

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**“Caracterización mecánica de polímeros inyectables PLA,  
PHB, HDPE y PP”**

Trabajo de graduación presentado por Luis Guillermo Velásquez Leiva  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

Guatemala  
2023







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



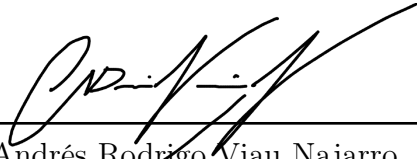
**“Caracterización mecánica de polímeros inyectables PLA,  
PHB, HDPE y PP”**

Trabajo de graduación presentado por Luis Guillermo Velásquez Leiva  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

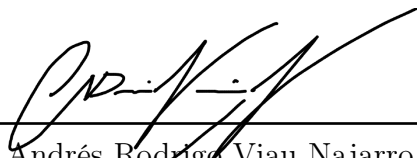
Guatemala  
2023




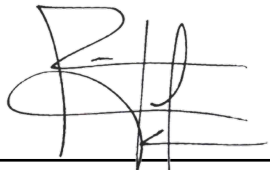
Vo.Bo.:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Víctor Hugo Ayerdi Bardales

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Rony José Herrarte Estevez

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de Enero de 2023.



<b>Lista de figuras</b>	VIII
<b>Lista de cuadros</b>	IX
<b>Resumen</b>	XI
<b>Abstract</b>	XIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>5</b>
3.1. Objetivo general . . . . .	5
3.2. Objetivos específicos . . . . .	5
<b>4. Marco teórico</b>	<b>7</b>
4.1. Concepto básico de resistencia de materiales . . . . .	7
4.2. Ensayos mecánicos . . . . .	8
4.2.1. Prueba a tensión . . . . .	8
4.2.2. Ensayo a compresión . . . . .	10
4.2.3. Velocidad de deformación . . . . .	10
4.3. Efecto de la manufactura en las propiedades . . . . .	11
4.4. Inyección de plástico . . . . .	11
4.5. Sistema de alimentación de la cavidad . . . . .	13
4.5.1. Diseño de bebedero . . . . .	14
4.6. Materiales inyectables . . . . .	15
4.6.1. Plásticos petroquímicos . . . . .	15
4.6.2. HDPE . . . . .	15
4.6.3. PP . . . . .	16
4.6.4. Biopolímeros . . . . .	16
4.6.5. PLA . . . . .	16
4.6.6. PHB . . . . .	17

<b>5. Metodología</b>	<b>19</b>
5.1. Descripción de metodología	19
5.2. Definición de requisitos	20
5.3. Delimitación de geometría	22
5.4. Generación de cavidad	23
5.5. Análisis de inyección	25
5.6. Estrategia de maquinado	27
5.7. Inyección de probetas	32
5.7.1. Pruebas a tensión	34
5.8. Procesamiento de vídeos	35
5.9. Obtención de curvas esfuerzo-deformación	36
5.9.1. Cálculo de propiedades mecánicas	37
5.10. Determinación de velocidad de deformación	38
<b>6. Cálculos y resultados</b>	<b>39</b>
6.1. Cumplimiento de requisitos	39
6.2. Simulación de inyección	39
6.3. Maquinado de molde	42
6.4. Inyección de probetas	42
6.5. Pruebas a tensión	44
6.6. Gráficas esfuerzo-deformación	45
6.7. Fichas técnicas	51
<b>7. Discusión</b>	<b>53</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>59</b>
<b>10. Bibliografía</b>	<b>61</b>
<b>11. Anexos</b>	<b>65</b>

---

## Lista de figuras

---

1. Ejemplo de ensayo a tensión. . . . .	8
2. Gráfica de esfuerzo-deformación típica de un plástico . . . . .	9
3. Geometría de probetas para ensayos (a) tensión y (b) compresión . . . . .	10
4. Diagrama de partes principales de una máquina de inyección . . . . .	12
5. Ejemplo de <i>Jetting</i> en un proceso de inyección . . . . .	12
6. Representación del sistema de alimentación con sus componentes . . . . .	13
7. Tipos de geometría para los bebederos del sistema de alimentación . . . . .	14
8. Dimensiones finales de probeta (mm) . . . . .	22
9. Prueba preliminar para determinar geometría mínima aceptada por la máquina de ensayo . . . . .	23
10. Definición de pieza de trabajo . . . . .	24
11. Parámetros de geometría del corredor . . . . .	24
12. Parámetros de geometría de la compuerta . . . . .	25
13. Parámetros para simulación de proceso de inyección . . . . .	26
14. Ranuras de sujeción para el molde de inyección . . . . .	27
15. Cambios de geometría para manufacturar del molde . . . . .	27
16. Configuración de la pieza de trabajo en Inventor CAM . . . . .	28
17. Colocación del molde y la sujeción KURT . . . . .	29
18. Simulación Final del molde para inyección . . . . .	30
19. Exportación de simulación a código G . . . . .	31
20. Probeta de polipropileno inyectada en APSX-PIM . . . . .	33
21. Configuración del equipo para realizar los ensayos a tensión . . . . .	35
22. Obtención de desplazamiento de la probeta en <i>Tracker</i> . . . . .	36
23. Nivel de confianza de llenado para molde . . . . .	41
24. Predicción de calidad para el llenado del molde . . . . .	41
25. Molde de aluminio maquinado en Haas VF-1 para inyección de probetas . . . . .	42
26. Probetas finales de los tres distintos materiales inyectados . . . . .	43
27. Probetas posterior a los ensayos realizados en orden de prueba (Orden izquierda a derecha: PHB, PP y HDPE) . . . . .	44
28. Gráfica de desplazamiento de la marca superior de la probeta 1 de HDPE . . . . .	46

29. Gráfica esfuerzo-deformación filtrada de las probetas HDPE utilizando la mordaza móvil como objeto de medición de posición . . . . .	47
30. Gráfica esfuerzo-deformación filtrada de las probetas PP utilizando la mordaza móvil como objeto de medición de posición . . . . .	47
31. Gráfica deformación-tiempo de probeta 6 de HDPE . . . . .	49
32. Gráfica deformación-tiempo de probeta 10 de PP . . . . .	50
100. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas HDPE utilizando la marca como referencia para medición de desplazamiento . . . . .	65
101. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas PP utilizando la marca como referencia para medición de desplazamiento . . . . .	66
102. Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas 1, 3 y 6 de PP utilizando la mordaza móvil como objeto de medición de posición . . . . .	66
103. Región elástica de gráfica esfuerzo-deformación de probetas de PP utilizando la marca como referencia para medición de desplazamiento . . . . .	67
104. Región elástica de gráfica esfuerzo-deformación de probetas de PP utilizando la mordaza móvil como referencia para medición de desplazamiento . . . . .	67
105. Gráfica deformación-tiempo de probeta 1 de HDPE . . . . .	68
106. Gráfica deformación-tiempo de probeta 5 de HDPE . . . . .	68
107. Gráfica deformación-tiempo de probeta 7 de HDPE . . . . .	69
108. Gráfica deformación-tiempo de probeta 8 de HDPE . . . . .	69
109. Gráfica deformación-tiempo de probeta 1 de PP . . . . .	70
110. Gráfica deformación-tiempo de probeta 3 de PP . . . . .	70
111. Gráfica deformación-tiempo de probeta 6 de PP . . . . .	71
112. Gráfica deformación-tiempo de probeta 9 de PP . . . . .	71
113. Gráfica deformación-tiempo de probeta 11 de PP . . . . .	72
114. Gráfica deformación-tiempo de probeta 12 de PP . . . . .	72
115. Gráfica deformación-tiempo de probeta 13 de PP . . . . .	73
116. Pasos para obtener una línea de tendencia en Excel 365 . . . . .	73

---

## Lista de cuadros

---

1. Propiedades mecánicas principales del HDPE	15
2. Propiedades mecánicas principales del PP	16
3. Propiedades mecánicas principales del PLA	17
4. Propiedades mecánicas principales del PHB	18
5. Definición de requisitos	20
6. Definición de requisitos	21
7. Características de APSX-PIM	22
8. Parámetros de corte y posición de las herramientas para maquinado de molde	30
9. Valores de parámetros de inyección de materiales poliméricos	33
10. Cumplimiento de requisitos	40
11. Resultados de polietileno de alta densidad	48
12. Resultados de polipropileno (PP)	48
13. Porcentaje de error de valores obtenidos a valores de referencia de HDPE	49
14. Porcentaje de error de valores obtenidos a valores de referencia de PP	49
15. Velocidad de deformación de probetas de HDPE	50
16. Velocidad de deformación de probetas de PP	51



Los plásticos son utilizados a nivel industrial por su versatilidad y durabilidad. En contraste se ha demostrado que tienen largo periodos de degradación, a tal punto que el proceso puede tardar siglos. Por lo tanto, Departamento de Química de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) ha empezado a reprocesar material plástico en sus instalaciones o bien producir nuevos a base de materiales naturales para estudiar su degradación bajo procesos controlados. No obstante, el conocimiento de las propiedades de estos polímeros para darles usos prácticos en diseño de ingeniería es un complemento faltante. A pesar de que el material sea conocido (en el caso de reprocesado) puede haber cambios en las propiedades durante el proceso de inyección. En el caso de los materiales creados en las instalaciones de UVG, las propiedades mecánicas son completamente desconocidas.

Por consiguiente, se estableció el proceso de caracterización mecánica dentro de las instalaciones de UVG con el objetivo de conocer sus propiedades mecánicas. Para esto se diseñó una probeta con características geométricas definidas para su inyección en la máquina APSX-PIM y a la vez realizar ensayos a tensión en la máquina universal Soiltest Versa Tester. Dichos ensayos fueron grabados utilizando una cámara con lente telescópico y fueron procesados utilizando el programa Tracker para medir el desplazamiento de las probetas.

Los materiales estudiados son HDPE y PP como resinas industriales conocidas, PLA y PHB como materiales producidos por el Departamento de Química. Un obstáculo y oportunidad para futuros estudios es que no se obtuvo suficiente PLA como para realizar las inyecciones. En cuanto al PHB, las propiedades no son aptas para ser medidas con el equipo disponible. Las propiedades determinadas fueron el módulo de elasticidad, esfuerzo a fluencia y a ruptura, y deformación a fluencia y ruptura. Además, se presentan las velocidades de deformación para todas las probetas ensayadas con el fin de determinar si el equipo es adecuado según valores recomendados y el posible efecto que esto tuvo en los resultados.

El HDPE presentó un módulo de elasticidad mayor al PP (423.03 y 358.34 MPa respectivamente) mas una deformación significativamente menor (8.14 y 233.4% respectivamente). La velocidad de deformación fue de 20 mm/min para HDPE y 30 mm/min para PP, lo cual no coincide con valores recomendados para ensayos. Por último, las fichas técnicas presentan las propiedades mecánicas descritas junto a los parámetros de inyección para cada material.



Plastics are used industrially due to their versatility and durability. In contrast, it has been demonstrated that they have long degradation time periods, to the point that the process can take centuries. Therefore, the Chemistry Department of the Universidad del Valle de Guatemala (UVG) has begun to reprocess plastic material in its facilities or produce new ones based on natural materials to study their degradation under controlled processes. However, the knowledge of the properties of these polymers to give them practical uses in engineering design is a missing complement. Even though the material is known (in the case of reprocessing) there may be changes in properties during the injection process. In the case of materials created at the UVG facility, the mechanical properties are completely unknown.

Therefore, the mechanical characterization process was established within the UVG facilities in order to know their mechanical properties. For this purpose, a specimen with defined geometrical characteristics was designed to be injected in the APSX-PIM machine and at the same time to perform tension tests in the universal machine Soiltest Versa Tester. These tests were recorded using a camera with a telescopic lens and were processed using the Tracker program to measure the displacement of the specimens.

The materials studied are HDPE and PP as known industrial resins, PLA and PHB as materials produced by the Chemistry Department. An obstacle and opportunity for future studies is that not enough PLA was obtained to perform the injections. As for PHB, the properties are not suitable to be measured with the available equipment. The properties determined were modulus of elasticity, stress at creep and rupture, and strain at creep and rupture. In addition, the strain rates for all the specimens tested are presented in order to determine if the equipment is adequate according to recommended values and the possible effect this had on the results.

HDPE had a higher modulus of elasticity than PP (423.03 and 358.34 MPa respectively) but significantly lower strain (8.14 and 233.4 % respectively). The strain rate was 20 mm/min for HDPE and 30 mm/min for PP, which does not coincide with recommended values for testing. Finally, the data sheets present the mechanical properties described together with the injection parameters for each material.



Con el fin de reducir la contaminación de plásticos el Departamento de Química de la Universidad del Valle de Guatemala ha iniciado la investigación sobre plásticos de fuentes renovables como lo es el azúcar o maíz conocidos como biopolímeros. Algunos de estos biopolímeros han presentado similares propiedades mecánicas a aquellos de origen fósil. Además, la huella de carbono en la fabricación de los biopolímeros es significativamente menor, incluso se han logrado huellas negativas por el uso de microorganismos que consumen CO<sub>2</sub>. Es por esta razón que el Departamento de Química ha fabricado dentro de sus instalaciones los polímeros ácido poliláctico (PLA) y ácido polihidroxibutírico (PHB).

El PLA tiene como base el ácido láctico, el cual se puede obtener de materia natural o biomasa altamente renovable como maicena o caña de azúcar. Existen diferentes tipos de PLA que se pueden obtener, los cuales son: PDLA, PLLA y PDLLA. Estas diferencias vienen de la estructura molecular de este. Tiene diferentes aplicaciones, sin embargo, la más destacada y popular es para impresión 3D en su presentación de filamento. Otra poco conocida, es su uso en la medicina; al ser de origen natural no presenta riesgo alguno para estar dentro del cuerpo humano.

El PHB también es biopolímero perteneciente a la familia de los poliéster, el cual se encuentra en microorganismos, como *Cupriavidus necator*, que en respuesta al estrés físico, principalmente en la falta de nutrientes, sirve como material para almacenar energía. Por lo general, este material rígido y frágil tiene una estructura semicristalina con una temperatura de fusión de 160-180 °C. Su principal aplicación es de uso médico como implantes y cápsulas medicinales.

Como se ha mencionado anteriormente, estos materiales son de gran interés por su degradabilidad, la cual es de aproximadamente 6 a 12 meses, lo cual es impresionante al compararse con los petroquímicos que tardan cientos de años desprendiendo micro plásticos en el proceso y junto a su pequeña huella de carbono; hace que estos materiales sean interesantes de investigar.



La generación de plástico cada día es exponencial, ahora los productos cotidianos vienen empacados en plástico y son de un solo uso. En el 2017 se estimó que se han generado 8,300 millones de toneladas métricas a la fecha, de las cuales aproximadamente 9 % han sido recicladas, 12 % incineradas y 79 % han quedado en el mundo (Geyer y col., 2017). El tiempo de degradación de una bolsa plástica es de 20 años y 450 años para una botella de agua plástica (World Wildlife Fund, 2021). Estas estimaciones implican que la mayoría de los plásticos producidos en 1907 sigue existiendo hoy en día, posiblemente en el océano. Una de las preocupaciones principales es la existencia de los micro plásticos, a pesar de que no haya estudios que determinen el daño al cuerpo humano, se cree que la ingestión de estos puede llegar a ser dañina (Rahman y col., 2021). Además, en el año 2016 las autoridades hondureñas se alarmaron por el alto nivel de contaminación que se presentaba en sus costas atlánticas, esta contaminación se originó en el río Motagua en Guatemala (UNDP, 2020). Este evento llevó a la amenaza de presentar una demanda al país. La solución que presentó el gobierno de Guatemala durante el período 2016-2019 fueron biobardas las cuales no permitirán el paso de contaminantes sólidos. Sin embargo, esta solución no ataca el problema de raíz pues desechos sólidos como envases de plástico siguen llegando al río.

La Universidad del Valle de Guatemala busca orientar sus actividades a los objetivos de desarrollo, por lo que fomenta aquellos proyectos que tengan relación con estos. Por lo tanto, el Departamento de Química ha iniciado la labor de producir plásticos con nuevos materiales para estudiar y potencialmente mejorar su degradación natural, así como procesar material plástico para darle un nuevo uso. Sin embargo, un aspecto importante previo a la reutilización del material es la obtención de las propiedades mecánicas. Esto se debe a que sin estos valores no se puede afirmar que el material o bien el diseño del producto sea válido para su aplicación. Es por esto que se realizará la caracterización mecánica de materiales producidos con el fin de apoyar y darle así al departamento una herramienta para seguir desarrollando este trabajo.

Se llevará a cabo el maquinado del molde para inyección, así como la inyección de las probetas de ensayo y la ejecución de pruebas a tensión. Además, se utilizarán dos resinas

industriales, HDPE y PP, como verificación del procedimiento ya que se pueden comparar estos valores con fuentes externas. Con estos materiales comprobados se podrá realizar la caracterización de los polímeros reprocesados y así obtener resultados confiables. Junto a esto se podrá establecer el procedimiento correcto para la futura inyección y pruebas a tensión dentro de las instalaciones de la UVG para cualquier material polimérico inyectable que el Departamento de Química logre producir. Esto facilitará la caracterización de lo antes mencionado por lo que cualquier estudiante puede seguir el procedimiento sin importar su carrera. Por otra parte, este procedimiento no aplica solamente a materiales producidos por el Departamento de Química, sino para cualquier polímero inyectable. Con este procedimiento los estudiantes que se encuentren trabajando en diseño de piezas o máquinas, pueden verificar que su material sea el adecuado para la aplicación dada con mayor facilidad y seguridad.

### 3.1. Objetivo general

Definir el procedimiento para caracterizar un polímero inyectable en las instalaciones de la UVG

### 3.2. Objetivos específicos

1. Determinar la geometría de una probeta de ensayo a tensión considerando las limitaciones de la máquina de ensayos "Soiltest Versa Tester" así como la máquina inyectora "APSX-PIM".
2. Realizar una simulación del proceso de inyección en *Autodesk Inventor*<sup>®</sup> Moldflow Analysis.
3. Fabricar un molde de inyección utilizando herramientas CAM y máquinas de control numérico.
4. Establecer los parámetros de inyección para la probeta y pruebas de inyección con los polímeros PLA y PHB.
5. Realizar los ensayos a tensión para determinar el módulo de Young, esfuerzo último a tensión, esfuerzo a fluencia, deformación máxima y deformación elástica.
6. Realizar una ficha técnica con las propiedades anteriores obtenidas de los ensayos realizados.



### 4.1. Concepto básico de resistencia de materiales

El concepto de propiedad mecánica se define como el comportamiento de un material bajo la acción de una fuerza externa (Lavakumar y col., 2017). Esta fuerza externa puede ser desde la acción de una mano hasta la fuerza de arrastre del aire. Como se define anteriormente, el material está sometido a una acción, la palabra acción viene a que una fuerza puede provocar diferentes efectos, también conocido como esfuerzos, en un mismo material dependiendo tanto del punto de aplicación como la dirección. Por ejemplo, si se toma una regla de plástico de 30cm con ambas manos en los extremos y se tratase de separar la regla a la mitad, se podrá dar cuenta que esto requiere una gran fuerza y probablemente no se lograra hacer con las manos. Ahora bien, si en lugar de tirar se dobla la regla, esto resulta bastante más fácil y esta se rompe a la mitad.

Esto es un ejemplo bastante básico sobre el efecto de la dirección de una carga externa en un elemento rígido. Este tipo de situaciones lleva a la pregunta: ¿Por qué la regla se quebró al ser doblada y no al jalar de ella? ¿Por qué resultó más fácil? La respuesta a estas preguntas es que existen diferentes propiedades para los distintos esfuerzos provocadas por la fuerza externa. De estas reacciones se tienen cuatro las cuales son de tensión, de compresión, de flexión y de torsión.

Ya que muchas máquinas tienen el objetivo de realizar o apoyar en actividades del hombre es importante diseñarles para que resistan las cargas y no fallen durante su operación. Para poder declarar que un diseño es adecuado, la resistencia del material deber ser mayor a los esfuerzos netos provocados por las cargas aplicadas.

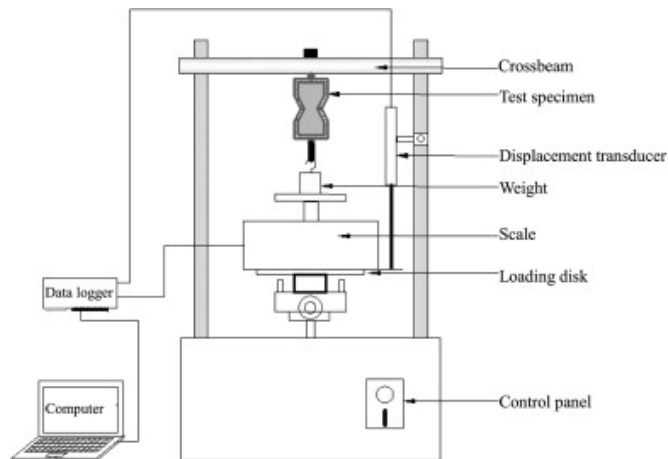
Para determinar la resistencia de un material se han desarrollado diferentes pruebas que, bajo condiciones controladas, genera uno de los esfuerzos anteriormente mencionados y por medio de uso de software especializado complementado con análisis de ingeniería se logran obtener propiedades como módulo elástico, esfuerzo a fluencia, deformación a ruptura, entre otros.

## 4.2. Ensayos mecánicos

### 4.2.1. Prueba a tensión

La prueba a tensión es una de las más importante al momento de caracterizar cualquier material, ya que de esta se logra obtener las propiedades mecánicas principales. Esta es bastante simple; consiste en colocar una muestra del material (conocida como probeta o espécimen), sujetado en ambos extremos, de los cuales solamente uno es fijo, mientras se aplica una carga en dirección longitudinal como se ve en la Figura 1.

