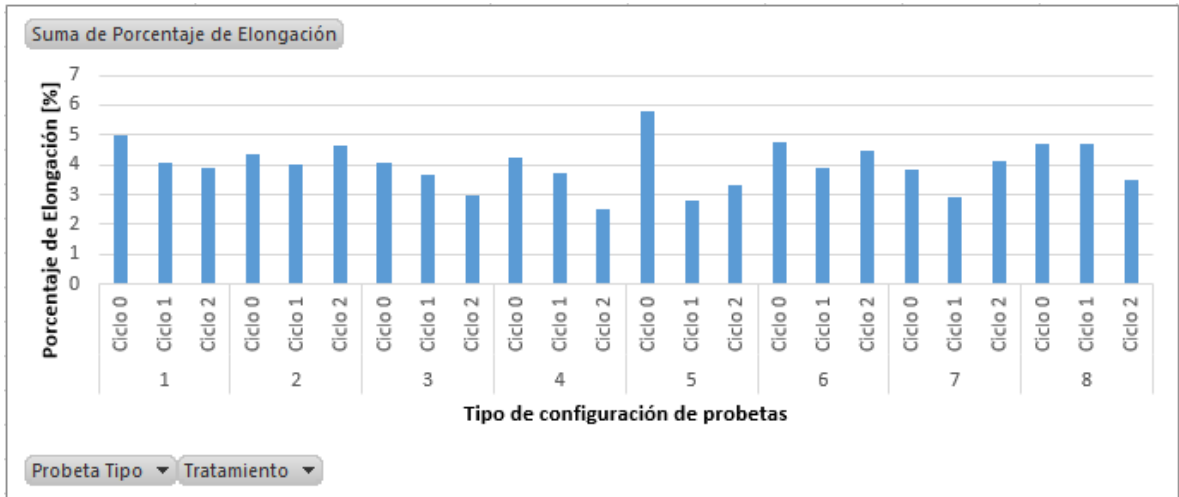
Fuente: Autor

Basándose en el gráfico anterior, se puede ver que generalmente los valores de esfuerzo máximo presentan sus valores máximos en el ciclo 0 de exposición (Humedad 60%, Temperatura 20°C, Irradiancia 0 W/m²) y sus valores mínimos en el ciclo 2 (Humedad 100%, Temperatura 70°C, Irradiancia 0.77 W/m²) donde las condiciones ambientales varían de mayor forma aumentando la humedad en un 40%, la temperatura en 50°C e irradiancia en 0.77 W/m².

La probeta que registro el mayor valor de esfuerzo máximo fue la probeta 6 [23.60 MPa] con ciclo 1 de exposición (Humedad 100%, Temperatura 60°C, Irradiancia 0.77 W/m²) y tipo de configuración 5 (Espesor 0.1 mm, Porosidad 35%, Ángulo 45°), y la probeta que registro el menor valor de esfuerzo máximo fue la probeta 21 [7.08 MPa] con ciclo 2 de exposición (Humedad 100%, Temperatura 70°C, Irradiancia 0.77 W/m²) y tipo de configuración 7 (Espesor 0.1 mm, Porosidad 65%, Ángulo 45°). De lo anterior se puede ver que entre las probetas 6 (Máximo Valor) y 21 (Mínimo Valor), el factor porosidad cambio su valor de un 35% a un 65% y la temperatura de exposición aumento en 10°, generando un decremento en el valor de la propiedad mecánica en estudio.

Para los tipos de configuración 1, 3, 4, 7 se presentó un comportamiento experimental esperado, donde el valor del esfuerzo máximo sufrió una disminución a medida que los valores de exposición ambiental fueron aumentando.

Figura 70. Comparación gráfica de Porcentaje de Elongación entre probetas según tipo de configuración de impresión y ciclo de exposición a degradación.



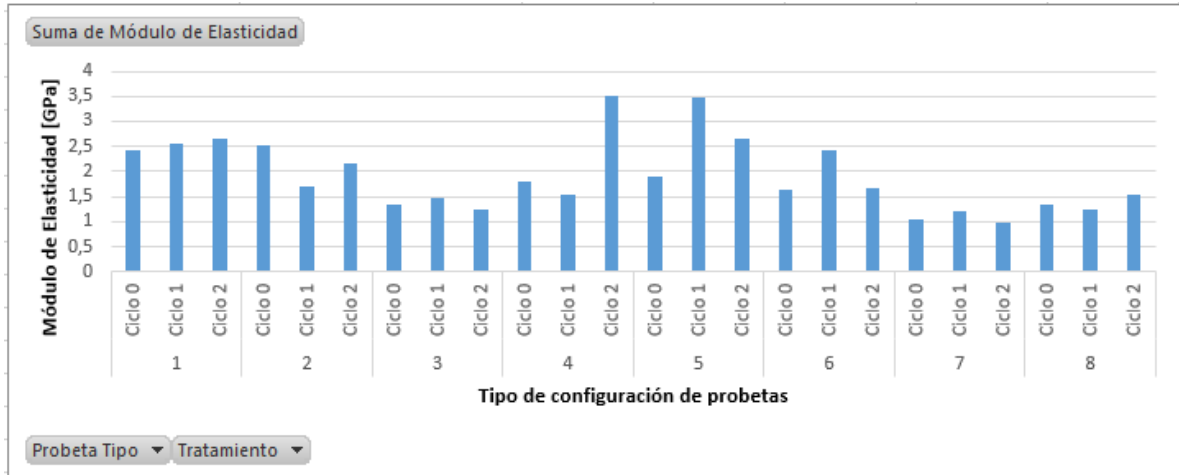
Fuente: Autor

Tomando como referencia el gráfico anterior, se puede ver que con respecto al porcentaje de elongación presentado en las probetas, este disminuyo su valor a medida que la influencia de las condiciones ambientales sobre las probetas era mayor, es decir que aumentaban los valores de los factores humedad, temperatura e irradiancia.

El valor máximo de porcentaje de elongación lo presento la probeta 4 [3.3080%] con ciclo 0 de exposición (Humedad 60%, Temperatura 20°C, Irradiancia 0 W/m²) y tipo de configuración 5 (Espesor 0.1 mm, Porosidad 35%, Ángulo 45°), y el valor mínimo lo presento la probeta 42 [0.72305] con ciclo 2 de exposición (Humedad 100%, Temperatura 70°C, Irradiancia 0.77 W/m²) y tipo de configuración 4 (Espesor 0.3 mm, Porosidad 65%, Ángulo 45°). De lo anterior se puede apreciar que todos los factores de impresión y de exposición ambiental entre estas dos probetas cambiaron su valor, lo que ocasiono la variación del resultado del porcentaje de elongación en un 2.58495%.

En los tipos de configuración 1, 3, 4, 8, se presentó un comportamiento esperado con respecto al valor de la propiedad mecánica, donde el porcentaje de elongación disminuyo a medida que la influencia por factores ambientales era mayor.

Figura 71. Comparación gráfica de Módulo de Elasticidad entre probetas según tipo de configuración de impresión y ciclo de exposición a degradación.



Fuente: Autor

El caso del módulo de Elasticidad fue distinto, ya que no se presentó un comportamiento uniforme para ningún tipo de configuración. Observando la anterior imagen se puede apreciar que el valor del módulo de elasticidad varía sin ningún orden entre ciclos y entre tipos de configuración.

El valor máximo de módulo de elasticidad lo presentó la probeta 42 [2.2394 GPa] con ciclo 2 de exposición (Humedad 100%, Temperatura 70°C, Irradiancia 0.77 W/m²) y tipo de configuración 4 (Espesor 0.3 mm, Porosidad 65%, Ángulo 0°), y el valor mínimo lo presentó la probeta 21 [0.3751 GPa] con ciclo 2 de exposición (Humedad 100%, Temperatura 70°C, Irradiancia 0.77 W/m²) y tipo de configuración 7 (Espesor 0.1 mm, Porosidad 65%, Ángulo 45°), Disminuyendo el valor en 2.201 GPa.

De lo anterior, se puede concluir que para el módulo de elasticidad, los factores de exposición a degradación, como temperatura, humedad e irradiancia, no tienen una gran influencia sobre el comportamiento de dicha propiedad, en comparación a las propiedades estudiadas anteriormente (Esfuerzo Máximo y Módulo de Elasticidad)

4.4 Conclusiones del capítulo

- Es importante hacer una preparación previa a los especímenes, cuando se someterán a algún tipo de prueba donde sus condiciones ambientales se verán modificadas. Esta preparación se realiza en un ambiente controlado con valores determinados según sea el tipo de material. Se hace con el fin de que los especímenes no sientan bruscamente el cambio de ambiente evitando así anomalías en su estructura.
- Durante la exposición a los ensayos de degradación de las probetas, estas sufrieron cierta deformación en su estructura, la cual se vio muy marcada en la parte del cuello de las probetas. Esta parte, se encontraba justo donde se soportaban en los porta probetas. Se concluye que debido al cambio en las condiciones ambientales y el tiempo de exposición (12 horas), al tener un elemento que hacia presión sobre el cuerpo de las probetas, estas empezaron a deformarse, generando marcas y alterando la linealidad de las mismas.
- Las curvas de esfuerzo VS deformación (Ver Anexo 1) obtenidas a partir de los ensayos de tracción realizados a las probetas, contaron con la generalidad de las curvas típicas para el material PLA (Ver Figura 62), donde las curvas muestran un comportamiento elástico estable casi hasta el punto de esfuerzo máximo donde sufren fractura. En los materiales plásticos como es el caso del PLA, la curva se comporta de una manera distinta que en los metales, presentando un comportamiento plástico muy pequeño o nulo, pasando de la zona elástica directamente al punto de esfuerzo máximo y falla de la pieza.
- Horizon es un software de adquisición de datos completo, y que cuenta con las ayudas multimediales necesarias para este tipo de ensayos (ensayo de tensión), presenta gráficos con datos suficientes y necesarios para una investigación de caracterización de propiedades mecánicas.
- Durante el ensayo de tensión algunas de las probetas presentaron falla en lugares inesperados (Zona de sujeción con las mordazas), esto ocasiono que las curvas de esfuerzo VS deformación también tuvieran comportamientos inesperados, por lo que la falla se ocasiono en una zona donde el área transversal era distinta a el área normal de fractura. Estas probetas contaban con una deformación marcada en el área de sujeción, impidiendo que las mordazas se ubicaran correctamente contra las caras de la probeta y aplicando la carga en una dirección que no era paralela a la probeta, ocasionando así falla en la parte de la deformación.

- Con el fin de obtener correctas curvas esfuerzo VS deformación de las probetas que fracturaron en una zona equivocada, se volvió a realizar el ensayo buscando una falla en el área transversal esperada, obteniendo curvas y valores más acercados a la teoría.
- Mediante las imágenes captadas para el análisis morfológico de la estructura de las probetas, se puede concluir que se presenta una falla más homogénea cuando se manejan ángulos de impresión de 90° , ya que solo fracturan los filamentos que se encuentran en dirección a la carga aplicada, mientras que en las probetas impresas con ángulos de 45° todos los filamentos soportan la falla, presentando irregularidad geométrica en el área de falla. Lo mismo sucede en el área de contorno.
- Los datos obtenidos permiten concluir que los valores de esfuerzo máximo en las probetas, aumentan cuando se manejan ángulos de impresión de $0-90^\circ$ debido a que la fuerza se encuentra paralela a los filamentos, y rellenos del 65% debido a que es más material soportando la carga.
- Para las propiedades de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad se puede concluir que la variación en el valor de los factores de exposición ambiental como temperatura, humedad e irradiación, cumplen un papel importante sobre el comportamiento del valor de estas propiedades mecánicas. Basándose en la figura 69 y 70, se puede ver el valor de estas disminuye a medida que el valor de los factores ambientales aumentan, acertando con la teoría donde a medida que aumentan las condiciones ambientales disminuirán las propiedades mecánicas.
- Con respecto al módulo de elasticidad no se presentó un comportamiento uniforme en el valor de la propiedad, ya que tenía una variación desigual entre los tipos de configuración lo que permite determinar que los factores ambientales no juegan un papel importante sobre el valor de esta propiedad mecánica.

5. ANÁLISIS DE VARIANZA Y REGRESIÓN LINEAL

En el presente capítulo se realiza el análisis estadístico correspondiente a los datos obtenidos durante la experimentación descrita anteriormente.

Para el desarrollo de este capítulo, se tomó como referencia el análisis de varianza ANOVA, este tipo de análisis evalúa la importancia de los factores que intervienen en un experimento, al comparar la media de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores.

Minitab 16 fue el software que se utilizó para plantear el análisis estadístico, permitiendo obtener valores importantes como el coeficiente de correlación R^2 , y la ecuación de predicción de una variable de respuesta mediante una regresión lineal, que se podrán Anexo 2.

5.1 REGRESIÓN LINEAL DE DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE ENSAYO DE TENSIÓN.

Como se describió en los anteriores capítulos, se desea encontrar la influencia de los factores de proceso (espesor de capa, ángulo de trama, porosidad) y de condiciones de exposición (Ciclo de degradación), sobre las variables de salida (Esfuerzo Máximo, Porcentaje de Elongación, Modulo de Elasticidad). Para esto se harán (3) tres análisis, uno para las probetas que no tuvieron exposición a ciclo de degradación, otro para las probetas con exposición a Ciclo A de degradación y otro para las expuestas al Ciclo B de degradación, respectivamente. Las ecuaciones de regresión se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 27. Modelos de regresión para datos obtenidos del ensayo de tensión.

Modelos de regresión		
Probetas sin exposición a Ciclo de degradación		
Propiedades Mecánicas	Ecuación de regresión	R²
Esfuerzo Máximo	29,4214 + 3,86148 Espesor - 26,4574 Porosidad - 0,0831603 Ángulo	77.77%
Porcentaje de Elongación	2,97845 - 0,625984 Espesor - 1,29925 Porosidad + 0,00366612 Ángulo	36.44%
Módulo de Elasticidad	1,57979 + 0,153812 Espesor - 1,20392 Porosidad - 0,00586806 Ángulo	84.28%

Probetas con exposición a Ciclo A de degradación		
Propiedades Mecánicas	Ecuación de regresión	R²
Esfuerzo Máximo	30,9492 + 1,86875 Espesor - 30,4958 Porosidad - 0,0333056 Ángulo	72.01%
Porcentaje de Elongación	1,54279 + 1,815 Espesor + 0,0641667 Porosidad - 0,00337778 Ángulo	25.85%
Módulo de Elasticidad	2,11213 - 1,13804 Espesor - 1,96004 Porosidad + 0,00303393 Ángulo	63.65%
Probetas con exposición a Ciclo B de degradación		
Propiedades Mecánicas	Ecuación de regresión	R²
Esfuerzo Máximo	8,18042 + 22,4188 Espesor + 1,52917 Porosidad + 0,0549722 Ángulo	22.03%
Porcentaje de Elongación	1,62462 + 1,4075 Espesor - 0,2725 Porosidad + 0,00666667 Ángulo	36.20%
Módulo de Elasticidad	0,688852 - 0,231361 Espesor + 0,955232 Porosidad - 0,00423184 Ángulo	14.77%

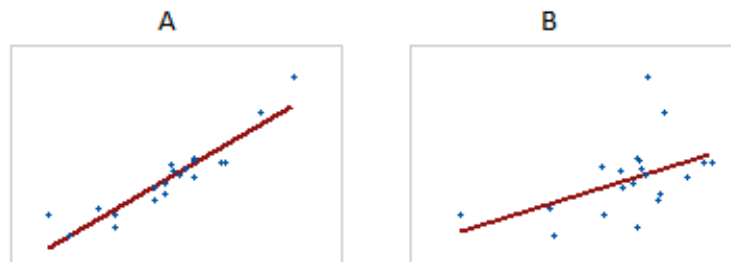
Fuente: Autor.

El valor de R^2 , es el porcentaje de variación de la variable de respuesta que explica su relación con una o más variables predictores, determina 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. Por lo general, mientras mayor sea el R^2 , mejor será el ajuste del modelo a sus datos. El R^2 siempre tendrá un valor entre 0 y 100% [46], aunque existen casos dentro de la definición computacional donde este valor puede llegar a tomar valores negativos [47].

