



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS  
DEL POLIETILENO REPROCESADO”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA

**ADRIÁN MANCILLA VELASCO**

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. UBALDO EDUARDO MÁRQUEZ AMADOR



Ciudad Universitaria, México D.F., Abril 2013

# ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLIETILENO REPROCESADO

## ÍNDICE

<b>OBJETIVO</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>Capítulo 1. ANTECEDENTES</b> .....	3
<b>Capítulo 2. EL PROCESO DE EXTRUSIÓN</b> .....	4
2.1 Descripción.....	4
2.2 Componentes de una Máquina Extrusora.....	4
2.3 Parámetros del Proceso.....	10
2.4 Análisis del Flujo Volumétrico.....	11
<b>Capítulo 3. EXTRUSIÓN DEL PERFIL</b>	
<b>Y ENSAYO DE TRACCIÓN</b> .....	14
3.1 Equipo Utilizado.....	14
3.2 El Dado.....	15
3.3 Producción de los Perfiles.....	17
3.4 El Perfil.....	21
3.5 Aplicaciones del "BLOK".....	22
3.6 Ensayo de tracción.....	24
3.7 Deformación.....	25
3.8 Esfuerzo de Cedencia.....	26
3.9 Resistencia a la tracción.....	26
3.10 Ductilidad.....	27

3.11 Módulo de elasticidad.....	27
<b>Capítulo 4. EXPERIMENTACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS.....</b>	<b>28</b>
4.1 Descripción de los casos para el análisis.....	28
4.2 Etapas del desarrollo experimental.....	29
<b>Capítulo 5. RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
5.1 Parámetros de los Casos 1 y 2.....	31
5.2 Evaluación de las Propiedades Mecánicas.....	32
<b>Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
6.1 Caso 1.....	42
6.2 Caso 2.....	43
<b>Capítulo 7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>

# **ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLIETILENO REPROCESADO**

## **OBJETIVO**

Analizar las principales propiedades mecánicas, obtenidas por medio del ensayo de tracción, de un perfil de polietileno de alta densidad de origen reciclado y extruido bajo diferentes parámetros, para determinar las condiciones de procesamiento que proporcionen las mejores propiedades mecánicas.

## **INTRODUCCIÓN**

Siendo los parámetros de extrusión el objeto de estudio, se empieza por describir el proceso de extrusión aplicado en los polímeros. Como son, las partes principales de una máquina extrusora y su respectivo funcionamiento.

Se analiza el flujo del polímero fundido, durante el proceso de extrusión y se evalúan las principales variables del proceso.

Se definen los pasos que se llevan a cabo en la producción del perfil en estudio, características del equipo extrusor así como las características del perfil obtenido y sus aplicaciones.

Se hace la descripción del ensayo de tracción del cual se obtendrán las principales propiedades mecánicas del perfil extruido.

Se describen los casos que se implementaron para llevar a cabo el análisis de las propiedades del material en estudio, se describen las etapas del desarrollo experimental del presente trabajo, y se definen las propiedades involucradas en el análisis del procesamiento.

Finalmente, con los resultados obtenidos se analizan los parámetros de extrusión (temperatura y velocidad de giro del tornillo extrusor) y su efecto sobre las propiedades mecánicas para el desarrollo de un producto con mejores propiedades.

Todo el trabajo desarrollado para el análisis en cuestión, desde el inicio de la producción, el proceso de extrusión y la obtención del producto final, se llevó a cabo en la empresa denominada GRUPO GYSAPOL S.A. de C.V., la cual proporcionó en sus instalaciones todo el equipo, materia prima así como toda la información necesaria para llevar a cabo dicho estudio.

GRUPO GYSAPOL es una empresa 100% mexicana dedicada a la extrusión de diferentes perfiles de polietileno de alta densidad de origen reprocesado o reciclado.

Existe un interés constante y gran empeño por parte de la empresa para mejorar tanto la calidad de sus productos como el proceso de extrusión que utiliza. Por tal razón, se lleva a cabo este análisis y así poder determinar las condiciones de procesamiento que proporcionen las mejores propiedades mecánicas de los perfiles en cuestión.

Los perfiles de polietileno reciclado que produce el GRUPO GYSAPOL pueden ser utilizados como sustitutos de algunos productos de madera como tablas, vigas, etc. con lo cual se busca reducir el consumo de este recurso natural.

Tomando en cuenta las diversas aplicaciones que pueden tener dichos perfiles, es necesario considerar las propiedades mecánicas que se pueden obtener de los ensayos de tracción, compresión, flexión e impacto. El presente trabajo sólo se limita al ensayo de tracción quedando la posibilidad de que se realicen estudios con los demás ensayos.

## Capítulo 1. ANTECEDENTES

Los primeros vestigios de la extrusión se tienen del año 1845 para la fabricación de tubos y en 1879 se patenta el primer extrusor, ya con diseños adecuados y con muchos de los elementos que tienen las extrusoras actuales. Desde entonces, y sobre todo, en los últimos 50 años se han caracterizado por la mejora tecnológica de los equipos para encaminarlos al perfeccionamiento, utilizando los avances que en equipos eléctricos y electrónicos se han desarrollado a una velocidad enorme, teniendo en la actualidad equipos dotados con motores de alta eficiencia y confiabilidad; así como controles térmicos y de velocidad de alta precisión, sumado al uso de mejores aleaciones y tratamientos termomecánicos que confieren gran dureza y resistencia a los componentes mecánicos del extrusor.

La extrusión es un proceso de transformación que presenta alta productividad y es uno de los procesos más comunes para la obtención de formas plásticas con altos volúmenes de consumo. Es uno de los primeros procesos que nacen con la necesidad para encontrar métodos de producción de artículos de plástico con una gran variedad de geometrías, consistentes en propiedades, características y con bajos costos. Su operación es de las más sencillas, ya que una vez establecidas las condiciones de operación, el proceso opera en forma automática con una alta productividad, en comparación con otros procesos como inyección, soplado o termoformado, y con una buena flexibilidad sin necesidad de hacer inversiones mayores.

El proceso de extrusión se controla por medio de los parámetros de temperatura, flujo volumétrico y presión, los cuales tienen un efecto en las propiedades mecánicas del producto final.

Además, la materia prima por sí misma es otra variable en el proceso de conformado, es decir, debido a que se trata de un material reciclado se pueden tener impurezas, o un proceso deficiente en el triturado del polietileno lo que implica tener partículas muy grandes que pueden pasar por todo el proceso de extrusión sin haber llegado al punto de fusión, de tal forma que nunca se integra al material fundido. Todo lo anterior puede ocasionar un producto final con poca homogeneidad, factor que también afecta las propiedades mecánicas y, en consecuencia, la calidad del producto. Pero solamente se analizarán las propiedades mecánicas con respecto a los parámetros de procesamiento mencionados.

## Capítulo 2. EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

En este capítulo se describe todo el proceso de extrusión aplicado a los polímeros, las partes principales de una máquina extrusora y su respectiva función. Se analizará el flujo del polímero fundido durante el proceso de extrusión y se hará mención de los principales parámetros del proceso.

### 2.1 Descripción.

La extrusión es un proceso de compresión dentro de una cámara o cilindro, donde un polímero se calienta hasta el punto de fusión y, por medio de un tornillo rotatorio, es forzado a fluir a través de un orificio, hecho en un dado, a fin de obtener un producto continuo, cuya sección transversal es constante en toda su longitud con la forma determinada por el dado.

Como proceso para dar forma a polímeros, se emplea mucho para termoplásticos y elastómeros para producir artículos en grandes cantidades tales como tubería, ductos, mangueras y perfiles estructurales (tales como, molduras para ventanas y puertas), hojas y película, filamentos continuos, así como recubrimientos para alambres y cables eléctricos [8].

### 2.2 Componentes de una Máquina Extrusora.

- *Reductor de velocidad.* El motor del extrusor proporciona la fuerza motriz que requiere el husillo, pero a una velocidad mayor de la necesaria para procesar el material y con un torque relativamente bajo con respecto a lo que la viscosidad del plástico demanda. Por lo que se utilizan los reductores de velocidad o caja de engranes, lo que permite incrementar proporcionalmente el torque del eje motriz del husillo.
  
- *Tolva.* La tolva es el depósito de materia prima en donde se colocan los pelets de plástico para la alimentación continua del extrusor. Debe tener dimensiones adecuadas para ser completamente funcional; los diseños mal planeados, principalmente en los ángulos de bajada de material, pueden provocar estancamientos y paros en la producción.

- **Cilindro.** Es la cámara metálica que contiene al husillo y constituye el cuerpo principal de la máquina. La cámara debe tener compatibilidad y resistencia al plástico que esté procesando, es decir, ser de un metal con la dureza necesaria para reducir al mínimo cualquier desgaste. Para lograr esto se usan aceros de baja aleación (ej. AISI 4140) y aceros inoxidable (ej. 304 y 410). A los materiales se les da un tratamiento térmico, o endurecimiento superficial, para lograr las propiedades requeridas.

A lo largo del cilindro se cuenta con resistencias eléctricas que proporcionan una parte de la energía térmica que el material requiere para ser fundido.

Al arranque de la máquina, el 100% de la energía para fundir el plástico proviene de estas resistencias eléctricas, pero una vez que el sistema llega a una operación estable, un 40%, o más, de la energía de fusión proviene de la fricción del husillo contra el material y el resto es proporcionado por las resistencias.

- **Husillo.** El husillo, o tornillo rotatorio, es el elemento que traslada al polímero fundido a lo largo del cilindro. Éste ha evolucionado ampliamente gracias al estudio sobre el comportamiento del flujo de los polímeros, por lo que se considera la pieza más importante en la extrusión.

Los diseños de los husillos varían en función de las propiedades de flujo del polímero que se desee procesar, o de la productividad que se espera de la extrusora. Las partes que lo conforman y sus principales características geométricas son:

- **Paletas.** Las paletas, hélices o cuerdas, se encuentran de un extremo al otro, siendo los impulsores del material a través del extrusor. Sus características geométricas importantes son: la profundidad del filete en la zona de alimentación, la profundidad del filete en la zona de descarga y la relación de compresión.
- **Longitud.** Funcionalmente al aumentar la longitud del husillo y, consecuentemente, la del extrusor, también aumenta la capacidad de plastificación y la productividad de la máquina. Otro aspecto importante es que, al aumentar la dimensión del husillo se aumenta la calidad de mezclado y homogeneización del material.



- **Diámetro.** Es la dimensión que influye directamente en la capacidad de producción de la máquina, generalmente, crece en proporción con la longitud del equipo, como ya se mencionó. A diámetros mayores, la capacidad en kg/hr es mayor.
- **Plato rompedor.** Un elemento sencillo y al mismo tiempo importante en el proceso de extrusión, es el plato rompedor perforado que se coloca a la salida del extrusor antes de la posición del dado.

Consiste en una placa de considerable espesor, robusta, con una serie de perforaciones circulares por donde entra el material y se separa para volver a unirse en el otro extremo del plato.

Tiene dos funciones básicas. La primera, es detener el flujo en espiral que tiene el material plástico a la salida del extrusor y evitar deformaciones en el producto por la inercia del movimiento helicoidal que el husillo imparte a la masa plástica. La segunda función es, servir de soporte para las mallas de filtrado que se colocan para evitar el paso de materiales extraños que no se funden.