Figura 1: Ejemplo de ensayo a tensión.



Fuente: Li y col., 2014

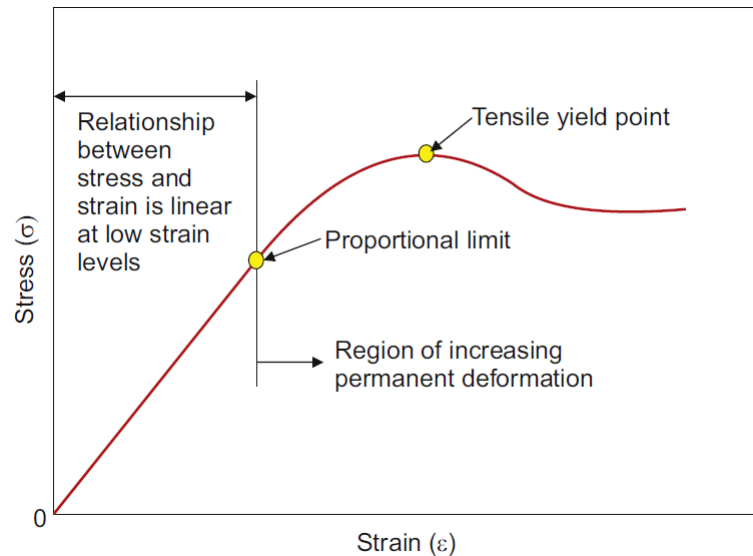
La carga aumenta gradualmente provocando una deformación longitudinal en la probeta; se continua hasta que la probeta se fracture. Este tipo de ensayo también se conoce como cuasi-estático ya que el aumento en la carga es a baja velocidad, esto con el fin de mitigar cualquier efecto de impacto y así lograr un esfuerzo axial uniforme (Bierögel & Grellmann, 2014).

De este ensayo se puede obtener la resistencia a tensión, el módulo de elasticidad, elongación y la razón de Poisson (Saba y col., 2019). Estos se obtienen de la gráfica resultante en donde se encuentra cada par esfuerzo-deformación tomado durante la prueba. El comportamiento general de plástico se encuentra en la Figura 2 (Crawford & Martin, 2020). De esta representación se puede observar cuatro puntos importantes:

- El límite de proporcionalidad: Este punto define el fin del comportamiento elástico y el comienzo de la zona plástica.
- A la izquierda del LP: En esta zona la deformación del material es reversible y, por lo general, el comportamiento es lineal.
- A la derecha del LP: En esta zona una parte de la deformación es permanente y el comportamiento deja de ser lineal.

- Resistencia a la fluencia: Este representa el esfuerzo en donde el material cede a pesar de no haber un incremento significativo en la carga.
- Resistencia última: Este es el punto más alto de la curva. Denota el valor más grande de esfuerzo, no necesariamente es el punto de ruptura.

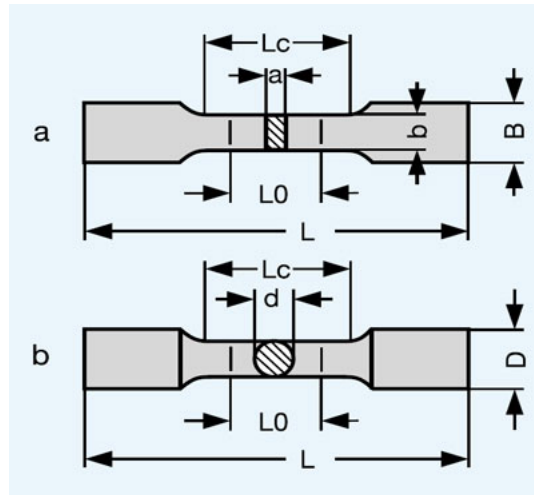
Figura 2: Gráfica de esfuerzo-deformación típica de un plástico



Fuente: Crawford y Martin, [2020](#)

En cuanto a la muestra, la geometría por lo general, es similar a lo que se muestra en la Figura [3](#), también conocida como *Hueso de Perro* por su forma. En el caso del ensayo a tensión se emplea una sección rectangular. Las dimensiones de estas son conocidas y a pesar que existan estándares que ya las definen, estas no son últimamente necesarias ya que las dimensiones más importantes son la longitud del cuello (LO) y la sección transversal.

Figura 3: Geometría de probetas para ensayos (a) tensión y (b) compresión



Fuente: GmbH, [2007](#)

#### 4.2.2. Ensayo a compresión

Así como el ensayo a tensión es importante, el ensayo a compresión también lo es. Este es el inverso de tensión ya que la fuerza va en dirección contraria; en el anterior la carga se dirige afuera del material, en compresión se dirige hacia el material. Las propiedades que se determinan en esta prueba son similares: resistencia a compresión y módulo de elasticidad. Es bastante común que en las propiedades de algunos materiales no se presenten los valores a compresión ya que, por lo general, no hay variación significativa entre las propiedades a tensión y compresión (Crawford & Martin, [2020](#)).

#### 4.2.3. Velocidad de deformación

Un aspecto importante para tomar en cuenta en los ensayos es la velocidad a la que se está deformando la probeta. Esta variable ha demostrado tener un impacto importante en las propiedades resultantes de las pruebas a tensión. A deformaciones rápidas el HDPE demuestra incremento en el módulo elástico y en la resistencia última (Amjadi & Fatemi, [2020](#)). Se recomienda que para determinar el módulo de elasticidad la velocidad debe ser 1%/min y 50 mm/min para la resistencia a fluencia (Bierögel & Grellmann, [2014](#)).

Así mismo el polipropileno presenta el mismo comportamiento, en donde el módulo elástico y la resistencia última aumentan con la velocidad de deformación hasta llegar a 50 mm/min que a partir de este punto no existen diferencias significativas entre los valores anteriormente mencionados (Murariu y col., [2016](#)).

### 4.3. Efecto de la manufactura en las propiedades

Los métodos de fabricación de productos de HDPE más populares son extrusión, moldeo por inyección, moldeo por soplado y moldeo por compresión. Es importante tomar en cuenta el tipo de proceso ya que estos pueden generar variaciones en las propiedades mecánicas del material. Se han realizado investigaciones acerca del efecto que tiene la orientación en la estructura del polímero al ser inyectado. La evidencia sugiere que de hecho sí hay un efecto debido al número de cadenas poliméricas orientadas en dicha dirección. Sin embargo, estas diferencias no son estadísticamente significativas. (Bernard, 2003) (Zhou & Wilkes, 1998). Además, investigaciones del comportamiento a tensión respecto al método de manufactura entre inyección, compresión y soplado de resina virgen y reprocesado de HDPE demostraron que el material no presentaba rasgos de anisotropía <sup>1</sup> (Amjadi & Fatemi, 2020).

### 4.4. Inyección de plástico

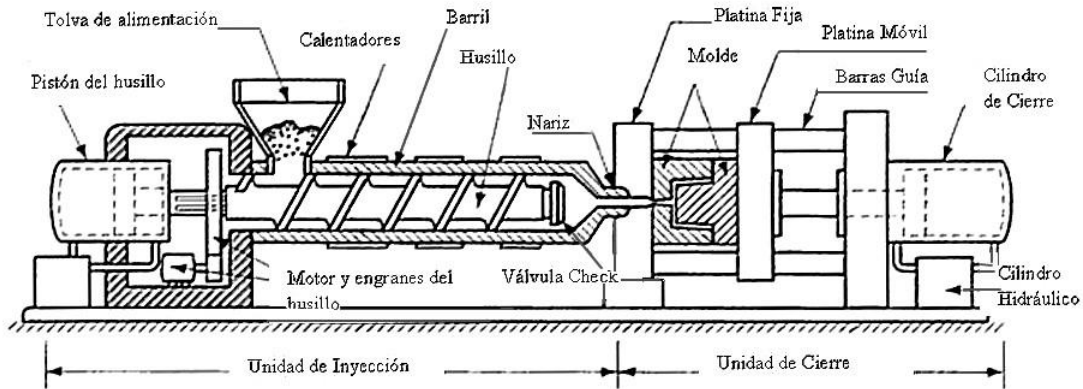
El proceso de inyección es el más común para la producción de partes plásticas por su alta tasa de producción y estabilidad. En este proceso el material se coloca en la tolva de alimentación y por medio de un tornillo sinfín pasa al barril. A lo largo del barril existen diferentes generadores de calor para derretir el material y pasa a la cámara de inyección. Una vez la cámara se encuentre llena, un pistón mueve todo el material hasta pasar por un orificio, el que conecta a la cavidad del molde. Cuando el material llene la cavidad del molde, comienza el proceso de enfriamiento. Existen dos tipos de enfriamiento: con un sistema de agua o de aire. Un ejemplo de una máquina de inyección junto a sus partes principales se puede apreciar en la Figura 4

Un aspecto importante, sino que el más crítico, es el llenado pues dependiendo de la presión y temperatura así será la calidad de la inyección, tanto de acabado superficial como propiedades mecánicas dependiendo del material. A mayor presión la velocidad del flujo aumenta. Una velocidad alta de inyección puede acabar en *Jetting* en el cual el material no se adhiere correctamente a al molde y genera el aspecto de olas como se ve en la Figura 5. Esto hace que el material no sea completamente homogéneo, teniendo ciertas capas principalmente en el *jetting*. De otra manera si la velocidad es insuficiente o bien que la temperatura del molde esté baja, puede generar endurecimiento en la capa próxima al molde. El principal problema los escenarios plantados anteriormente es que la generación de esfuerzos internos o bien ciertas soldaduras entre capas, teniendo un efecto en las propiedades del material.

---

<sup>1</sup>Las propiedades varían según la dirección en la que se mide. RAE

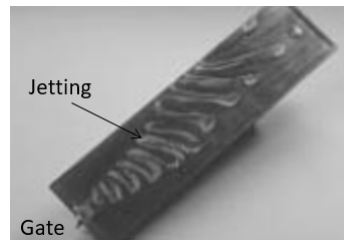
Figura 4: Diagrama de partes principales de una máquina de inyección



*Partes de una máquina de inyección típica.*

Fuente: Colwill, [2012](#)

Figura 5: Ejemplo de *Jetting* en un proceso de inyección



Fuente: Patterson y Rothwell, [2018](#)

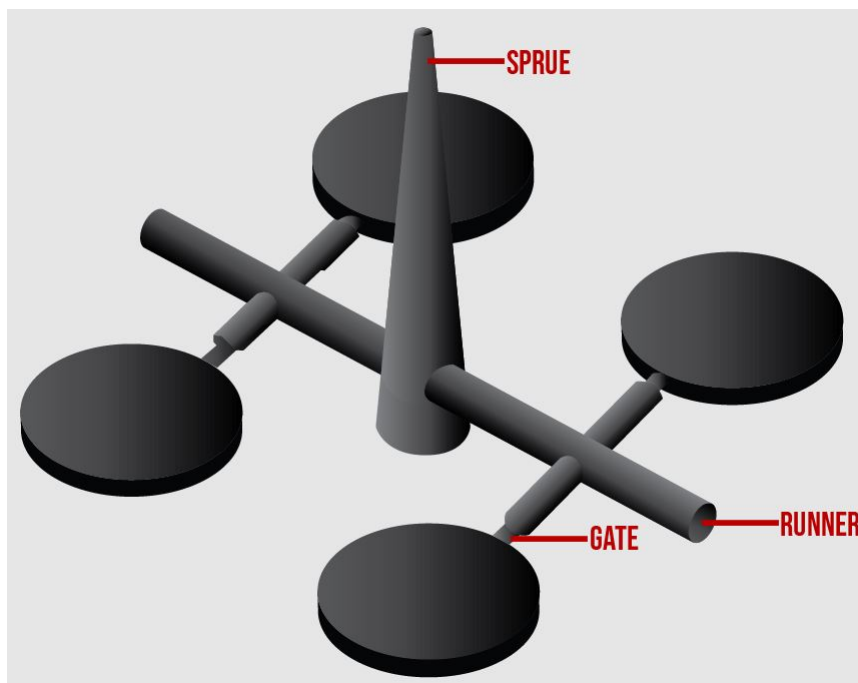
Ahora bien, un punto importante es que la temperatura debe ser escogida con sumo cuidado, pues es necesario que la temperatura sea mayor o igual a la temperatura de fusión del material (de estado sólido a líquido); sin embargo, no puede ser significativamente mayor pues los materiales plásticos llegan a degradarse y descomponerse si se exponen a altas temperaturas. Esto impacta a la estructura molecular del plástico y por ende sus propiedades mecánicas.

## 4.5. Sistema de alimentación de la cavidad

El sistema de alimentación es un aspecto importante en el diseño del molde pues este elemento se encarga de llevar el material desde la nariz de la máquina hasta la cavidad. Este sistema ocupa material cada vez que se produzca una pieza por lo que debe tener el menor volumen posible (para utilizar menor cantidad por inyección) y debe representar una pérdida de presión baja para que haya poca resistencia. El proceso de diseño se divide en tres partes: especificar el tipo de sistema en base a la colada, segundo hacer la ruta que debe tomar el material para llegar a la cavidad. Por último, determinar los diámetros o dimensiones de cada segmento basándose en caída de presión y uso de material.

Por otra parte, todo el sistema de alimentación consiste en tres secciones principales: bebedero (*sprue*), corredor (*runner*) y compuerta (*gate*). El bebedero es donde entra el material de la máquina hacia el molde, por lo general no se tiene control de diseño de este elemento, pero se debe tomar en cuenta para el diámetro a la entrada. Los corredores son los encargados de distribuir el material en todo el molde hasta las compuertas que es en donde el material ingresa hacia la cavidad. La compuerta se diferencia por su reducción de área significativa, como se puede apreciar en la Figura 6, con el fin de poder separar fácilmente la pieza del sistema de alimentación.

Figura 6: Representación del sistema de alimentación con sus componentes



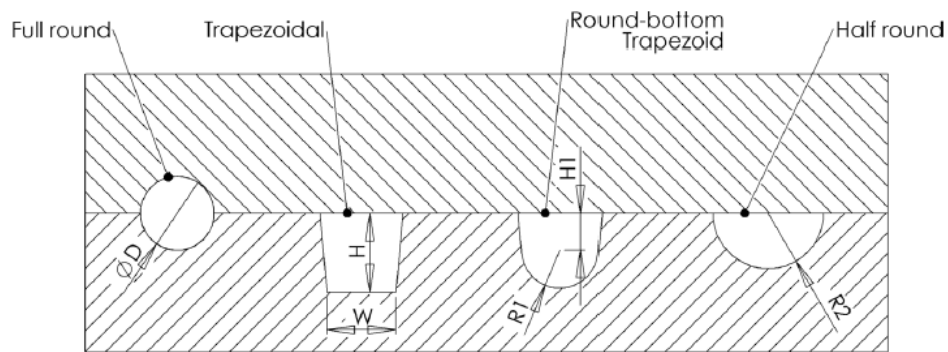
Fuente: Lechner, 2020

#### 4.5.1. Diseño de bebedero

En donde se requiere mayor cálculo es en los corredores pues es en estos en donde se ocupará la mayor cantidad de material y si no se diseña con cuidado la pieza no será fabricada con éxito. Lo primero a tomar en cuenta es la geometría transversal del bebedero. En la Figura 7 se tienen los cuatro más comunes, la selección de este dependerá la capacidad de manufactura (máquina CNC y herramientas de corte) y las restricciones de eficiencia. Las geometrías con mejores eficiencias son la redonda y trapezoidal modificada por su relación entre el área transversal y perímetro (radio hidráulico).

Como se ha mencionado anteriormente, cuando el material entra en contacto con el molde existe un enfriamiento y por ende endurecimiento del plástico en la periferia del corredor, esto conlleva a mayor resistencia al flujo, requiriendo mayor presión de inyección. La geometría trapezoidal y semicircular no son eficientes, pero en sentido de maquinado son bastante más fáciles de generar.

Figura 7: Tipos de geometría para los bebederos del sistema de alimentación



Fuente: Kazmer, 2016

## 4.6. Materiales inyectables

Actualmente el plástico es el material más utilizado en todo el mundo y desde su descubrimiento se han desarrollado diferentes tecnologías para fabricar productos como extrusión, soplado, inyección, impresión, entre otros. Actualmente existen dos grandes familias de plásticos: termoestables y termoplásticos. Los termoplásticos se derriten y fluyen en presencia de calor y se solidifican al enfriarse, pueden sufrir estos cambios una y otra vez. En comparación, los termoestables una vez se hayan solidificado ya no pueden volver a derretirse; por lo que no pueden reprocesarse como los termoplásticos (Francis, 2017). Por su grado de reciclabilidad, los termoplásticos son altamente utilizados en la industria para usos cotidianos como empaques y bolsas.

### 4.6.1. Plásticos petroquímicos

A pesar de sus aplicaciones y popularidad, algunos de estos son derivados de combustibles fósiles como el HDPE y PP, lo cual los hacen dañinos al medio ambiente (Agboola y col., 2017). Estos pertenecen a la familia de poliolefinas, los cuales son los plásticos con mayor importancia en el mercado al día de hoy por su bajo costo y alta tasa de producción. A continuación, se presentan los dos polímeros más populares a nivel mundial: HDPE y PP.

### 4.6.2. HDPE

El polipropileno de alta densidad o HDPE es el miembro más importante de la familia de las poliolefinas y es el plástico más utilizado en todo el mundo. Este se produce mediante la polimerización catalítica de etileno como cromo/silicio, Ziegler-Natta o catalizador metolceno (Zhu y col., 2011). Existen tres tipos de PE dependiendo de su polimerización: HDPE, LDPE (baja densidad) y LLDPE (baja densidad lineal). Estos poseen gran dureza, excelente resistencia química y eléctrica y casi nula absorción de humedad (Agboola y col., 2017).

El HDPE se puede encontrar en una gran variedad de productos de uso común como botellas de agua y leche, así como en cascos de seguridad industrial y partes de automóviles. Sus propiedades mecánicas lo hacen un material bastante atractivo, además de su bajo costo de producción. Este material se puede procesar por extrusión, inyección, soplado e impresión 3D.

Cuadro 1: Propiedades mecánicas principales del HDPE

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	
<i>Módulo de elasticidad</i>	700-1,000	MPa
<i>Esfuerzo a fluencia</i>	21.4-31.0; 23.5-24.8 (bimodal)	MPa
<i>Esfuerzo a ruptura</i>	13-51; 17.9-29 (bimodal)	MPa
<i>Deformación a fluencia</i>	8.7-15; 3.7-6.3 (bimodal)	%
<i>Deformación a ruptura</i>	250-1,200; 600-860 (bimodal)	%

Fuente: Wypych, G. (2016). HDPE high density polyethylene. Handbook of Polymers, 156–163. doi:10.1016/b978-1-895198-92-8.50053-7

### 4.6.3. PP

El polipropileno o PP, así como el HDPE, es miembro de la familia de las poliolefinas y es el segundo plástico más utilizado en el mercado a nivel mundial. Ese se produce mediante la polimerización de propileno, aunque no es el único método ya que se puede producir mediante la polimerización con etileno para crear un copolímero de etileno-propileno más elástico (Agboola y col., 2017). Al ser de la misma familia, este tiene comportamiento similar a los polietilenos (PE) y comparten el hecho que sus propiedades dependen del peso molecular y la cristalinidad (Vidya y col., 2012).

A pesar de que se comporten similar, el PP tiene ciertas ventajas sobre el HDPE. Principalmente el PP es más rígido, sufre menor deformación a temperaturas moderadamente altas a comparación del HDPE, es por esto que se emplea este material cuando las aplicaciones requieren de temperaturas elevadas, como el llenado de un bote de ketchup (Selke & Hernandez, 2001).

Cuadro 2: Propiedades mecánicas principales del PP

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	
<i>Módulo de elasticidad</i>	1,200-2,000	MPa
<i>Esfuerzo a fluencia</i>	31-35.2	MPa
<i>Esfuerzo a ruptura</i>	26-32	MPa
<i>Deformación a fluencia</i>	7-12	%
<i>Deformación a ruptura</i>	10-140	%

Fuente: Wypych, G. (2012). PP polypropylene. Handbook of Polymers, 479–486. doi:10.1016/b978-1-895198-47-8.50144-2

### 4.6.4. Biopolímeros

Ahora bien, existen nuevas tecnologías para reducir las emisiones de carbono en la producción de plástico. Existen plásticos de origen natural conocidos como biopolímeros. Estos se producen utilizando materia orgánica como azúcar, bagazo, maíz, entre otros (Sukumaran & Gopi, 2021). Como es de esperarse, estos nuevos polímeros han captado la atención de ingenieros y científicos, entre los más conocidos se encuentran el PLA y PHB.

### 4.6.5. PLA

Ácido Poliláctico o PLA por sus siglas, es un biopolímero derivado del ácido poliláctico, el cual se puede producir por medio de fermentación utilizando materiales renovables como azúcar o maicena (Hagen, 2012). Por su origen, este plástico es altamente biodegradable por microorganismos y es no tóxico. Además, la producción de 1 kg de PLA requiere menor energía que producir 1 kg de polímeros de origen petroquímico.

Actualmente el PLA tiene una amplia gama de aplicaciones como material de empaque y filamento para impresión 3D. Este material se puede procesar mediante diferentes métodos como inyección de plástico y no requieren un equipo especial, solamente se debe cuidar el

manejo de la resina. Se debe secar el material previo a su procesamiento ya que este puede degradarse pues el agua y las altas temperaturas aceleran este fenómeno. Para reducir al mínimo el efecto de la degradación se debe secar el material hasta obtener menos de 0.01 % w/w (Jamshidian y col., 2010). El tiempo de secado por lo general es de cuatro horas a 80°C (175 °F) en un horno de convección o bien lo que indique el proveedor.