También es válido decir que entre más cercano sea el valor de R^2 a 0, el modelo no explica la variación de y (variable de respuesta) a partir de su relación lineal con los datos (x_1, x_2, \dots, x_k) [48], por esta razón en este trabajo se toma como referencia un valor de R^2 , mínimo del 60% para determinar que los resultados del modelo son suficientemente ajustados.

En la Figura 72, se puede apreciar una comparación gráfica entre dos modelos de regresión con valores de R^2 totalmente distintos. En la figura A se muestra un modelo de regresión con un R^2 de 85.5%, En la figura B se muestra un modelo de regresión con un R^2 22.6%. Mientras mayor sea la varianza (Valor de R^2) que explica el modelo de regresión, más cerca estará los puntos de los datos de la línea de regresión ajustada. El hecho de que el valor de R^2 sea bajo, no significa un error en el modelo de regresión lineal, solo quiere decir que los datos obtenidos no explican completamente la relación entre la variable de respuesta con las variables predictoras [46].

Figura 72. Gráficos de respuestas observadas vs. Respuestas ajustadas (Representación gráfica del R^2). A) Modelo de regresión con explicación del 85.5% de la varianza. B) Modelo de regresión con explicación del 22.6 % de la varianza.



Fuente: Minitab 17 [46].

Tomando como referencia la Tabla 27, es claro que no todas las ecuaciones de regresión tuvieron el valor de R^2 establecido (60%) para suponer que los valores de los factores de impresión y condiciones ambientales, son buenos predictores de las propiedades mecánicas de estudio.

Mediante los análisis de varianza que se realizaron, se logra observar los factores que tienen más influencia sobre cada una de las variables de salida (Esfuerzo máximo, Porcentaje de elongación, Modulo de elasticidad).

- ANOVA para datos obtenidos en las probetas sin exposición a ciclo de degradación.

Tabla 28. ANOVA probetas sin exposición a ciclo de degradación.

A). ANOVA ESFUERZO MÁXIMO VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN							
FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	319.382	77.77%	319.382	106.461	13.9964	0.000318
ESPESOR	1	20.029	4.87%	2.274	2.274	0.2990	0.594562
POROSIDAD	1	244.240	59.47%	247.933	247.933	32.5956	0.000098
ÁNGULO	1	55.113	13.42%	55.113	55.113	7.2457	0.019605
ERROR	12	91.276	22.22%	91.276	7.606		
TOTAL	15	410.658	100%				

Fuente: Autor.

B). ANOVA PORCENTAJE DE ELONGACIÓN VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	0.75014	36.44%	0.75014	0.250046	2.29293	0.130043
ESPESOR	1	0.03678	1.7866%	0.05976	0.059758	0.54798	0.473378
POROSIDAD	1	0.60624	29.449%	0.59790	0.597895	5.48272	0.037282
ÁNGULO	1	0.10711	5.20%	0.10711	0.107112	0.98222	0.341216
ERROR	12	1.30861	63.56%	1.30861	0.10905		
TOTAL	15	2.05875	100%				

Fuente: Autor.

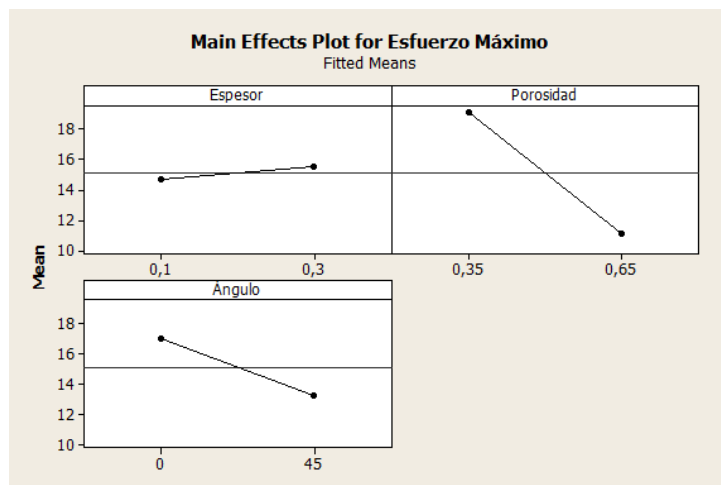
C). ANOVA MÓDULO DE ELASTICIDAD VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	0.823670	84.28%	0.82367	0.27455	21.447	0.000041
ESPESOR	1	0.047781	4.88%	0.00360	0.00360	0.2818	0.605185
POROSIDAD	1	0.501472	51.31%	0.51337	0.51337	40.104	0.000038
ÁNGULO	1	0.274418	28.07%	0.27441	0.27441	21.437	0.000580
ERROR	12	0.153613	15.71%	0.15361	0.01280		
TOTAL	15	0.977283	100%				

Fuente: Autor.

En la Tabla 28 A) se puede observar que el factor con mayor influencia con respecto al Esfuerzo Máximo obtenido es la porosidad con el 59.47% de contribución. En la Tabla 28 B) se aprecia que el factor más influyente con respecto al porcentaje de elongación es porosidad con el 29.449%. Por ultimo en la Tabla 28 C) se ve que el factor con mayor influencia sobre el Módulo de Elasticidad es la porosidad con el 51.31% de contribución.

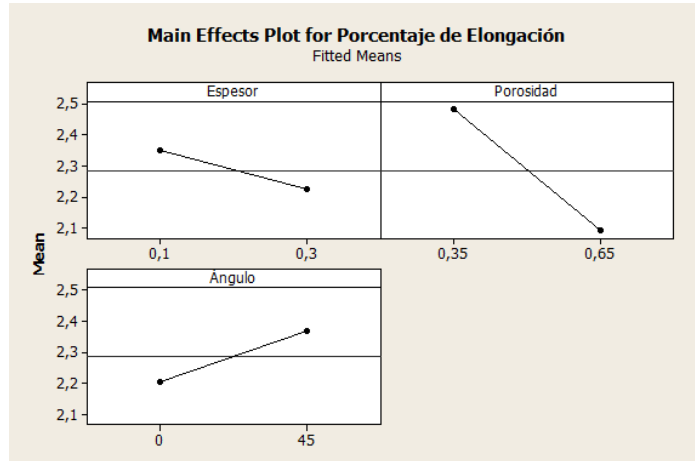
Figura 73. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Esfuerzo Máximo, para probetas sin exposición a ciclo de degradación.



Fuente: Autor.

En la Figura 73, se aprecia que el esfuerzo máximo disminuye cuando se maneja un espesor de 0.1mm, ángulo de 45° y porosidad del 65%. Se puede contrastar lo analizado de la Tabla 28 A) donde se resalta la influencia del factor porosidad en la variación del valor de Esfuerzo Máximo.

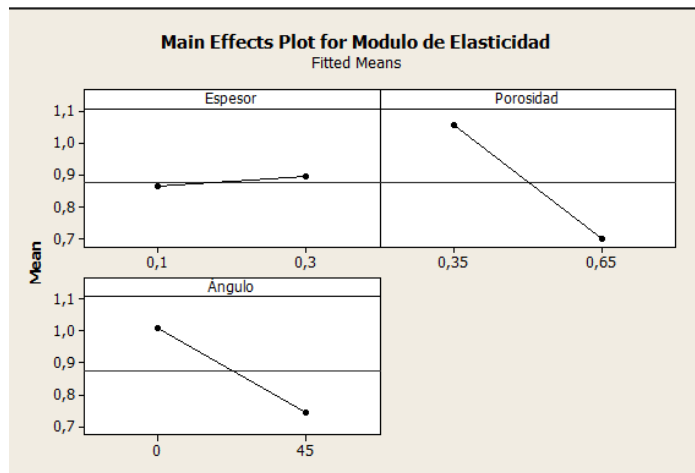
Figura 74. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Porcentaje de Elongación, para probetas sin exposición a ciclo de degradación.



Fuente: Autor.

En la Figura 74, se puede ver que en cuanto el porcentaje de elongación disminuye su valor al manejar espesores y porosidades mayores (0.3 mm, 65% respectivamente), también que tiene un máximo valor al hacer la manufactura con un ángulo de trama de 45°.

Figura 75. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Módulo de Elasticidad, para probetas sin exposición a ciclo de degradación.



Fuente: Autor.

En la Figura 75, se aprecia que el módulo de elasticidad disminuye, cuando se manejan los niveles más altos en los factores de impresión ($e = 0.3\text{mm}$, $p = 65\%$, $a = 45^\circ$).

- ANOVA para datos obtenidos en las probetas con exposición a ciclo A de degradación.

Tabla 29. ANOVA probetas con exposición a ciclo A de degradación.

A. ANOVA ESFUERZO MÁXIMO VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	344.342	72.01%	344.342	114.781	10.2917	0.001229
ESPESOR	1	0.559	0.1169%	0.559	0.559	0.0501	0.826654
POROSIDAD	1	334.799	70.01%	334.799	334.799	30.0195	0.000141
ÁNGULO	1	8.985	1.8789%	8.985	8.985	0.8056	0.387068
ERROR	12	133.833	4.64%	133.833			
TOTAL	15	478.175	100%				

Fuente: Autor.

B. ANOVA PORCENTAJE DE ELONGACIÓN VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	0.62097	25.85%	0.62097	0.206997	1.39441	0.292173
ESPESOR	1	0.52708	21.94%	0.52708	0.527076	3.55068	0.083969
POROSIDAD	1	0.00148	0.0616%	0.00148	0.001482	0.00999	0.922053
ÁNGULO	1	0.09242	3.84%	0.09242	0.092416	0.62257	0.445405
ERROR	12	1.78133	74.15%	1.78133	0.148444		
TOTAL	15	2.40230	100%				

Fuente: Autor.

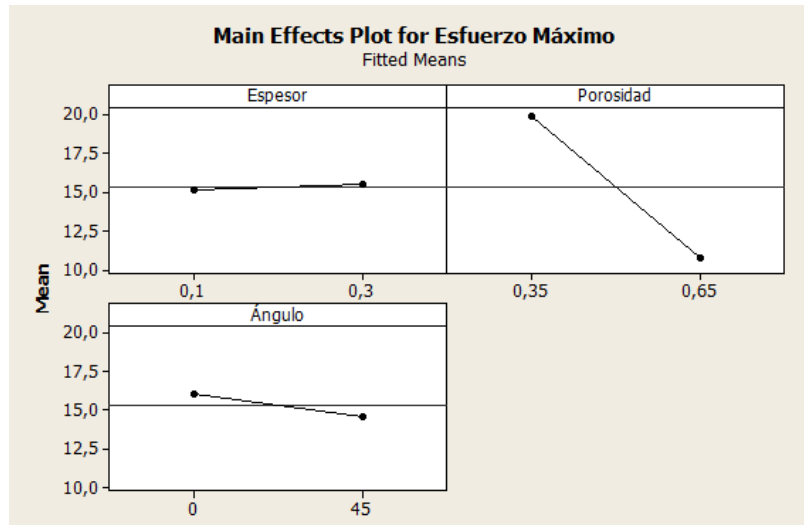
C. ANOVA MÓDULO DE ELASTICIDAD VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	1.66482	63.65%	1.66482	0.55494	7.0033	0.005613
ESPESOR	1	0.20722	7.92%	0.20722	0.20722	2.6151	0.131817
POROSIDAD	1	1.38304	52.87%	1.38304	1.38304	17.4539	0.001282
ÁNGULO	1	0.07456	2.85%	0.07456	0.07456	0.9409	0.351186
ERROR	12	0.95088	36.35%	0.95088	0.07924		
TOTAL	15	2.61569	100%				

Fuente: Autor.

En la Tabla 31 A) se aprecia que el factor con más influencia sobre el Esfuerzo Máximo, es la porosidad con una contribución del 70.01%, en la Tabla 29 B) se muestra que el factor más influyente para el cálculo del porcentaje de elongación es el espesor de capa con un 25.85%, por último en la Tabla 29 C) vemos que para el Módulo de elasticidad, la porosidad vuelve a ser el factor más influyente con una contribución del 52.87%.

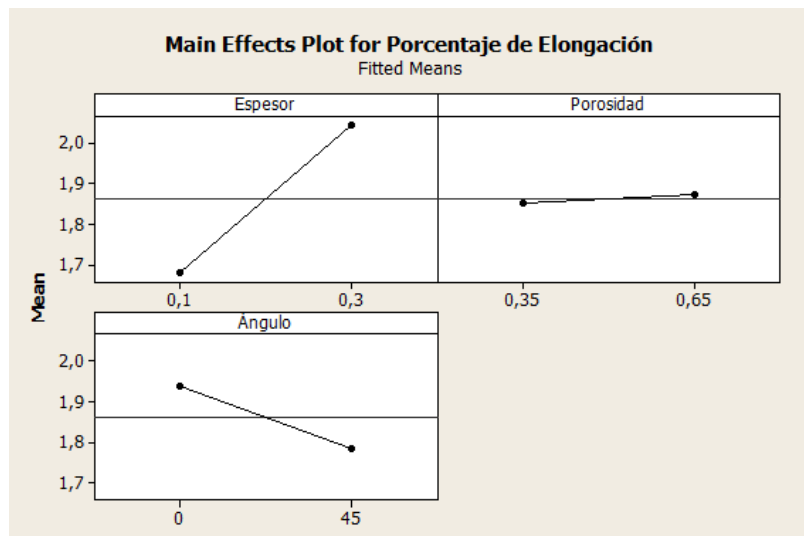
Figura 76. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Esfuerzo Máximo, para probetas con exposición a ciclo A de degradación.



Fuente: Autor.

En la anterior figura, se puede ver como varía de manera descendente el valor de esfuerzo máximo al manejar porosidades del 65% y ángulos de 45°, contrario pasa con el espesor de capa, ya que al manejar un espesor de capa superior 0.3 mm, el valor del esfuerzo incrementa.

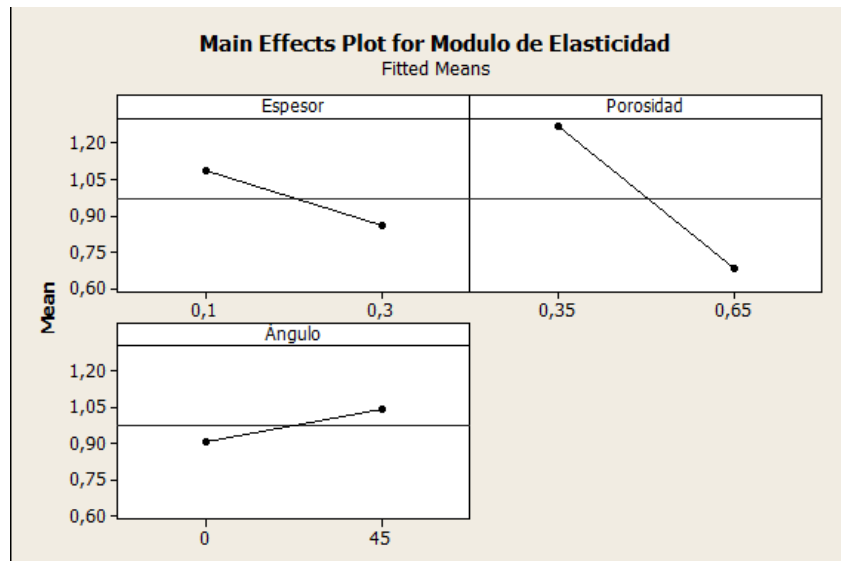
Figura 77. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Porcentaje de elongación, para probetas con exposición a ciclo A de degradación.



Fuente: Autor.

En la Figura 77, se observa como el espesor marca de manera muy influyente en el valor del porcentaje de elongación, generando una gran variación en el valor de esta medida que el espesor aumenta hasta su punto máximo 0.3mm. También se aprecia que al manejar porosidades del 65% el valor aumenta un poco, mientras que disminuye cuando se utilizan ángulos de 45°.

Figura 78. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Módulo de Elasticidad, para probetas con exposición a ciclo A de degradación.