- **Mallas.** Antes de alcanzar el dado, el polímero fundido debe recibir un proceso de filtrado para eliminar cualquier impureza que se transporte con el material, como contaminaciones de materiales no plásticos, material carbonizado, resina sin fundir y otros. Es importante realizar esta eliminación de sólidos porque estos pueden estancarse en partes angostas que presentan algunos dados y obstruir el paso del material provocando desde marcas superficiales sobre el producto que causan mal aspecto y hasta paros en la producción por defectos mayores en la superficie del material extruido.

También, en procesos como los de reciclado, se utilizan sistemas de filtrado altamente eficientes para remover todos los materiales no plásticos que contaminan al producto terminado.

- **Dado.** El dado, o formador, es el elemento que define la geometría del producto. Su función principal es tomar el flujo de material plastificado que proviene del extrusor y moldearlo a su forma final.

- *Tina de enfriamiento.* A continuación del formador, o dado, se encuentra el sistema de enfriamiento, que tiene diferentes formas según el producto que se está manejando. En el caso más simple, consiste en una tina abierta con entrada y salida de agua para una circulación constante. Otros diseños constan de una cámara con rodillos y múltiples boquillas que esparcen agua constantemente sobre la tubería, misma que se acumula en el fondo para ser extraída, enviada a un sistema de enfriamiento y reciclada a la tina.

En las tuberías de diámetros pequeños y perfiles de sección transversal pequeña, el enfriamiento es más sencillo, porque la remoción de calor es relativamente más rápida. En la mayoría de estos casos solamente se requiere de algunas mangueras para aplicar flujos de agua abundantes durante pequeños tramos.

En contraste, para tuberías de gran espesor o perfiles de grandes áreas de sección transversal, el enfriamiento es muy complicado, ya que mientras la superficie externa pierde rápidamente calor, el interior se puede encontrar casi a la temperatura de procesamiento. Por esta razón, las tinas de enfriamiento son muy largas para estas secciones, para tener el tiempo suficiente en que el calor se elimine de las capas internas.

Los dos componentes principales del extrusor son el tornillo y la cámara, o cilindro. El dado no es un componente del extrusor; es una herramienta especial que debe fabricarse para el perfil particular que se va a producir.

Es común que el diámetro interno de la cámara del extrusor ( $D$ ) varíe entre 25 y 150 mm. La longitud de la cámara ( $L$ ) es grande en relación con su diámetro, con relaciones  $L/D$  que, por lo general, están entre 10 y 30. Los valores más altos se emplean para materiales termoplásticos, en tanto que los valores  $L/D$  más bajos son para los elastómeros.

En el extremo opuesto al dado, se localiza una tolva que contiene el material que se alimenta. Los pelets se alimentan por gravedad al tornillo rotatorio, cuya rosca mueve al material a lo largo del cilindro.

Se utilizan calefactores eléctricos para iniciar la fundición de los pelets, después, la mezcla y el trabajo mecánico realizado al material generarán calor adicional, lo que lo mantiene fundido.

En ciertos casos, se suministra suficiente calor a través de la mezcla y con la acción cortante, de modo que no se requiere mucho calor externo.

En algunos casos la cámara debe enfriarse desde el exterior a fin de impedir el sobrecalentamiento del polímero.

El material se hace avanzar a lo largo del barril hacia la abertura del dado, por medio de la acción del tornillo extrusor. El tornillo tiene varias funciones y se divide en tres secciones que son: 1) **sección de alimentación**, en la que el material se mueve del punto de la tolva y recibe precalentamiento; 2) **sección de compresión**, en la que el polímero se transforma para adquirir consistencia líquida, se extrae del material fundido el aire atrapado entre los pelets y se comprime el material; y 3) **sección dosificadora**, en la que se homogeneiza al material fundido y se genera presión suficiente para hacerlo pasar a través de la abertura del dado.

En la figura 2.1. se pueden observar los componentes antes mencionados y las tres secciones del tornillo extrusor.

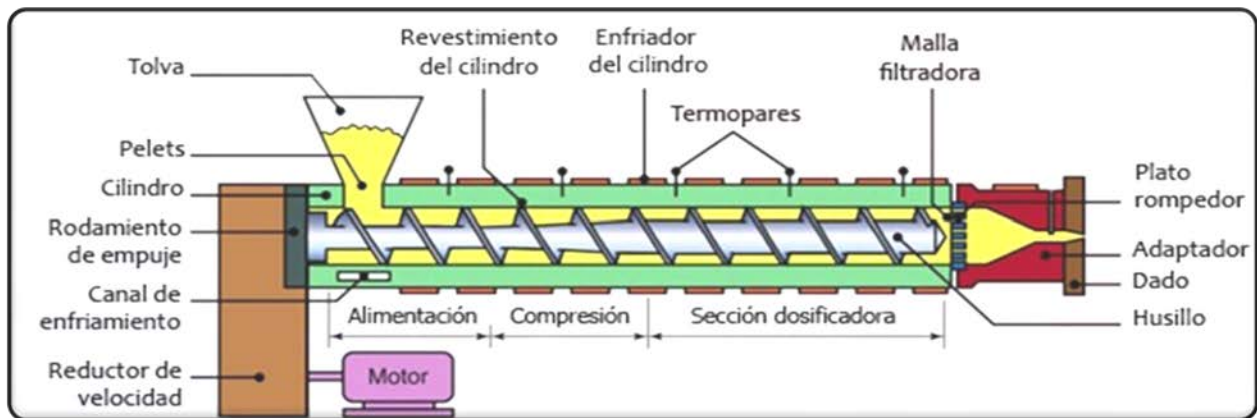


Fig. 2.1. Esquema de un extrusor de tornillo característico [9].

La operación del tornillo está determinada por su forma geométrica y velocidad de rotación.

El tornillo consiste en paletas con canales entre ellas por donde avanza el polímero fundido. El canal tiene un ancho  $w_c$  y una profundidad  $d_c$  (figura 2.2.).

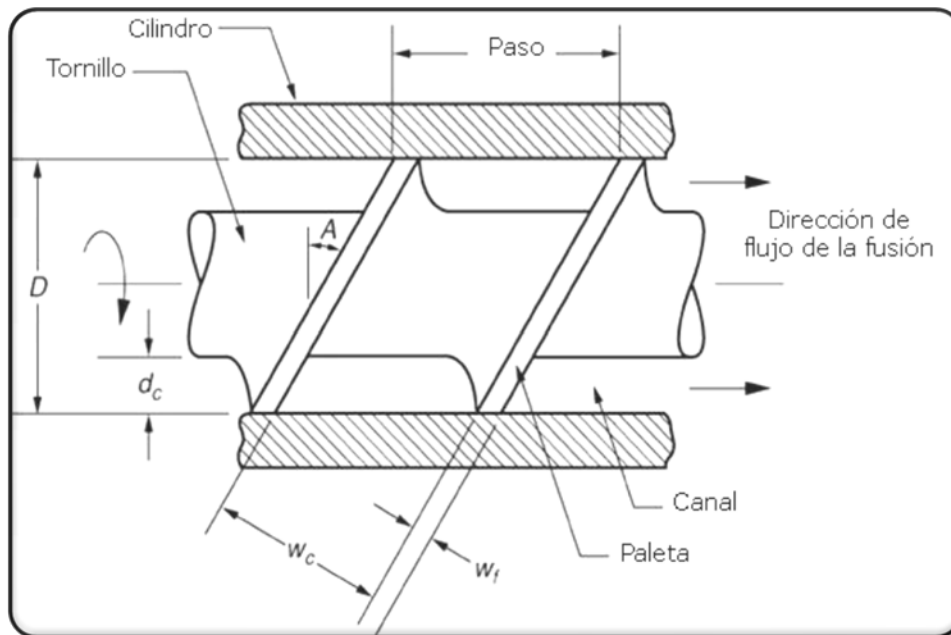


Fig. 2.2. Detalle de un tornillo extrusor dentro del cilindro [8].

Conforme el tornillo gira, las paletas empujan al material hacia adelante a través del canal, dentro del cilindro, del extremo de la tolva al dado.

Existe una separación muy pequeña entre el cilindro y el diámetro del tornillo (aprox. 0.05 mm). Este claro tiene como función limitar la fuga del material fundido a la parte posterior del canal.

La paleta tiene un ancho  $w_f$  y está fabricada de acero aleado y tratado, a fin de que resista el uso cuando gira y presiona contra el interior de la cámara.

El tornillo tiene un paso entre cuerdas cuyo valor, por lo general, se acerca al diámetro  $D$ .

El ángulo de paleta,  $A$ , es el de la hélice del tornillo, y se determina con la relación.

$$\tan A = \frac{\text{paso}}{\pi D} \dots\dots\dots (2.1)$$

El incremento de la presión aplicada al polímero fundido en las tres secciones de la cámara está determinado en mucho por la profundidad del canal  $d_c$ .

En la sección de alimentación  $d_c$  es relativamente grande, para permitir la entrada de cantidades importantes de polímero granular al cilindro.

En la sección de compresión,  $d_c$  se reduce en forma gradual, con lo que se aplica mayor presión sobre el polímero conforme se funde.

En la sección de dosificación,  $d_c$  se reduce y la presión alcanza un máximo según se restringe el flujo por el dado. Aunque el diseño óptimo del tornillo es distinto para cada tipo de material, en la práctica es común usar tornillos de propósito general. Estos diseños evitan la necesidad de hacer cambios frecuentes de tornillo, lo que resultaría en una gran pérdida del tiempo de trabajo del equipo.

### 2.3 Parámetros del Proceso.

En este proceso existen una serie muy específica y particular de parámetros a controlar para obtener la calidad del producto deseada. En lo correspondiente a la cámara de extrusión, las variables más importantes son:

- Temperatura del material.
- Temperatura de las resistencias.
- Tipo de material.
- Velocidad de giro del tornillo.
- Presión generada por el plástico fundido.
- Flujo volumétrico del material.

Cada uno de estos parámetros tiene un efecto importante en la velocidad de producción y en las propiedades mecánicas que definen la calidad del producto obtenido. De los cuales, sólo se analizarán la temperatura del material en la sección de compresión y la velocidad de giro del tornillo.

#### 2.4 Análisis del Flujo Volumétrico.

Al girar el tornillo dentro del cilindro, se obliga al polímero fundido a moverse en dirección al dado. El principal mecanismo de transporte es el flujo por arrastre, el cual resulta de la fricción entre el líquido viscoso y las dos superficies opuestas que se mueven una con respecto a la otra: el cilindro estacionario y el tornillo giratorio. Este arreglo puede parecerse al flujo de fluido que ocurre entre una placa estacionaria y una placa móvil separada por un líquido viscoso [8], como se muestra en la figura 2.3.