Las propiedades mecánicas del PLA se pueden encontrar en la Cuadro 3

Cuadro 3: Propiedades mecánicas principales del PLA

Propiedades	Valor	
Módulo de elasticidad	3,700-4,1000	MPa
Deformación a ruptura	4-6; 3-10 (DL); 5-10 (L)	%
Esfuerzo máximo	52-72;27-41 (DL);55-82(L)	MPa

Fuente: Wypych, G. (2012). PLA poly(lactic acid). Handbook of Polymers, 436–440. doi:10.1016/b978-1-895198-47-8.50131-4.

#### 4.6.6. PHB

Ácido polihidroxibutírico o PHB en inglés, también es un biopolímero como el PLA. Fue descubierto por primera vez en 1925 por Lemoigne (Wypych, 2012a). Este material en la naturaleza, en términos mecánicos, es por lo general rígido y frágil con baja estabilidad térmica y alto grado de cristalinidad. Este puede llegar a presentar valores similares a un polímero petroquímico como PP y PE (polietileno) (McAdam y col., 2020). En cuanto a su producción este se produce en bacterias y plantas en respuesta al estrés fisiológico (Pooja y col., 2020), la cual es la condición en donde se interrumpe la homeostasis<sup>2</sup>

Actualmente existen ciertas limitantes para el PHB; el elevado costo, la susceptibilidad a la degradación y necesidad tecnológica son algunos obstáculos para la producción. Para poder competir con los bajos costos de los petroquímicos nuevas metodologías emergentes han dado resultados prometedores, uno de estos es por medio de la fermentación bacteriana (McAdam y col., 2020). Este material se ha desarrollado a lo largo del tiempo debido a su gran potencial en cuanto a propiedades mecánicas, además su origen es orgánico por lo que no presenta riesgos ambientales.

<sup>2</sup>“Conjunto de fenómenos de autorregulación, que conducen al mantenimiento de la constancia en la composición y propiedades del medio interno de un organismo.” - RAE

Entre sus aplicaciones se encuentra: biomédico (material de sutura, implantes quirúrgicos e ingeniería de válvulas de corazón), farmacéutico (encapsulado de medicina), empaques y uso diario (botellas, higiene personal, pañales degradables, entre otros) (dos Santos y col., 2017).

Cuadro 4: Propiedades mecánicas principales del PHB

Propiedades	Valor
Módulo de elasticidad	3,500 MPa
Deformación a ruptura	5-58 %
Esfuerzo máximo	40-62 MPa

Fuente: Wypych, G. (2012). PHB poly(3-hydroxybutyrate). Handbook of Polymers, 412–414. doi:10.1016/b978-1-895198-47-8.50124-7.

### 5.1. Descripción de metodología

Para cumplir el objetivo del presente trabajo, primero se delimitó la geometría de la probeta pues se debía cumplir con los requerimientos de herramienta disponible, de la inyectora y de la máquina universal. Para esto, se habló con el encargado del laboratorio de Ingeniería Mecánica para identificar aquellas herramientas disponibles. Si se diseña una probeta con un ancho menor al diámetro de la herramienta más pequeña disponible, el maquinado del molde no será posible. Además, se buscaron las limitaciones en el manual de usuario de APSX-PIM, principalmente el volumen de inyección y el tamaño del molde. Esto debido a que, si la probeta junto al sistema de alimentación sobrepasa la capacidad de inyección, la máquina no será capaz de llenar el molde. La máquina universal de ensayo da mejores lecturas si la probeta cuenta con ciertos requisitos de tamaño, esto con base en la experiencia del encargado del laboratorio del departamento de ingeniería civil.

Las deformaciones se obtienen mediante el programa *tracker* el cual permite medir distancias en un vídeo y rastrear la posición de un punto específico. Por último, utilizando funciones y paquetes de análisis en *Excel* se obtuvieron las curvas y diferentes propiedades mecánicas de las probetas.

## 5.2. Definición de requisitos

Los cuadros 5 y 6 presenta la definición de requisitos a alcanzar en cada aspecto para poder obtener las propiedades mecánicas de los diferentes materiales.

Cuadro 5: Definición de requisitos

<i>Aspecto</i>	<i>Código</i>	<i>Descripción</i>
<i>Consideraciones de diseño</i>	CD-00	La geometría de la probeta debe ser en forma de hueso de perro o Dog Bone en inglés
	CD-01	El tamaño de probeta deber tener una longitud total no menor a 5 in y un espesor mínimo de 4 mm para obtener lecturas durante los ensayos a tensión
	CD-02	La probeta debe ser inyectada en el molde estándar de 15X12 cm
<i>Limitaciones de inyección</i>	LI-00	La probeta, junto al sistema de alimentación debe tener un volumen no mayor a 30 cm <sup>3</sup>
	LI-01	El diseño del molde no debe representar una pérdida de presión igual o mayor a 34 MPa
	LI-02	Los materiales para inyectar deben tener un punto de fusión menor a 315 °C
<i>Especificaciones de molde</i>	EM-00	El molde debe ser de aluminio grado 6061
	EM-01	El molde deber tener un ángulo de desmoldeo no menor a 1°
	EM-02	El molde debe contar con dos espacios para las mordazas de la máquina inyectora modelo APSX-PIM
	EM-03	El punto de inyección del molde debe coincidir con el de la APSX-PIM
	EM-04	El molde debe ser un prisma rectangular con dimensiones externas de 15X12X2.5 cm

Cuadro 6: Definición de requisitos

<b>Aspecto</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>Requisitos de simulación</b>	RS-00	La simulación en MoldFlow debe indicar el llenado completo de la cavidad
	RS-01	La simulación en MoldFlow debe indicar un nivel de confianza no menor a medio (medium) en toda la cavidad
	RS-02	La simulación en MoldFlow debe pronosticar una calidad no menor a medio (medium) en toda la cavidad
<b>Ensayos a tensión</b>	ET-00	Se debe contar con un mínimo de cinco probetas por material para realizar los ensayos a tensión
	ET-01	Las probetas deben contar con dos marcas en el área reducida para posteriormente medir el desplazamiento en Tracker
	ET-02	Los ensayos deben ser grabados usando una cámara digital con telefoto con una distancia focal no menor a 80mm y una apertura no menor a f/5.6
	ET-03	La velocidad de deformación debe ser de 1%/min para el módulo elástico y 50 mm/min para el esfuerzo a fluencia
<b>Aspectos de ficha técnica</b>	AFT-00	La ficha técnica debe indicar el nombre del material en cuestión, el método de procesamiento, la máquina empleada para la inyección y la máquina para ensayos utilizada.
	AFT-01	La ficha técnica debe presentar una tabla con las propiedades principales: Módulo de elasticidad, esfuerzo a fluencia y a ruptura, deformación a fluencia y ruptura.
	AFT-02	La ficha técnica debe presentar una segunda tabla con los valores de los parámetros de procesamiento incluyendo la temperatura de barril, la temperatura del molde, presión de inyección, fuerza de cierre, tiempo de enfriamiento y volumen de corte
	AFT-03	La ficha técnica debe incluir la fecha de actualización de información y el lugar de procesamiento del material

### 5.3. Delimitación de geometría

Ya que la probeta fue inyectada en la APSX-PIM se debió cumplir con los requerimientos de la máquina, los cuales son:

Cuadro 7: Características de APSX-PIM

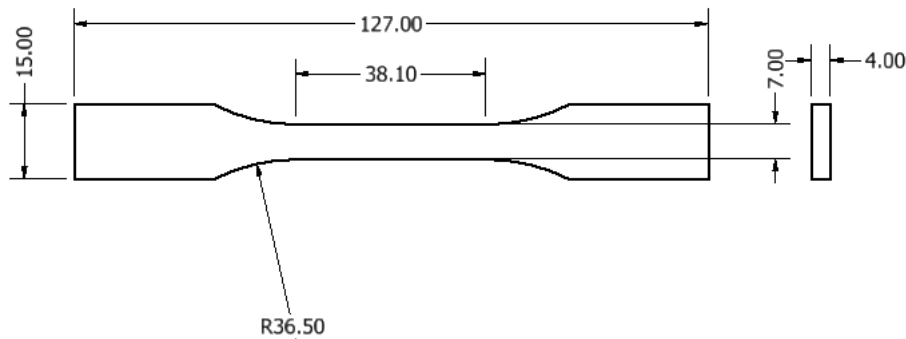
Característica	Dimensión
Tamaño del molde	4.8" x 6"
Volumen de inyección	30 $cm^3$
Temperatura máxima	315 °C
Presión máxima	345 BAR

Fuente: APSX, 2022

En cuanto a la máquina de ensayos, se realizaron dos pruebas preliminares diferentes utilizando impresión 3D con relleno medio para determinar el largo, ancho y el espesor de las probetas. Durante la experimentación el encargado de laboratorio de Ingeniería Civil indicó que por experiencia se debe tener un largo mínimo de 5 pulgadas y, en referencia a la dimensión inicial era necesario incrementar el espesor para que la probeta pudiese soportar altas lecturas y así obtener datos.

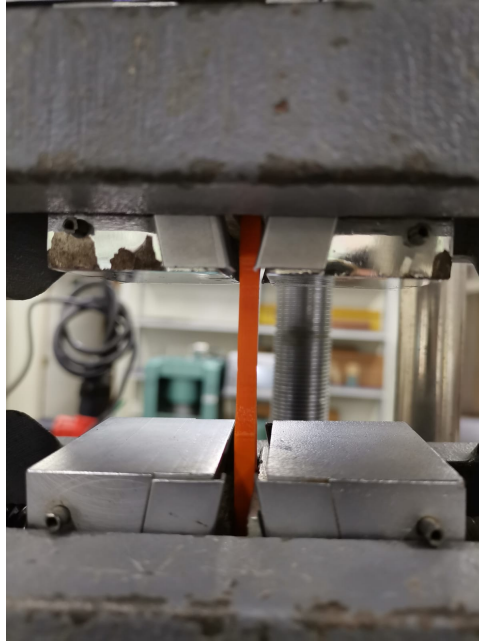
Las dimensiones finales de la probeta fueron las siguientes:

Figura 8: Dimensiones finales de probeta (mm)



Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Prueba preliminar para determinar geometría mínima aceptada por la máquina de ensayo



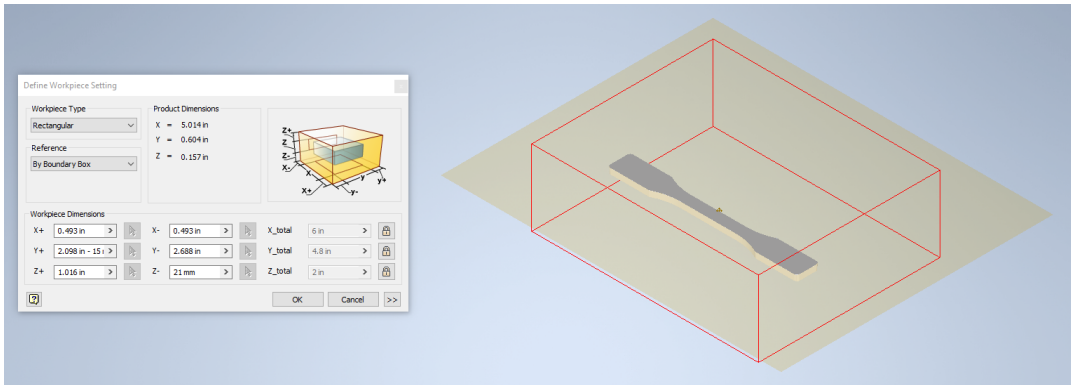
Fuente: Elaboración propia

#### 5.4. Generación de cavidad

Una vez se obtuvo la geometría final de la probeta se siguió con la cavidad del molde. Para esto se utilizó la herramienta de *Autodesk Inventor*<sup>®</sup> de *Mold Design* la cual permite generar una cavidad preliminar de la pieza a inyectar y simular el proceso e identificar posibles fallas. Para esto se inició definiendo la pieza de trabajo en donde se ingresan los valores de las dimensiones del molde como se ve en la Figura 10, estas dimensiones se obtuvieron del encargado del laboratorio quien ya conoce el tamaño del molde para la inyectora. Es importante aclarar que se definió un grosor de 2 pulgadas, ya que el programa genera dos cavidades y solo es necesario una.

En cuanto al corredor este se definió con una longitud de 5 milímetros iniciando en el centro del molde para el punto de inyección. Para el área transversal se seleccionó trapezoidal ya que es una geometría sencilla de maquinar. Ahora bien, para las dimensiones de la compuerta se definió una geometría cuadrada con los valores que se pueden ver en la Figura 12. Los valores de geometría se definieron tomando en cuenta la herramienta de  $\frac{3}{16}$  pulgadas (4.7625 mm) para la mayor remoción de material. Es por esta razón que el ancho del corredor y de la compuerta se definieron de 5 milímetros. La profundidad de los anteriores se estableció de manera iterativa a través de simulación, este se fue reduciendo o aumentando según el resultado de *MoldFlow* específicamente el nivel de confianza de llenado.

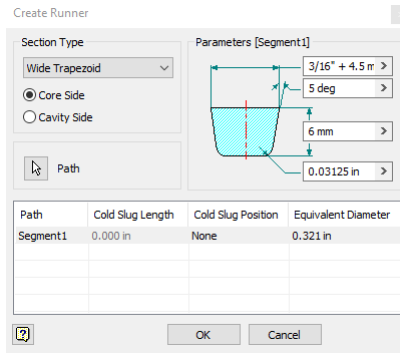
Figura 10: Definición de pieza de trabajo



Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

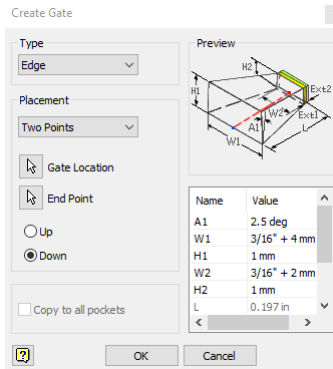
Figura 11: Parámetros de geometría del corredor



Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Figura 12: Parámetros de geometría de la compuerta



Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

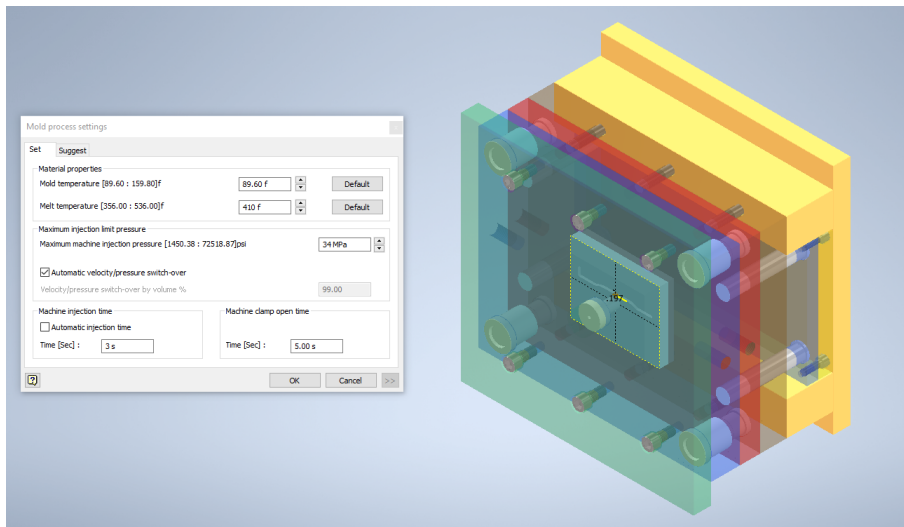
Para terminar con la cavidad se agregó un pozo frío al inicio del corredor con diámetro de 0.375 pulgadas y profundidad de aproximadamente 0.25 pulgadas (valores arbitrarios dependientes de las herramientas disponibles). Por último, se agregó una base de inyección de la librería, así como un bebedero virtual. Esto es necesario para realizar el análisis de inyección por requerimiento del programa.

## 5.5. Análisis de inyección

Para realizar el análisis de inyección se debe ingresar los parámetros, así como el material. Para la información del material se utiliza la librería de Inventor y se seleccionó HDPE por Sabic ya que se estará trabajando con un material similar. En cuanto a los parámetros estos se obtienen de los valores de la máquina y del material en cuestión. El tiempo de inyección fue establecido por la recomendación del encargado del laboratorio. Los parámetros son:

- Temperatura del molde: 32 °C
- Temperatura de barril: 210 °C
- Presión máxima: 34 MPa
- Tiempo de inyección: 3 segundos

Figura 13: Parámetros para simulación de proceso de inyección



Fuente: Elaboración propia

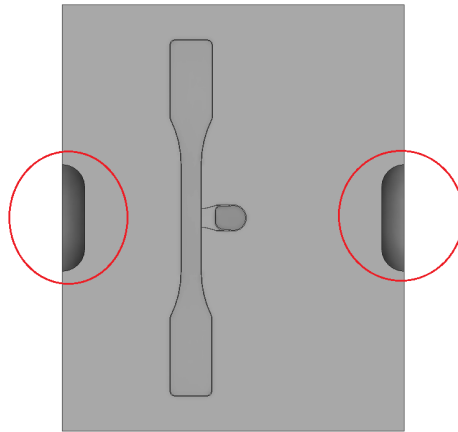
Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

## 5.6. Estrategia de maquinado

Una vez finalizado el molde se prosigue a utilizar el complemento de *Autodesk Inventor*<sup>®</sup> llamado *Inventor CAM - Ultimate* que permite la generación y simulación del proceso de maquinado. Previo a iniciar con el procedimiento, primero fue necesario realizar cambios al molde:

- Ranuras para sujeción: Estas son los que se encuentran en los bordes, se utilizan para sujetar el molde a la inyectora.

Figura 14: Ranuras de sujeción para el molde de inyección

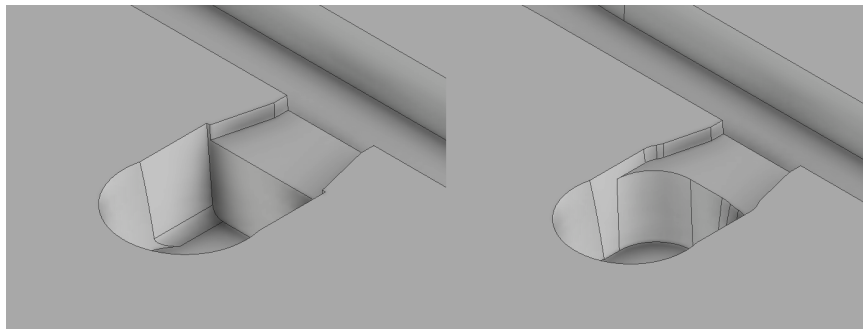


Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

- Remoción de esquinas interiores: el molde cuenta con esquinas interiores que no son posibles de realizar por lo que se tuvo que realizar redondeos o remoción de geometría para que fuese posible su manufactura con radios mínimos de 1/8" (3.175 mm).

Figura 15: Cambios de geometría para manufacturar del molde



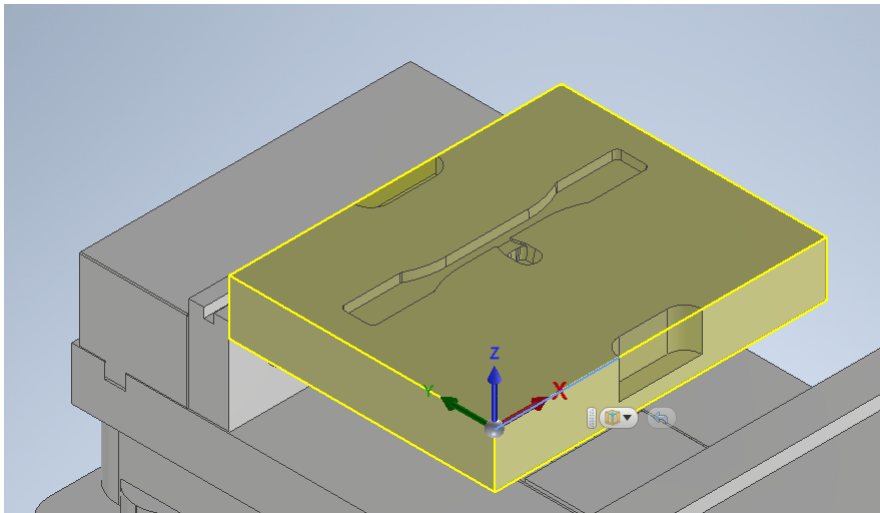
Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Con estos cambios se procedió a configurar la pieza de trabajo, en esta se definió lo siguiente:

- El tipo de operación: en este caso se está haciendo fresado o *milling*.
- La orientación: sirve para indicarle a la máquina CNC las direcciones de los tres ejes principales (X,Y,Z), ver Figura 16.
- El origen: sirve para que la CNC sepa en donde se encuentran las geometrías a partir de este punto, ver 16.
- Sujeción y pieza: la pieza es el bloque de aluminio en donde se hará la cavidad; la sujeción indica la geometría que ayuda a mantener la pieza en su lugar (sirve para indicar posibles colisiones no deseadas). La sujeción es una prensa horizontal marca *Kurt* que se encuentra colocada en la máquina CNC. Para el maquinado la pieza se eleva por medio de alzas las cuales son de 1.5 pulgadas, eso se ingresó en la configuración para tener la posición correcta.