Fuente: Autor.

En este caso, el módulo de elasticidad disminuye cuando se utilizan los valores máximos de espesor y porosidad, y por el contrario aumenta al utilizar un ángulo de impresión de 45°.

- ANOVA para datos obtenidos en las probetas con exposición a ciclo B de degradación.

Tabla 30. ANOVA probetas con exposición a ciclo B de degradación.

A. ANOVA ESFUERZO MÁXIMO VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN							
FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	105.736	22.03%	105.736	35.2452	1.1304	0.375814
ESPESOR	1	80.416	16.75%	80.416	80.4161	2.5791	0.134262
POROSIDAD	1	0.842	0.1754%	0.842	0.8418	0.0270	0.872221
ÁNGULO	1	24.478	5.099%	24.478	24.4778	0.7850	0.393012
ERROR	12	374.160	77.95%	374.160	31.1800		
TOTAL	15	479.895	100%				

Fuente: Autor.

B. ANOVA PORCENTAJE DE ELONGACIÓN VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	0.70370	36.20%	0.70370	0.234567	2.26919	0.132717
ESPESOR	1	0.31697	16.30%	0.31697	0.316969	3.06634	0.105424
POROSIDAD	1	0.02673	1.37%	0.02673	0.026732	0.25861	0.620299
ÁNGULO	1	0.36000	18.519%	0.36000	0.36000	3.48262	0.086637
ERROR	12	1.24044	63.81%	1.24044	0.103370		
TOTAL	15	1.94415	100%				

Fuente: Autor.

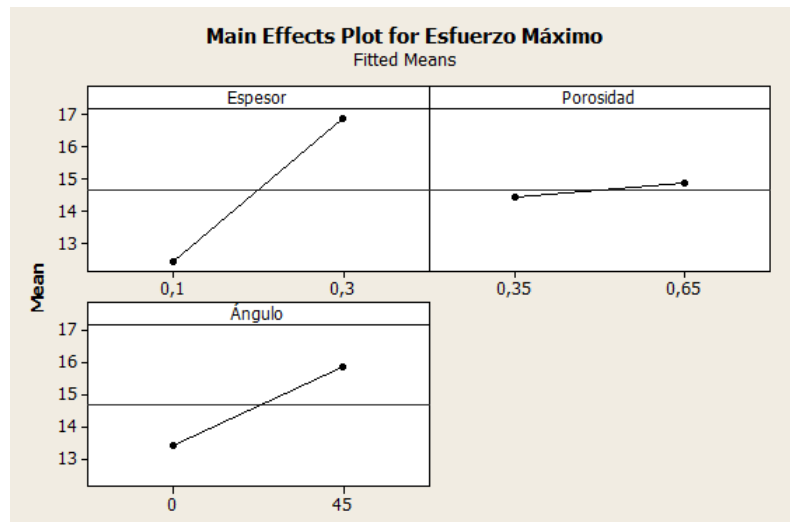
C. ANOVA MÓDULO DE ELASTICIDAD VS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

FUENTE	GL	SC	Contribución	Adj SS	Adj MS	F	P
REGRESIÓN	3	0.48211	14.77%	0.48211	0.160704	0.69327	0.573610
ESPESOR	1	0.00856	0.26%	0.00856	0.008564	0.03695	0.850788
POROSIDAD	1	0.32849	10.06%	0.32849	0.328488	1.41708	0.256902
ÁNGULO	1	0.14506	4.44%	0.14506	0.145058	0.62577	0.444264
ERROR	12	2.78168	85.21%	2.78168	0.231807		
TOTAL	15	3.26379	100%				

Fuente: Autor.

En la Tabla 32 A) se puede ver como para el valor de Esfuerzo Máximo, el factor que tiene mayor influencia es el espesor de capa brindando una contribución del 16.75%, para el porcentaje de elongación Tabla 30 B) el ángulo de deposición toma la mayor influencia con un 18.51%, y por ultimo para el módulo de elasticidad Tabla 30 C) la mayor contribución la tiene el factor de porosidad.

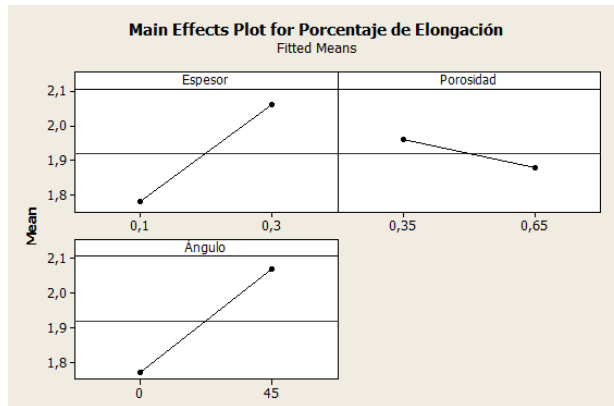
Figura 79. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Esfuerzo Máximo, para probetas con exposición a ciclo B de degradación.



Fuente: Autor.

Vemos en la Figura 79 como el aumento en el valor del esfuerzo máximo se ve marcado directamente por los valores máximos de los factores de proceso.

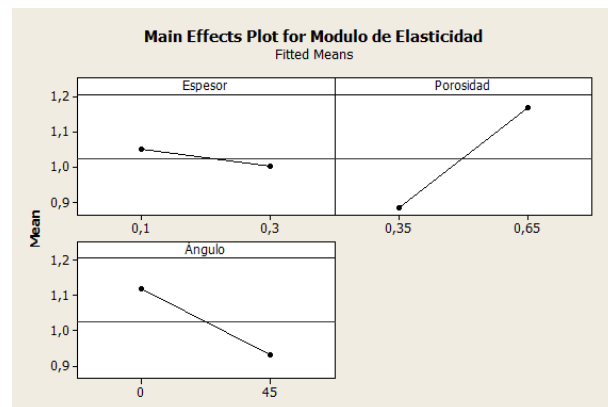
Figura 80. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Porcentaje de Elongación, para probetas con exposición a ciclo B de degradación.



Fuente: Autor.

En la Figura 80, se aprecia una gran similitud entre el grafico de espesor VS esfuerzo, y Ángulo VS esfuerzo, indicando que entre más grande sea el valor de estos, mayor será el valor alcanzado para esfuerzo máximo. Ocurre lo contrario con el factor porosidad, donde el valor del esfuerzo disminuye a medida del porcentaje poroso dentro de la estructura.

Figura 81. Efectos principales de los factores de proceso con respecto al Módulo de Elasticidad, para probetas con exposición a ciclo B de degradación.



Fuente: Autor.

Por ultimo en la Figura 81, vemos como a medida que aumentan los valores de espesor y tienden al máximo ($e = 0.3\text{mm}$, $a = 45^\circ$), el valor del esfuerzo máximo disminuye, ocurriendo lo contrario con el factor porosidad.

En la Tabla 33, Se podrá encontrar una recopilación de las contribuciones máximas de cada uno de los factores de proceso sobre las propiedades mecánicas en estudio, para cada uno de los ciclos de degradación.

Tabla 31. Recopilación de contribuciones máximas (factores de proceso VS propiedades mecánicas).

	Esfuerzo (MPa)	Máximo	Porcentaje de Elongación (%)	de	Módulo de Elasticidad (GPa)	de
Probetas sin exposición a ciclo de degradación	Porosidad	59.47%	Porosidad	29.44%	Porosidad	51.31%
Probetas con exposición a ciclo A de degradación	Porosidad	70.01%	Espesor de capa	25.85%	Porosidad	52.87%
Probetas con exposición a ciclo B de degradación	Espesor de capa	16.75%	Ángulo de trama	18.51%	Porosidad	10.06%

Fuente: Autor.

En la siguiente tabla se puede entender de una manera más práctica, los efectos principales de los factores de proceso sobre las propiedades mecánicas, partiendo de que el color verde indica que a medida que aumenta el valor del factor de proceso aumentara el valor de la propiedad mecánica, y el color rojo indica que a medida que aumenta el valor del factor de proceso, disminuye el valor de la propiedad mecánica.

Tabla 32. Relación de efectos entre factores de proceso y propiedades mecánicas.

Ciclos de degradación	Propiedades mecánicas	Factores de Proceso		
		Espesor de capa	Porosidad	Ángulo de Trama
Sin exposición a ciclo de degradación	Esfuerzo Máximo			
	Porcentaje de Elongación			
	Módulo de Elasticidad			
Ciclo A de degradación	Esfuerzo Máximo			
	Porcentaje de Elongación			
	Módulo de Elasticidad			
Ciclo B de degradación	Esfuerzo Máximo			
	Porcentaje de Elongación			
	Módulo de Elasticidad			

Fuente: Autor.

5.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Mediante los datos obtenidos a partir de las regresiones lineales planteadas en este capítulo, se concluye que los datos del ensayo de tensión en las probetas que no tuvieron ningún tipo de exposición a degradación, están más acercados al modelo lineal planteado debido a que tiene unos coeficientes de correlación R^2 cercanos al 100%.
- Para los 3 ciclos de exposición de las probetas, se evidencia que el factor porosidad es el que mayor influencia y contribución tiene sobre las variables de respuesta (Esfuerzo Máximo, Porcentaje de Elongación, Módulo de Elasticidad) (Ver Tabla 31).
- Según la Tabla 32, se puede concluir que el factor que al aumentar su valor, ocasiona menor reducción en el valor de las propiedades mecánicas es el espesor de capa (Valor Mínimo = 0.1mm, Valor Máximo = 0.3mm). Sucede lo contrario con el factor porosidad el cual al aumentar su valor (Valor Mínimo = 35%, Valor Máximo = 65%), genera una mayor reducción en el valor de las propiedades mecánicas de estudio.
- Tomando como referencia los datos suministrados en la Tabla 27, se puede concluir que los coeficientes de correlación más bajos se presentaron en las regresiones lineales planteadas a partir de los datos recolectados, de las probetas que fueron expuestas al ciclo B de degradación, las cuales tenían deformaciones mayores en su estructura al resto de probetas, y que presentaron casos específicos durante los ensayos de tensión, como fracturas en el área de sujeción.

CONCLUSIONES.

- Gracias al diseño factorial de experimentos que se empleó para el proyecto, se logró la mayor optimización de recursos, reduciendo factores como costos, tiempos de impresión.
- Los niveles empleados para cada uno de los factores, fueron seleccionados de acuerdo a una previa investigación bibliográfica, que permitió obtener valores acordes para la investigación, ofreciendo cierta confiabilidad en los resultados.
- El PLA como cualquier otro material plástico, presenta curvas características de esfuerzo VS Deformación como la que se presenta en la Figura 62, donde el material registra un comportamiento elástico estable hasta el punto de alcanzar su esfuerzo máximo y presentar falla
- A partir de los datos obtenidos en el ensayo de tensión, se puede concluir que la propiedad de esfuerzo máximo en el material, se ve influenciada en gran parte por el ángulo de trama para la impresión de las probetas, presentando valores mayores en probetas impresas con un ángulo de 0-90°, debido a que la carga aplicada para generar la falla, se encuentra en la misma dirección de los filamentos.
- A partir del análisis estadístico realizado, se puede concluir que el factor que tiene menor influencia sobre las propiedades mecánicas del material es el espesor de capa, lo contrario pasa con la porosidad, factor que tiene gran influencia sobre los resultados de las propiedades mecánicas
- Los cambios de las condiciones ambientales a las que son expuestas un material, logran tener una gran influencia dependiendo el tiempo de exposición. Ya que se generan choques térmicos y están expuestos a vapores o agua en distintas fases, llegando a generar alteraciones en su estructura que son irreversibles.
- El módulo de elasticidad de cada uno de los especímenes se determinó con los datos de deformación que se encontraban entre el 0% y el 0.2% debido a que en esta zona, todas las gráficas contaban con la característica de ser una línea recta con pendiente definida.
- La probeta número 11 ($e = 0.3$, $p = 35\%$, $a = 0-90^\circ$), presento los máximos valores de esfuerzo máximo, tanto en la probeta sin exposición a degradación, como en la probeta expuesta.
- No se puede determinar directamente la influencia de los factores de exposición a degradación (Humedad, Temperatura, Irradiancia), sobre las propiedades mecánicas de estudio, debido a que dichos factores estaban relacionados entre sí dentro de unos ciclos específicos (Sin exposición, Ciclo A, Ciclo B) con un tiempo de exposición igual (8 Horas de exposición a UV, 4 horas de condensación), y esto generó que al momento de hacer el análisis de regresión y ANOVA el software despreciara estos valores. Para efectos de esto se realizaron los análisis estadísticos separados para cada uno de los ciclos como se puede observar en el capítulo de análisis estadístico.

- Para cada uno de los ciclos de exposición a degradación, se logra evidenciar la influencia de los factores sobre el resultado de las propiedades mecánicas, estos resultados se pueden apreciar en la siguiente tabla

	Esfuerzo (MPa)	Máximo	Porcentaje de Elongación (%)	Módulo de Elasticidad (GPa)
Probetas sin exposición a ciclo de degradación	Porosidad 59.47%		Porosidad 29.44%	Porosidad 51.31%
	Espesor 4.87%		Espesor 1.7866%	Espesor 4.88%
	Ángulo 13.42%		Ángulo 5.20%	Ángulo 28.07%
Probetas con exposición a ciclo A de degradación	Porosidad 70.01%		Espesor de capa 25.85%	Porosidad 52.87%
	Espesor 0.1169%		Porosidad 0.0616%	Espesor 7.92%
	Ángulo 1.8789%		Ángulo 3.84%	Ángulo 2.85%
Probetas con exposición a ciclo B de degradación	Espesor de capa 16.75%		Ángulo de trama 18.51%	Porosidad 10.06%
	Porosidad 0.1754%		Porosidad 1.37%	Espesor 0.26%
	Ángulo 5.099%		Espesor 16.30%	Ángulo 4.44%