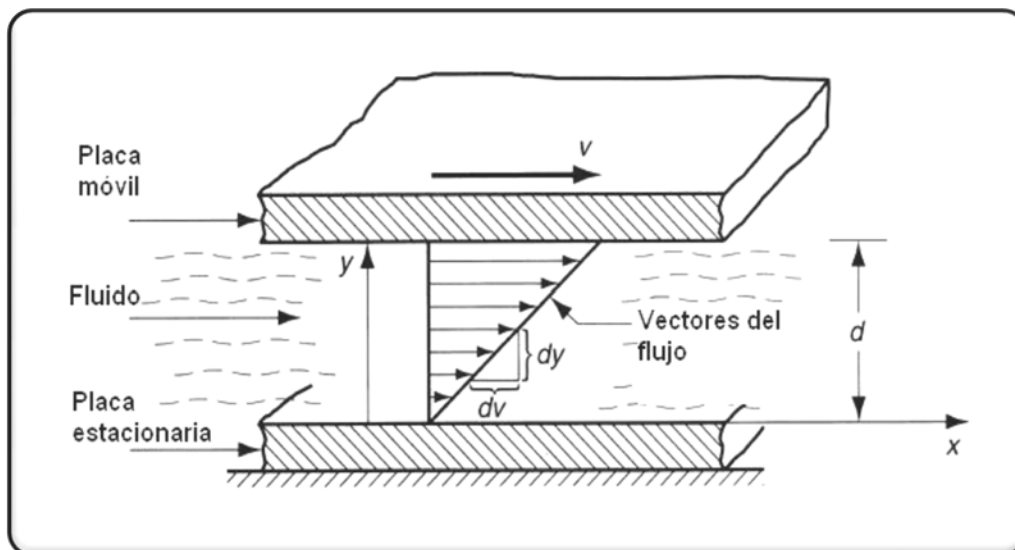


Fig. 2.3. Flujo de fluido entre dos placas paralelas.

La ecuación que describe el flujo volumétrico en este caso está dada por la siguiente expresión:

$$Q = 0.5vdw \dots\dots\dots (2.2)$$

donde  $Q$  es la velocidad de flujo volumétrico por arrastre [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ].  
 $v$  es la velocidad de la placa móvil [ $\text{cm}/\text{s}$ ].  
 $d$  es la distancia entre placas [ $\text{cm}$ ].  
 $w$  es el ancho de las placas perpendiculares en dirección a la velocidad [ $\text{cm}$ ].

Estos parámetros se pueden comparar a aquellos dentro del cilindro extrusor mediante las siguientes expresiones:

$$v = \pi DN \cos A \dots\dots\dots (2.3)$$

$$d = d_c \dots\dots\dots (2.4)$$

$$w = \pi D \text{sen} A \dots\dots\dots (2.5)$$

donde  $D$  es el diámetro de la paleta del tornillo [ $\text{cm}$ ].  
 $N$  es la velocidad de giro del tornillo [ $\text{rev}/\text{s}$ ].  
 $d_c$  es la profundidad del canal del tornillo [ $\text{cm}$ ].  
 $w_c$  es el ancho del canal del tornillo [ $\text{cm}$ ].  
 $A$  es el ángulo de la paleta [ $^\circ$ ].

Sustituyendo y simplificando las expresiones (2.3), (2.4) y (2.5) en la ecuación (2.2), se obtiene:

$$Q_A = 0.5\pi^2 D^2 N d_c \text{sen} A \cos A \dots\dots\dots (2.6)$$

Esta ecuación representa una descripción de la velocidad del flujo del material fundido dentro del cilindro, en la cual se considera que no existe un contra flujo que se oponga al movimiento del fluido.

Para determinar el contra flujo que se opone al movimiento del fluido, se toman en cuenta las dimensiones del tornillo, la viscosidad del polímero fundido y la variación de la presión a lo largo del cilindro.

Todo esto se puede resumir en la siguiente ecuación:

$$Q_c = \frac{p \pi D d_c^3 \text{sen}^2 A}{12 \eta L} \dots\dots\dots (2.7)$$

donde  $Q_c$  es el contra flujo [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ].

$\eta$  es la viscosidad del polímero fundido [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ].

$p$  es la presión en el cilindro [ $\text{Pa}$ ].

$L$  es la longitud del cilindro [ $\text{cm}$ ].

Entonces, el flujo resultante se obtiene de la diferencia entre el flujo de arrastre  $Q_A$  y el contra flujo  $Q_C$  [8]:

$$Q = 0.5 \pi^2 D^2 N d_c \text{sen} A \cos A - \frac{p \pi D d_c^3 \text{sen}^2 A}{12 \eta L} \dots\dots\dots (2.8)$$

En esta expresión se involucran los principales parámetros del proceso mencionados en el punto 2.3.



## Capítulo 3. EXTRUSIÓN DEL PERFIL Y ENSAYO DE TRACCIÓN

En este capítulo se especifican las características del equipo extrusor, los pasos que se llevan a cabo para la producción del perfil en estudio, así como las características del perfil obtenido en las instalaciones del GRUPO GYSAPOL y algunas de sus aplicaciones.

También se hace la descripción del ensayo de tracción del cual se obtienen las propiedades mecánicas del perfil extruido y se definen las propiedades involucradas en el análisis.

### 3.1 Equipo Utilizado.

En la figura 3.1. se muestra la máquina extrusora utilizada para la producción de los perfiles cuyas características principales son:

- Monohusillo con 6 zonas de calentamiento.
- Diámetro de husillo (D) de 12 [cm].
- Razón  $L/D = 33$ .
- Profundidad de canal ( $d_c$ ) de 0.6 [cm].
- Ángulo de paleta (A) de  $20^\circ$ .
- Longitud de la cámara (L) de 400 [cm].
- Potencia de 75 [kW].
- Enfriada con agua.
- Capacidad máxima de producción 120 [Kg/h].



Fig. 3.1. Máquina extrusora utilizada para la obtención de los perfiles en estudio.

### 3.2 El Dado.

El dado utilizado para la obtención de los perfiles consta de una sección transversal rectangular con una sección longitudinal mucho mayor con respecto a ésta. Tal como se puede ver en la figura 3.2.

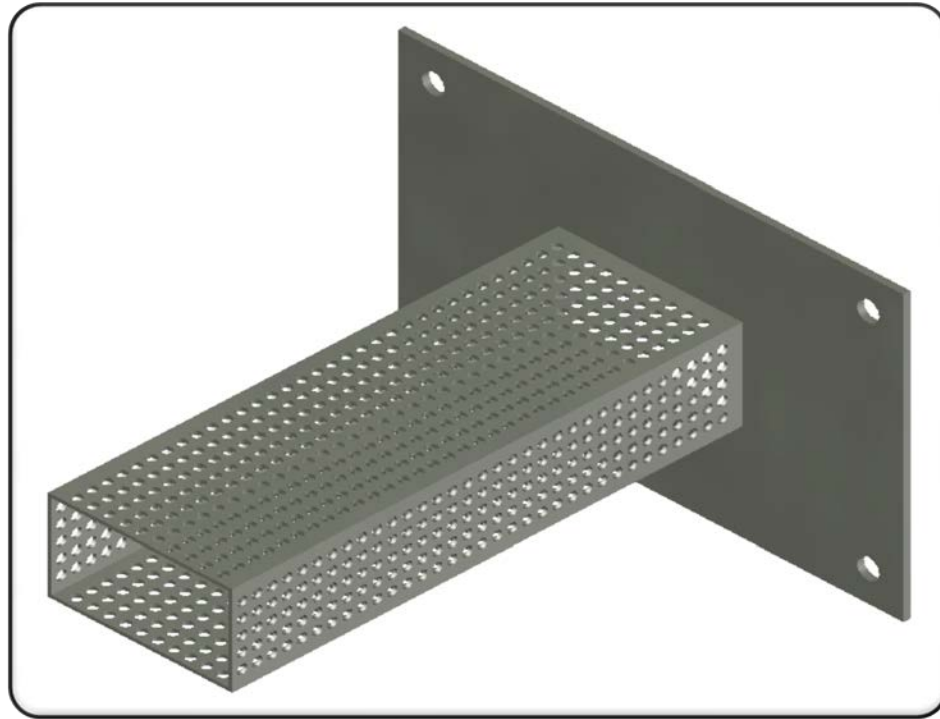


Fig. 3.2. Vista isométrica del Formador utilizado en la obtención de los perfiles en estudio.

Las dimensiones del formador se describen en las figuras 3.3 y 3.4:

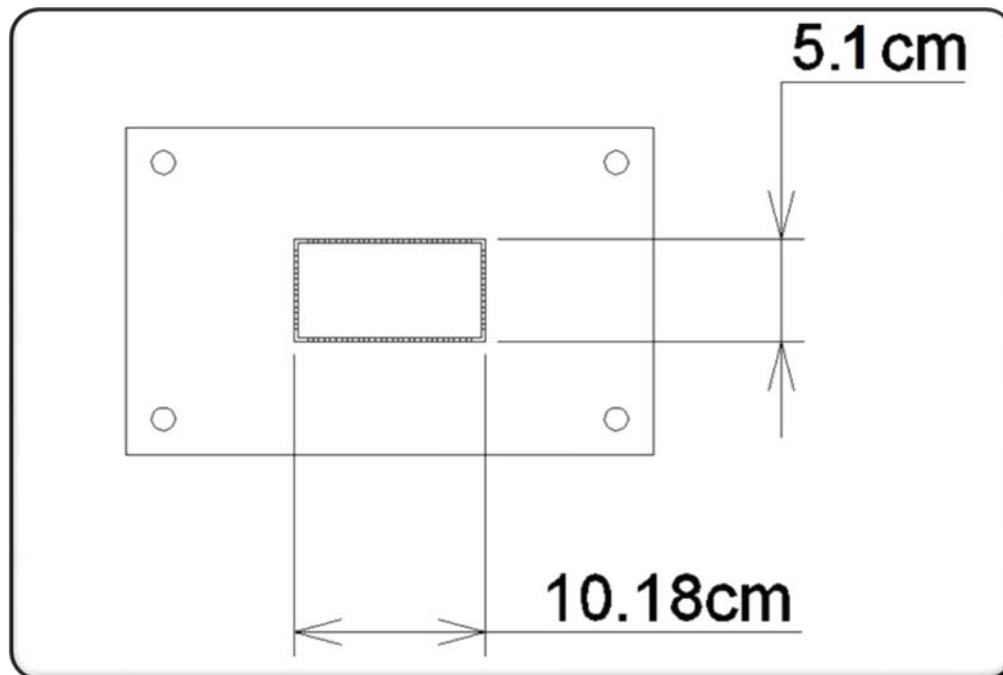


Fig. 3.3. Vista frontal del Formador utilizado.

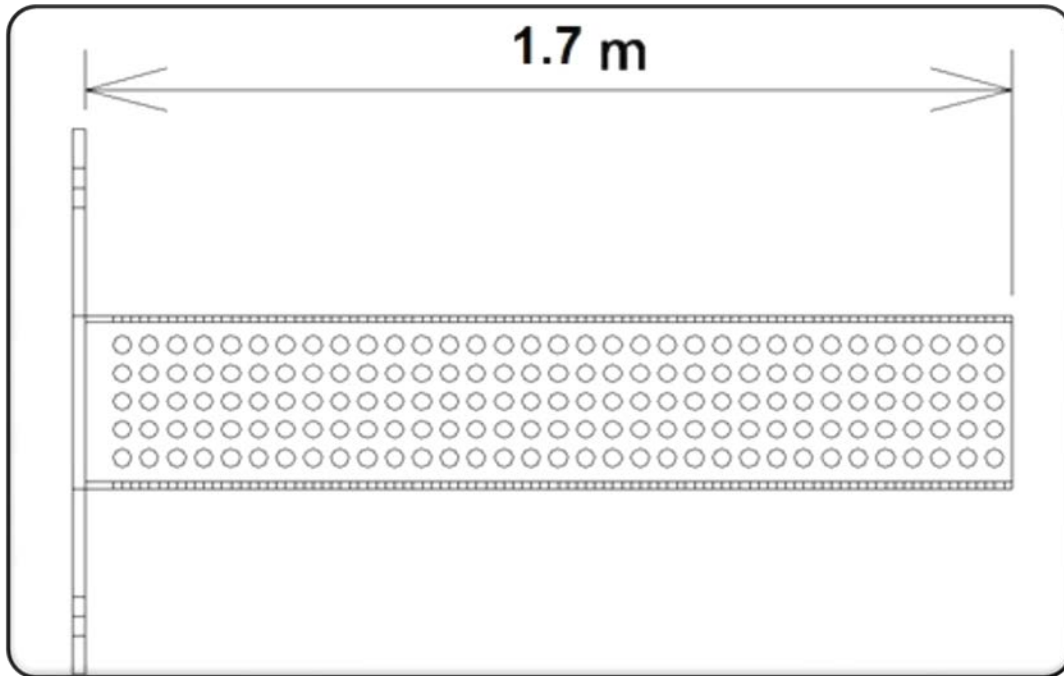


Fig. 3.4. Vista superior del Formador utilizado.