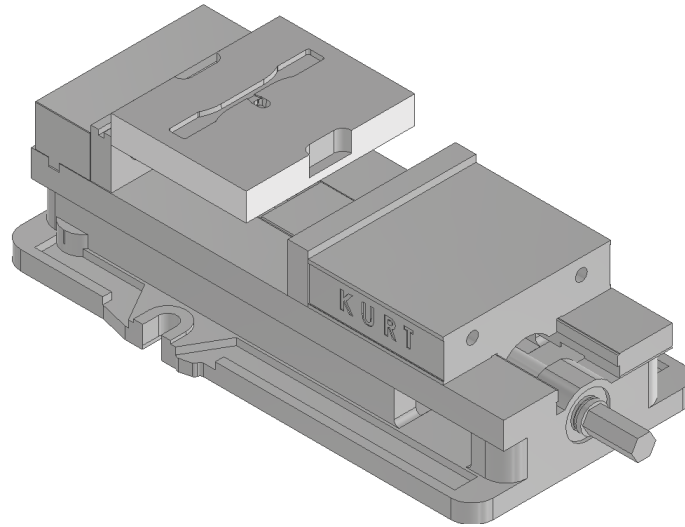
Figura 16: Configuración de la pieza de trabajo en Inventor CAM



Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Figura 17: Colocación del molde y la sujeción KURT



Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Ahora bien, con la configuración correcta se realizaron las siguientes operaciones:

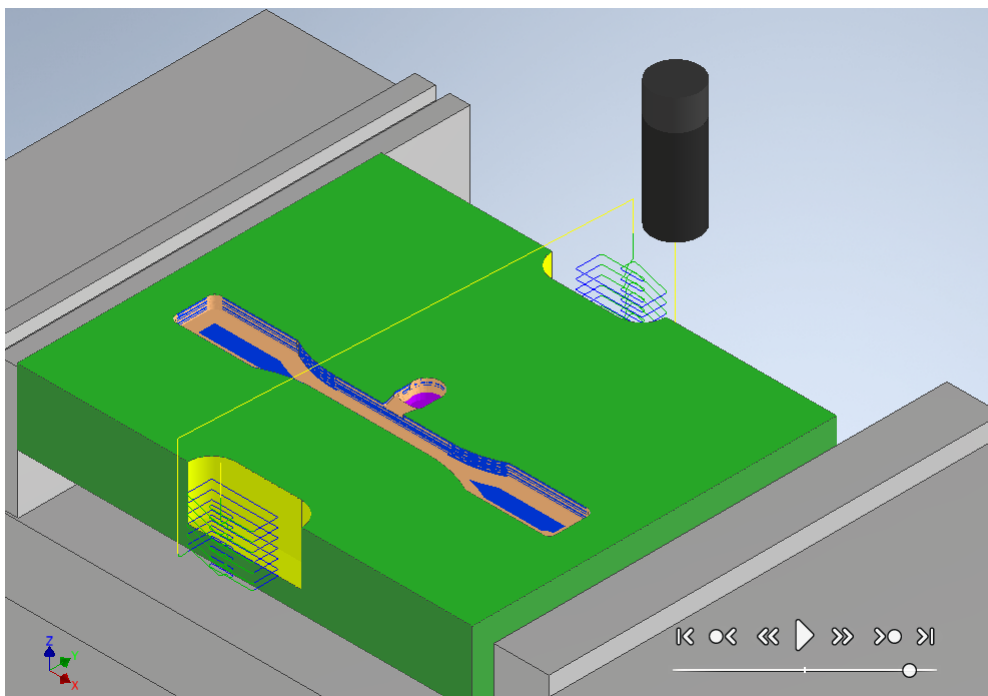
- Refrentado (5/8"): Con *Face* se removió material en la cara del molde de 0.2 mm de profundidad para tener una superficie plana.
- Acabado (3/16"): Con *Adaptive* se generó la cavidad principal del molde de forma rápida y remueve la mayor cantidad de material.
- Refinado (3/16"): Con *Contour* se terminó de remover material en la superficie restante para obtener un buen acabado superficial.
- Pozo (1/8"): Con *2D Adaptive* se generó el orificio a la entrada de material conocido como "Pozo Frío" o *Cold Well* en inglés.
- Agarradores (5/8"): Con *2D Pocket* se generó el espacio para poder sujetar el molde a la máquina.

Para las herramientas se consultó con el encargado de laboratorio de Manufactura de UVG para determinar qué herramientas de corte se encontraban disponibles. Además, se definieron los siguientes parámetros de corte de las herramientas basándose en parámetros recomendados por el proveedor de herramienta:

Cuadro 8: Parámetros de corte y posición de las herramientas para maquinado de molde

Herramienta	Tipo	RPM	Avance (mm/min)	Profundidad Axial (mm)		Posición
				Máximo	Mínimo	
5/8'	Fresa Plana	5,000	1,000	3	-	T7
3/16'	Fresa Plana	5,000	1,000	1	1.5	T1
1/8'	Fresa Plana	5,000	1,000	-	-	T13

Figura 18: Simulación Final del molde para inyección

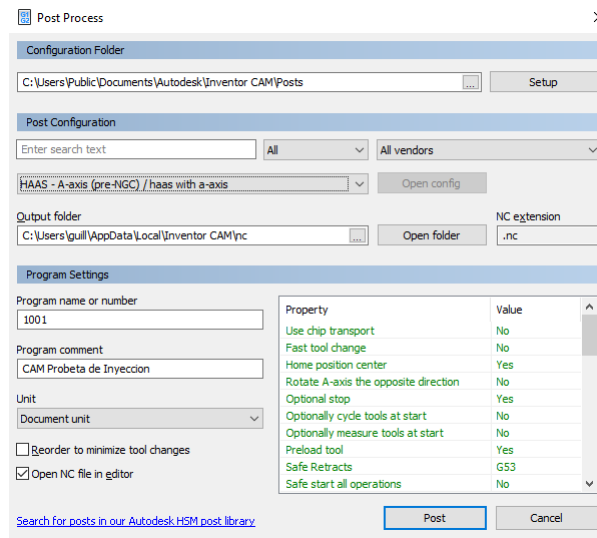


Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Por último se exportó la simulación a código G para poder utilizar la máquina de control numérico, para esto se seleccionó el compilador para *HAAS - A-axis(pre-NGC)/ haas with a-axis*. Las demás opciones son arbitrarias.

Figura 19: Exportación de simulación a código G



Fuente: Elaboración propia

Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

El encargo del laboratorio contaba con el material ya colocado en la prensa. Para poder realizar el maquinado del molde es necesario configurar el cero u origen, este debe coincidir con el origen definido previamente en *Inventor CAM*. Seguidamente, utilizando la computadora de la Haas VF1 se verifica que no hayan errores en la programación del maquinado, así como en la configuración del cero. Para esto:

- Utilizando dos alzas de 1.5 pulgadas de alto se colocó el material entre las mordazas de la prensa.
- Utilizando una herramienta de 5/8" se configuró el cero en los ejes horizontales X,Y
- Por medio de un reloj comparador se configuró el cero en el eje vertical Z
- Se procedió a revisar el programa y la configuración del material por medio de la vista previa incorporada en la CNC
- Luego, se inició el programa reduciendo la velocidad de avance a 25% para verificar que el desplazamiento de la herramienta sea el correcto
- Una vez la herramienta haya iniciado el corte subió el avance a 100% y se habilitó refrigerante

## 5.7. Inyección de probetas

En cuanto al proceso de inyección fue necesario seguir una serie de pasos iniciales, los cuales son necesarios para asegurar que la inyectora funcione, de lo contrario no iniciará el ciclo de inyección. Con la máquina encendida y funcional, se colocan los parámetros de inyección y el material para iniciar el proceso. Para esto:

- ✓ Se encendió la computadora de la maquina y se abrió el programa APSX-PIM.
- ✓ Una vez haya iniciado el programa se conecta la máquina a la alimentación eléctrica.
- ✓ Se sigue colocando los parámetros de inyección iniciales (estos pueden modificarse según sea conveniente).
- ✓ Con los parámetros ingresados se precalienta el barril por medio del botón *HEAT*, esto tomará aproximadamente 15 minutos.
- ✓ Seguidamente se coloca el material en la tolva de alimentación. En caso el barril se encuentre vacío se debe seleccionar *RUN HOPPER* para que llene el barril (dejar correr por aproximadamente 30 segundos).
- ✓ Una vez se haya llegado a la temperatura de operación se presionó el botón *Run*.
- ✓ A cada probeta se le marcó con un numero para identificar el orden de fabricación.
- ✓ Se sigue corriendo la máquina hasta acabar el material o bien hasta que se haya llegado al número de probetas necesarias (en este caso mínimo cinco).

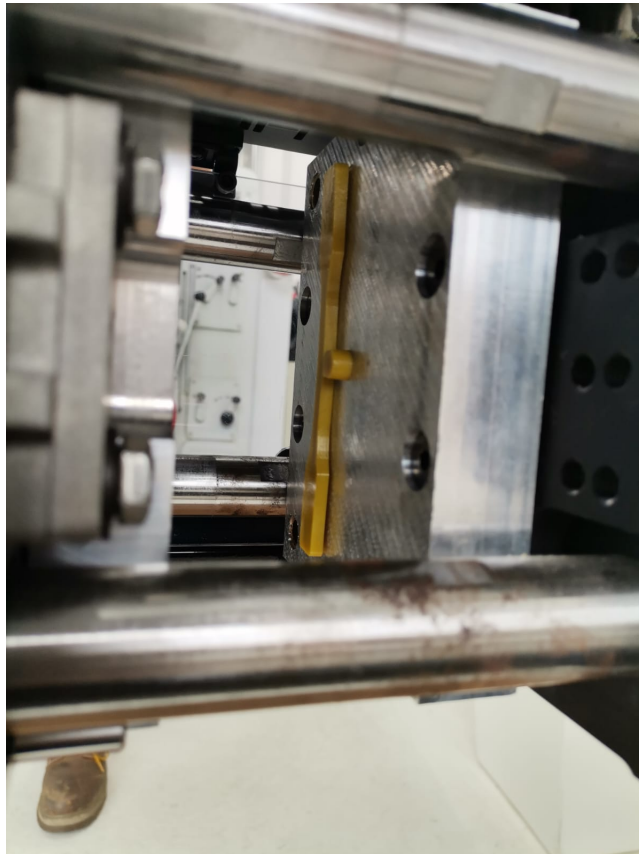
Es importante establecer que del PLA no fue posible realizar las inyecciones por dos razones. La primera es que la cantidad suministrada (15g) no era suficiente para inyectarse, si bien se podía llenar el molde una sola vez (8.69g por inyección) no se contaba con suficiente cantidad para purgar completamente el barril, lo cual toma alrededor de 15 inyecciones. La segunda es que su punto de fusión era menor a 100 °C y a temperaturas mayores este se incineraba.

En cuanto al PHB, se tenía suficiente para realizar cinco inyecciones completas, sin embargo, al momento de realizar el llenado de la cavidad utilizando los parámetros iniciales el material comenzó a salir por los bordes del molde. Es por esto que se cambiaron los parámetros pues se creyó que por la alta temperatura su índice de fluidez era muy alta o que la presión de llenado estuviese muy alta y lograba abrir el molde. Esto redujo la cantidad de material desperdiciado sin embargo no redujo en su totalidad la rebaba, es por esto que disminuyó el volumen de corte. Con estos valores se redujo significativamente el desbordamiento mas no se logró eliminar la rebaba, fue necesario quitarle material con cuchilla manualmente.

Cuadro 9: Valores de parámetros de inyección de materiales poliméricos

Parámetros	HDPE y PP	PHB
Temperatura de barril (°C)	210	180
Temperatura del molde (°C)	40	40
Presión de inyección (Bar)	225	150
Fuerza de cierre (Kg)	3,200	2,500
Tiempo de cierre (mSec)	5,000	6,000
Tiempo de enfriamiento (mSec)	25,000	50,100
Volumen de corte ( $cm^3$ )	10	7
Primera etapa ( $cm^3$ )	4	2

Figura 20: Probeta de polipropileno inyectada en APSX-PIM



Fuente: Elaboración propia

### 5.7.1. Pruebas a tensión

Con las probetas inyectadas se siguió a realizar las pruebas a tensión en el laboratorio de Ingeniería Civil. Se contaba con ocho probetas de HDPE y trece de PP, sin embargo, no se ensayaron todas por disponibilidad de horario del encargado. De las probetas de HDPE se optó por ensayar la número 1,5,6,7 y 8 esto se debe a que las primeras probetas se inyectaron con material recalentado y presentaron un color levemente oscuro por lo que la probeta 1 se utilizó para verificar si existe alguna diferencia en propiedades entre material recalentado y nuevo. Las últimas inyecciones presentaron un color blanco más homogéneo, es por esto que se ensayaron a partir de la 5 pues este ya era el material nuevo.

En cuanto al PP, este material fue inyectado posterior al HDPE. Las primeras probetas eran una mezcla de materiales, esto generó fibras longitudinales a la inyección de color blanco, estas eran mayoritariamente visibles en el bebedero y no en la probeta *per se*. Bajo la misma línea de pensamiento que en el caso de HDPE se ensayaron las probetas número 1,3,6,9,10,11 y 13 para observar si esto tenía algún efecto en el comportamiento del material. Durante los ensayos las probetas número 6 y 9 presentaron mayor deformación que las anteriores lo cual indicaba mayor presencia de PP. Al observar que la probeta número 12 se comportó similar al número 9, se optó por ensayar las probetas 10, 11 y 13 para tener cinco muestras.

Es importante mencionar que se requirió de una cámara con lente telescópico para mitigar paralaje <sup>1</sup> y así tener mejor exactitud al momento de procesar los vídeos. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de materiales de Ingeniería Civil utilizando la máquina universal *Soiltest Versa Tester*:

- Se colocó la cámara con lente telescópico enfocando a la probeta utilizando el máximo de *zoom*.
- Se colocaron la probeta entre las mordazas (una fija en la parte superior y otra móvil en la parte superior), las cuales se fijaron con los tornillos.
- Con cinta adhesiva se pegó una regla plástica de 30 cm con marcas en 28 y 18 cm en el mismo plano de la probeta.
- Se hicieron dos marcas con marcador permanente negro en los extremos visibles de las probetas.
- Se comenzó a grabar con la cámara, colocando la mano frente al lente la cual se removía al iniciar la carga (para identificar el cuadro inicial con mucha mayor facilidad)
- Con la cámara del celular se grabó la lectura de la máquina y la probeta. Este último con el objetivo de poder identificar el punto de ruptura con facilidad y poder emparejar los datos.
- Se inició la carga de la probeta hasta el punto de ruptura

---

<sup>1</sup>Variación aparente de la posición de un objeto, especialmente un astro, al cambiar la posición del observador - RAE

Figura 21: Configuración del equipo para realizar los ensayos a tensión



Fuente: Elaboración propia

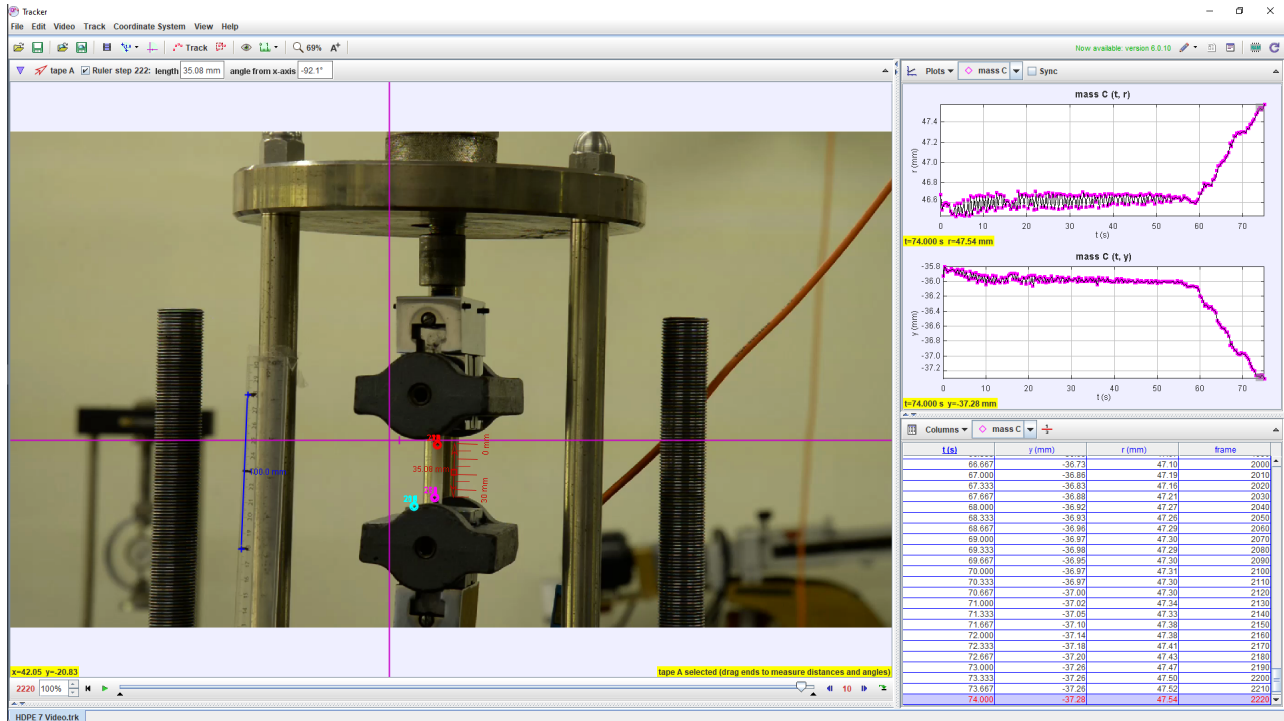
## 5.8. Procesamiento de vídeos

Para analizar los vídeos se utilizó el programa *Tracker* en el cual se determinó el desplazamiento de cada una de las marcas realizadas anteriormente. Los datos se pasaron a una hoja de cálculo en Excel para poder obtener la deformación y el esfuerzo correspondiente a cada dato. Para esto:

- Primero se ajustó la velocidad de muestreo a treinta cuadros por segundo
- Se identificaron los cuadros inicial y final para el muestreo automático
- Se colocó una vara de calibración entre las marcas de la regla y se ingresó un valor de 100 mm
- Se utilizó una vara de medición para obtener la longitud efectiva inicial de la probeta
- Se colocó el eje de coordenadas sobre una mordaza para que tomara este de referencia para el cálculo de desplazamiento

- Utilizando la herramienta *tracker*, se rastreo cada diez cuadro la posición de ambas marcas, además también se rastreo la parte superior de la mordaza móvil para control
- Una vez el programa haya terminado de rastrear el objeto se seleccionaron: cuadro y posición  $y$  . Estos se copiaron y pegaron los valores en una hoja de cálculo en Excel.

Figura 22: Obtención de desplazamiento de la probeta en *Tracker*



Fuente: Elaboración propia

## 5.9. Obtención de curvas esfuerzo-deformación

Con los datos obtenidos de *Tracker* se siguió a calcular los valores de deformación unitaria, para esto:

- Para determinar el desplazamiento de cada punto rastreado se restó el dato actual y el dato inicial. No se utilizaron los datos de la marca superior ya que al ver la gráfica de estos se observó una tendencia horizontal con bastante ruido (ver Figura 28), por lo que se omitieron.
- La deformación unitario es el cociente entre el desplazamiento y la longitud inicial, esta última se obtuvo de *tracker* mediante una vara de medición.
- Para emparejar el valor de carga con la deformación correspondiente se identificó el cuadro previo a la falla de la probeta y a partir de este punto se ingresó manualmente la lectura de fin a inicio.

- La carga al estar en libras fuerza (lbf) se convirtió a Newtons (N).
- El esfuerzo es el cociente entre la carga y el área inicial. En este caso se tiene  $N/mm^2$  por lo que la dimensional del esfuerzo es megapascales (MPa).
- Se graficó la curva esfuerzo-deformación en Excel colocando los valores de esfuerzo en el eje de las ordenadas y la deformación en el eje de las abscisas.

Las curvas de HDPE presentaron un nivel de ruido elevado por lo que se filtraron aún más los datos para suavizar la curva. Para las probetas número 1, 5 y 6 se filtraron cada 12 datos, 10 datos para la probeta 7 y cada 8 datos para la probeta 8. En el caso del PP las curvas no presentaban exceso de ruido y se puede apreciar una tendencia notable en los datos, no obstante se optó por filtrar los datos para poder calcular el módulo elástico con mayor exactitud (mitigando el efecto del ruido) y manteniendo la tendencia de los datos.

### 5.9.1. Cálculo de propiedades mecánicas

Con los datos filtrados se continuó a determinar las propiedades mecánicas de las probetas. Haciendo uso del programa *Microsoft Excel* y empleando un paquete para análisis estadístico de datos se logró encontrar las propiedades que se describen a continuación.

Para el esfuerzo y deformación a fluencia se identificó el punto en donde existe un aumento en la deformación sin haber un incremento en el esfuerzo (la tendencia de los datos en este punto es horizontal). Por la forma de las gráficas este valor coincide con el esfuerzo máximo, utilizando la función MAX()<sup>2</sup> de *Excel* en la columna de esfuerzo se determinó el valor más grande medido. Para encontrar la deformación unitaria correspondiente al punto máximo se utilizó la función BUSCARX()<sup>3</sup>.

En cuanto al esfuerzo y deformación a ruptura estos son los últimos datos reportados, pues fue en este punto en donde se presentó el fallo de la probeta. Ahora bien, el módulo elástico es la pendiente de la región proporcional de la curva y siguiendo la norma ISO 527-1 “Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles” se calcula en el intervalo de 0.05 % y 0.25 % de deformación. No obstante, el método actual no permite obtener tan pequeña resolución. Es por esto que se decidió calcular el módulo elástico entre 0 % y 2 % de deformación. Para esto se utilizó la herramienta de regresión de Excel tomando solamente los pares esfuerzo-deformación de 0 % hasta 2 %. El programa devuelve una tabla con diferentes valores, el módulo de elasticidad se encuentra al final de esta, en la celda “Coeficiente X”. Al ser una regresión lineal, la ecuación ajustada es de la forma  $y = mx + b$ , en donde  $m$  es la pendiente de la recta, lo que viene siendo por definición el módulo elástico.