RECOMENDACIONES

- Para Futuros trabajos donde se haga impresión 3D mediante FDM (Fused Deposition Modeling) con PLA, se recomienda ajustar los programas de impresión de tal manera que se puedan elaborar impresiones múltiples.
- Al momento de hacer una impresión 3D con un solo filamento, en una impresora de doble cabezal (doble boquilla extrusora), se recomienda ajustar la altura de la boquilla que no esté en uso, para que no levante el material ya depositado por la boquilla que se encuentra trabajando.
- Es aconsejable el uso de las impresoras 3D, que tienen la temperatura de la cama de impresión independiente, pues puede ser modificable por el usuario en cualquier momento, y no se considera como un parámetro programable dentro del software slicing como Cura.
- Realizar estudios para la caracterización mecánica de especímenes elaborados en PLA, por medio de métodos no destructivos.
- Se recomienda, realizar futuras investigaciones donde sean modificados los factores de proceso para la impresión, que permitan comparar y si es posible mejorar las propiedades mecánicas de los especímenes.
- Se sugiere para futuras investigaciones, realizar estudios de caracterización similares, omitiendo el contorno en las probetas, con el fin de comprobar que tanta influencia tienen dentro de los resultados obtenidos a partir del ensayo de tensión.
- Es importante conocer acerca de los equipos que se usaran para las pruebas en cualquier proyecto de investigación, y en que pueden llegar a repercutir sobre los especímenes de ensayo. Antes de hacer cualquier diseño geométrico, saber con qué espacio y condiciones se cuenta.
- Se recomienda, la búsqueda de otro tipo de equipo para la exposición a degradación de los especímenes, donde las probetas no tengan contacto físico con ningún sólido, tratando de evitar posibles deformaciones.
- Para la caracterización del PLA, bajo exposición a degradación, se recomienda la exposición a otro tipo de ciclo donde se manejen valores distintos para los factores de degradación.
- Para el ensayo de tensión, se recomienda que la máquina universal de ensayos cuente con mordazas con algún tipo de ranurado, esto con el fin de evitar deslizamientos de la probeta mientras se hace la aplicación de la carga.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sculpteo, “Fabricación Aditiva,” *Fabricación Aditiva*. [Online]. Available: <https://www.sculpteo.com/es/servicios/fabricacion-aditiva/>. [Accessed: 10-Feb-2017].
- [2] F. Esteve, “Evolución y crecimiento de la fabricación aditiva (Additive manufacturing),” *Evolución y crecimiento de la fabricación aditiva (Additive manufacturing)*, 2014. [Online]. Available: [http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/126021-Evolucion-y-crecimiento-de-la-fabricacion-aditiva-\(Additive-manufacturing\).html](http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/126021-Evolucion-y-crecimiento-de-la-fabricacion-aditiva-(Additive-manufacturing).html). [Accessed: 10-Mar-2017].
- [3] J. Wind and A. Rangaswamy, “Customization: The next revolution in mass customization,” *J. Interact. Mark.*, vol. 15, no. 1, pp. 13–32, 2001.
- [4] L. Serna C., A. Rodríguez de S., and F. Albán A., “Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones,” *Rev. Ing. y Compet.*, vol. 5, no. 1, pp. 16–26, 2011.
- [5] a. S. Maxwell, W. R. Broughton, G. Dean, and G. D. Sims, “Review of accelerated ageing methods,” *Report*, vol. 1, p. 84, 2005.
- [6] Lauren h, “Capítulo 6 Diseño Experimental,” pp. 59–81, 2000.
- [7] M. Varela *et al.*, “ANÁLISIS CRÍTICO DEL DISEÑO FACTORIAL 2 k SOBRE CASOS APLICADOS Critical analysis of 2k factorial design based on applied cases,” no. 47, pp. 101–106, 2011.
- [8] A. L. Dise and D. E. Experimentos, “PRINCIPIOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL Para el no ilustrado en la teoría, un estadístico es una persona que trabaja con la aplicación de métodos,” pp. 1–14, 1935.
- [9] D. C. Montgomery, “Diseño De Experimentos montgomery.pdf.” Limusa Wiley, Arizona, p. 692, 2004.
- [10] COMHER, “Impresión 3D FDM y PolyJet,” *Impresión 3D FDM y PolyJet*. [Online]. Available: <http://www.comher.com/tecnologia-impresion-3d/>. [Accessed: 10-Apr-2017].
- [11] Stratasys, “Tecnología FDM,” *Tecnología FDM*. [Online]. Available: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/fdm-technology>. [Accessed: 20-Mar-2017].
- [12] J. Rodriguez and D. Gonzalo, “ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES PLÁSTICOS POROSOS, MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIONES DE REGENERACIÓN ÓSEA,” Universidad Santo Tomas, 2015.
- [13] RePro 3D, “Guía de diseño para impresión 3D,” *RePro 3D*, pp. 1–10, 2016.
- [14] D. G.-A. M Velasco, J Rodriguez, “BASIC & CLINICAL PHARMACOLOGY & TOXICOLOGY,” in *EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLYLACTIC ACID (PLA) SCAFFOLDS FOR BONE TISSUE ENGINEERING AS A FUNCTION OF THE PROCESS PARAMETERS IN FUSED FILAMENT FABRICATION (FFF)*, 2016, pp. 24–24.
- [15] J. Cerneels, A. Voet, J. Ivens, and J.-P. Kruth, “Additive manufacturing of thermoplastic composites,” *Composites Week at Leuven*, 2013. [Online].

- Available: <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/419132>. [Accessed: 15-Apr-2017].
- [16] A. Copinet, C. Bertrand, S. Govindin, V. Coma, and Y. Couturier, "Effects of ultraviolet light (315 nm), temperature and relative humidity on the degradation of polylactic acid plastic films," *Chemosphere*, vol. 55, no. 5, pp. 763–773, 2004.
- [17] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, "Physical and Mechanical Properties of PLA, and their Functions in Widespread Applications - a Comprehensive Review," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, p. 55, 2016.
- [18] B. P. Bustamante, "La degradación de los plásticos," *Revista Universidad EAFIT*, vol. 30, no. 94. Eafit, Bogotá D.C., pp. 67–86, 2012.
- [19] A. W. Tests and R. Materials, "Standard Practice for Fluorescent UV Exposure of Plastics 1," *Distribution*, 2000. .
- [20] EstrucPlan, "Degradación Térmica de los Plásticos," *Degradación Térmica de los Plásticos*, 2013. [Online]. Available: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=3107>. [Accessed: 20-Apr-2017].
- [21] Gregorio García Pérez, "Estudio de la degradación por radiación ultravioleta de la mezcla poliestireno de alto impacto y policarbonato," Instituto Politecnico Nacional, 2005.
- [22] B. G. S. Polímeros, "B.1 generalidades sobre polímeros," *Introd. a los Polim.*, pp. 21–41, 1987.
- [23] Wikipedia, "Punto de Rocío," *Punto de Rocío*, 2015. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Punto_de_rocío. [Accessed: 23-Apr-2017].
- [24] Edwin Medina Bejarano, "Ensayo De Tensión O Tracción," Bogotá D.C., 2010.
- [25] Wikipedia, "Tensión de Rotura," *Tensión de Rotura*. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Tensión_de_rotura. [Accessed: 21-Feb-2017].
- [26] Lawrence., "Ensayo De Traccion," Bogotá D.C., 2011.
- [27] L. M. V. Moreno, "Materiales Industriales, Teoría y Aplicaciones.," *Materiales Industriales, Teoría y Aplicaciones.*, 2008. [Online]. Available: [https://books.google.com.co/books?id=VSdtMx8Oj8wC&pg=PA120&dq=modulo+de+elasticidad&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjckreW_vfSAhXCeCYKHd2oDdoQ6AEIjAC#v=onepage&q=modulo de elasticidad&f=false](https://books.google.com.co/books?id=VSdtMx8Oj8wC&pg=PA120&dq=modulo+de+elasticidad&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjckreW_vfSAhXCeCYKHd2oDdoQ6AEIjAC#v=onepage&q=modulo%20de%20elasticidad&f=false). [Accessed: 15-Apr-2017].
- [28] J. Ferré, "EL DISEÑO FACTORIAL COMPLETO 2^k," *Univ. Rovira i Virgili*, p. 10, 2011.
- [29] ASTM Norma, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2004.
- [30] C. Metrology, "Universal Test Machine," *Universal Test Machine*. [Online]. Available: <https://www.cmsmetrology.com.mx/equipos/fuerza/máquinas-universales-de-ensayo/>. [Accessed: 15-Dec-2016].
- [31] Wikipedia, "Galga Extensiométrica," 2012. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensiométrica. [Accessed: 10-Oct-2016].
- [32] ASTM International, "Standard test method for tensile properties of plastics," *ASTM International*, vol. 8. pp. 46–58, 2003.

- [33] Zona Maker, "Manual de CURA," *Manual de CURA*, 2016. [Online]. Available: <https://www.zonamaker.com/impresion-3d/software-imp3d/manual-de-cura>. [Accessed: 17-Jul-2017].
- [34] 3D Printers Online Store, "3D Printers Online Store," *Multoo MT 1.5 Pro High Speed Large Format Digital 3D Printer*. [Online]. Available: <https://www.3dprintersonlinestore.com/multoo-high-speed-3d-printer>. [Accessed: 20-Jul-2017].
- [35] 3D HUBS, "PLA VS ABS, What is the difference," *PLA vs. ABS: What's the difference?* [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference>. [Accessed: 19-Jul-2017].
- [36] F. 2 Print, "Dudas habituales sobre la temperatura y velocidad de impresión del PLA y ABS," *Dudas habituales sobre la temperatura y velocidad de impresión del PLA y ABS*, 2015. [Online]. Available: https://filament2print.com/es/blog/9_Dudas-habituales-sobre-la-temperatura-y-la-ve.html. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [37] M. T. S. Atlas, "Fluorescent / UV Instrument Easy to Use : Cost Effective : Additional Features : A2LA Accredited," *Fluorescent / UV Instrument Easy to Use : Cost Effective : Additional Features : A2LA Accredited*, 2015. [Online]. Available: <http://mareintex.com.ar/wp-content/uploads/atlas/UV-Test.pdf>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [38] R. L. S. Andres, "Caracterización de las propiedades mecánicas a tensión y compresión de componentes poliméricos porosos en polimetilmetacrilato mediante fabricación por filamento fundido," Universidad Santo Tomas, 2017.
- [39] Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad real, "Esfuerzos y Deformaciones," 2010.
- [40] Tinius Olsen, "Tinius Olsen Modelo 50 ST," *Tinius Olsen Modelo 50 ST*. [Online]. Available: <https://www.tiniusolsen.com/list-of-products/model-50-st>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [41] M. T. Machine, "MODEL 50ST Model 50ST Specifications."
- [42] M. T. Data, "HORIZON SOFTWARE SOFTWARE POWERFUL MATERIALS."
- [43] AnMo Electronics Corporation, "Dino Lite Digital Microscope," *AM4013MT*. [Online]. Available: http://www.dino-lite.com/products_detail.php?index_m1_id=9&index_m2_id=35&index_id=92.
- [44] C. Núñez, "Volumen 2 : Ensayos mecánicos . Ensayos no destructivos," *Univ. Barcelona*, vol. 2, 2011.
- [45] D. Roylance, "STRESS-STRAIN CURVES," *Dep. Mater. Sci. Eng. Massachusetts Inst. Technol.*, pp. 1–14, 2001.
- [46] Minitab 17, "R-Cuadrado," *R-Cuadrado*, 2016. [Online]. Available: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/regression-and-correlation/goodness-of-fit-statistics/r-squared/>. [Accessed: 15-Jul-2017].
- [47] Wikipedia, "Coeficiente de Determinación," *Coeficiente de Determinación*. [Online]. Available:

https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_determinaci3n. [Accessed: 14-Jul-2017].

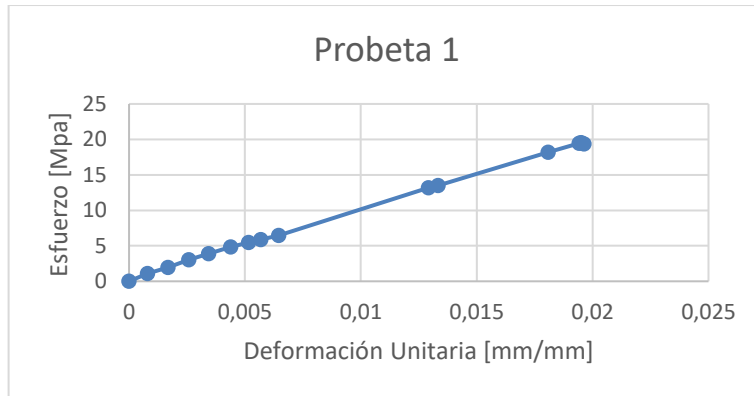
- [48] Universidad de Granada, "Análisis de regresión," Universidad de Granada, Ed. Granada, 2012, pp. 47–57.

ANEXOS

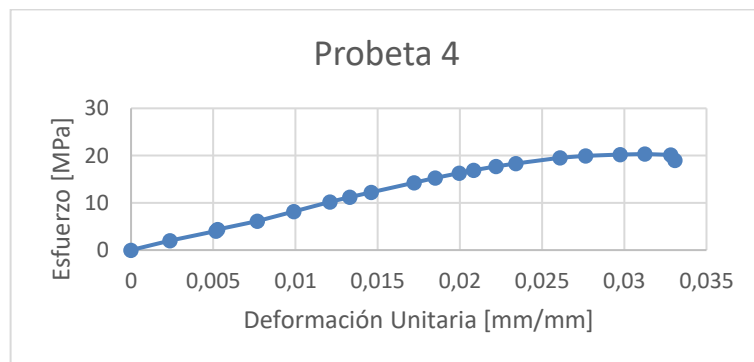
Anexo 1. Curvas de Esfuerzo VS Deformación para ensayos de tensión.

Gráfico comparativo de esfuerzo vs deformación para probetas sin degradación

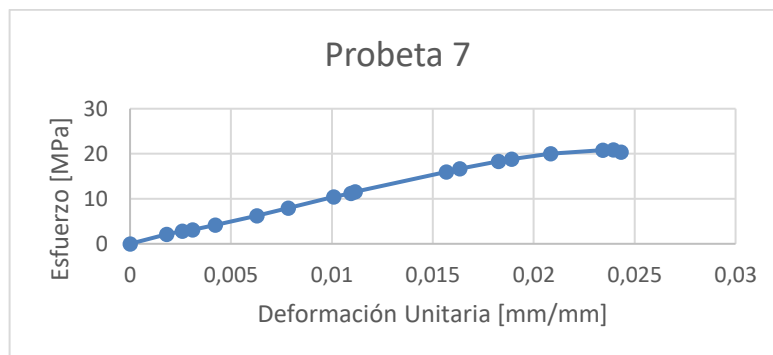
Probeta 1. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



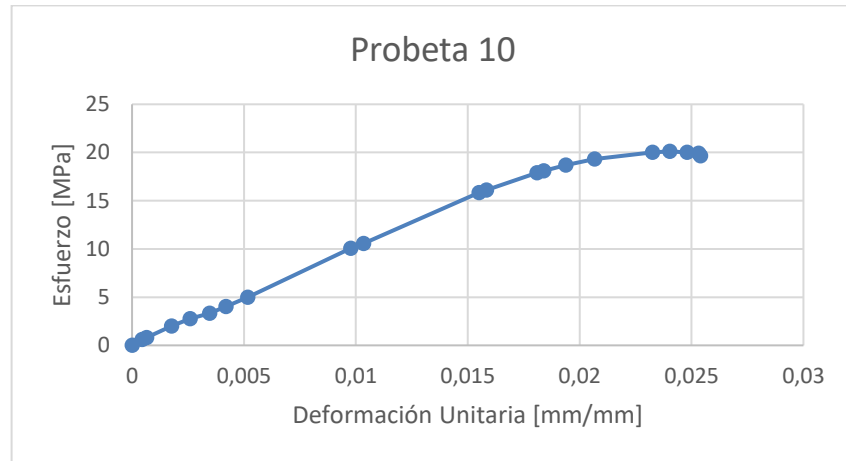
Probeta 4. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



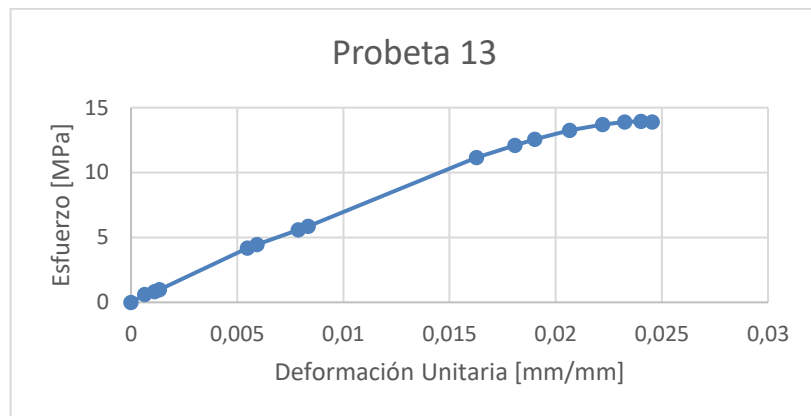
Probeta 7. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



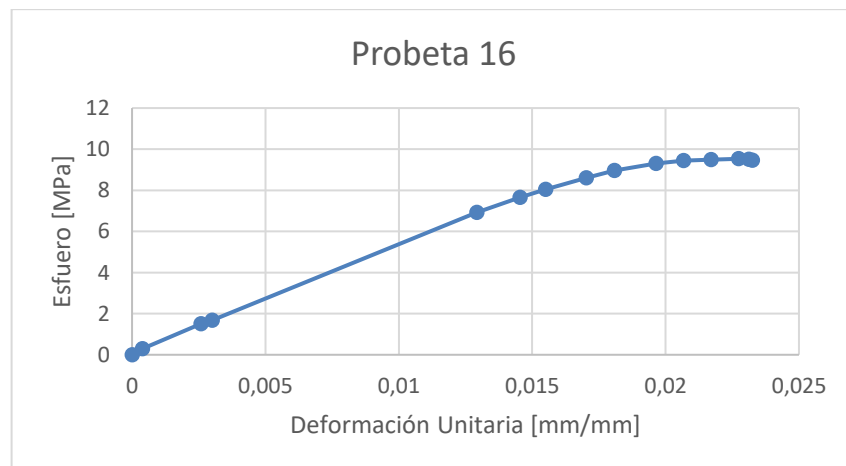
Probeta 10. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