### 3.3 Producción de los Perfiles.

La producción de los perfiles, que serán analizados, consiste en las siguientes etapas:

**1. Recolección de la materia prima.** Consiste en concentrar residuos de polietileno de alta densidad que se generan en la misma planta durante la fabricación de otros productos y, también, se lleva a cabo la recolección de este material de otras fuentes, como otras fábricas que procesen polietileno de alta densidad.

**2. Trituración.** Los residuos son triturados para obtener pequeños granos que facilitan la mezcla entre el mismo polietileno y los aditivos, posteriormente, facilitará su fundición para iniciar el proceso de extrusión.

En la figura 3.5. se pueden observar los pequeños granos producto de la trituración.



Fig. 3.5. Material triturado.

**3. Secado.** Después de la trituración, la materia prima se somete a un proceso de secado con aire caliente en una tolva, figura 3.6, para eliminar el exceso de humedad que pueda tener por una exposición a la lluvia, o bien, si en algún momento el material tuvo contacto con alguna fuente de humedad.

Con el secado, se evitan los choques térmicos en el material cuando inicie su fundición.



Fig. 3.6. Equipo de secado con aire caliente.

**4. Aditivos.** Al finalizar las etapas de trituración y secado, se añaden al material los aditivos y pigmentos necesarios que pueden mejorar su procesamiento como es el caso de los plastificantes, además se pueden agregar filtros UV y antioxidantes para mejorar la resistencia a la degradación por luz ultravioleta cuando el material queda expuesto al ambiente y también se pueden añadir pigmentos que solo le darán cierto color al producto final.

**5. Extrusión.** Cuando la mezcla del polietileno y los aditivos ya se tiene preparada, se inicia el proceso de extrusión.

Además, el dado es colocado dentro de una cámara barométrica, ver figura 3.7., cuya función es, únicamente, lograr un mejor llenado, obteniéndose un mejor formado del perfil.



Fig. 3.7. Vista lateral de la cámara contenedora del formador o dado.

**6. Enfriamiento.** Ésta es la última etapa del proceso. El perfil pasa a través de un contenedor con agua fría o tina de enfriamiento, ver figura 3.8., con el objetivo de disminuir la temperatura del perfil para que sea posible su manipulación.



Fig. 3.8. Vista lateral de la conexión entre el formador y la tina de enfriamiento.

### 3.4 El Perfil.

El perfil que se obtiene con este proceso, llamado “**BLOK**” (*denominación propia*), tiene una sección transversal rectangular. En la figura 3.9. se puede ver esta sección acotada y en la figura 3.10 se muestra la vista isométrica del perfil.

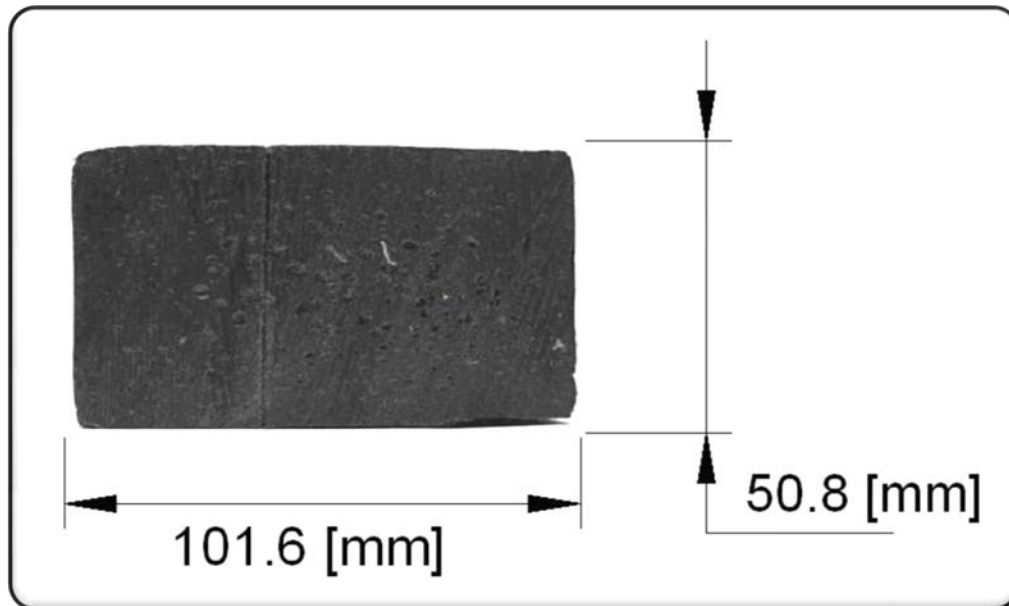


Fig. 3.9. Vista frontal con las dimensiones del perfil **BLOK**. Tolerancia  $\pm 3$  mm.

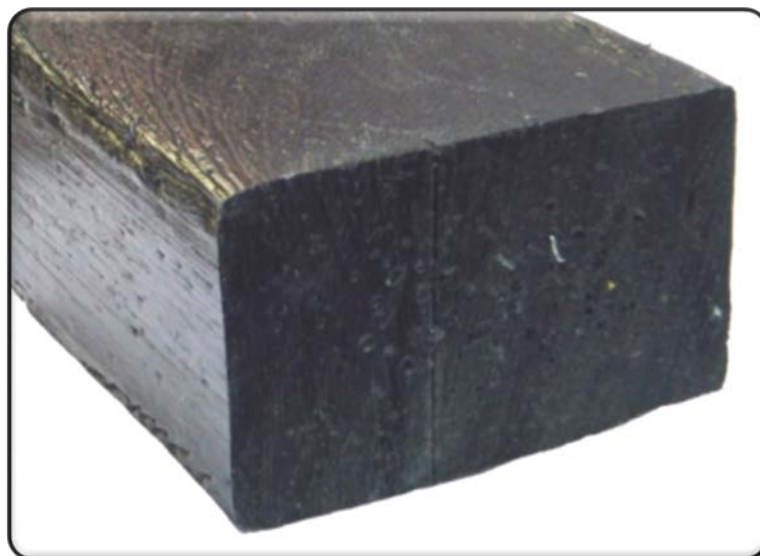


Fig. 3.10. Vista isométrica del perfil **BLOK**.



### 3.5 Aplicaciones del BLOK.

Algunas de las aplicaciones del **BLOK** pueden ser:

- Fabricación de cercos o corrales para delimitar ciertos espacios, figura 3.11.
- En redilas como parte de la carrocería de camionetas de carga, figura 3.12.
- En la fabricación de tarimas para transportación y almacenaje de productos en general, figura 3.13.



Fig. 3.11. Aplicación del **BLOK** en cercos.



Fig. 3.12. Aplicación del **BLOK** en redilas.



Fig. 3.13. Aplicación del **BLOK** en tarimas.

### 3.6 Ensayo de Tracción.

El ensayo de tracción es la forma básica de obtener información sobre el comportamiento mecánico de los materiales.

La realización de este ensayo se llevó a cabo con base en la norma **ASTM D638** “**Método Estándar de Prueba para las Propiedades en Tracción de los Plásticos**”.

Mediante una máquina universal de pruebas se somete una probeta normalizada, figura 3.14, a un esfuerzo axial de tracción progresivo hasta que se produce la falla de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente, ver figura 3.15. Dicha norma define los parámetros del ensayo y la geometría de la probeta.

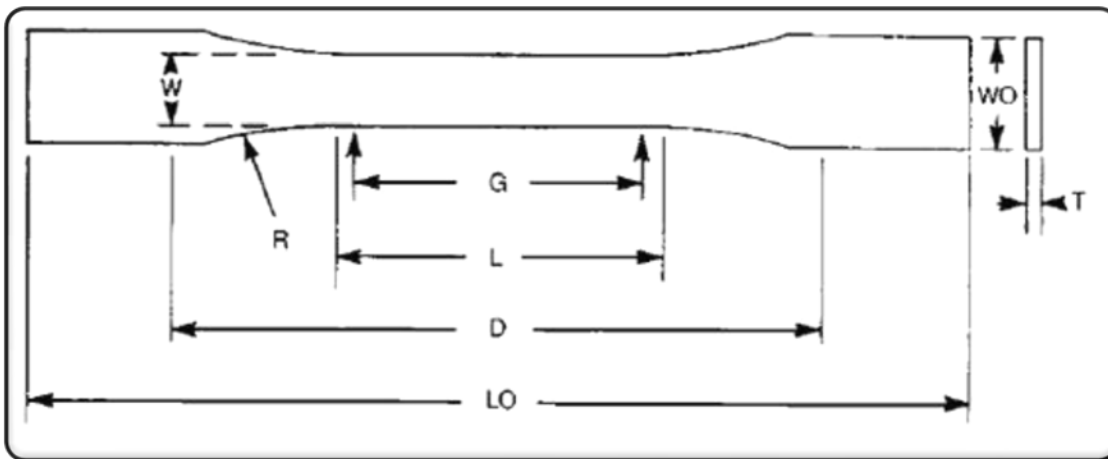


Fig. 3.14. Probeta estandarizada para tracción de plásticos [1].

En donde:

- $G$  es la longitud de prueba de 50 [mm].
- $L$  es la longitud de la sección recta de 57 [mm].
- $D$  es la distancia de entre mordazas de 135 [mm].
- $LO$  es la longitud total de 183 [mm].
- $W$  es el ancho de la sección recta de 6 [mm].
- $WO$  es el ancho total de 19 [mm].
- $R$  es el radio del filete de 76 [mm].
- $T$  es el espesor de 3.2 [mm].

A medida que se va deformando la muestra, se va registrando la carga, llegando, generalmente, hasta la fractura de la pieza [4].

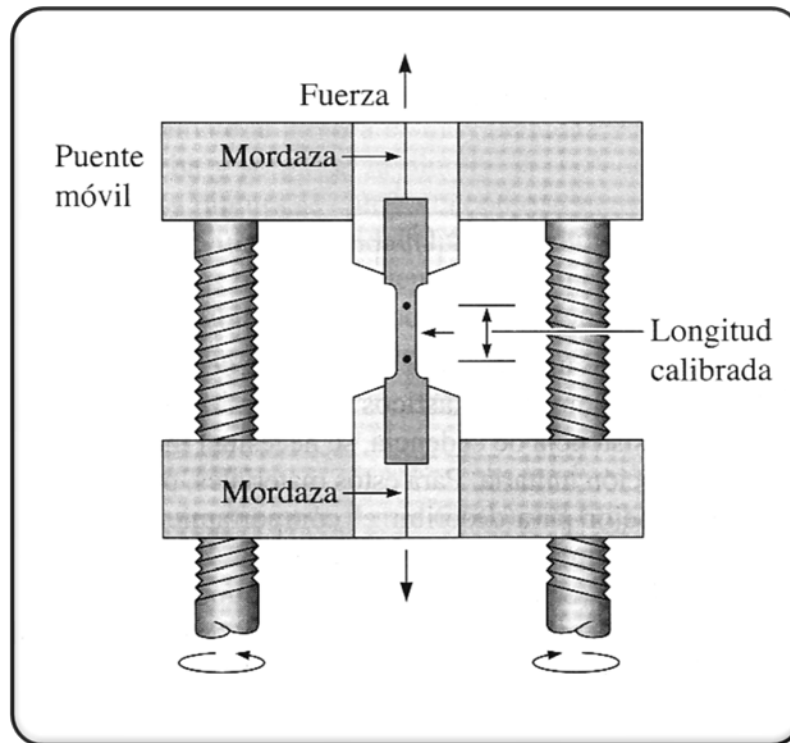


Fig. 3.15. Ensayo de tracción mediante un puente o cabezal móvil [4].