---

<sup>2</sup>“Devuelve el valor máximo de un conjunto de valores.” - Microsoft Support

<sup>3</sup>“La función BUSCARX busca en un rango o una matriz y, a continuación, devuelve el elemento correspondiente a la primera coincidencia que encuentra.” - Microsoft Support

## 5.10. Determinación de velocidad de deformación

Para calcular la velocidad de deformación para ambos materiales se graficó la deformación en función del tiempo para cada probeta y utilizando la herramienta de línea de tendencia se encontró la ecuación de la recta forzando pasar por el origen ya que la deformación inicia en cero. Al ser una línea recta la pendiente de esta se define como la velocidad de deformación de la probeta en %/s, para tener el valor en mm/min se multiplicó por la longitud inicial de la probeta y por el factor de conversión de segundos a minuto (60 s/min). Además, junto a este se determinó el coeficiente de determinación  $R^2$  <sup>4</sup>

Para las probetas de PP se tomó solamente la porción inicial que compartían tendencia (en algunas se puede apreciar un cambio en la pendiente) debido a que con estos puntos se calculó el módulo de elasticidad. Para las probetas de HDPE se tomó todo el conjunto de datos ya que la variación no permite observar cambios en la tendencia como en el PP.

---

<sup>4</sup>“El coeficiente de determinación proporciona una medida de la bondad de ajuste para la ecuación de regresión estimada.” - Anderson y Sweeney, [2011](#)

## 6.1. Cumplimiento de requisitos

El Cuadro 10 presenta el cumplimiento de los requisitos establecidos anteriormente junto a la justificación de si se alcanzaron o no.

## 6.2. Simulación de inyección

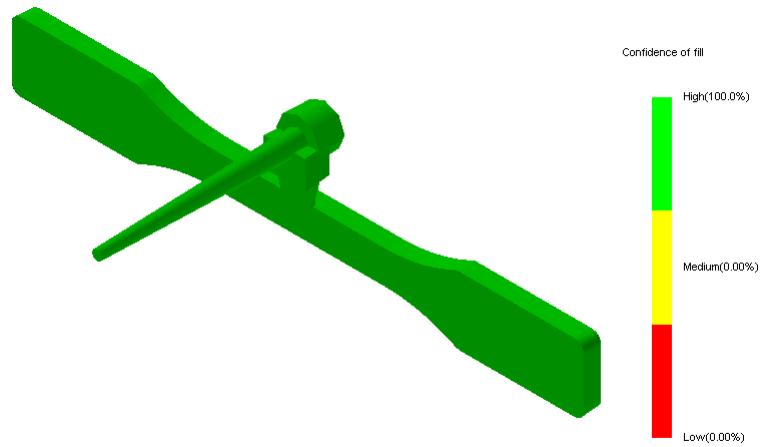
Las figuras 23 y 24 presentan los resultados de la simulación realizada en *Autodesk Inventor* empleando *Mold Flow Analysis*. En la Figura 23 se aprecia el nivel de confianza de llenado de la probeta según los valores ingresados que se mencionaron en secciones anteriores. Se puede observar que el nivel de confianza para toda la probeta es del 100 % por lo que no debería haber problema con la inyección. La Figura 24 muestra la calidad predicha por el programa, esta indica si se espera ciertos problemas como *Jetting* durante el proceso de inyección. Se puede apreciar que la geometría principal (es decir la probeta) se encuentra totalmente en verde lo que significa que el programa no espera desperfectos visuales.

Es importante aclarar que los porcentajes en la escala de color del lado izquierdo de las figuras representa el porcentaje del volumen que se encuentra en dicha categoría. En este caso el 100 % de la geometría (incluyendo sistema de alimentación) tiene un alto nivel de confianza de llenado, por otro lado, el 95 % del volumen no tendrá desperfectos y el 5 % puede o no presentar alguno.

Cuadro 10: Cumplimiento de requisitos

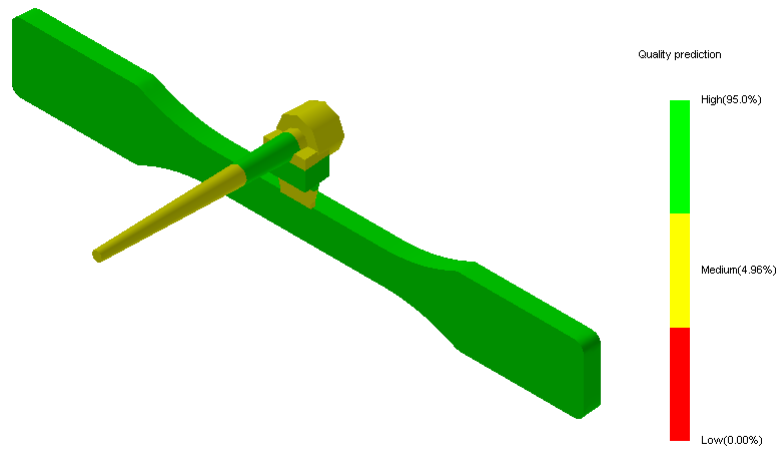
<i>Código</i>	<i>¿Se cumplió? Sí/No</i>	<i>¿Por qué?</i>
<i>CD-00</i>	Sí	La geometría con las dimensiones finales se puede apreciar en la Figura 8
<i>CD-01</i>	Sí	
<i>CD-02</i>	Sí	El molde es de 15.2X12.1 cm
<i>LI-00</i>	Sí	El volumen de la inyección es de 6.95 cm <sup>3</sup>
<i>LI-01</i>	Sí	La presión de inyección necesaria es de 21.57 MPa
<i>LI-02</i>	Sí	HDPE y PP fueron inyectados a 210 °C y el PHB a 180°C
<i>EM-00</i>	Sí	El molde es de aluminio 6061
<i>EM-01</i>	Sí	El molde tiene un ángulo de desmoldeo de 2.5°
<i>EM-02</i>	Sí	Las mordazas son un prisma rectangular con dimensiones externas de 38.1X8X18 mm con redondeos internos de 8 mm
<i>EM-03</i>	Sí	El centro del molde coincide con el punto de inyección de la APSX-PIM como se puede apreciar en la Figura 20
<i>EM-04</i>	Sí	El molde es un prisma rectangular de 15.2X12.1X2.5 cm
<i>RS-00</i>	Sí	La simulación indica un tiempo de llenado de 4s y logra llenar toda la cavidad
<i>RS-01</i>	Sí	El 100 % de la cavidad tiene un nivel de confianza de llenado alto
<i>RS-02</i>	Sí	El 95 % de la cavidad tiene una predicción de calidad alta, teniendo un nivel medio en el sistema de alimentación.
<i>ET-00</i>	Parcial	Se lograron obtener 8 probetas de HDPE, 14 de PP, 5 de PHB y ninguna de PLA.
<i>ET-01</i>	Sí	Se realizaron dos círculos con marcador permanente en los extremos del área reducida como se puede observar en la Figura 27
<i>ET-02</i>	Sí	Se utilizó un lente Nikon AF-S Nikkor con una distancia focal de 120mm y apertura f/4
<i>ET-03</i>	No	La velocidad de deformación fue de 60%/min para todas. Además, el promedio de velocidad de deformación fue de 20 y 30 mm/min para HDPE y PP respectivamente.
<i>AFT-00</i>	Sí	La ficha técnica presenta toda la información especificada en los requisitos definidos.
<i>AFT-01</i>	Sí	
<i>AFT-02</i>	Sí	
<i>AFT-03</i>	Sí	

Figura 23: Nivel de confianza de llenado para molde



Fuente: Elaboración propia  
Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Figura 24: Predicción de calidad para el llenado del molde

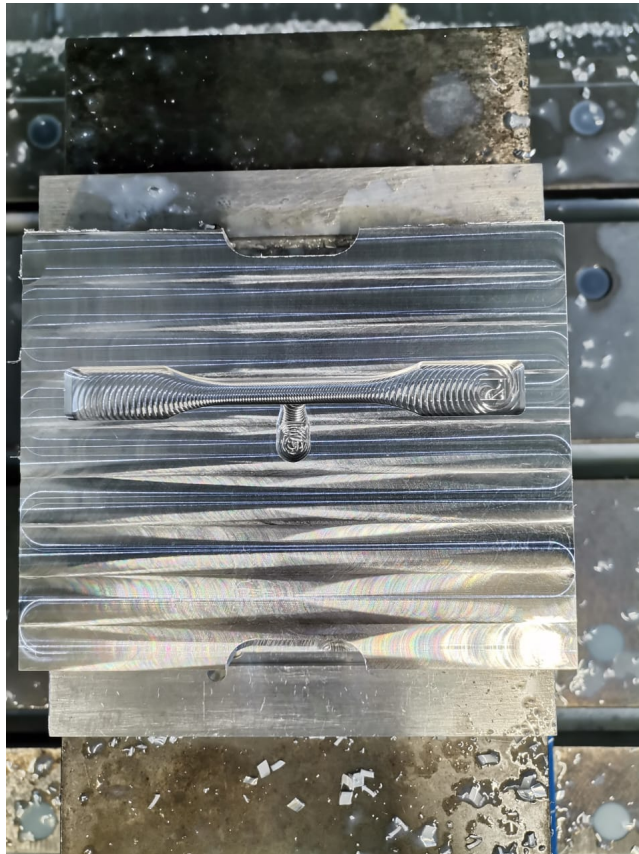


Fuente: Elaboración propia  
Captura de pantalla de *Autodesk* reimpresas por cortesía de *Autodesk, Inc.*

### 6.3. Maquinado de molde

La siguiente figura presenta el maquinado de la probeta en bloque de aluminio grado 6061. Se puede observar en la superficie del molde los pasos de las herramientas corte, sin embargo, la superficie quedó completamente lisa por lo que no habrá problema al momento de inyectar.

Figura 25: Molde de aluminio maquinado en Haas VF-1 para inyección de probetas



Fuente: Elaboración propia

### 6.4. Inyección de probetas

La siguiente figura presenta dos probetas de cada material inyectado (HDPE, PP y PHB). Se puede apreciar que las probetas de HDPE [26a](#) exhiben cierta coloración rojiza, esto se debe a que el material es recalentado y no era resina nueva. Las probetas de PP [26b](#) exteriorizan un alto grado de reflectividad, además, las primeras probetas mostraron fibras de color blanco, esto se debe a la combinación de materiales con HDPE. Por último, las probetas de PHB [26c](#) resultaron con exceso de material en sus bordes con mezcla de PP.

Figura 26: Probetas finales de los tres distintos materiales inyectados



(a) Probetas de HDPE



(b) Probetas de PP



(c) Probetas de PHB

Fuente: Elaboración propia

## 6.5. Pruebas a tensión

La Figura 27 contiene las probetas posteriores a las pruebas de tensión. Es notable la diferencia en deformación entre PP con HDPE y PHB. Además, las probetas 1, 3 y 6 exhiben significativamente menor deformación. Es interesante apreciar las fibras en cada una de las probetas a excepción de la probeta número 13.

Figura 27: Probetas posterior a los ensayos realizados en orden de prueba (Orden izquierda a derecha: PHB, PP y HDPE)



Fuente: Elaboración propia

## 6.6. Gráficas esfuerzo-deformación

Para determinar la deformación:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (1)$$

Para calcular el esfuerzo:

$$\sigma = \frac{F}{A_{trans}} = \frac{F}{W * t} \quad (2)$$

Para calcular el módulo elástico:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} = \frac{\sigma_2}{\epsilon_2} \quad (3)$$

Conversión libras-fuerza a Newtons:

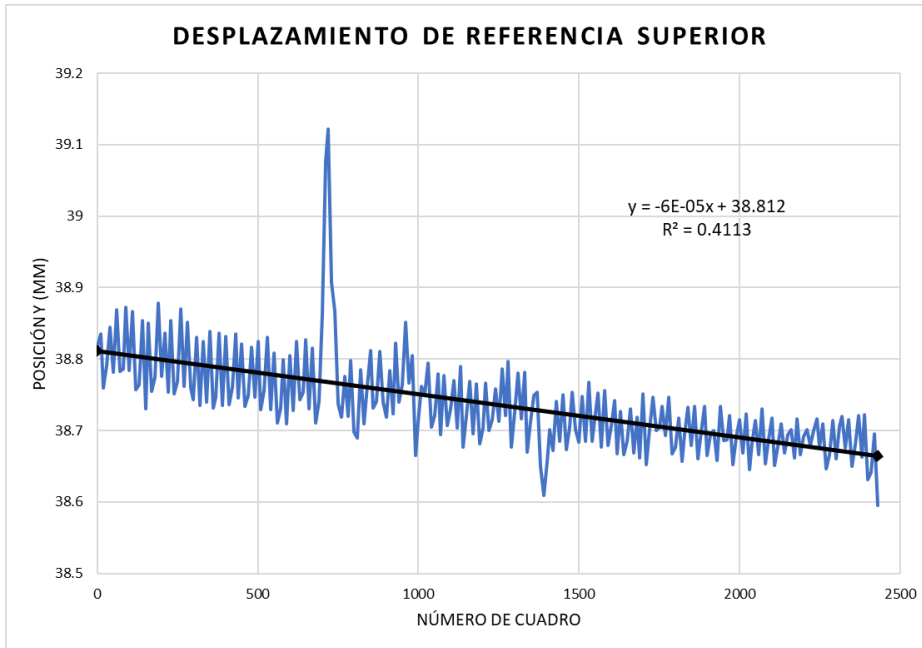
$$1lbf = 4.44822N \quad (4)$$

en donde:

- $\epsilon$  es la deformación en  $mm/mm$  o bien en porcentaje (%)
- $\Delta L$  es el cambio en la longitud de la probeta en  $mm$
- $L_o$  es la longitud inicial efectiva de la probeta en  $mm$
- $\sigma$  es el esfuerzo en MPa
- $F$  es la carga aplicada en Newtons ( $N$ )
- $A_{trans}$  es el área de la sección transversal de la probeta en  $mm^2$
- $W$  es el ancho de la probeta en la sección reducida  $mm$
- $t$  es el espesor de la probeta en  $mm$

La Figura 28 es un gráfico de los valores de posición de la marca superior de la probeta 1, como se puede ver el nivel de ruido es alto y a pesar de que se logre apreciar una tendencia la pendiente del conjunto de datos es de  $6 \times 10^{-5}$  lo cual puede aproximarse a cero. Por lo que esta referencia no se desplazo en absoluto.

Figura 28: Gráfica de desplazamiento de la marca superior de la probeta 1 de HDPE



Las figuras 29 y 30 son las gráficas esfuerzo-deformación filtradas de HDPE y PP respectivamente. Cabe destacar que estas se obtuvieron de los datos medidos utilizando la mordaza móvil de la máquina de ensayos pues el nivel de ruido es menor. Las gráficas utilizando la marca en la probeta (el método convencional) se encuentran en anexos 100 y 101.

Nótese que la deformación o elongación puede reportarse en forma de porcentaje (%) o bien en decimales (mm/mm) ambas formas denotan lo mismo. En este documento se utilizan ambas notaciones según se vio conveniente su representación.

Figura 29: Gráfica esfuerzo-deformación filtrada de las probetas HDPE utilizando la mordaza móvil como objeto de medición de posición

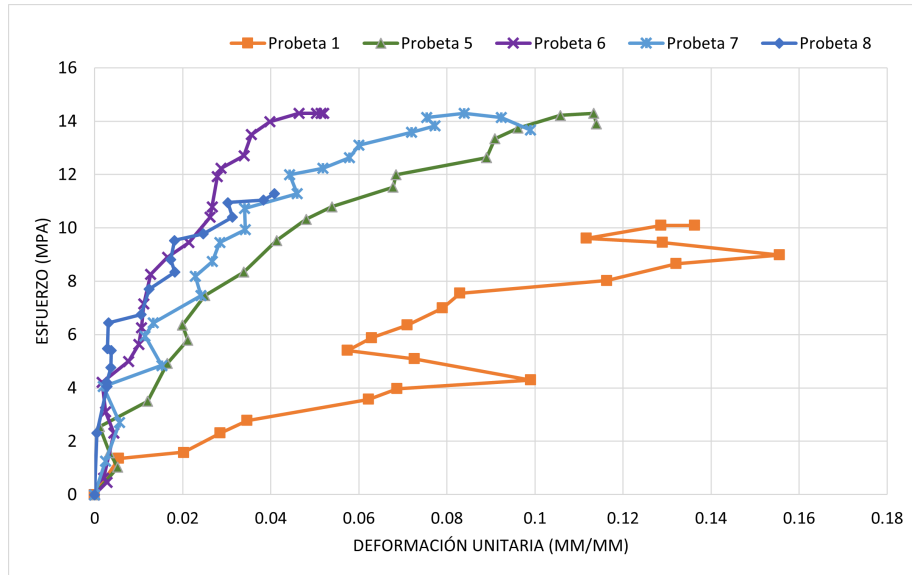
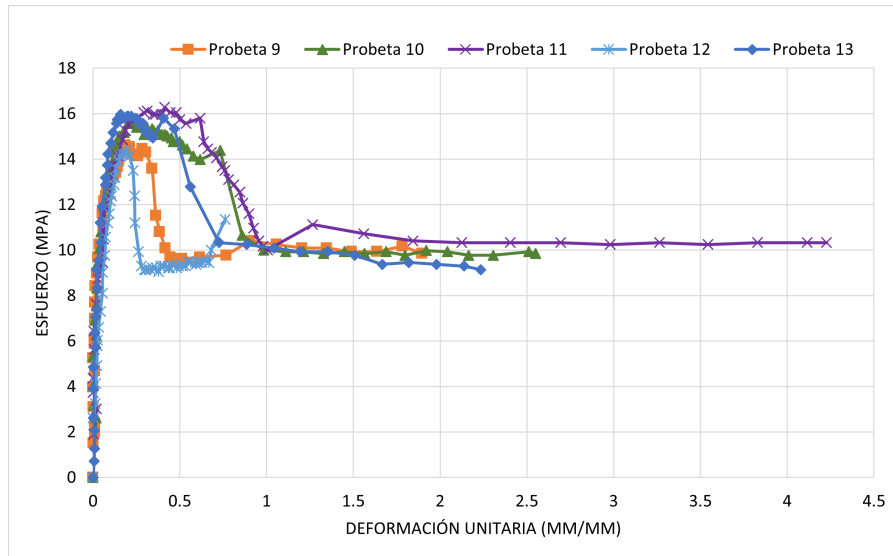


Figura 30: Gráfica esfuerzo-deformación filtrada de las probetas PP utilizando la mordaza móvil como objeto de medición de posición



Los cuadros 11 y 12 contienen las propiedades principales de las probetas ensayadas. Los valores del módulo y esfuerzos se encuentran en megapascales (MPa).

Cuadro 11: Resultados de polietileno de alta densidad

	<i>Módulo de elasticidad</i>	<i>Esfuerzo a fluencia</i>	<i>Esfuerzo a ruptura</i>	<i>Elongación a fluencia</i>	<i>Elongación a ruptura</i>
<i>Probeta 1</i>	89.87	11.44	11.28	4.94 %	5.678 %
<i>Probeta 5</i>	299.96	14.30	13.90	11.79 %	11.792 %
<i>Probeta 6</i>	614.16	14.62	12.95	5.09 %	5.197 %
<i>Probeta 7</i>	436.64	14.30	13.66	8.40 %	9.896 %
<i>Probeta 8</i>	341.38	11.44	11.28	4.94 %	5.678 %
<i>Promedio</i>	423.03	13.66	12.95	7.55 %	8.14 %
<i>Desv. Est.</i>	139.67	1.49	1.18	3.25 %	3.22 %

Cuadro 12: Resultados de polipropileno (PP)

	<i>Módulo de elasticidad</i>	<i>Esfuerzo a fluencia</i>	<i>Esfuerzo a ruptura</i>	<i>Elongación a fluencia</i>	<i>Elongación a ruptura</i>
<i>Probeta 1</i>	231.52	9.21	2.07	8.92 %	61.33 %
<i>Probeta 3</i>	383.98	8.82	2.70	5.63 %	55.59 %
<i>Probeta 6</i>	493.35	11.44	1.91	3.19 %	27.78 %
<i>Probeta 9</i>	418.53	14.62	9.85	18.58 %	189.65 %
<i>Probeta 10</i>	337.48	15.73	9.85	21.43 %	255.05 %
<i>Probeta 11</i>	347.77	16.28	10.33	41.28 %	422.67 %
<i>Probeta 12</i>	265.71	14.38	11.36	19.13 %	76.16 %
<i>Probeta 13</i>	422.18	15.97	9.13	15.98 %	223.47 %
<i>Promedio</i>	358.34	15.39	10.10	23.28 %	233.40 %
<i>Desv. Est.</i>	64.86	0.85	0.82	10.25 %	125.53 %

Los cuadros 13 y 14 son tablas comparativas de los valores de referencia y los obtenidos de la experimentación para ambos materiales.