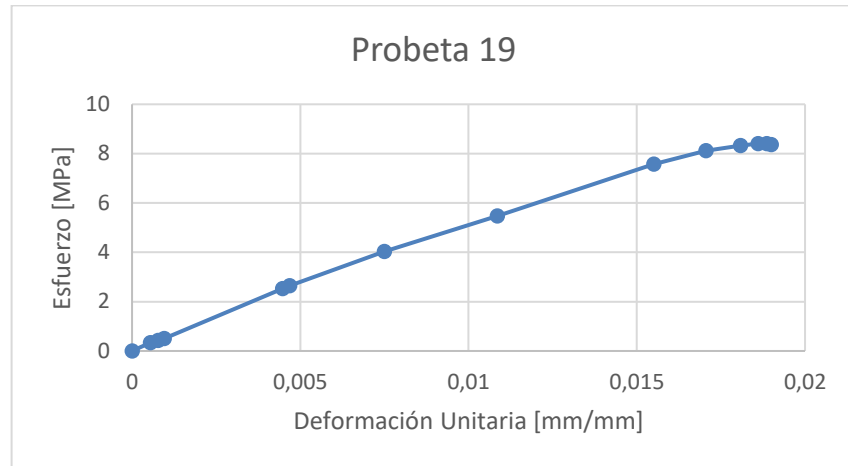
Probeta 13. Parámetros de impresión ($e = 0,3$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



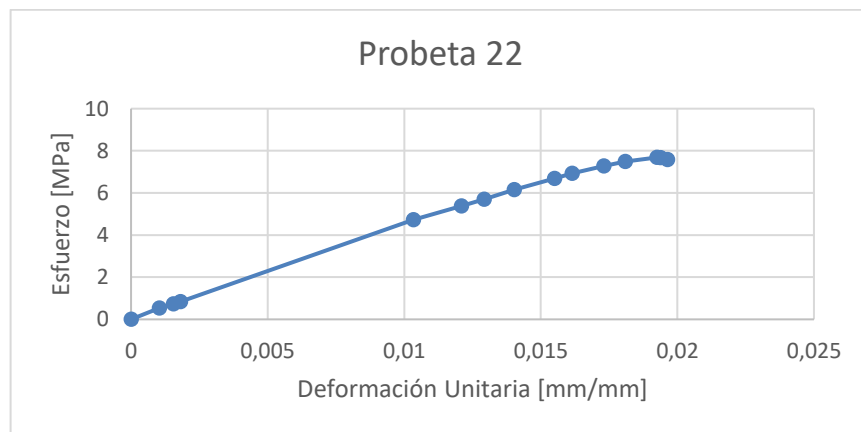
Probeta 16. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



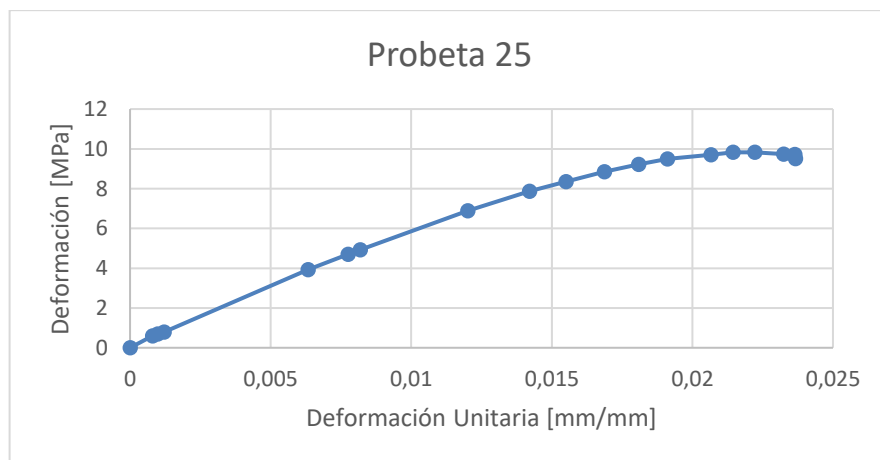
Probeta 19. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



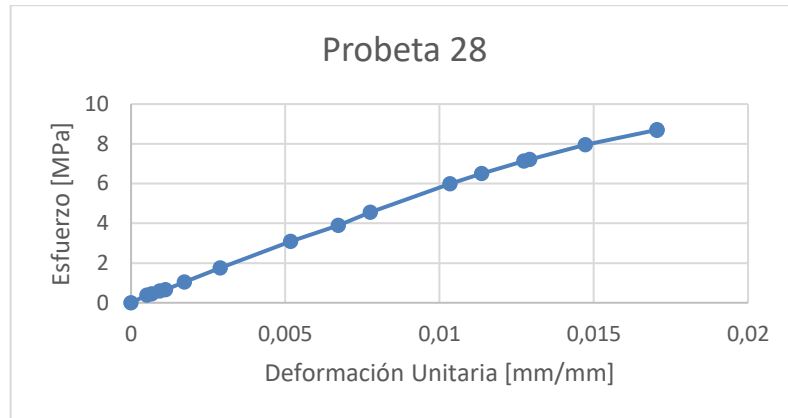
Probeta 22. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



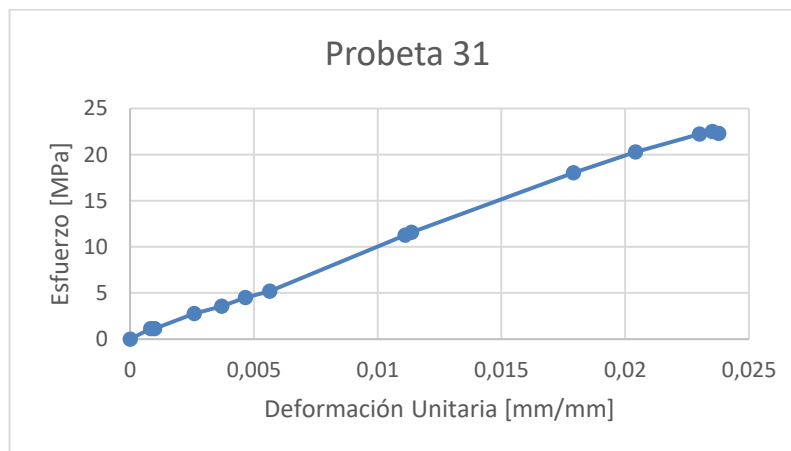
Probeta 25. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



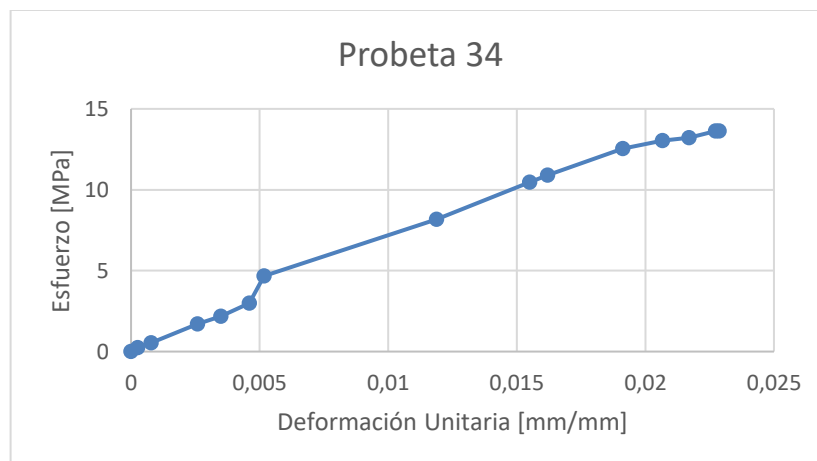
Probeta 28. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



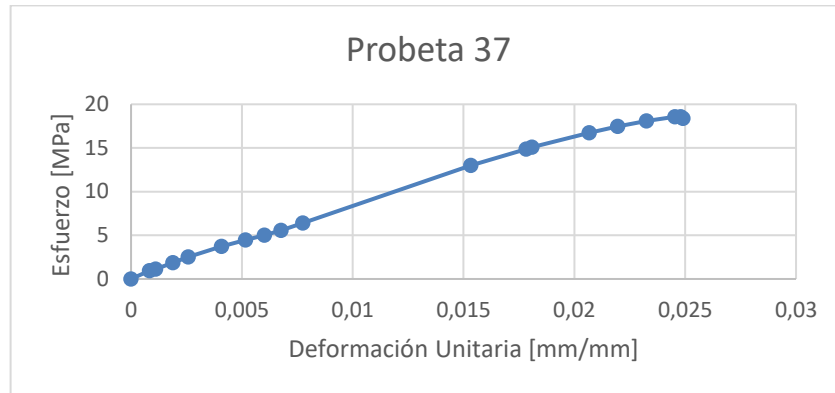
Probeta 31. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



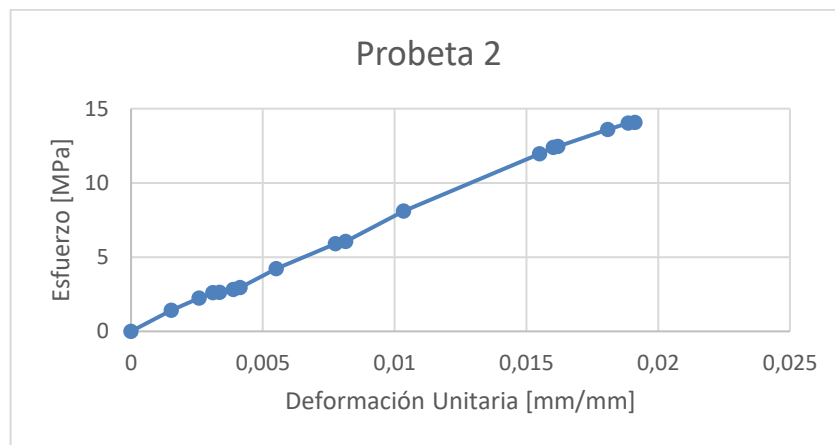
Probeta 34. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



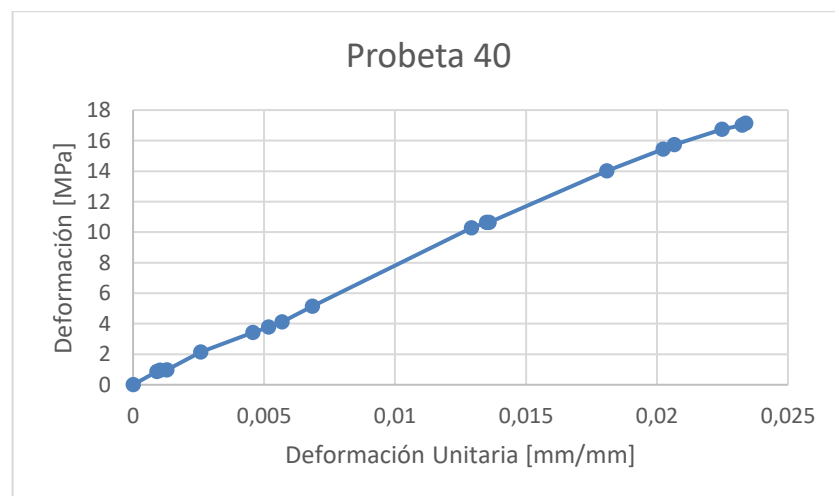
Probeta 37. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



Probeta 2. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



Probeta 40. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta 46. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).

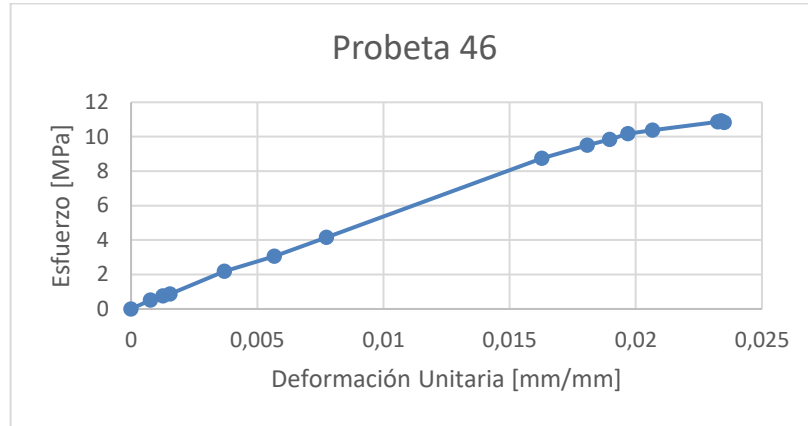
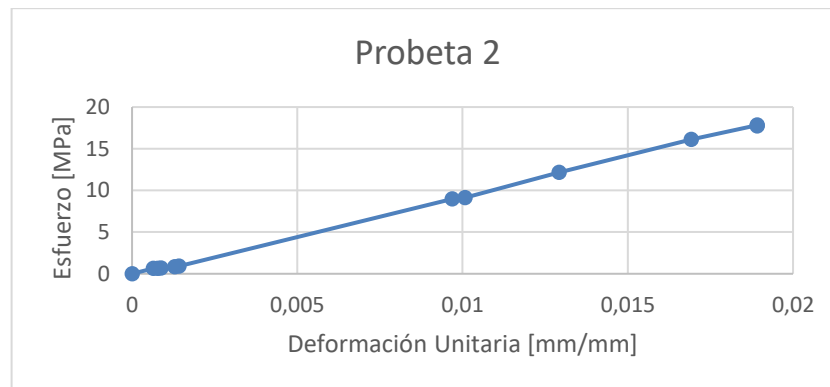
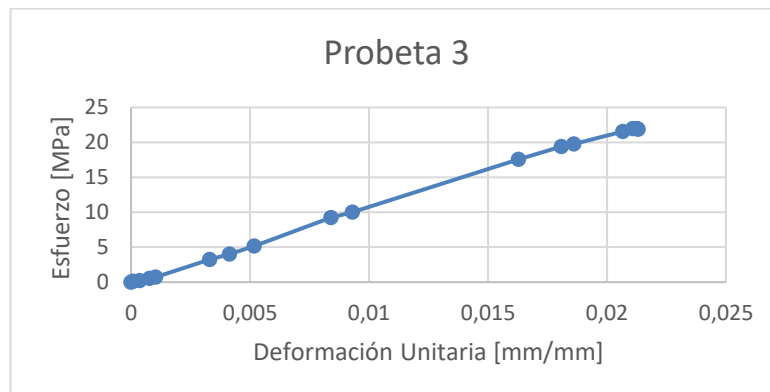


Gráfico comparativo de esfuerzo vs deformación para probetas expuestas a Ciclo A de degradación.