El ensayo de tracción es el más común para determinar propiedades mecánicas de los materiales, como son la deformación, esfuerzo de cedencia, resistencia o esfuerzo máximo, ductilidad y módulo elástico [9]. A continuación, se hará una breve descripción de dichas propiedades.

### 3.7 Deformación.

Cuando el material es sometido a una fuerza externa, primero se lleva a cabo una deformación ( $\epsilon$ ) elástica, es decir, el material regresa a su forma original cuando la aplicación de la carga se retira. Sin embargo, si la carga aplicada aumenta lo suficiente, se presenta una deformación permanente, o plástica, por lo que el material ya no puede regresar a su forma original.

### 3.8 Esfuerzo de Cedencia.

El esfuerzo de cedencia ( $\sigma_y$ ) se define como el punto en el cual el material empieza a sufrir una deformación plástica, es decir, el material pasa la zona de deformación elástica y comienza a deformarse permanentemente.

### 3.9 Resistencia a la tracción.

Después de que el material alcanza su límite de cedencia, el esfuerzo necesario para continuar la deformación plástica sigue aumentando hasta llegar a un límite máximo o de fractura.

La resistencia a la tracción (TS) es el esfuerzo en el punto final de la curva esfuerzo-deformación, figura 3.16., y corresponde al esfuerzo máximo que puede soportar el material, que es cuando se produce la fractura.

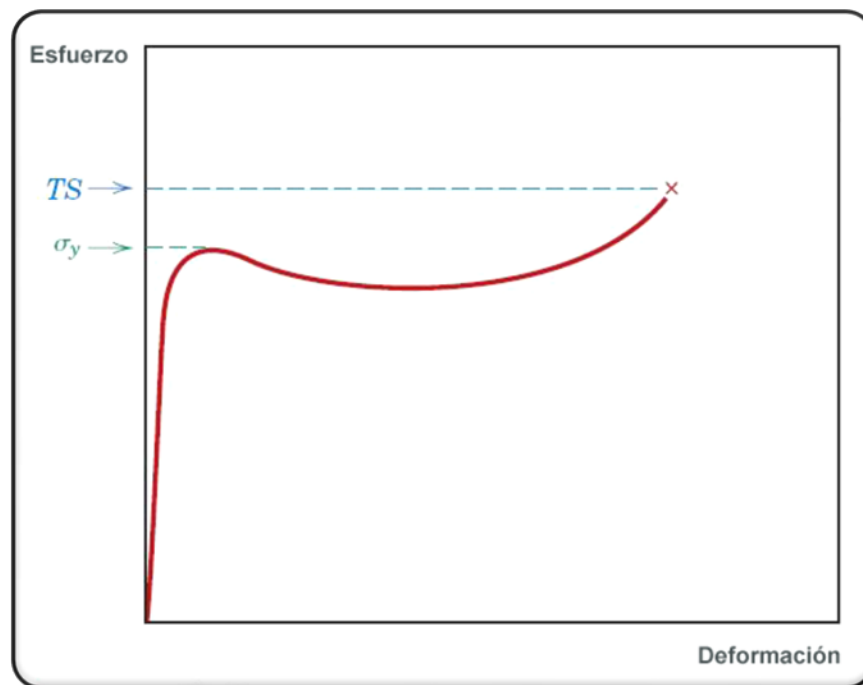


Fig. 3.16. Gráfica típica de esfuerzo-deformación en polímeros. Se muestran los puntos donde se alcanzan el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_y$ ) y la resistencia (TS) del material [14].

### **3.10 Ductilidad.**

La ductilidad es una medida del grado de deformación plástica que puede soportar el material antes de llegar a la fractura. Un material que se fractura con poca, o ninguna, deformación plástica se denomina frágil. Y, por el contrario, si un material presenta una mayor deformación plástica antes de llegar a la fractura, entonces, se denomina dúctil.

### **3.11 Módulo de elasticidad.**

El módulo de elasticidad es un parámetro que indica la resistencia, o rigidez, del material en el rango elástico de la deformación. También, se le conoce como la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación del material. Mientras mayor sea el módulo, más rígido será el material, es decir, cuando se le aplica un esfuerzo, su límite de deformación elástica es menor. [14]

## Capítulo 4. EXPERIMENTACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS

En este capítulo se describen los casos que se implementaron para llevar a cabo el análisis de las propiedades mecánicas del material en estudio y se mencionan las etapas del desarrollo experimental del presente trabajo.

Algunas de las propiedades obtenidas en el ensayo de tracción, como son esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo y porcentaje de deformación, son propiedades que nos proporcionarán una medida cuantificable de la calidad del producto.

### 4.1 Descripción de los casos para el análisis.

Para llevar a cabo el análisis de las propiedades mecánicas del perfil, se realizaron combinaciones de dos de los principales parámetros que se pueden controlar durante la producción y que tienen un efecto notable sobre las propiedades mecánicas del producto: la **temperatura** en la sección de compresión del cilindro extrusor y la **velocidad de giro** del tornillo extrusor. Dicha combinación consistió en variar uno de los parámetros y mantener constante el otro. Obteniendo así dos productos con propiedades mecánicas diferentes.

Es decir, en el **Caso 1**, se obtuvo el **BLOK 1**, incrementando la velocidad de giro del tornillo y manteniendo constante la temperatura. (Tabla 4.1)

En el **Caso 2**, se obtuvo el **BLOK 2**, incrementando la temperatura y manteniendo constante la velocidad del tornillo. (Tabla 4.2)

La correlación de las combinaciones de parámetros mencionadas se simplifica en las tablas 4.1 y 4.2:

Tabla 4.1. Caso 1, correlación de parámetros en la obtención del perfil BLOK 1.

COMBINACIÓN	TEMPERATURA	VELOCIDAD DEL TORNILLO	FLUJO VOLUMÉTRICO	PRESIÓN	VISCOSIDAD
1	<b>CONSTANTE</b>	$N_1$	$Q_1$	$P_1$	$\eta_1$
2	<b>CONSTANTE</b>	$N_2$	$Q_2$	$P_2$	$\eta_2$
3	<b>CONSTANTE</b>	$N_3$	$Q_3$	$P_3$	$\eta_3$

Tabla 4.2. Caso 2, correlación de parámetros en la obtención del perfil BLOK 2.

COMBINACIÓN	TEMPERATURA	VELOCIDAD DEL TORNILLO	FLUJO VOLUMÉTRICO	PRESIÓN	VISCOSIDAD
1	$T_1$	<b>CONSTANTE</b>	$Q_1$	$P_1$	$\eta_1$
2	$T_2$	<b>CONSTANTE</b>	$Q_2$	$P_2$	$\eta_2$
3	$T_3$	<b>CONSTANTE</b>	$Q_3$	$P_3$	$\eta_3$

El criterio para establecer la magnitud de los parámetros  $T$  y  $N$  constantes, se basa en el rango de operación del equipo extrusor. Es decir, dicho valor es el promedio del rango operativo del equipo. Estos valores se mostrarán en el siguiente capítulo.

#### 4.2 Etapas del desarrollo experimental.

- *Maquinado.* El perfil en estudio se maquinó con una fresadora vertical de torreta modelo *Bridgeport*, hasta obtener una preforma rectangular de la probeta. Posteriormente, la pieza obtenida se vuelve a fresar hasta obtener la forma final, tal como lo establece la norma ASTM D 638, figura 4.1.

Para este análisis, se obtuvieron cinco probetas para cada una de las seis combinaciones mencionadas en las tablas 4.1 y 4.2, teniendo un total de quince probetas del perfil **BLOK 1** y quince del **BLOK 2**.





Fig. 4.1. Probeta del **BLOK** normalizada de acuerdo a la norma *ASTM D638*.

- *Realización del ensayo de tracción.* Una vez obtenidas todas las probetas, se llevó a cabo el ensayo de tracción. Las pruebas se realizaron en una máquina universal de pruebas marca Instron, modelo 4206, con capacidad de carga de 15 toneladas y a una velocidad de deformación (velocidad del cabezal) de 5 mm/min. Cada probeta se fue colocando, ver figura 4.2., y sometiendo a tracción hasta la falla. Obteniéndose así, el registro de las propiedades del perfil.



Fig. 4.2. Máquina universal de pruebas, Instron 4206. Se observa la colocación de la probeta.

## Capítulo 5. RESULTADOS

Para la realización del ensayo de tracción se llevaron a cabo cinco pruebas para cada combinación de cada caso. Cada propiedad es evaluada con respecto al parámetro establecido como constante para los casos 1 y 2, como se mencionó en la sección 4.1. A continuación se muestran los resultados de dicha evaluación.

### 5.1 Parámetros de los Casos 1 y 2.

Los parámetros del proceso, mencionados en la sección 2.3, correspondientes al caso 1 y 2 se agrupan en las tablas 5.1 y 5.2 de acuerdo al esquema de la sección 4.1.

La densidad del BLOK 1 y BLOK 2, se mantuvo constante con un valor de 0.949 [gr/cm<sup>3</sup>].

Tabla 5.1. Caso 1, parámetros del proceso para la obtención del BLOK 1.

COMBINACIÓN	TEMPERATURA [°C]	VELOCIDAD DEL TORNILLO [rpm]	FLUJO VOLUMÉTRICO [cm <sup>3</sup> /s]	PRESIÓN [MPa]	VISCOSIDAD [Pa•s]
1	<b>195</b>	<b>30</b>	58.816	66	2230
2	<b>195</b>	<b>40</b>	77.027	87	2230
3	<b>195</b>	<b>50</b>	95.149	106	2230

Tabla 5.2. Caso 2, parámetros del proceso para la obtención del BLOK 2.

COMBINACIÓN	TEMPERATURA [°C]	VELOCIDAD DEL TORNILLO [rpm]	FLUJO VOLUMÉTRICO [cm <sup>3</sup> /s]	PRESIÓN [MPa]	VISCOSIDAD [Pa•s]
1	<b>175</b>	<b>40</b>	82.475	154	3710
2	<b>190</b>	<b>40</b>	78.738	102	2564
3	<b>220</b>	<b>40</b>	67.054	43	1274

En cada caso y combinación, además de la temperatura y velocidad del tornillo, los valores de presión ( $P$ ), *viscosidad* ( $\eta$ ) y densidad ( $\rho$ ), fueron proporcionados por el GRUPO GYSAPOL. Con estas variables y las características del equipo, mencionadas en la sección 3.1, se calculó el flujo volumétrico utilizando la ecuación 2.8.