Cuadro 13: Porcentaje de error de valores obtenidos a valores de referencia de HDPE

<i>Propiedad</i>	<i>Referencia</i> (Wypych, 2016)	<i>Obtenido</i>	<i>%Error</i>
<i>Módulo de elasticidad</i>	700	423.03	39.57 %
<i>Esfuerzo a fluencia</i>	21.4	13.66	36.16 %
<i>Esfuerzo a ruptura</i>	13	12.95	0.40 %
<i>Elongación a fluencia</i>	8.70 %	7.55 %	13.18 %
<i>Elongación a ruptura</i>	250 %	8.14 %	96.74 %

Cuadro 14: Porcentaje de error de valores obtenidos a valores de referencia de PP

<i>Propiedad</i>	<i>Referencia</i> (Wypych, 2012b)	<i>Obtenido</i>	<i>% Error</i>
<i>Módulo de elasticidad</i>	1,200	358.34	70.14 %
<i>Esfuerzo a fluencia</i>	31	15.39	50.34 %
<i>Esfuerzo a ruptura</i>	26	10.10	61.14 %
<i>Elongación a fluencia</i>	7	23.28 %	96.67 %
<i>Elongación a ruptura</i>	10	233.40 %	76.66 %

Los cuadros 31 y 32 presentan los gráficos de deformación-tiempo con su regresión, las demás se encuentran en la sección de anexos (105 - 115).

Figura 31: Gráfica deformación-tiempo de probeta 6 de HDPE

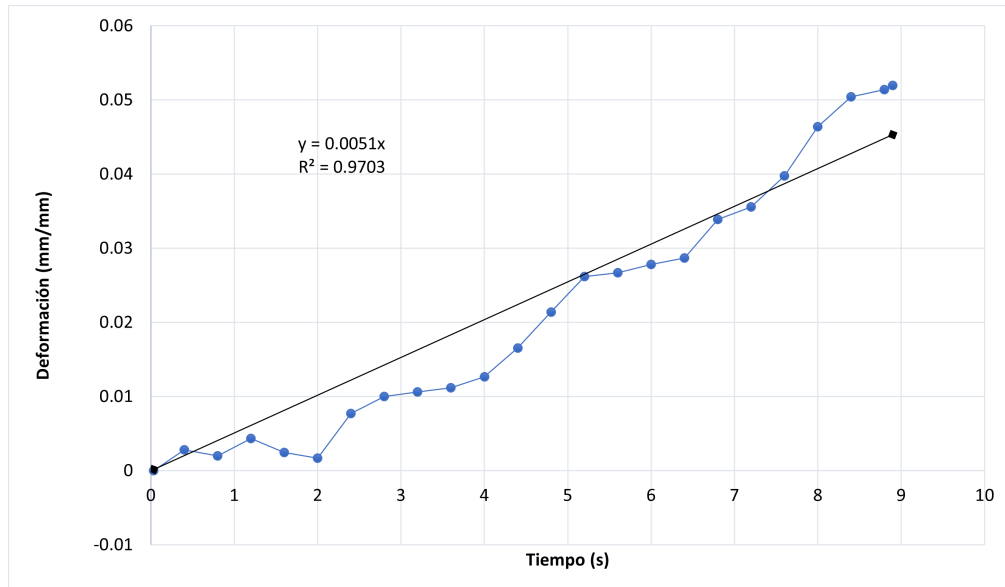
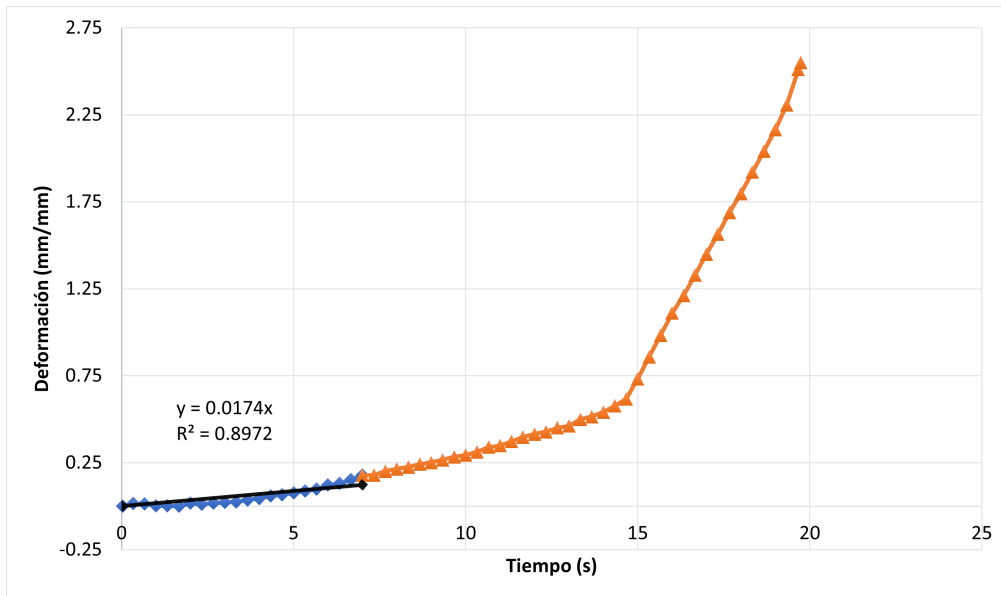


Figura 32: Gráfica deformación-tiempo de probeta 10 de PP



Los cuadros 15 y 16 presentan las velocidades de deformación de las probetas de HDPE y PP respectivamente tanto unitarias (% o mm/mm) así como absolutas (mm).

Cuadro 15: Velocidad de deformación de probetas de HDPE

	<i>Velocidad de deformación</i>		<i>Longitud inicial</i>
	<i>%/s</i>	<i>mm/min</i>	<i>mm</i>
<i>Probeta 1</i>	1.89%	25.13	22.16
<i>Probeta 5</i>	1.32%	25.26	31.89
<i>Probeta 6</i>	0.51%	12.31	40.23
<i>Probeta 7</i>	1.12%	23.57	35.08
<i>Probeta 8</i>	0.96%	14.01	24.33
<i>Promedio</i>	1.16%	20.06	-
<i>Desv. Est.</i>	0.51%	6.36	-

Cuadro 16: Velocidad de deformación de probetas de PP

	<i>Velocidad de deformación</i>		<i>Longitud inicial</i>
	<i>%/s</i>	<i>mm/min</i>	<i>mm</i>
<i>Probeta 1</i>	1.87 %	43.74	38.98
<i>Probeta 3</i>	1.59 %	32.15	33.7
<i>Probeta 6</i>	0.57 %	13.17	38.5
<i>Probeta 9</i>	1.29 %	26.76	34.58
<i>Probeta 10</i>	1.74 %	30.16	28.89
<i>Probeta 11</i>	2.59 %	33.36	21.47
<i>Probeta 12</i>	2.01 %	46.38	38.46
<i>Probeta 13</i>	0.94 %	21.14	37.49
<i>Promedio</i>	1.58 %	30.86	-
<i>Desv. Est.</i>	0.64 %	10.95	-

## 6.7. Fichas técnicas

Las siguientes fichas técnicas contienen la información relevante del material: nombre de la resina, el método de procesamiento y el nombre de la máquina en la cual fue procesado, información general del material, las propiedades mecánicas tabuladas así como los parámetros de inyección utilizados. Además, contiene la fecha de actualización de datos.

## Ficha técnica de HDPE

Nombre de resina: polietileno de alta densidad (HDPE)  
Procesamiento: inyección plástica  
Máquina: APSX-PIM  
Color: Blanco



## Información del material

Es un termoplástico con excelente resistencia al impacto, alta resistencia a la tracción, baja absorción de humedad, resistencia a los químicos y a la corrosión.

Aplicación: guías de cadena de trabajo ligero, prótesis, tanques y recipientes, tuberías, dispositivos termoformados para manejo de material, almacenamiento de agua, industria alimentaria y otros.

Los siguientes cuadros contienen las propiedades mecánicas del material HDPE en su estado de resina virgen procesadas en la máquina inyectora modelo APSX-PIM dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala. Los valores se obtuvieron de ensayos a tensión utilizando la máquina universal “Soiltest Versa Tester” del departamento de Ingeniería Civil.

<i>Propiedad mecánica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<b>Módulo elástico</b>	423.03	MPa
<b>Esfuerzo a fluencia</b>	13.66	MPa
<b>Deformación a fluencia</b>	7.55	%
<b>Esfuerzo a ruptura</b>	12.95	MPa
<b>Deformación a ruptura</b>	8.14	%

<i>Parámetro de inyección</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<b>Temperatura de barril</b>	210	°C
<b>Temperatura del molde</b>	40	°C
<b>Presión de inyección</b>	225	BAR
<b>Fuerza de cierre</b>	3,200	Kg
<b>Tiempo de enfriamiento</b>	5,000	mSec
<b>Volumen de corte</b>	10	cm <sup>3</sup>

Fecha de actualización: Noviembre – 2022

Nota: Valores encontrados dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala

## Ficha técnica de PP

Nombre de resina: polipropileno (PP)  
Procesamiento: inyección plástica  
Máquina: APSX-PIM  
Color: Amarillo



## Información del material

Es un polímero termoplástico que presenta alta resistencia química e y resistencia a materiales ácidos. Tiene aplicaciones en la industria alimentaria. Además, en cuanto a sus propiedades mecánicas posee buena rigidez, dureza y resistencia superficial; posee una gran capacidad de recuperación elástica y buena resistencia térmica.

Aplicación: cajas, botellas, tuberías, industria automotriz, envases de alimentos y aplicaciones varias mecánicas.

Las siguientes tablas contienen las propiedades mecánicas del material PP en su estado de resina virgen procesadas en la máquina inyectora modelo APSX-PIM dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala. Los valores se obtuvieron de ensayos a tensión utilizando la máquina universal “Soiltest Versa Tester” del departamento de Ingeniería Civil.

<i>Propiedad mecánica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<b>Módulo elástico</b>	358.34	MPa
<b>Esfuerzo a fluencia</b>	15.39	MPa
<b>Deformación a fluencia</b>	23.28	%
<b>Esfuerzo a ruptura</b>	10.10	MPa
<b>Deformación a ruptura</b>	233.40	%

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Temperatura de barril</i>	210	°C
<i>Temperatura del molde</i>	40	°C
<i>Presión de inyección</i>	225	BAR
<i>Fuerza de cierre</i>	3,200	Kg
<i>Tiempo de enfriamiento</i>	5,000	mSec
<i>Volumen de corte</i>	10	cm <sup>3</sup>

Fecha de actualización: Noviembre – 2022

Nota: Valores encontrados dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala

Previo a iniciar con el análisis de los datos es importante establecer que el objetivo general no fue alcanzado por dos principales razones. Primero, del ácido poliláctico (PLA) se contaba con insuficiente material para una inyección limpia. Si bien la cantidad podía llenar una sola vez el molde, esta no rendía para purgar el barril de la inyectora. Además, de un ensayo casero del material este no soportaba altas y se incineraba con facilidad, lo cual podría dañar el interior de la inyectora. Segundo, del ácido polihidroxibutírico (PHB) si fue posible realizar la inyección. Sin embargo, al realizar los ensayos a tensión dos probetas se fracturaron solamente con el peso de la mordaza móvil (5.78 kg) y solamente una logró llegar a una lectura de 7 lbf.

A pesar de lo anterior, los resultados de HDPE y PP fueron exitosos con los valores reportados en los cuadros 11 y 12. No obstante, los cuadros 13 y 14 demuestran que las magnitudes experimentales difieren de las referencias. Esto no implica que los resultados no sean confiables pues en este caso, el porcentaje de error no va a representar un valor importante en el trabajo. Esto debido a que se están tomando valores de referencia de una fuente externa específica; de otras fuentes electrónicas<sup>1</sup> que reportan las propiedades de HDPE y PP, se puede percibir una gran variación entre estos; lo cual cambiaría el porcentaje de error según se tome la referencia. Lo ideal es conocer el nombre comercial de la resina utilizada para comparar sus valores con los del proveedor. Sin embargo, se desconoce esta información.

El aspecto más importante que considerar es el comportamiento de los datos ya que si todas o bien la mayoría de los ensayos siguen una tendencia, se puede decir que las pruebas y los resultados son correctos. Si todas las gráficas esfuerzo-deformación fuesen diferentes entre sí, entonces las pruebas serían inconclusas. Esto se respalda observando la desviaciones estándar en las tablas de resultados 11 y 12 para los esfuerzos en donde las desviaciones son menores o iguales al 10 % del valor promedio. Las curvas individuales del polipropileno (30) comparten la misma tendencia en donde el valor del esfuerzo sube, llega a un máximo que

<sup>1</sup>CAMPUS Plastics es una base de datos gratuita de polímeros de marcas comerciales cuya finalidad es el libre acceso a la información. Los datos se encuentran estandarizados («Campus Plastics», 2022)

a partir de este punto comienza a decrecer y llega a estabilizarse, lo cual sugiere que este es el comportamiento del PP que se encuentra en la UVG.

En el caso del HDPE como se puede apreciar que en la Figura 29 la probeta 1 presenta un comportamiento anormal respecto a las demás probetas. Esto se puede deber a que esta estaba hecha de material recalentado, el día que se realizaron la inyección fue dos días posterior a un evento de ingeniería de la universidad en donde se hicieron inyecciones de HDPE. Puede que este proceso de calentamiento, endurecimiento y recalentamiento haya tenido efecto alguno en las propiedades, pues las últimas probetas fueron hechas de resina nueva y estas presentan un comportamiento similar entre ellas. Por esta razón, no se tomó en cuenta la probeta 1 para el cálculo de propiedades mecánicas, solamente se reportaron los valores.

Por otro lado, el valor del módulo de elasticidad puede verse afectado por el nivel de ruido de los datos el cual se define como la variación por instrumentación de la medición y no del material. Si bien se filtraron para obtener una curva más suave sin perder la tendencia, este procedimiento pudo alterar el resultado y alejarlo del valor real. Para verificar esto se puede iterar la cantidad de datos filtrados para obtener el módulo de elasticidad en cada uno y así analizar su sensibilidad. Esto queda fuera del alcance de este estudio.

En el caso del PP los resultados de las probetas 1,3 y 6 se encuentran dentro de el Cuadro 12 mas no se consideraron en el cálculo de las propiedades ya que estas eran una combinación de HPDE y PP. Al ser las primeras inyecciones después del HDPE, hubo una mezcla de materiales en el tornillo de la inyectora y fue esto lo que generó las fibras. Es interesante observar la gráfica de estas tres probetas (Figura 102) pues la forma de la curva es idéntica al de las probetas con 100 % PP. La diferencia recae en las magnitudes de esfuerzo y elongación. Del Cuadro 12 se puede ver que el esfuerzo a fluencia de las probetas 1, 3 y 6 no concuerdan con los demás que en promedio es 15.39 MPa al igual que en la deformación.

Ahora bien, es importante establecer que las mediciones reportadas se obtuvieron al rastrear un punto en la mordaza móvil de la máquina de ensayos. Esto gracias a que al procesar los datos en Excel se notó una gran dispersión en los datos (llamado ruido) lo cual dificultaba el cálculo de las propiedades, así como determinación de la tendencia (comportamiento de datos). Con la medición en la mordaza esto se logró reducir considerablemente. Como se puede apreciar en la Figura 100 no se puede definir con claridad la tendencia de los puntos, aún con los datos filtrados. Esto puede deberse a cómo el programa *Tracker* realiza el rastreo, el cual es por comparación de píxeles. Si el programa logra un emparejamiento del 95 % de píxeles, puede que esta diferencia represente un desfase en la lectura y son esos desfases por instrumentación los que generan ruido.

La razón principal del porqué las marcas de la probeta no resultaron útiles es por el hecho que la marca fue excesivamente grande. Como se puede ver en la Figura 27 las marcas están hechas de marcador permanente negro y tienen forma de círculo. Esto le da a *Tacker* la holgura para emparejar píxeles con altos niveles de desfase. Otro trabajo de graduación por Oliva, 2022 quien realizó ensayos a tensión en la UVG en probetas impresas en 3D, utilizó líneas horizontales delgadas como marcas para medir la deformación de la probeta y sus resultados no presentaron los mismos niveles de ruido que empleando un círculo. Por lo que la implementación de estas marcas podría mejorar los resultados.

Por último, en cuanto a la velocidad de deformación se puede apreciar que la máquina tiende a deformar las probetas a una velocidad de 1 % por segundo, lo cual es sesenta (60) veces mayor de lo que se recomienda para la determinación del módulo elástico. Además, de las unidades absolutas (mm) se ve que se cuenta con un promedio de 20 y 30 para HDPE y PP respectivamente, lo cual tampoco se alinea a la recomendación de 50 mm/min para la resistencia a fluencia. En retrospectiva, la velocidad fue significativamente mayor para el módulo elástico y menor para la resistencia a fluencia. Esto implica que, si se realiza el procedimiento en las condiciones correctas, se podría esperar una reducción en el módulo elástico y un incremento en la resistencia a fluencia para ambos materiales. Esto basándose en el hecho que el módulo elástico y resistencia a fluencia aumentan con la velocidad de deformación hasta cierto punto.

La máquina empleada cuenta con una opción de carga controlada, mas no permite establecer la tasa de incremento (se asume que lo hace automáticamente) y esto se puede ver en la casi linealidad de la deformación. Sin embargo, el hecho que sea ‘carga controlada’ implica que lo que hace la máquina realmente es controlar la fuerza de extensión y no la deformación; y la linealidad observada en las gráficas de deformación se deba a la relación cuasi lineal entre la carga y la deformación en la región elástica, también conocida como región proporcional.



1. Empleando probetas de HDPE y PP de 38.1X7X4 mm en el área reducida, fabricadas en un proceso de inyección se obtuvo un módulo elástico promedio de 423 MPa y 358 MPa (respectivamente) y esfuerzo a fluencia promedio de 13.66 MPa y 15.39 Mpa (respectivamente).Adicionalmente se obtuvieron las propiedades mecánicas de esfuerzo a ruptura, elongación a fluencia y elongación a ruptura, cuyos resultados se encuentran en los cuadros 11 y 12.
2. La simulación de inyección para las probetas empleadas en la caracterización de propiedades mecánicas, realizada con el software *Inventor Autodesk* con el complemento *Moldflow Analysis*, difiere de los parámetros reales empleados finalmente en la fabricación de las probetas en una máquina de inyección APSX-PIM un 4 % en la presión de llenado y 30 % en el volumen. Basándose en esto, se puede utilizar la simulación como método para establecer los parámetros iniciales de inyección para reducir las iteraciones al tener materiales nuevos.
3. Debido a que al realizar análisis geométricos con un ángulo de desmoldeo de 2.5° no se observaron defectos o problemas en las probetas, se concluye que este ángulo no tiene un efecto significativo en cuanto al área transversal de la misma al ser una geometría pequeña (4 mm de espesor).
4. Al momento medir tanto el ancho como el espesor de la probeta posterior a la inyección en el área reducida se encontró una variación del 12 % del área transversal, por lo que se concluye que la dilatación térmica tiene un efecto significativo en las dimensiones de esta.
5. Se deben desechar las primeras probetas de un material debido a que los restos de una resina diferente en el barril pueden contaminar las probetas, como sucedió en el caso las probetas 1, 3 y 6 de PP.
6. La mordaza móvil al sujetarse solamente de la probeta contribuye a 2 MPa de pre-esfuerzo, el cual representa entre 12 % y 14 % del esfuerzo a fluencia. Este valor no se tomó en cuenta en las mediciones; para el caso de materiales frágiles este peso adicional

tiene un impacto significativo al poder deformar la probeta más de 0.25 %, apartando el material, según el criterio ISO 527-1, de la región para medir el módulo elástico. Es necesario agrandar el área transversal de la probeta para minimizar este efecto.

7. Si bien los porcentajes de error para el módulo de elasticidad y esfuerzo a fluencia son elevados (mínimo de 39.57 % y 36.13 % respectivamente), se infiere que la metodología de ensayos y toma de datos captura el comportamiento de los materiales ensayados (PP y HDPE) ya que las curvas esfuerzo-deformación (en resultados y anexos) para cada material siguen una tendencia marcada y definida.
8. La geometría de la probeta demostró ser suficiente para caracterizar material polimérico inyectable, especialmente en PP. No obstante, en el caso del HDPE la medición de deformación fue pequeña (con una elongación a ruptura promedio de 8.14 %) por lo que el aumentar el largo efectivo de la probeta aumentará la deformación absoluta (mm) con el objetivo de poder ser capturado de mejor manera a través del software *Tracker* para obtener resultados más precisos.

---

### Recomendaciones

---

- Realizar un nuevo molde con dos cavidades para mejorar el rendimiento de las inyecciones, así la relación del volumen de probetas y volumen total es mayor (un mismo bebedero para dos probetas) y se reduce el desperdicio generado.
- Realizar pruebas de inyección con el fin de determinar la cantidad mínima de material para purgar el barril y realizar cinco inyecciones limpias. Esto con el objetivo de tener ya sea un volumen o masa de resina mínimo necesario para realizar el procedimiento de caracterización.
- Realizar marcas horizontales delgadas con marcador permanente color negro o bien puntos más pequeños para que, durante el rastreo en Tracker, este no mueva el área de ajuste y así obtener mediciones de desplazamiento más certeras.
- Contar con el grado de la resina del polímero a trabajar para tener una mejor referencia de las propiedades esperadas y evaluar de manera más efectiva la exactitud del procedimiento presentado o bien evaluar la efectividad de los cambios a la metodología o equipo.
- Investigar si la máquina universal “Soiltest Versa Tester” del departamento de Ingeniería Civil permite variaciones de velocidades de carga/deformaciones más grandes (para el esfuerzo a fluencia); y más pequeña para alcanzar 1 %/min para el módulo elástico. De la misma forma, investigar si se puede aumentar la resolución de la máquina pues actualmente su medición más pequeña es de 0.5 lbf (2.224 N). Para materiales rígidos y frágiles es necesario mayor resolución en la máquina.
- Evaluar la capacidad de lectura para geometrías pequeñas de la máquina universal “Soiltest Versa Tester” para casos en los cuales el material sea bastante limitado; así mismo maquinar un nuevo molde con geometría más pequeña para reducir la necesidad de volumen por inyección. Bajo este pensamiento, se recomienda evaluar la implementación de colada caliente para eliminar el desperdicio de materia por la solidificación del bebedor, el cual para el caso de las probetas es significativo.