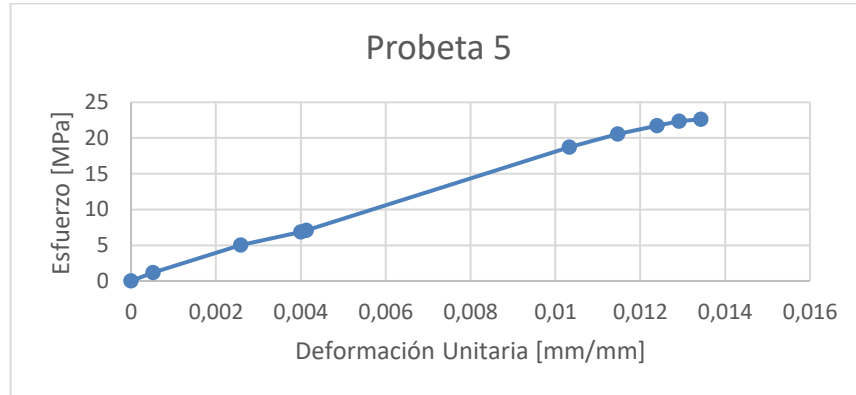
Probeta 2. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



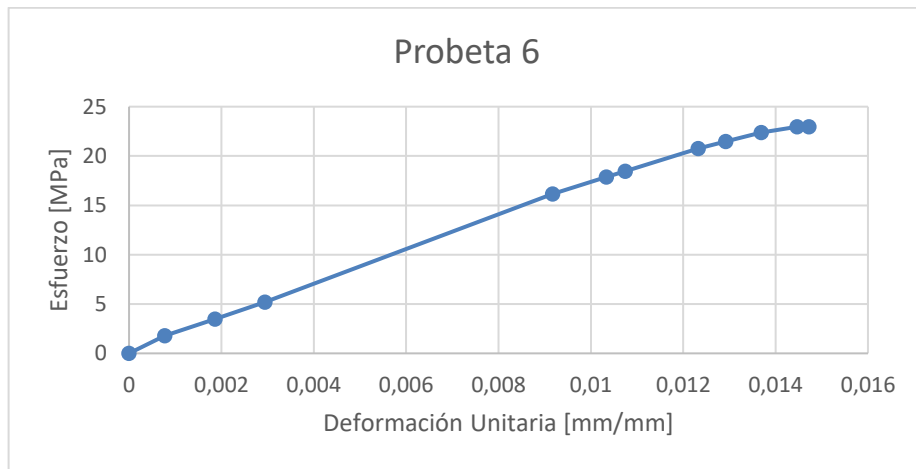
Probeta 3. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



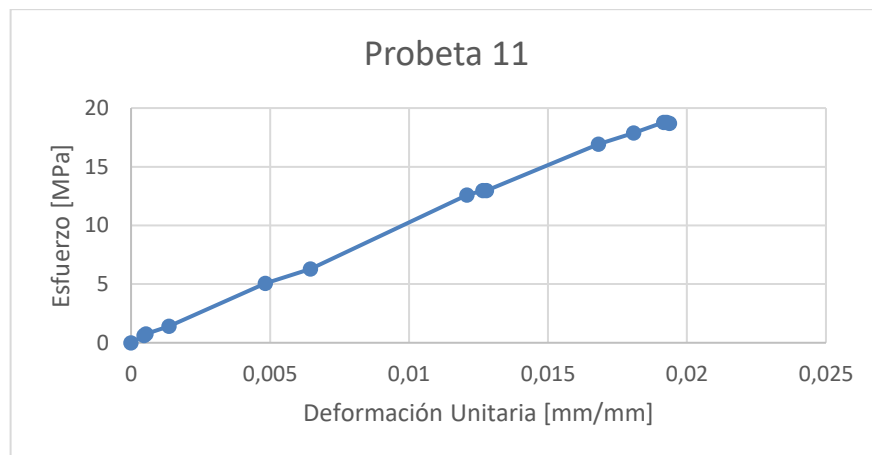
Probeta 5. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



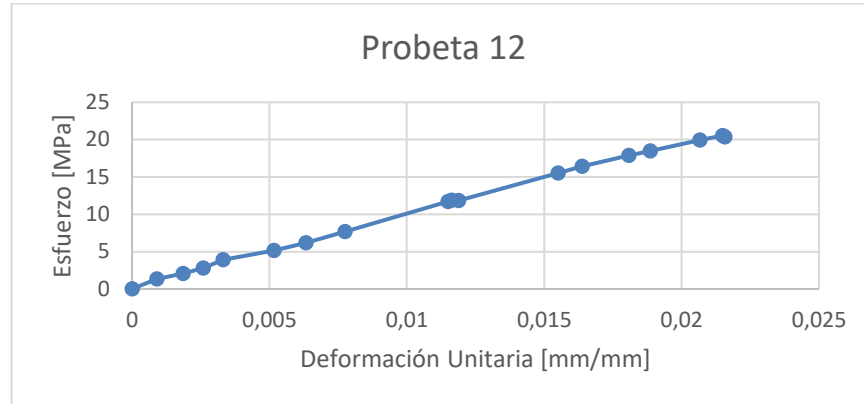
Probeta 6. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



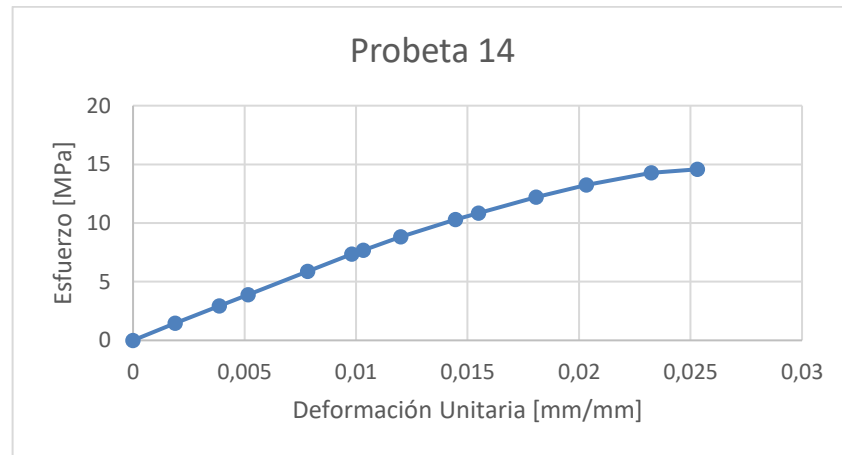
Probeta 11. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



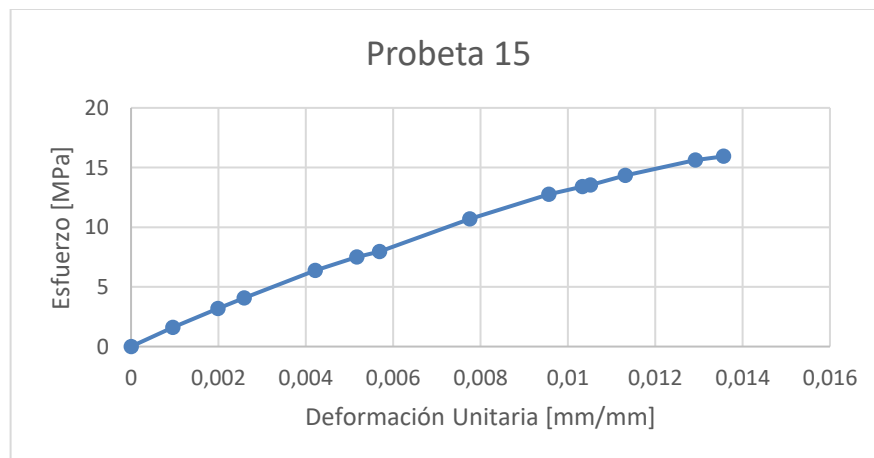
Probeta 12. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



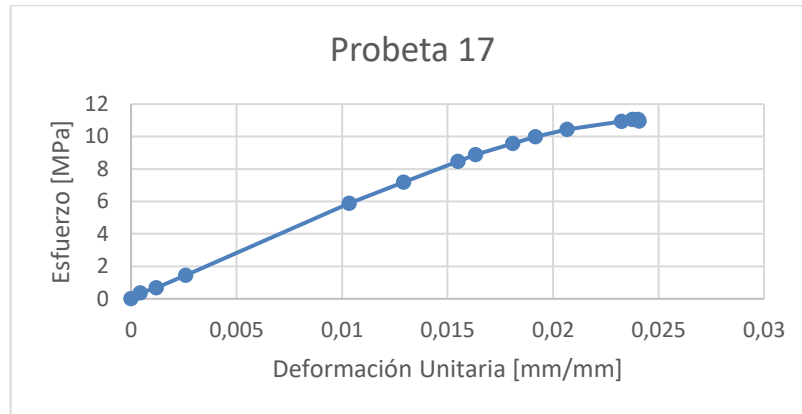
Probeta 14. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



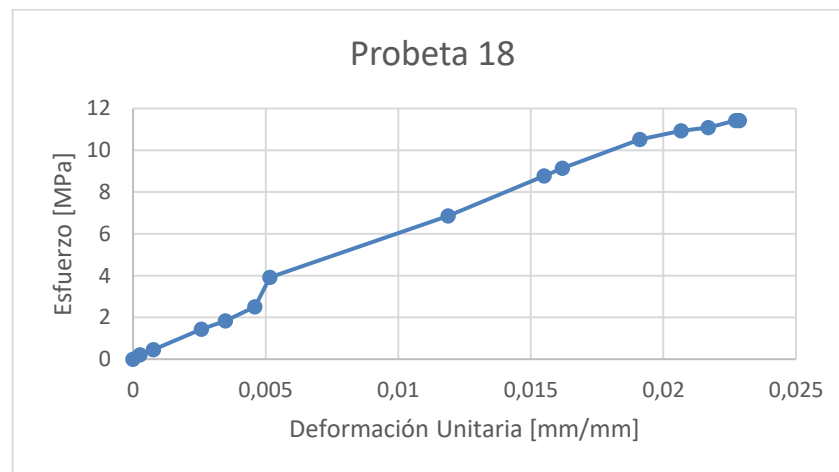
Probeta 15. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



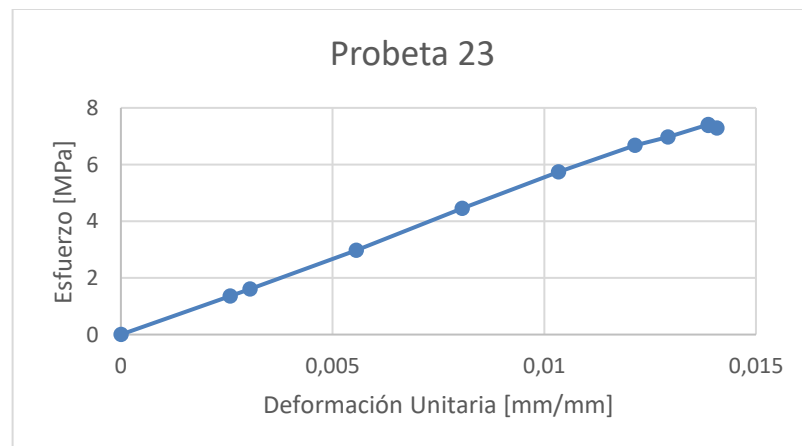
Probeta 17. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



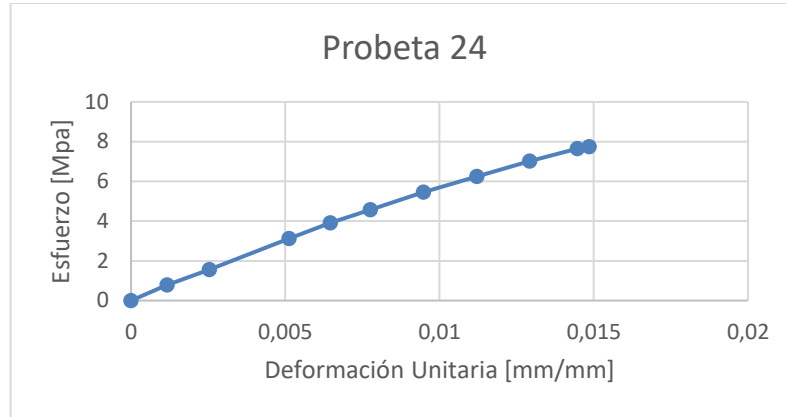
Probeta 18. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



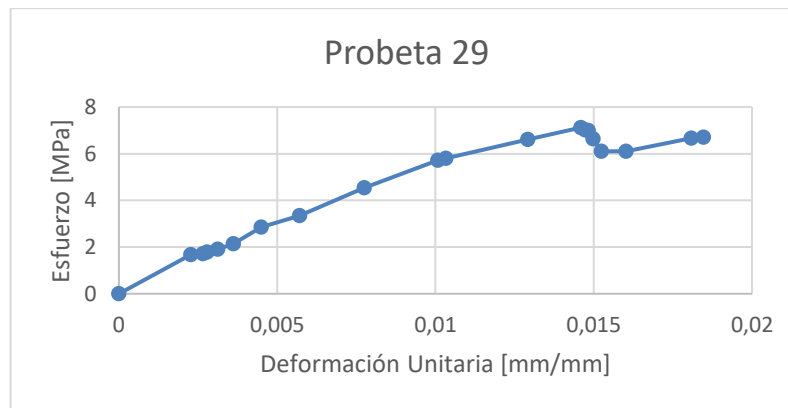
Probeta 23. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



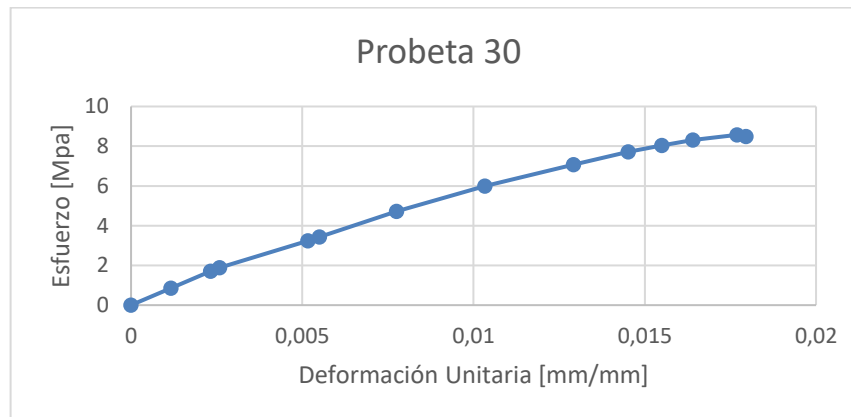
Probeta 24. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



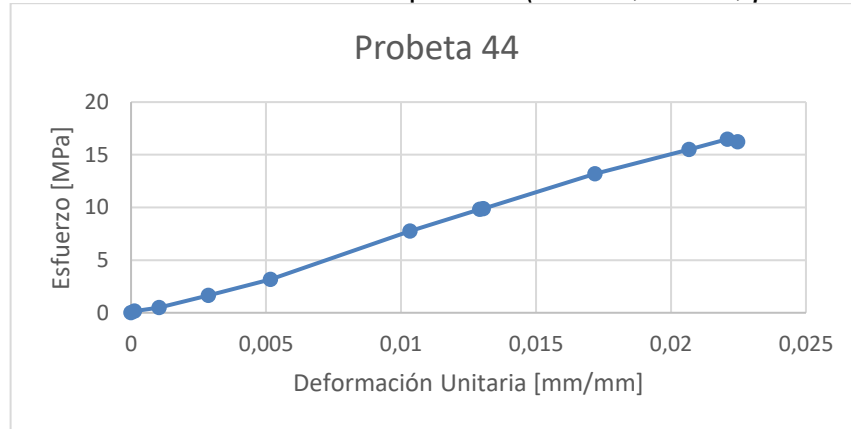
Probeta 29. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta 30. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta 44. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta 45. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).