## 5.2 Evaluación de las propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas evaluadas en cada perfil extruido son: el **esfuerzo de cedencia**, el **esfuerzo máximo** y el **porcentaje de deformación**. La máquina universal de pruebas, en la que se llevaron a cabo los ensayos de tracción, proporcionó las gráficas y resultados de dichas propiedades.

### CASO 1. BLOK 1

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas de esfuerzo-deformación, esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo y deformación, comparando las tres combinaciones de 30, 40 y 50 [RPM] del caso 1.

#### ESFUERZO-DEFORMACIÓN

En la gráfica de la figura 5.1. se puede observar el comportamiento de la deformación ante el esfuerzo promedio del BLOK 1 obtenido a 30 [RPM], a 40 [RPM] y 50 [RPM]. De la cual se puede notar que a 30 [RPM] se obtuvo un esfuerzo máximo cercano a 16 [MPa] y una deformación cercana al 2%, a 40 [RPM] se obtuvo un esfuerzo máximo cercano a 20 [MPa] y una deformación de 5% y a 50 [RPM] se obtuvo un esfuerzo máximo ligeramente mayor a 20 [MPa] con una deformación de 7% aproximadamente. Estos valores se establecerán y analizarán con mayor detalle en el siguiente capítulo.

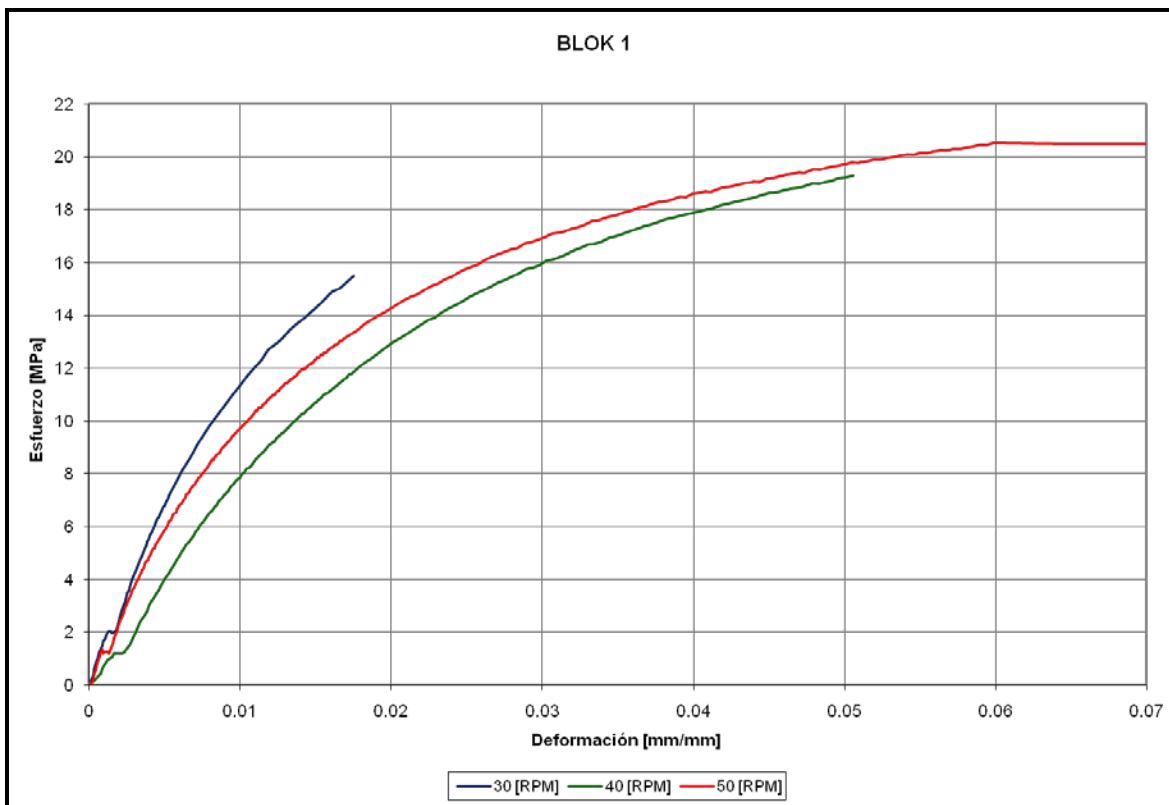


Fig. 5.1. Gráfica de esfuerzo-deformación para el **BLOK 1**.

### ESFUERZO DE CEDENCIA

En la figura 5.2. se puede observar un incremento de la cedencia conforme aumenta la velocidad de giro del tornillo. Además, este incremento es mucho mayor de 30 a 40 [RPM], notándose una tendencia a estabilizarse de 40 a 50 [RPM].

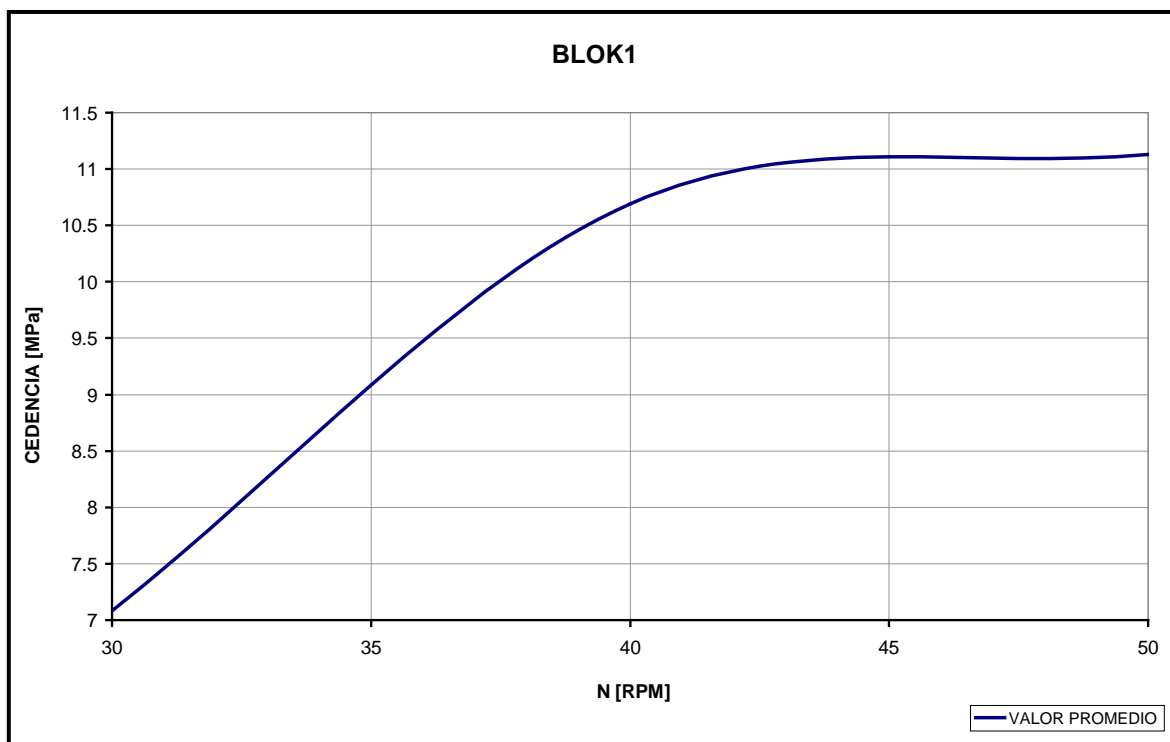


Fig. 5.2. Gráfica de esfuerzo de cedencia contra velocidad del tornillo extrusor para el BLOK 1.

### ESFUERZO MÁXIMO

En la figura 5.3. se puede apreciar que la pendiente entre 30 y 40 [RPM] es mayor que la pendiente entre 40 y 50 [RPM]. En otras palabras, el esfuerzo máximo aumenta rápidamente de 30 a 40 [RPM], después de este punto no parece estabilizarse pero su incremento es más lento.

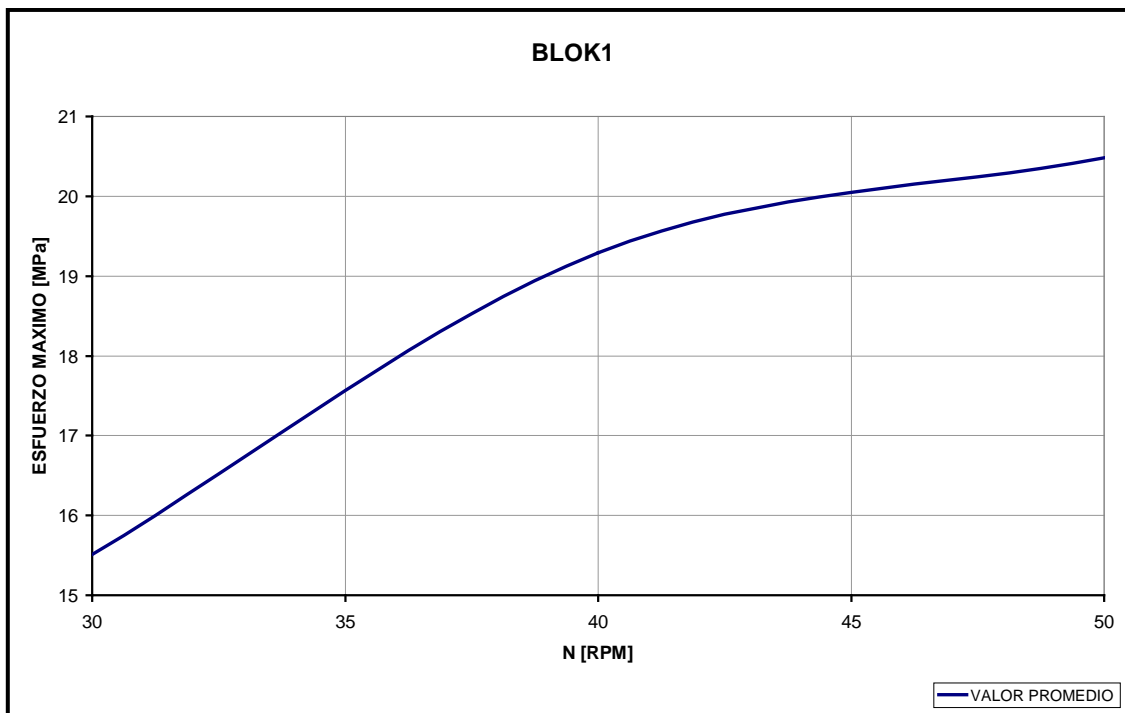


Fig. 5.3. Gráfica de esfuerzo máximo contra velocidad del tornillo extrusor para el **BLOK 1**.

### PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN

En la figura 5.4. se observa que el porcentaje de deformación entre 30 y 50 [RPM] aumenta de forma casi constante, solamente se aprecia una ligera variación alrededor de las 40 [RPM].