- Mejorar los métodos de medición de desplazamiento mediante uso de sensores de distancia con mayor resolución y precisión o bien el uso de extensómetros. De esta manera se reduce el ruido por instrumentación en el procesamiento de datos. Además, se recomienda buscar una metodología o herramienta que permita emparejar de forma automática y en tiempo real las lecturas de desplazamiento y carga, pues en la metodología actual el uso de dos cámaras de video involucra cierto desfase entre los valores, afectando los resultados.
- Evaluar el uso de insertos en el molde de inyección para no tener varios moldes con diferentes geometrías, solamente se cambia la probeta (el sistema de alimentación permanece siempre en el molde). Con esta estrategia, se reduce el tiempo de maquinado de la cavidad, se reduce el desperdicio de material y además permite la iteración de cavidades (si un inserto no funciona de forma adecuada o esperada, no es necesario desechar todo el molde).
- Utilizar una celda de carga con capacidad de 100 kg (220 lbf) para ser colocada en serie con la probeta, es decir, entre la probeta y la mordaza fija para medir la carga aplicada, así junto a un Arduino y sensor de distancia se logra emparejar de forma automática los datos carga-desplazamiento o bien desplegar la curva esfuerzo-deformación desde un inicio. Además, con esta herramienta se logra aumentar la resolución del método actual, con el objetivo de medir 0.05 % de deformación y así cumplir con la recomendación de la norma ISO527-1 para el módulo elástico.
- Las fuentes consultadas indica que el polihidroxitirato (PHB) posee propiedades mecánicas similares a aquellos de origen petroquímico (como el HDPE), sin embargo, este no fue el caso como se presentó en la discusión. Se debe seguir investigando este material a mayor profundidad y evaluar si el procesamiento por inyección tuvo algún impacto en la estructura molecular del material afectando las propiedades mecánicas.
- La velocidad de deformación de las probetas no cumple con las recomendaciones de la norma ISO 527-1 para medir módulo elástico y resistencia a fluencia, se debe estudiar la máquina universal para modificar la tasa de carga o la geometría de la probeta.
- La metodología actual no permite la caracterización de material limitado como el caso de PLA, pues el volumen de inyección es considerable (10 cm<sup>3</sup>). Se necesita desarrollar una nueva geometría que requiera menor material o bien aumente el rendimiento por inyección.

- Agboola, O., Sadiku, R., Mokrani, T., Amer, I. & Imoru, O. (2017). Polyolefins and the environment. *Polyolefin Fibres* (pp. 89-133). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101132-4.00004-7>
- Amjadi, M. & Fatemi, A. (2020). Tensile Behavior of High-Density Polyethylene Including the Effects of Processing Technique, Thickness, Temperature, and Strain Rate. *Polymers*, 12(9), 1857. <https://doi.org/10.3390/polym12091857>
- Anderson, D. & Sweeney, D. (2011). *Estadística para negocios y economía (11a. ed.)* [OCLC: 958556061]. CENGAGE Learning.
- APSX. (2022). APSX - PIM Manual. [https://www.apsx.com/images/uploaded/APSX-PIM\\_Manual.pdf](https://www.apsx.com/images/uploaded/APSX-PIM_Manual.pdf)
- Bernard, S. (2003). Deformation and failure of semi-crystalline polymer systems : influence of micro and molecular structure. <https://doi.org/10.6100/IR563142>
- Bierögel, C. & Grellmann, W. (2014). Quasi-static tensile test - introduction. En K.-F. Arndt & M. D. Lechner (Eds.), *Polymer Solids and Polymer Melts–Mechanical and Thermomechanical Properties of Polymers* (pp. 83-87). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-55166-6\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-55166-6_15)
- Campus Plastics. (2022). <https://www.campusplastics.com>
- Colwill, J. (2012). *A framework for supporting the sustainable adoption of biopolymers in packaging applications* (Doctoral Thesis). Loughborough University. [https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/A\\_framework\\_for\\_supporting\\_the\\_sustainable\\_adoption\\_of\\_biopolymers\\_in\\_packaging\\_applications/9524570](https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/A_framework_for_supporting_the_sustainable_adoption_of_biopolymers_in_packaging_applications/9524570)
- Crawford, R. J. & Martin, P. J. (2020). General properties of plastics. *Plastics Engineering* (pp. 1-57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100709-9.00001-7>
- dos Santos, A. J., Oliveira Dalla Valentina, L. V., Hidalgo Schulz, A. A. & Tomaz Duarte, M. A. (2017). From Obtaining to Degradation of PHB:Material Properties. Part I. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 269-298. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.10>
- Francis, R. (Ed.). (2017). *Recycling of polymers: methods, characterization and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

- GmbH, Z. (2007). Specimen Preparation and Testing Options For Metal Samples [publisher: Azo Materials]. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3760>
- Hagen, R. (2012). Polylactic Acid. *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (pp. 231-236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00269-7>
- Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M. & Desobry, S. (2010). Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(5), 552-571. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x>
- Kazmer, D. (2016). *Injection mold design engineering* (2nd edition). Hanser Publications, ; Hanser Publishers.
- Lavakumar, A., & Institute of Physics (Great Britain). (2017). *Concepts in physical metallurgy: concise lecture notes* [OCLC: 1035715481]. Consultado el 5 de noviembre de 2021, desde <http://ezproxy.uniandes.edu.co:8080/login?url=http://iopscience.iop.org/book/978-1-6817-4473-5>
- Lechner, L. (2020). Injection Molding Basics: Cold Runner Systems [publisher:]. <https://www.echosupply.com/blog/injection-molding-basics-cold-runner-systems/>
- Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X. & Shi, B. (2014). Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 133-137. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.003>
- McAdam, B., Brennan Fournet, M., McDonald, P. & Mojicevic, M. (2020). Production of Polyhydroxybutyrate (PHB) and Factors Impacting Its Chemical and Mechanical Characteristics. *Polymers*, 12(12), 2908. <https://doi.org/10.3390/polym12122908>
- Murariu, A. C., Golubovic, Z., Sedmak, A. & Kreculj, D. (2016). Tensile Behaviour of Polyethylene Under Different Loading Rates in the Presence of Imperfections. *Structural Integrity and Life*, 16(1), 15-18.
- Oliva, O. (2022). *Caracterización de propiedades mecánicas de polímeros impresos en 3D* (Undergraduate Thesis). Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala.
- Patterson & Rothwell. (2018). In Pursuit Of The Perfect Injection Moulded Part 7 – Jetting [publisher: PATTERSON ROTHWELL]. <https://www.patterson-rothwell.co.uk/in-pursuit-of-the-perfect-injection-moulded-part-seven-jetting/>
- Pooja, Sharma, A. & Sharma, J. (2020). Stress Physiology in Plants. [https://www.researchgate.net/publication/347908867\\_Stress\\_Physiology\\_in\\_Plants](https://www.researchgate.net/publication/347908867_Stress_Physiology_in_Plants)
- Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O. P., Achari, G. & Slobodnik, J. (2021). Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. *Science of The Total Environment*, 757, 143872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143872>
- Saba, N., Jawaid, M. & Sultan, M. (2019). An overview of mechanical and physical testing of composite materials. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (pp. 1-12). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>
- Selke, S. & Hernandez, R. (2001). Packaging: Polymers for Containers. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 6646-6652). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01175-X>
- Sukumaran, N. P. & Gopi, S. (2021). Overview of biopolymers. *Biopolymers and their Industrial Applications* (pp. 1-19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819240-5.00001-8>

- UNDP. (2020). Lanzamiento del Proyecto Gestión Ambiental Integral de la Cuenca del Río Motagua. <https://www.undp.org/es/guatemala/news/lanzamiento-del-proyecto-gesti%C3%B3n-ambiental-integral-de-la-cuenca-del-r%C3%ADo-motagua>
- Vidya, F., Thomas, T. E. s. & Thachil. (2012). *Modification of Linear Low Density Polyethylene for Improved Photo and Biodegradation* (Ph. D.). Department of Polymer Science y Rubber Technology. Kerala, India. <https://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/handle/purl/3140>
- World Wildlife Fund. (2021). The lifecycle of plastics [publisher: WWF]. Consultado el 27 de julio de 2022, desde <https://www.wwf.org.au/news/blogs/the-lifecycle-of-plastics>
- Wypych, G. (2012a). PHB poly(3-hydroxybutyrate). *Handbook of Polymers* (pp. 412-414). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-47-8.50124-7>
- Wypych, G. (2012b). PP polypropylene. *Handbook of Polymers* (pp. 479-486). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-47-8.50144-2>
- Wypych, G. (2016). HDPE high density polyethylene. *Handbook of Polymers* (pp. 156-163). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-92-8.50053-7>
- Zhou, H. & Wilkes, G. L. (1998). Orientation-dependent mechanical properties and deformation morphologies for uniaxially melt-extruded high-density polyethylene films having an initial stacked lamellar texture. *Journal of Materials Science*, 33(2), 287-303. <https://doi.org/10.1023/A:1004351209140>
- Zhu, X., Guo, Z., Cen, W. & Mao, B. (2011). Ethylene Polymerization Using Improved Polyethylene Catalyst. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 19(1), 52-56. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(09\)60176-2](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(09)60176-2)



Figura 100: Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas HDPE utilizando la marca como referencia para medición de desplazamiento

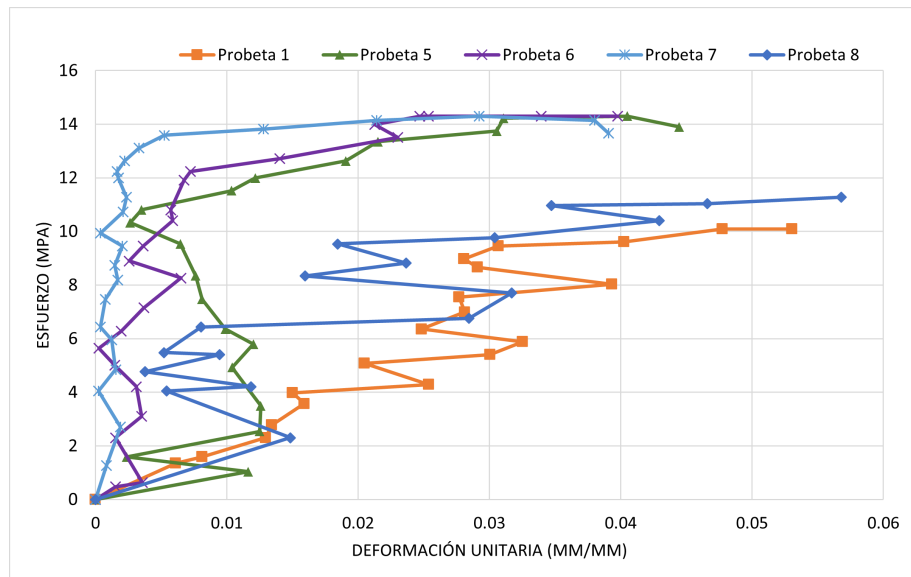


Figura 101: Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas PP utilizando la marca como referencia para medición de desplazamiento

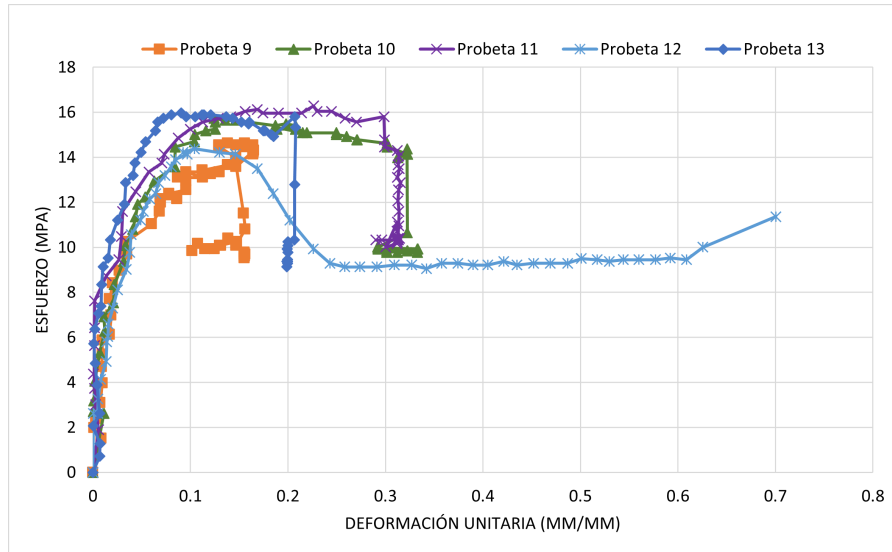


Figura 102: Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas 1, 3 y 6 de PP utilizando la mordaza móvil como objeto de medición de posición

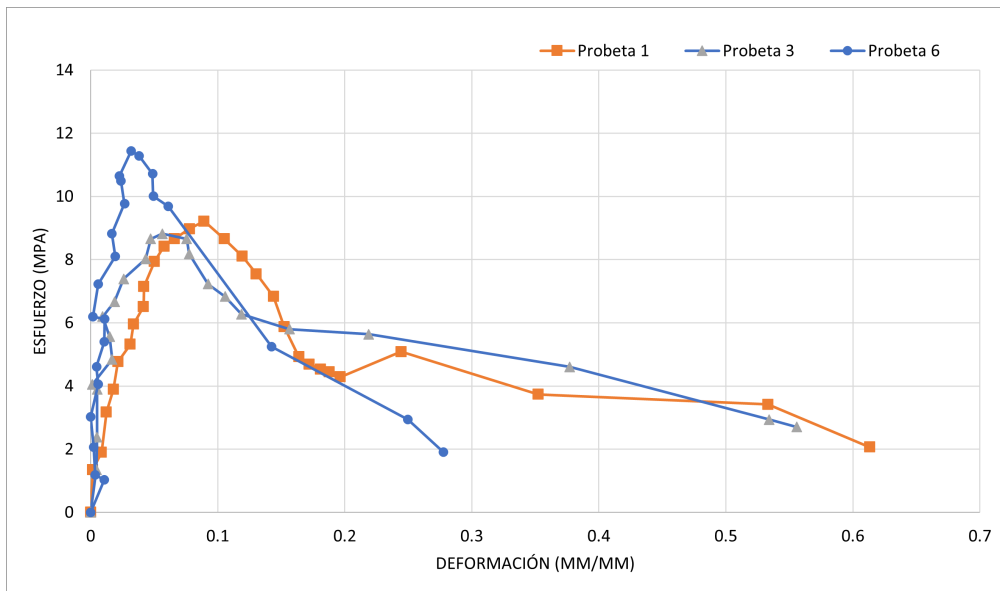


Figura 103: Región elástica de gráfica esfuerzo-deformación de probetas de PP utilizando la marca como referencia para medición de desplazamiento

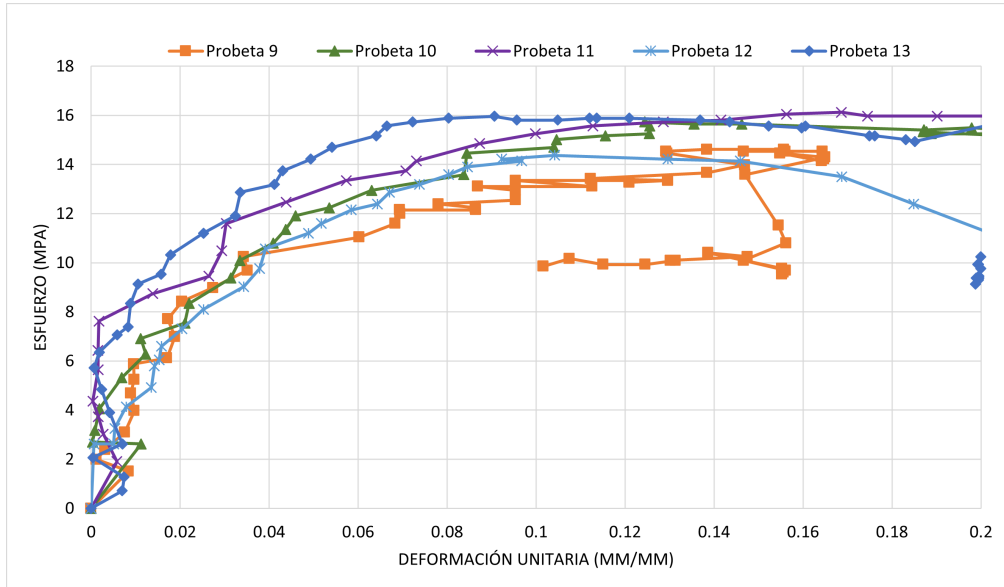


Figura 104: Región elástica de gráfica esfuerzo-deformación de probetas de PP utilizando la mordaza móvil como referencia para medición de desplazamiento