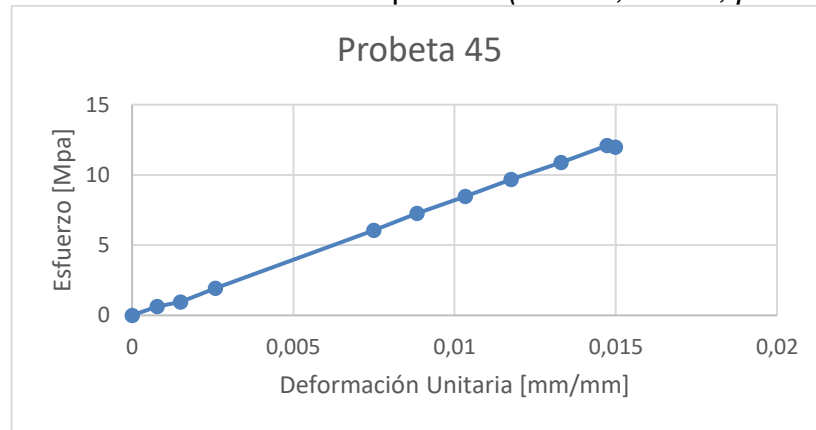
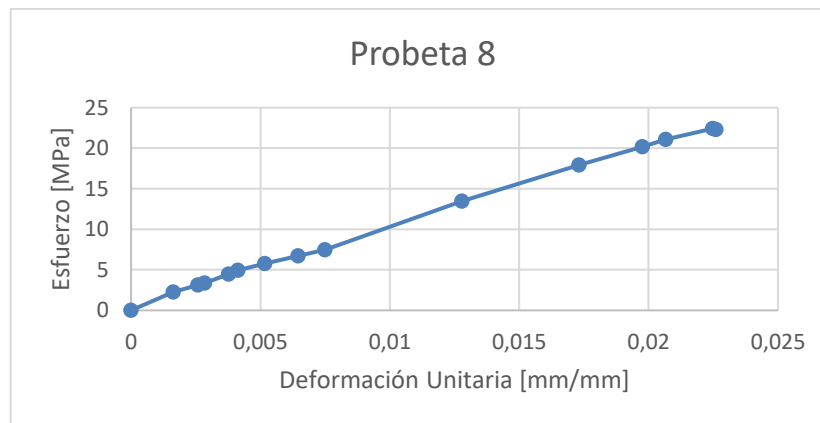
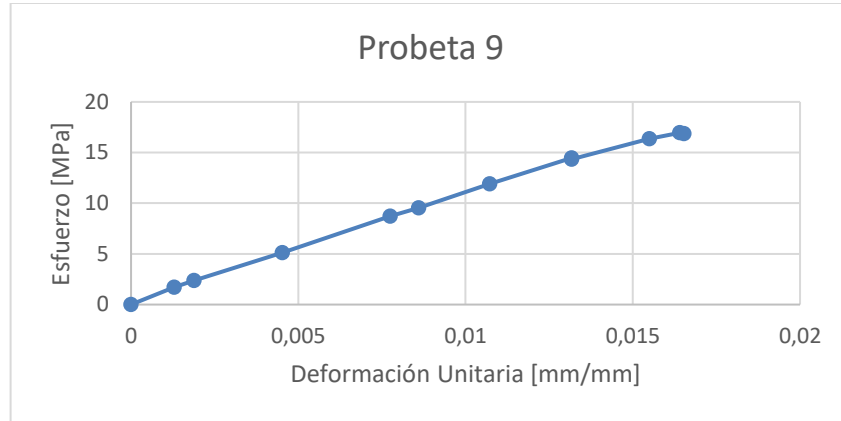


Gráfico comparativo de esfuerzo vs deformación para probetas expuestas a Ciclo B de degradación.

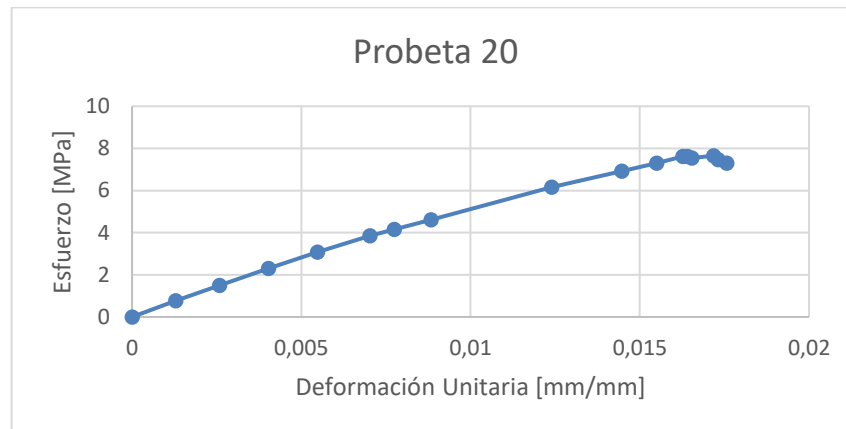
Probeta 8. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



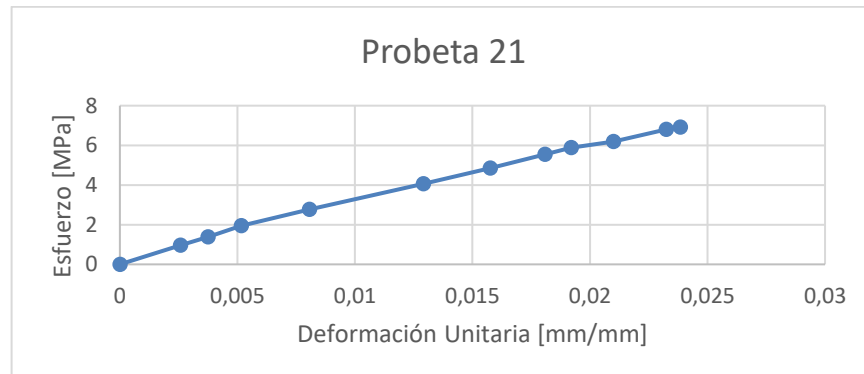
Probeta 9. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



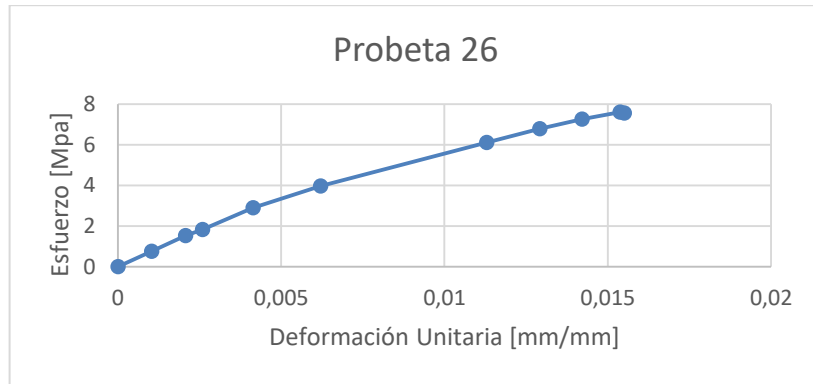
Probeta 20. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



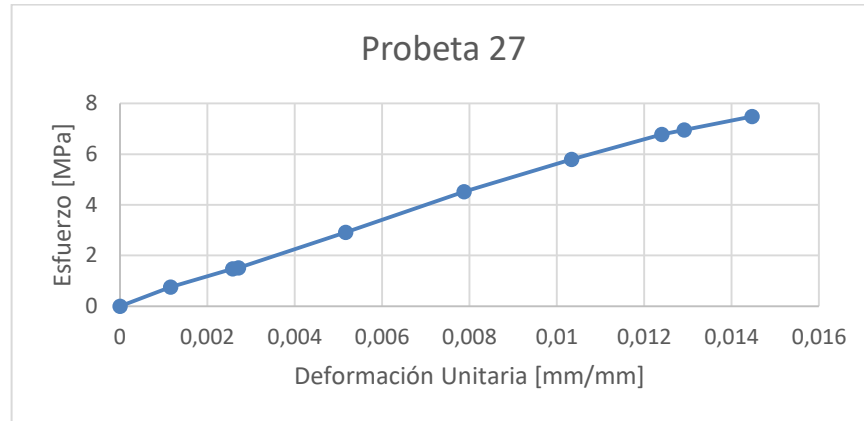
Probeta 21. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



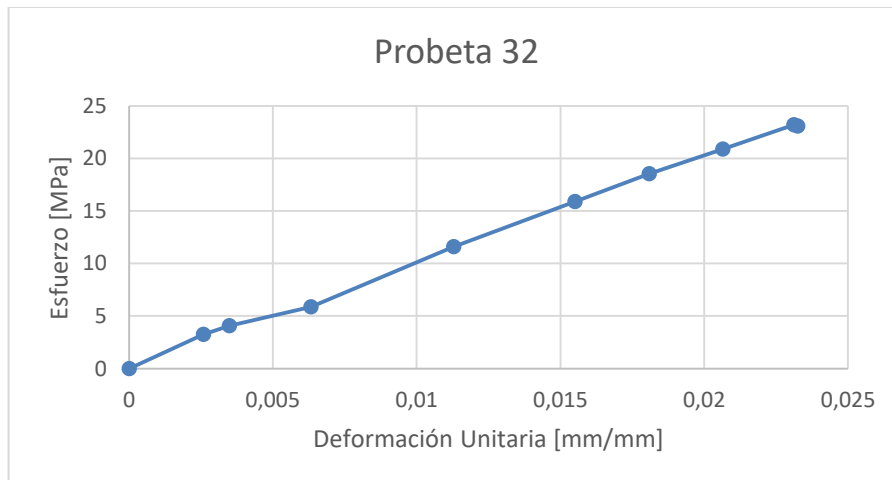
Probeta 26. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



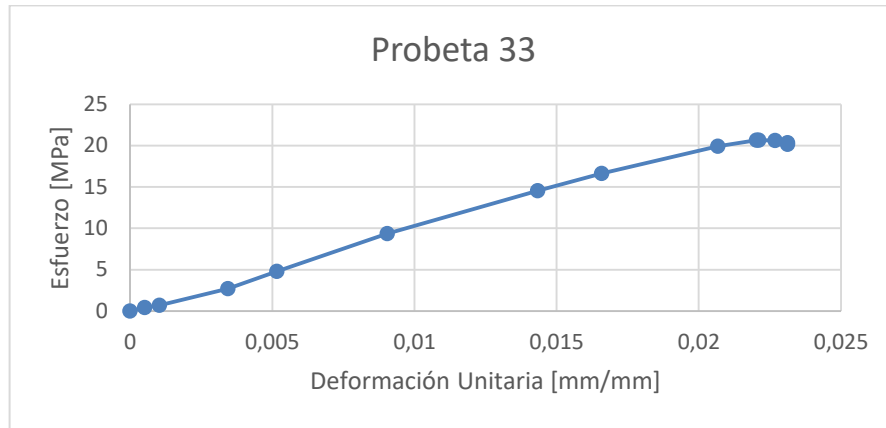
Probeta 27. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



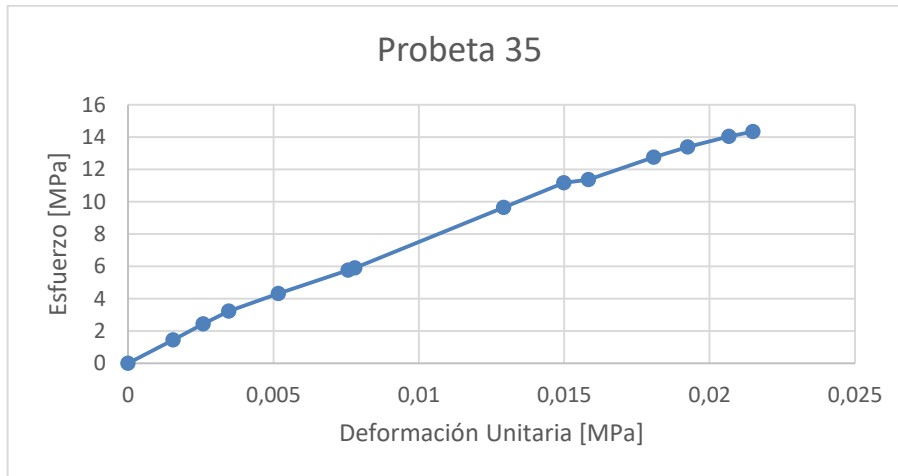
Probeta 32. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



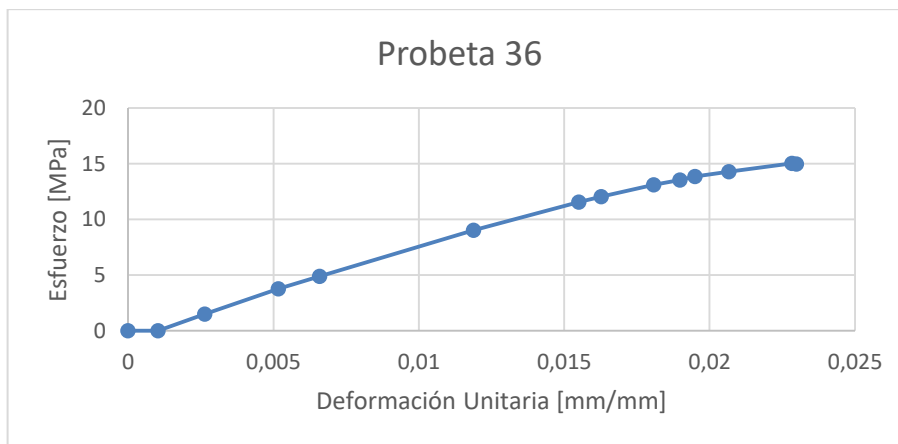
Probeta 33. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 35\%$).



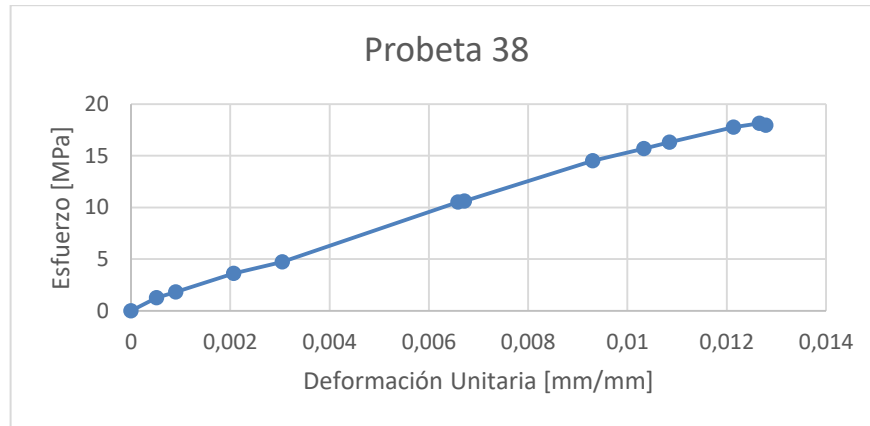
Probeta 35. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



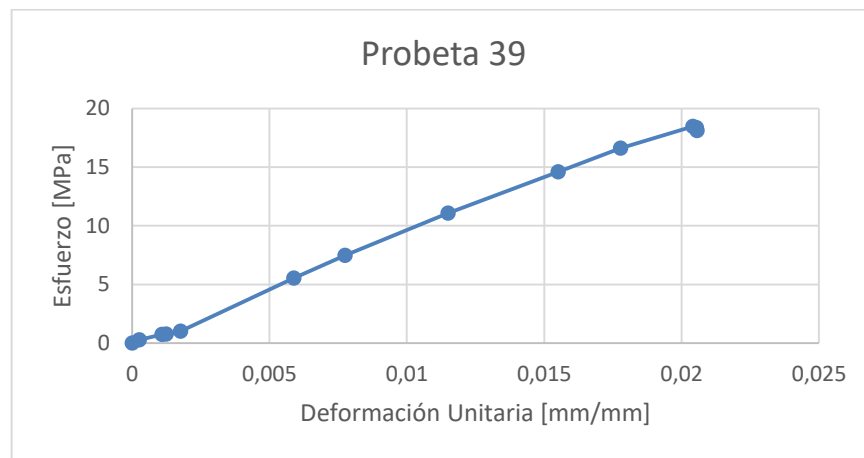
Probeta 36. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



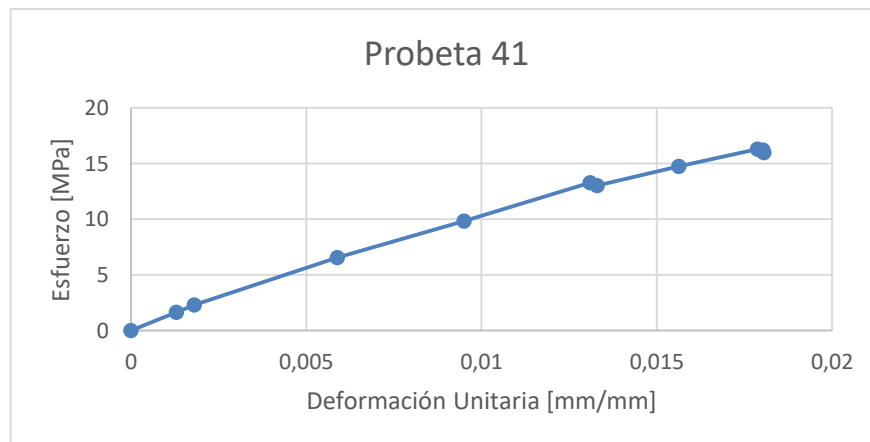
Probeta 38. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



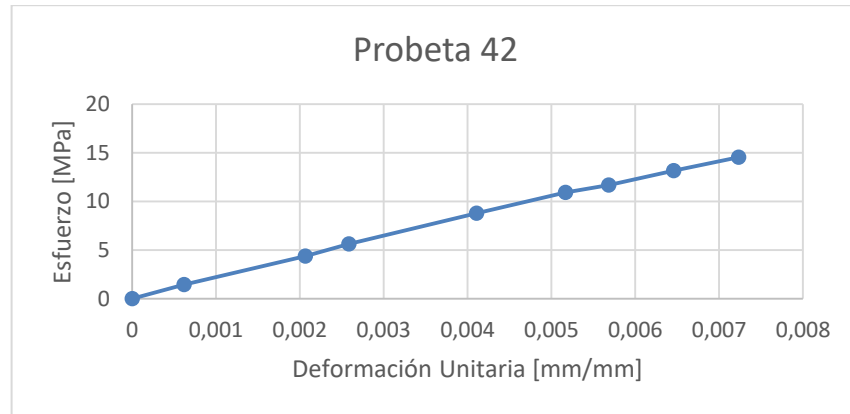
Probeta 39. Parámetros de impresión ($e = 0.1$, $a = 45^\circ$, $p = 35\%$).