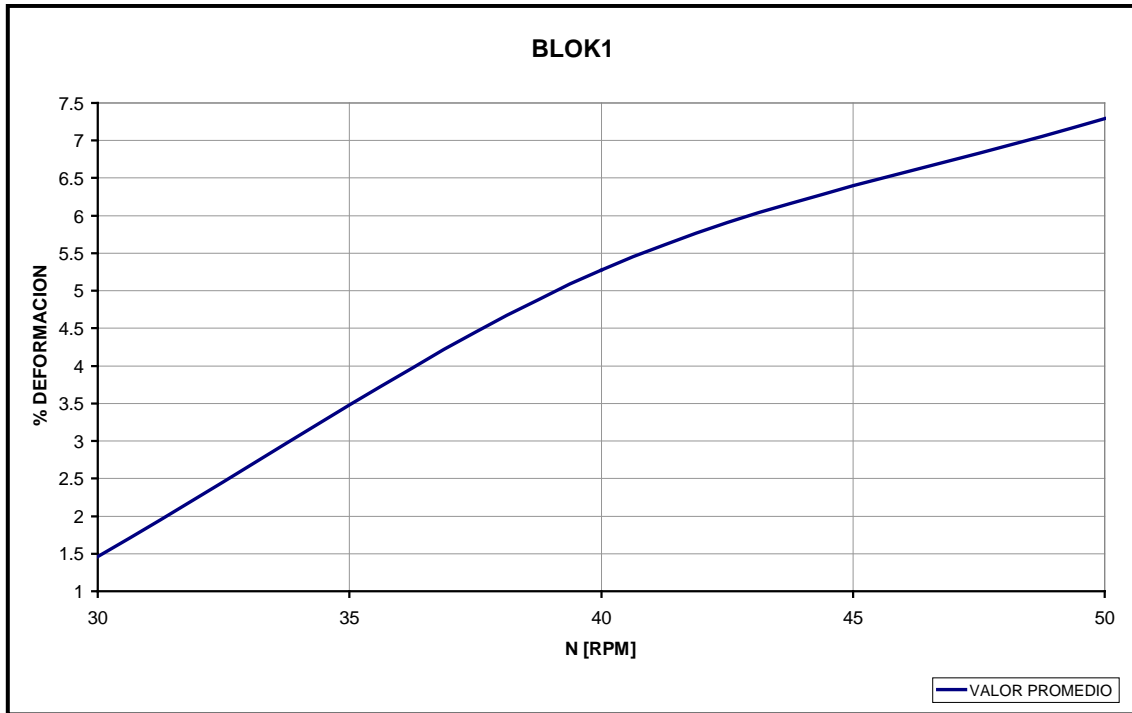


Fig. 5.4. Gráfica del porcentaje de deformación contra velocidad del tornillo extrusor para el **BLOK 1**.

Los resultados obtenidos, en cada combinación del caso 1, se agrupan en la tabla 5.3:

Tabla 5.3. Caso 1, propiedades mecánicas obtenidas del BLOK 1.

<b>VELOCIDAD DE TORNILLO [RPM]</b>	<b>ESFUERZO DE CEDENCIA [MPa]</b>	<b>ESFUERZO MÁXIMO [MPa]</b>	<b>PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN [%]</b>
<b>30</b>	7.08 ± 0.95	15.51 ± 1.11	1.46 ± 0.72
<b>40</b>	10.69 ± 0.84	19.29 ± 0.79	5.28 ± 0.67
<b>50</b>	11.13 ± 0.64	20.48 ± 0.86	7.29 ± 0.82

**CASO 2. BLOK 2**

Continuando de la misma forma, se presentan las gráficas obtenidas de esfuerzo-deformación, esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo y porcentaje de deformación, comparando las tres combinaciones de 175, 190 y 220 [°C] del caso 2.

**ESFUERZO-DEFORMACIÓN**

En la figura 5.5. se puede observar el comportamiento de la deformación ante el esfuerzo promedio del BLOK 2 obtenido a 175, 190 y 220 [°C]. De la, cual se puede ver que a 175 [°C] se obtuvo un esfuerzo máximo superior a 25 [MPa] y una deformación cercana al 16%, a 190 [°C] se obtuvo un esfuerzo máximo superior a 20 [MPa] y una deformación cercana a 10% y a 220 [°C] se obtuvo un esfuerzo máximo cercano a 20 [MPa] con una deformación de 3% aproximadamente. Estos valores, también, se establecerán y analizarán con mayor detalle en el siguiente capítulo.

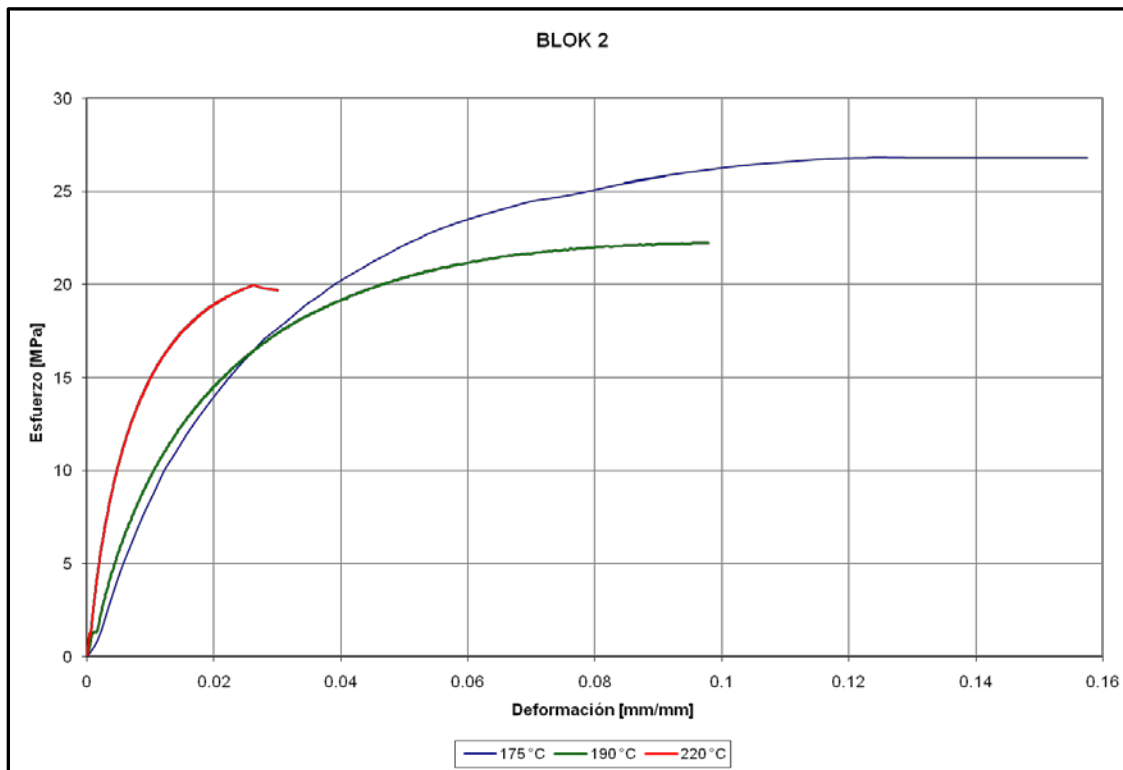


Fig. 5.5. Gráfica de esfuerzo-deformación para el **BLOK 2**.



### ESFUERZO DE CEDENCIA

En figura 5.6. se puede observar que el esfuerzo de cedencia disminuye conforme aumenta la temperatura, esta disminución no es constante debido a que hay un cambio alrededor de los 190 [°C]. Notándose alrededor de este punto que, de 175 a 190 [°C] el esfuerzo de cedencia disminuye rápidamente y de 190 a 220 [°C] el rango de la disminución es mucho menor.

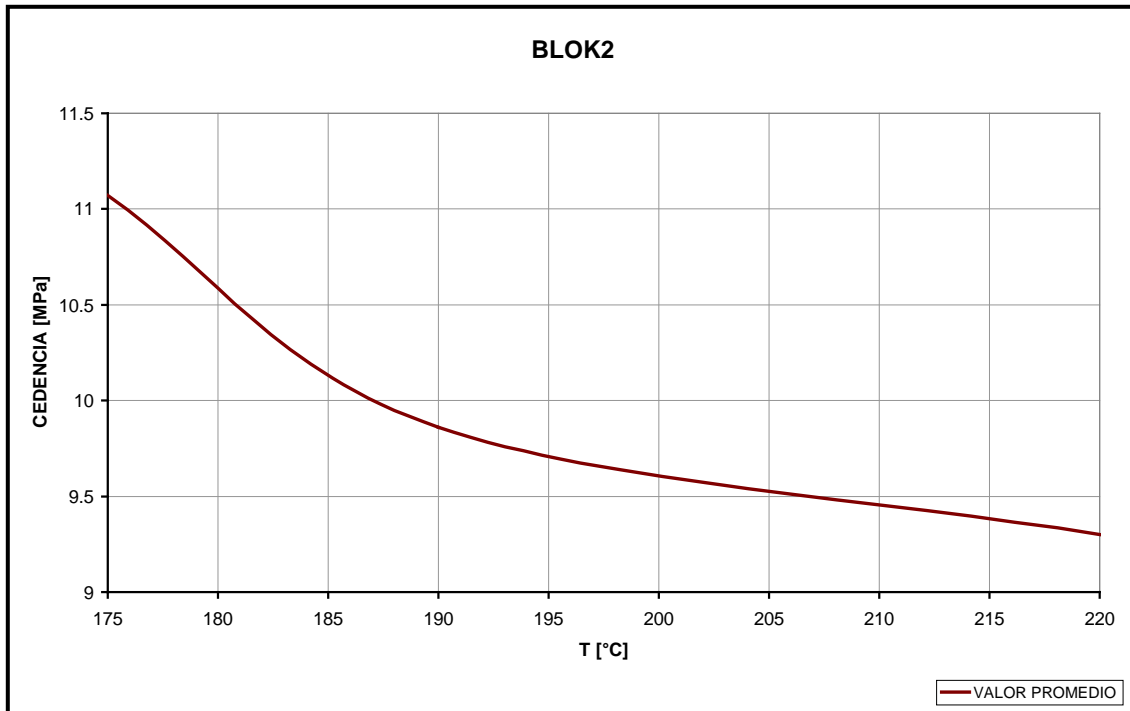


Fig. 5.6. Gráfica de esfuerzo de cedencia contra la temperatura para el **BLOK 2**.

### ESFUERZO MÁXIMO

En la figura 5.7. el comportamiento observado es muy similar al del esfuerzo de cedencia, es decir, el esfuerzo máximo disminuye al aumentar la temperatura. En esta reducción se ven dos secciones, de 175 a 190 [°C] el esfuerzo desciende rápidamente y de 190 a 220 [°C] se observa una tendencia más estable en su reducción.