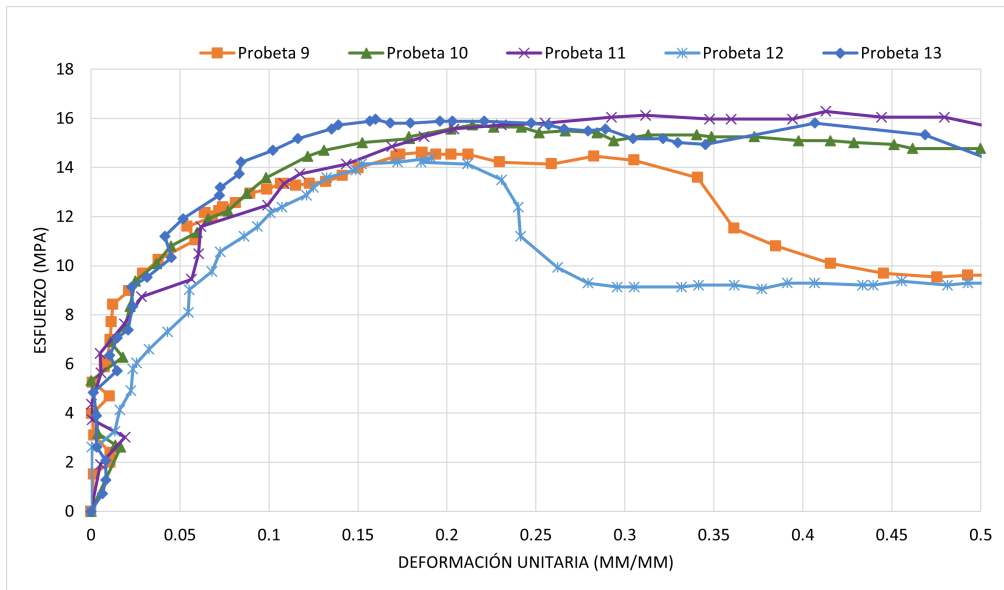


Figura 105: Gráfica deformación-tiempo de probeta 1 de HDPE

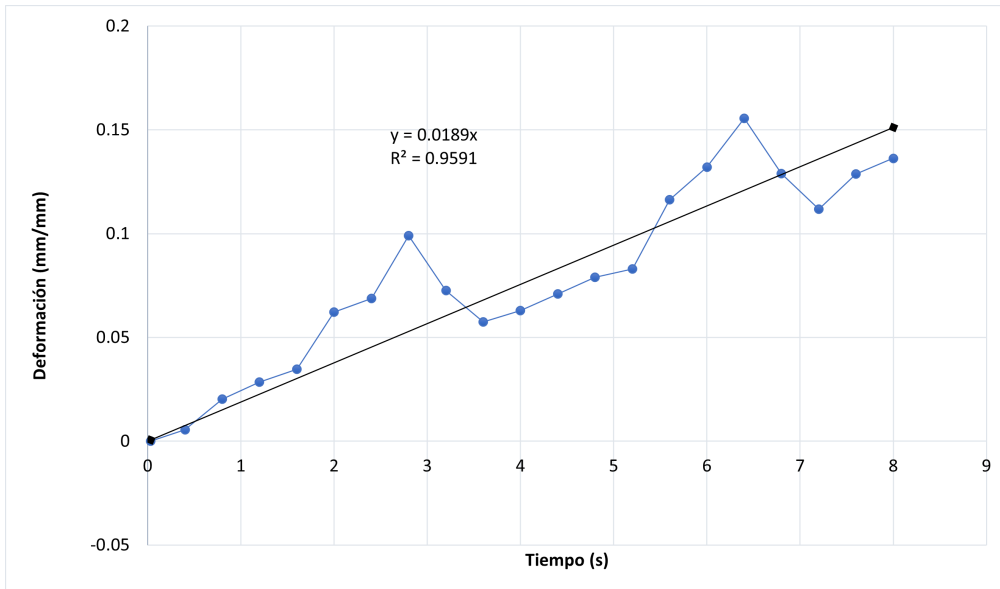


Figura 106: Gráfica deformación-tiempo de probeta 5 de HDPE

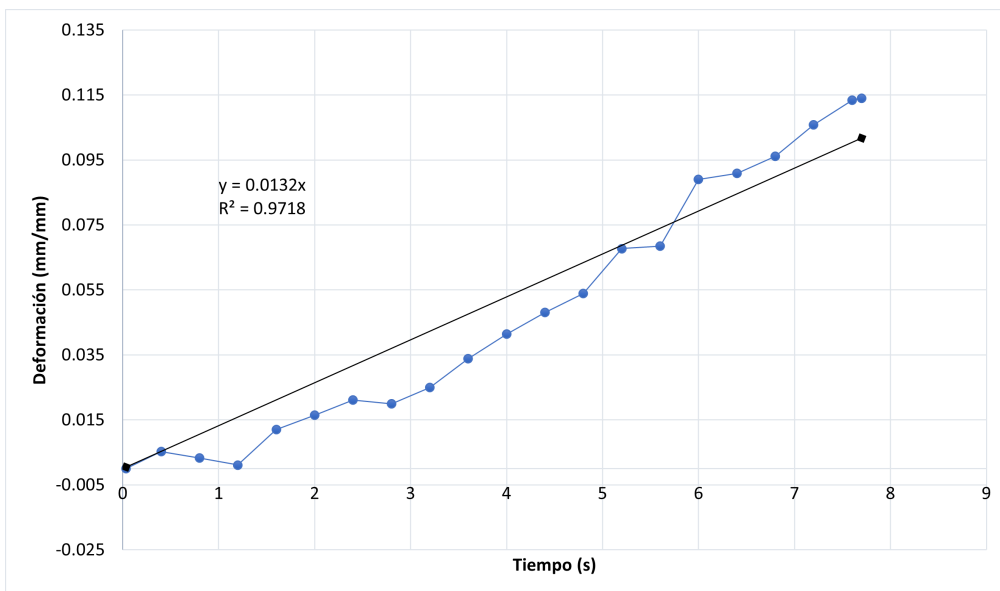


Figura 107: Gráfica deformación-tiempo de probeta 7 de HDPE

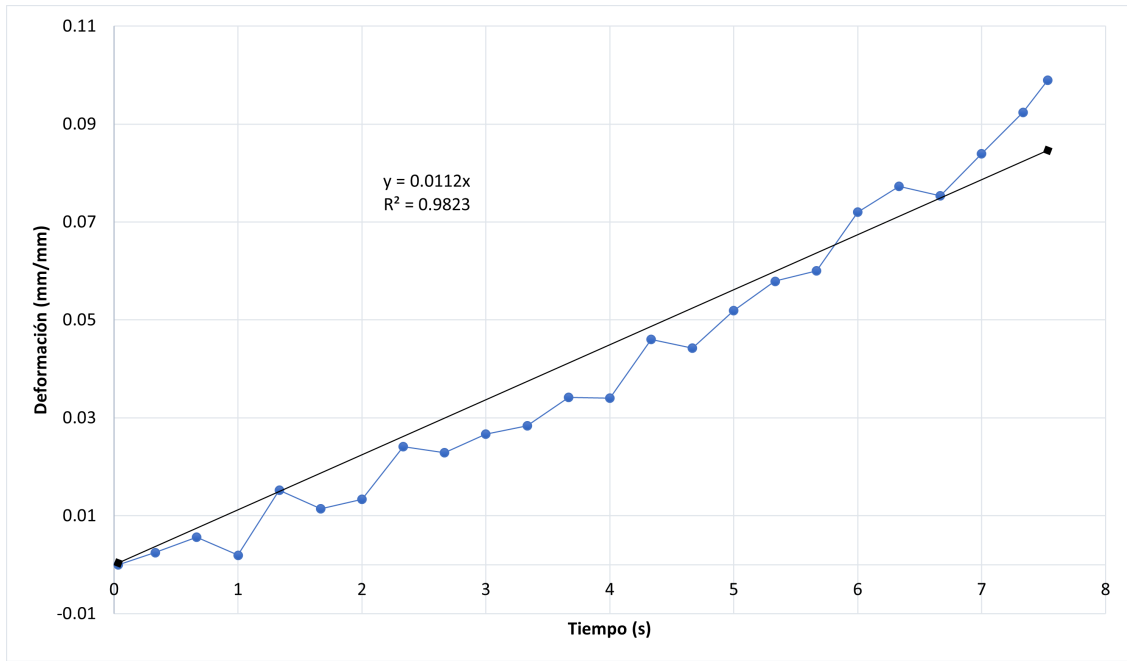


Figura 108: Gráfica deformación-tiempo de probeta 8 de HDPE

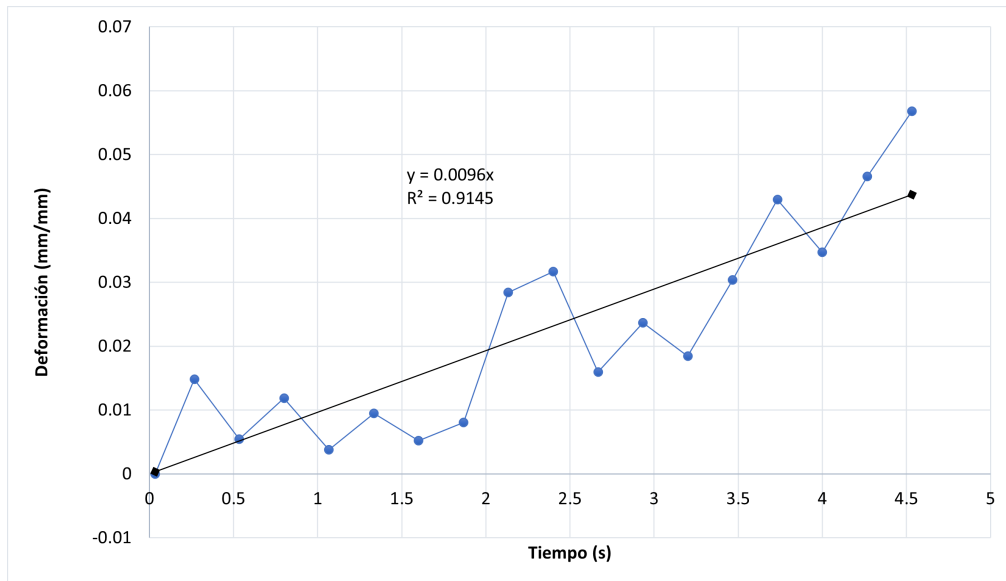


Figura 109: Gráfica deformación-tiempo de probeta 1 de PP

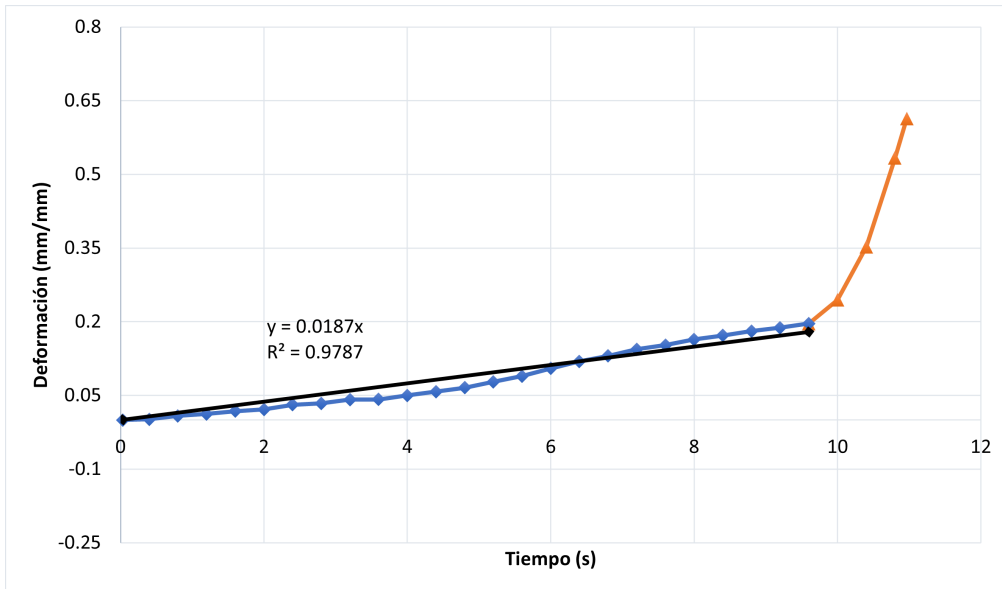


Figura 110: Gráfica deformación-tiempo de probeta 3 de PP

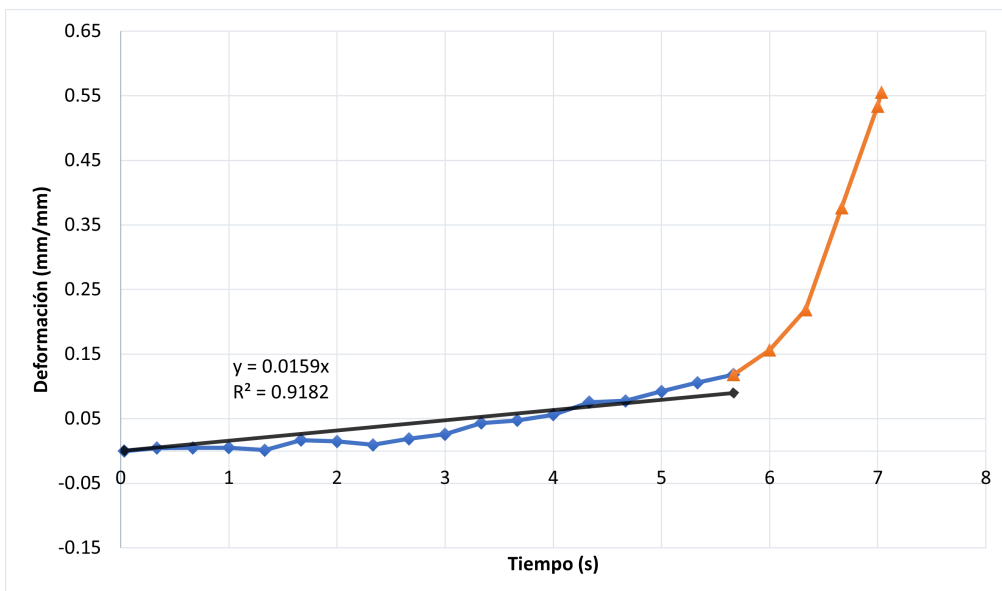


Figura 111: Gráfica deformación-tiempo de probeta 6 de PP

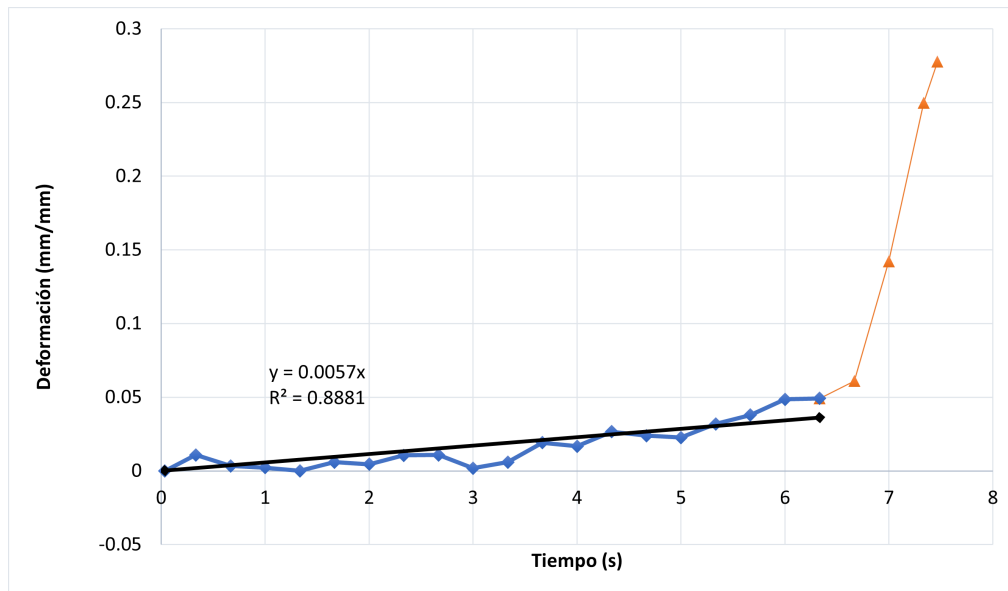


Figura 112: Gráfica deformación-tiempo de probeta 9 de PP

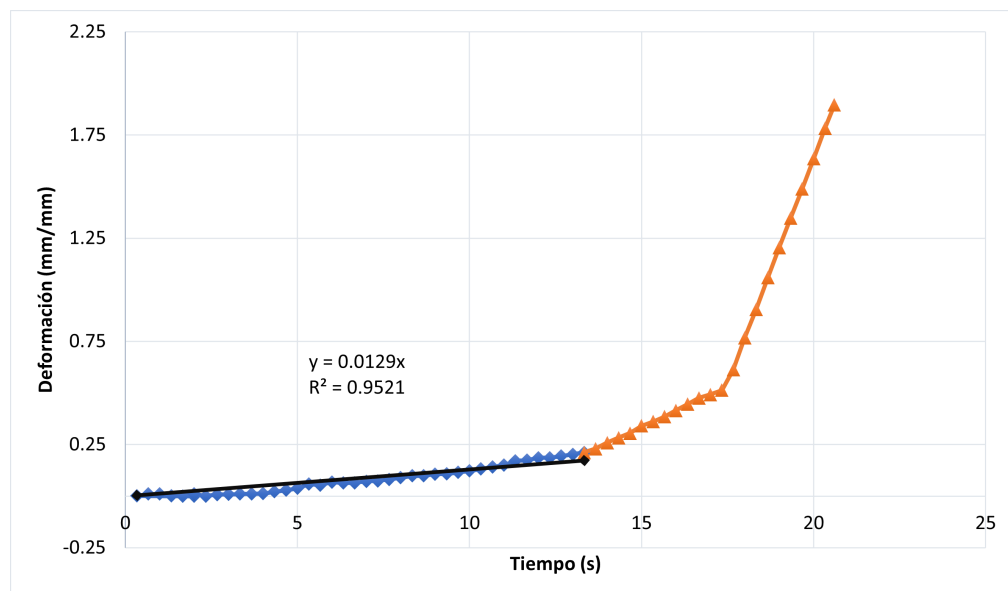


Figura 113: Gráfica deformación-tiempo de probeta 11 de PP

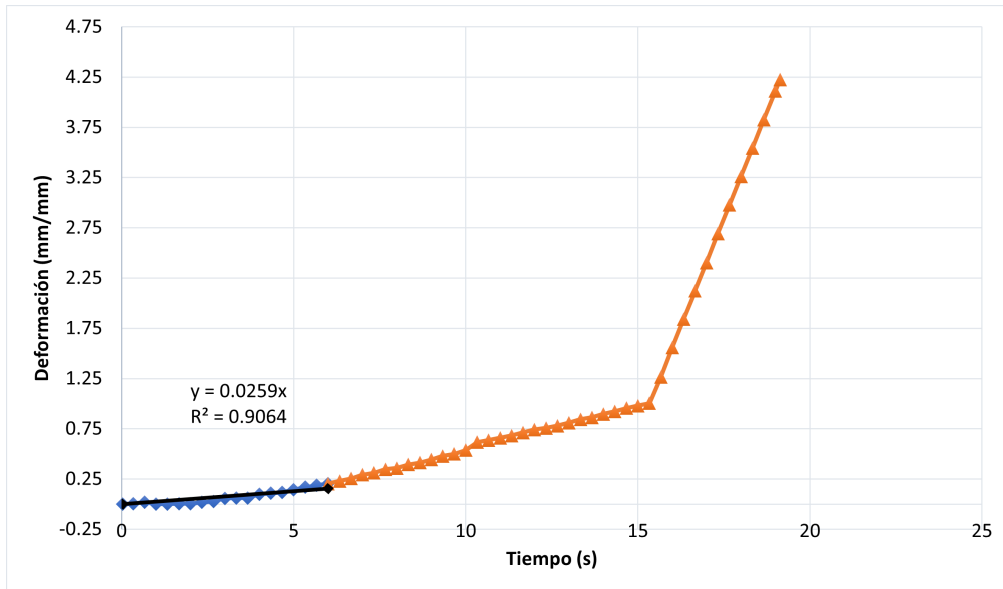


Figura 114: Gráfica deformación-tiempo de probeta 12 de PP

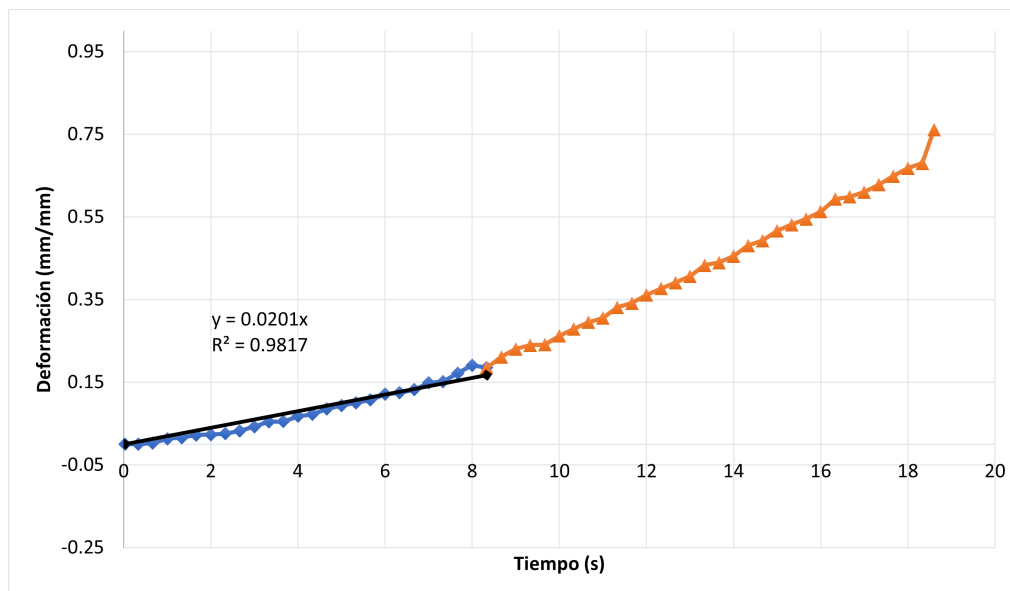


Figura 115: Gráfica deformación-tiempo de probeta 13 de PP

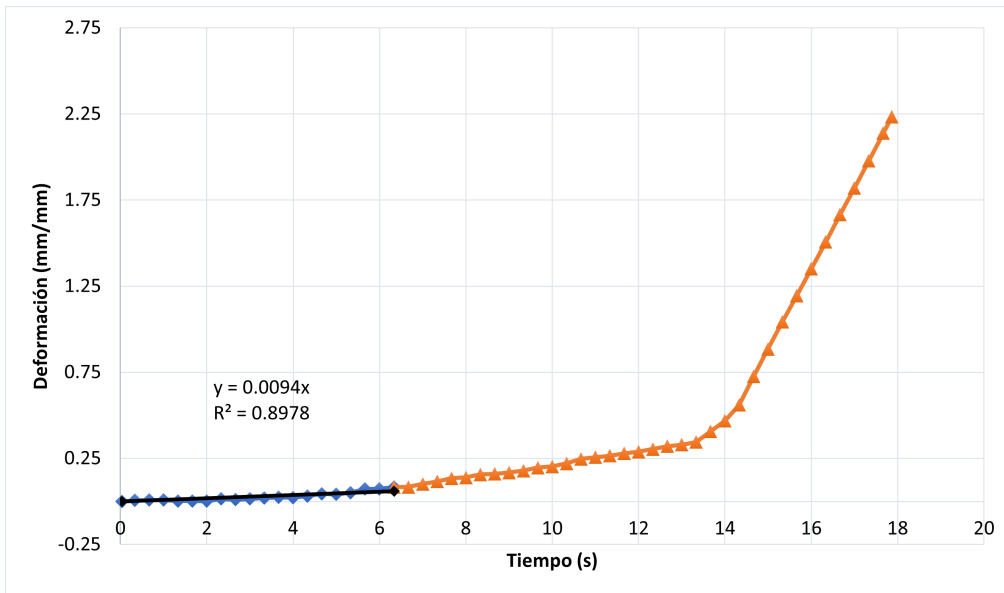


Figura 116: Pasos para obtener una línea de tendencia en Excel 365

The screenshot displays the Excel 365 interface with a chart titled 'Probeta 7'. The chart shows a scatter plot of data points with a blue linear trendline. The equation  $y = 0.0112x$  and  $R^2 = 0.9823$  are displayed on the chart. The following steps are highlighted with red boxes and numbers:

- 1:** Click 'Add Chart Element' in the Chart Design ribbon.
- 2:** Select 'Trendline' from the dropdown menu.
- 3:** Choose 'Linear' as the trendline type.
- 4:** Click 'Format Trendline' to open the task pane.
- 5:** In the 'Format Trendline' task pane, under 'Trendline Options', select 'Linear'.
- 6:** Check the boxes for 'Set Intercept', 'Display Equation on chart', and 'Display R-squared value on chart'.

The background spreadsheet shows the following data:

Time (s)	Deformation (mm/mm)
0	0.0033333
1	0.0333333
2	0.00248
3	1.27092
4	0.666667
5	0.005604
6	2.700706
7	39
8	4.051059
9	32
10	4.845384
11	88
12	5.95744
13	29
14	6.434035
15	42
16	7.466658
17	58
18	8.18155
19	85
20	8.737578
21	97
22	9.452471
23	120
24	4
25	0.033994
26	10.72339
27	4.333333
28	0.046022
29	11.27942
30	4.666667
31	0.044251
32	11.99431
33	150
34	5
35	0.051866
36	12.23261
37	5.333333
38	0.057889
39	12.62977
40	5.666667
41	0.06003
42	13.10637
43	6.333333
44	0.077281
45	13.82126
46	6.666667
47	0.075366
48	14.13899
49	210
50	7
51	0.08396
52	14.29786
53	220
54	7.333333
55	0.092382
56	14.13899
57	226
58	7.533333
59	0.098959
60	13.66239