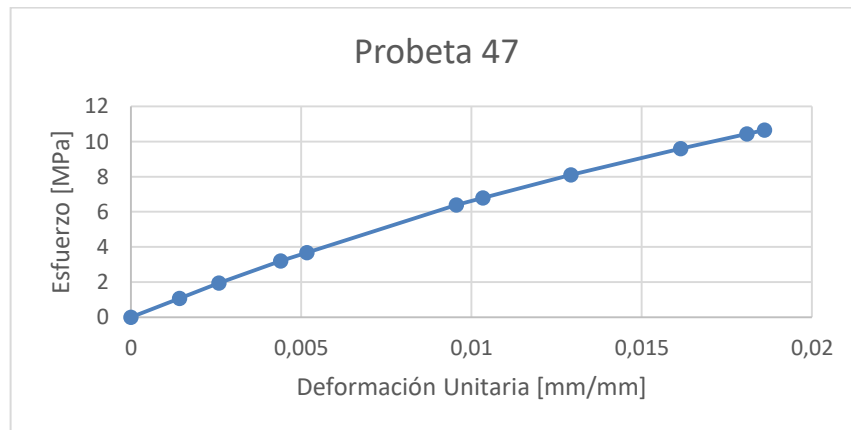
Probeta 41. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



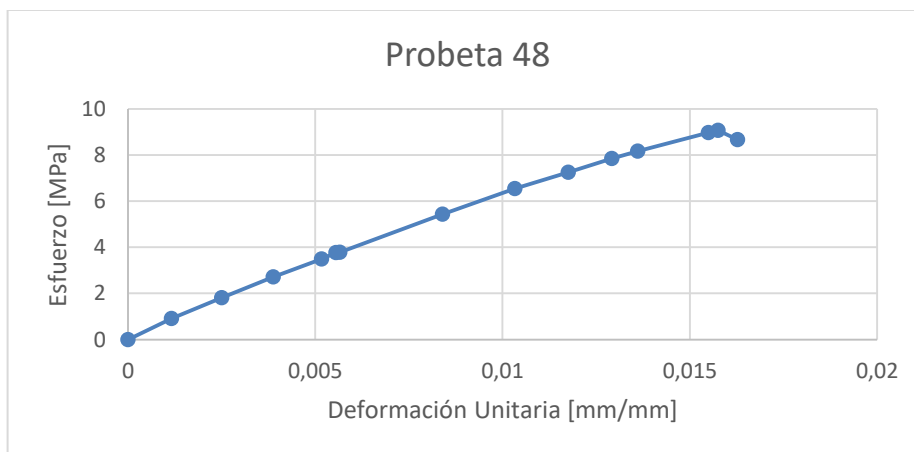
Probeta 42. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 0^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta 47. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



Probeta 48. Parámetros de impresión ($e = 0.3$, $a = 45^\circ$, $p = 65\%$).



Anexo 2. Regresiones múltiples de los factores de proceso y ambientales vs propiedades mecánicas del PLA.

Probetas sin exposición a ciclos de degradación.

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

Regression Equation

$$\text{Esfuerzo Máximo} = 29,4214 + 3,86148 \text{ Espesor} - 26,4574 \text{ Porosidad} - 0,0831603 \text{ Ángulo}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	29,4214	3,02423	9,72857	0,000
Espesor	3,8615	7,06240	0,54677	0,595
Porosidad	-26,4574	4,63412	-5,70926	0,000
Ángulo	-0,0832	0,03089	-2,69178	0,020

Summary of Model

S = 2,75796 R-Sq = 77,77% R-Sq(adj) = 72,22%
PRESS = 164,700 R-Sq(pred) = 59,89%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	319,382	319,382	106,461	13,9964	0,000318
Espesor	1	20,029	2,274	2,274	0,2990	0,594562
Porosidad	1	244,240	247,933	247,933	32,5956	0,000098
Ángulo	1	55,113	55,113	55,113	7,2457	0,019605
Error	12	91,276	91,276	7,606		
Lack-of-Fit	4	78,135	78,135	19,534	11,8923	0,001900
Pure Error	8	13,140	13,140	1,643		
Total	15	410,658				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo' = Espesor Porosidad Ángulo;
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: Porcentaje de El versus Espesor; Porosidad; Ángulo

Regression Equation

$$\text{Porcentaje de Elongación} = 2,97845 - 0,625984 \text{ Espesor} - 1,29925 \text{ Porosidad} + 0,00366612 \text{ Ángulo}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,97845	0,362111	8,22524	0,000
Espesor	-0,62598	0,845628	-0,74026	0,473
Porosidad	-1,29925	0,554874	-2,34152	0,037
Ángulo	0,00367	0,003699	0,99107	0,341

Summary of Model

S = 0,330228 R-Sq = 36,44% R-Sq(adj) = 20,55%
 PRESS = 2,28639 R-Sq(pred) = -11,06%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,75014	0,75014	0,250046	2,29293	0,130043
Espesor	1	0,03678	0,05976	0,059758	0,54798	0,473378
Porosidad	1	0,60624	0,59790	0,597895	5,48272	0,037282
Ángulo	1	0,10711	0,10711	0,107112	0,98222	0,341216
Error	12	1,30861	1,30861	0,109051		
Lack-of-Fit	4	0,45386	0,45386	0,113465	1,06198	0,434530
Pure Error	8	0,85475	0,85475	0,106843		
Total	15	2,05875				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Porcentaje de Elongación	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	3,308	2,62609	0,161003	0,681914	2,36512 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

```
MTB > GReg 'Porcentaje de Elongación' = Espesor Porosidad Ángulo;
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: Modulo de Elasti versus Espesor; Porosidad; Ángulo

Regression Equation

$$\text{Modulo de Elasticidad} = 1377,1 + 107,032 \text{ Espesor} - 1033,28 \text{ Porosidad} - 4,83914 \text{ Ángulo}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1377,10	85,060	16,1897	0,000
Espesor	107,03	198,639	0,5388	0,600
Porosidad	-1033,28	130,341	-7,9276	0,000
Ángulo	-4,84	0,869	-5,5690	0,000

Summary of Model

S = 77,5711 R-Sq = 89,05% R-Sq(adj) = 86,31%
 PRESS = 129470 R-Sq(pred) = 80,36%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	587144	587144	195715	32,5255	0,000005
Espesor	1	30785	1747	1747	0,2903	0,599859
Porosidad	1	369739	378164	378164	62,8463	0,000004
Ángulo	1	186621	186621	186621	31,0141	0,000122
Error	12	72207	72207	6017		
Lack-of-Fit	4	60759	60759	15190	10,6141	0,002759
Pure Error	8	11449	11449	1431		
Total	15	659352				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Modulo de Elasticidad' = Espesor Porosidad Ángulo;
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.
```

Probetas con exposición a Ciclo A de degradación.

Descripción del ciclo: 8 Horas de exposición UV con panel negro sin aislamiento, temperatura controlada a 60 ±3°C.

4 horas de condensación con panel negro sin aislamiento, temperatura controlada a 50 ±3°C

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

Regression Equation

Esfuerzo Máximo = 30,9492 + 1,86875 Espesor - 30,4958 Porosidad - 0,0333056 Ángulo

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	30,9492	3,45358	8,96148	0,000
Espesor	1,8688	8,34892	0,22383	0,827
Porosidad	-30,4958	5,56595	-5,47900	0,000
Ángulo	-0,0333	0,03711	-0,89757	0,387

Summary of Model

S = 3,33957 R-Sq = 72,01% R-Sq(adj) = 65,01%
PRESS = 237,924 R-Sq(pred) = 50,24%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	344,342	344,342	114,781	10,2917	0,001229
Espesor	1	0,559	0,559	0,559	0,0501	0,826654
Porosidad	1	334,799	334,799	334,799	30,0195	0,000141
Ángulo	1	8,985	8,985	8,985	0,8056	0,387068
Error	12	133,833	133,833	11,153		
Lack-of-Fit	4	104,666	104,666	26,167	7,1772	0,009312
Pure Error	8	29,166	29,166	3,646		
Total	15	478,175				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo' = Espesor Porosidad Ángulo;
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: Porcentaje de El versus Espesor; Porosidad; Ángulo

Regression Equation

Porcentaje de Elongación = 1,54279 + 1,815 Espesor + 0,0641667 Porosidad -
0,00337778 Ángulo

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,54279	0,398437	3,87211	0,002
Espesor	1,81500	0,963210	1,88432	0,084
Porosidad	0,06417	0,642140	0,09993	0,922
Ángulo	-0,00338	0,004281	-0,78903	0,445

Summary of Model

S = 0,385284 R-Sq = 25,85% R-Sq(adj) = 7,31%
PRESS = 3,16680 R-Sq(pred) = -31,82%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,62097	0,62097	0,206991	1,39441	0,292173
Espesor	1	0,52708	0,52708	0,527076	3,55068	0,083969
Porosidad	1	0,00148	0,00148	0,001482	0,00999	0,922053
Ángulo	1	0,09242	0,09242	0,092416	0,62257	0,445405
Error	12	1,78133	1,78133	0,148444		
Lack-of-Fit	4	0,73748	0,73748	0,184369	1,41300	0,313190
Pure Error	8	1,04385	1,04385	0,130481		
Total	15	2,40230				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Porcentaje de Elongación' = Espesor Porosidad Ángulo;
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: Modulo de Elasti versus Espesor; Porosidad; Ángulo

Regression Equation

$$\text{Modulo de Elasticidad} = 1965,96 - 905,663 \text{ Espesor} - 1857,82 \text{ Porosidad} + 4,04103 \text{ Ángulo}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1965,96	295,825	6,64569	0,000
Espesor	-905,66	715,148	-1,26640	0,229
Porosidad	-1857,82	476,765	-3,89672	0,002
Ángulo	4,04	3,178	1,27139	0,228

Summary of Model

S = 286,059 R-Sq = 60,53% R-Sq(adj) = 50,67%
PRESS = 1745704 R-Sq(pred) = 29,84%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	1506047	1506047	502016	6,1349	0,009011
Espesor	1	131236	131236	131236	1,6038	0,229401
Porosidad	1	1242539	1242539	1242539	15,1844	0,002123
Ángulo	1	132272	132272	132272	1,6164	0,227681
Error	12	981959	981959	81830		
Lack-of-Fit	4	619286	619286	154822	3,4151	0,065547
Pure Error	8	362672	362672	45334		
Total	15	2488006				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Modulo de Elasticidad' = Espesor Porosidad Ángulo;
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.
```

Probetas con exposición a Ciclo B de degradación.

Descripción del ciclo: 8 Horas de exposición UV con panel negro sin aislamiento, temperatura controlada a 70 ±3°C.

4 horas de condensación con panel negro sin aislamiento, temperatura controlada a 50 ±3°C

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

Regression Equation

Esfuerzo Máximo = 8,18042 + 22,4188 Espesor + 1,52917 Porosidad + 0,0549722
Ángulo

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,1804	5,7745	1,41664	0,182
Espesor	22,4188	13,9598	1,60596	0,134
Porosidad	1,5292	9,3065	0,16431	0,872
Ángulo	0,0550	0,0620	0,88603	0,393

Summary of Model

S = 5,58390 R-Sq = 22,03% R-Sq(adj) = 2,54%
PRESS = 665,173 R-Sq(pred) = -38,61%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	105,736	105,736	35,2452	1,1304	0,375814
Espesor	1	80,416	80,416	80,4161	2,5791	0,134262
Porosidad	1	0,842	0,842	0,8418	0,0270	0,872221
Ángulo	1	24,478	24,478	24,4778	0,7850	0,393012
Error	12	374,160	374,160	31,1800		
Lack-of-Fit	4	351,837	351,837	87,9592	31,5229	0,000060
Pure Error	8	22,323	22,323	2,7903		
Total	15	479,895				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

No unusual observations

```
MTB > GReg 'Esfuerzo Máximo' = Espesor Porosidad Ángulo;
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: Porcentaje de El versus Espesor; Porosidad; Ángulo

Regression Equation

Porcentaje de Elongación = 1,62462 + 1,4075 Espesor - 0,2725 Porosidad + 0,00666667 Ángulo

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,62462	0,332489	4,88625	0,000
Espesor	1,40750	0,803782	1,75110	0,105
Porosidad	-0,27250	0,535854	-0,50853	0,620
Ángulo	0,00667	0,003572	1,86618	0,087

Summary of Model

S = 0,321513 R-Sq = 36,20% R-Sq(adj) = 20,24%
 PRESS = 2,20523 R-Sq(pred) = -13,43%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,70370	0,70370	0,234567	2,26919	0,132717
Espesor	1	0,31697	0,31697	0,316969	3,06634	0,105424
Porosidad	1	0,02673	0,02673	0,026732	0,25861	0,620299
Ángulo	1	0,36000	0,36000	0,360000	3,48262	0,086637
Error	12	1,24044	1,24044	0,103370		
Lack-of-Fit	4	0,39585	0,39585	0,098964	0,93739	0,489261
Pure Error	8	0,84459	0,84459	0,105574		
Total	15	1,94415				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Porcentaje de Elongación	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
11	1,278	1,88825	0,160756	-0,61025	-2,19169 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

```
MTB > GReg 'Porcentaje de Elongación' = Espesor Porosidad Ángulo;
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: Modulo de Elasti versus Espesor; Porosidad; Ángulo

Regression Equation

Modulo de Elasticidad = 630,291 + 471,5 Espesor + 352,466 Porosidad + 0,36689
Ángulo

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	630,291	355,106	1,77494	0,101
Espesor	471,500	858,459	0,54924	0,593
Porosidad	352,466	572,306	0,61587	0,549
Ángulo	0,367	3,815	0,09616	0,925

Summary of Model

S = 343,383 R-Sq = 5,44% R-Sq(adj) = -18,20%
PRESS = 2515460 R-Sq(pred) = -68,11%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	81384	81384	27128	0,23007	0,873677
Espesor	1	35570	35570	35570	0,30166	0,592915
Porosidad	1	44724	44724	44724	0,37930	0,549484
Ángulo	1	1090	1090	1090	0,00925	0,924980
Error	12	1414946	1414946	117912		
Lack-of-Fit	4	1138765	1138765	284691	8,24649	0,006124
Pure Error	8	276182	276182	34523		
Total	15	1496330				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Modulo de Elasticidad	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	R
11	1579,77	923,054	171,692	656,716	2,20835	R

R denotes an observation with a large standardized residual.

```
MTB > GReg 'Modulo de Elasticidad' = Espesor Porosidad Ángulo;
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.
```