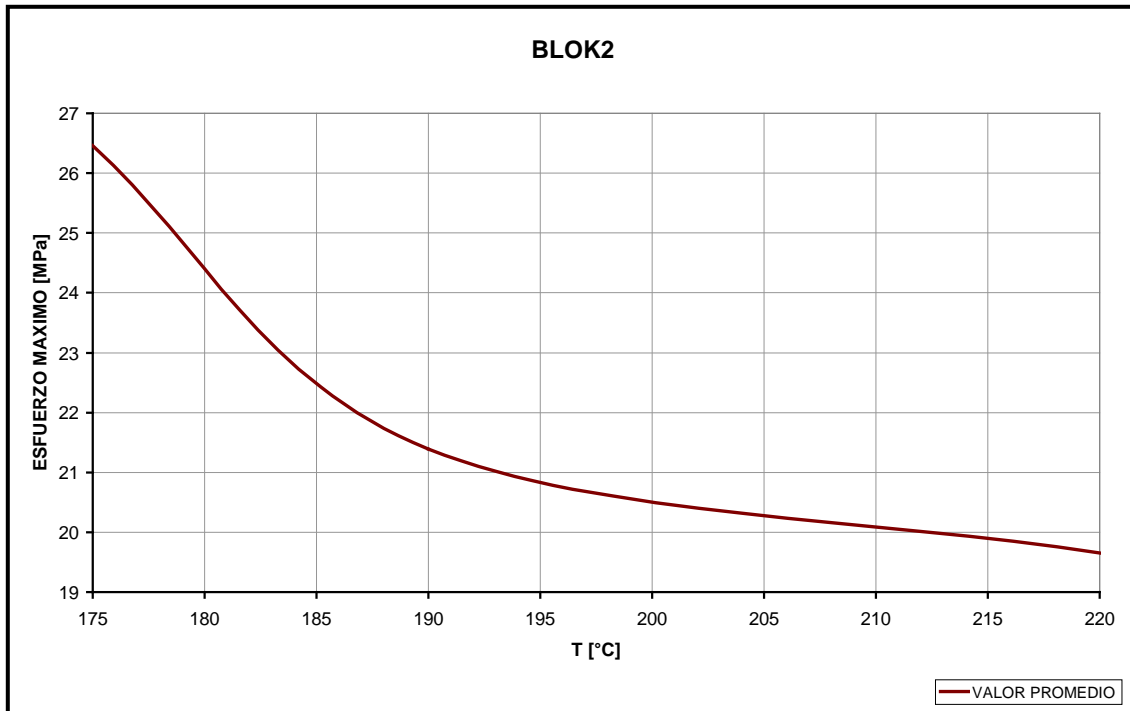


Fig. 5.7. Gráfica de esfuerzo máximo contra la temperatura para el **BLOK 2**.

PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN

En la figura 5.8. se observa que la deformación disminuye en forma casi lineal con respecto al aumento de temperatura. Notándose un leve cambio de pendiente entre 185 y 190 [°C].

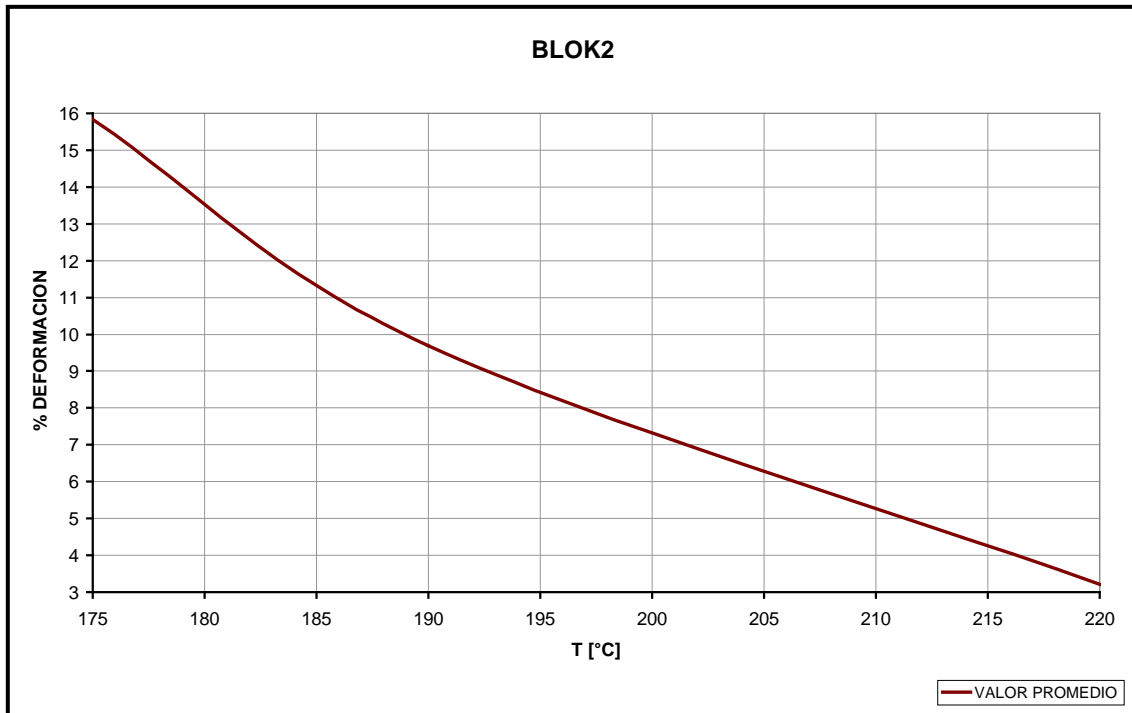


Fig. 5.8. Gráfica del porcentaje de deformación contra la temperatura para el **BLOK 2**.

Los resultados obtenidos en cada combinación del caso 2, se agrupan en la tabla 5.4:

Tabla 5.4. Caso 2, propiedades mecánicas obtenidas del BLOK 2.

TEMPERATURA [°C]	ESFUERZO DE CEDENCIA [MPa]	ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN [%]
<b>175</b>	11.07 ± 0.98	26.46 ± 1.12	15.84 ± 0.79
<b>190</b>	9.86 ± 0.87	21.39 ± 0.89	9.69 ± 0.89
<b>220</b>	9.30 ± 0.84	19.65 ± 1.05	3.21 ± 0.95

En la tabla 5.5. se muestra un cuadro comparativo con los valores óptimos de cada propiedad y bajo que parámetros se obtuvieron, correspondientes a cada BLOK.

Tabla 5.5. Propiedades mecánicas óptimas de cada BLOK.

<b>BLOK</b>	<b>ESFUERZO DE CEDENCIA</b>	<b>ESFUERZO MÁXIMO</b>	<b>PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN</b>	<b>PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN</b>
1	11.13 [MPa]	20.48 [MPa]	7.29 [%]	50 [RPM] ; 190 [°C]
2	11.07 [MPa]	26.46 [MPa]	15.84 [%]	40 [RPM] ; 175 [°C]

En la tabla 5.5. podemos ver que el esfuerzo de cedencia obtenido para el BLOK 1 y el BLOK 2 es similar. Mientras que el esfuerzo máximo obtenido en el BLOK 2 es mayor que el obtenido en el BLOK 1, y la máxima deformación se obtuvo con el BLOK 2 con una gran diferencia respecto al BLOK 1.

## Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se establece el siguiente análisis para cada Caso.

### 6.1 Caso 1:

- El esfuerzo de cedencia aumenta al incrementarse  $N$ , pero en el rango de 30 a 40 [RPM] el incremento es de 3.61 [MPa] y en el rango de 40 a 50 [RPM] existe un incremento de 0.44 [MPa]. Es decir, en el primer rango de  $N$ , el esfuerzo de cedencia tiene un aumento ocho veces mayor que en el segundo rango. Siendo entonces, el rango de 30 a 40 [RPM] el mayor incremento del esfuerzo de cedencia. Aunque éste siga incrementándose después de las 40 [RPM].
- En cuanto al esfuerzo máximo, se observó que incrementa cuando  $N$  aumenta, y lo hace con cierta similitud al esfuerzo de cedencia, es decir, de 30 a 40 [RPM] el esfuerzo máximo tiene un incremento de 3.78 [MPa], y de 40 a 50 [RPM] hay un incremento de 1.19 [MPa], aproximadamente el triple en el primer rango de  $N$ . Por lo que el esfuerzo máximo tiene un aumento más rápido de 30 a 40 [RPM], y por supuesto, su mayor valor, al igual que el esfuerzo de cedencia, lo alcanza en las 50 [RPM].
- La variación del porcentaje de deformación se mostró más estable en los rangos de  $N$ , debido a que de 30 a 40 [RPM] la deformación tuvo un incremento de 0.0382 [mm/mm] y de 40 a 50 [RPM] tuvo un incremento de 0.0201 [mm/mm]. Por lo que, se tiene un aumento total de 0.0583 [mm/mm], o sea, la capacidad de deformación es cinco veces mayor cuando  $N$  va de 30 a 50 [RPM].

## 6.2 Caso 2:

- El esfuerzo de cedencia disminuye cuando la temperatura aumenta y esta disminución no se mantiene constante. Es decir, de 175 a 190 [°C], el esfuerzo disminuye 1.21 [MPa], mientras que en el rango de 190 a 220 [°C] se presenta una disminución de 0.56 [MPa]. El óptimo valor del esfuerzo de cedencia se tiene a los 175 [°C].
- En cuanto al esfuerzo máximo, se observa un comportamiento similar al esfuerzo de cedencia. Es decir, cuando la temperatura aumenta el esfuerzo máximo disminuye, y lo hace en rangos diferentes. De 175 a 190 [°C], el esfuerzo se reduce en 5.07 [MPa] y de 190 a 220 [°C] hay una disminución de 1.74 [MPa]. Teniéndose, también, a los 175 [°C] el mayor valor del esfuerzo máximo.
- El comportamiento del porcentaje de deformación es, casi, inversamente proporcional al aumento de la temperatura, debido a que en el rango de 175 a 190 [°C] hay una reducción en la deformación de 0.0615 [mm/mm] y de 190 a 220 [°C] hay una disminución de 0.0648 [mm/mm]. Sin embargo, la disminución total de la deformación en todo el rango de temperatura va de 0.1584 [mm/mm] a 3.21 [mm/mm], es decir, hay una caída en la capacidad de deformación de 80% durante el incremento de temperatura. Siendo el rango de 175 a 190 [°C] el rango en que la deformación mantiene un mayor valor y de 190 a 220 [°C] el que más reduce la capacidad de deformación.

## Capítulo 7. CONCLUSIONES

- De acuerdo a la tabla 5.1, se puede concluir que al incrementar la velocidad del tornillo extrusor ( $N$ ) se genera un aumento en el flujo volumétrico ( $Q$ ) relativamente uniforme. De manera similar, se observa que la presión ( $P$ ) dentro de la cámara extrusora también aumenta, relativamente proporcional, conforme se incrementa  $N$ . Con base en lo anterior, se puede establecer que  $Q$  y  $P$  están relacionadas por medio de  $N$ . En otras palabras, el flujo volumétrico es un parámetro que se ve afectado directamente por la presión dentro de la cámara extrusora, y a su vez, la velocidad del tornillo afecta directamente en la presión.
- Además, de la tabla 5.2, se concluye que conforme la temperatura ( $T$ ) se incrementa,  $Q$  y  $P$  disminuyen prácticamente de manera uniforme. Por lo cual, se puede establecer que  $Q$  y  $P$  son parámetros que también se relacionan de forma directa por medio de  $T$ .
- Con respecto a las propiedades mecánicas, se puede ver que el efecto de la temperatura durante el proceso de extrusión, también afecta de forma inversa sobre las propiedades mecánicas. Es decir, conforme aumenta la temperatura, disminuyen el esfuerzo de cedencia, el esfuerzo máximo y el porcentaje de deformación del material.
- Por otra parte, el efecto de la velocidad del tornillo extrusor es proporcional sobre las propiedades mecánicas resultantes. Es decir, al incrementarse  $N$  también aumentan el esfuerzo de cedencia, el esfuerzo máximo y el porcentaje de deformación.

Tomando en cuenta los valores óptimos de las propiedades mecánicas, obtenidas de los Casos 1 y 2, se llega a la siguiente conclusión:

- El mayor esfuerzo de cedencia se obtuvo a una temperatura de 190 °C y 50 RPM. Pero, a 175 °C y 40 RPM se obtuvo un nivel de esfuerzo muy cercano.
- El valor más alto del esfuerzo máximo se obtuvo a una temperatura de 175 °C y 40 RPM.
- El mayor porcentaje de deformación se logró con una temperatura de 175 °C y 40 RPM.

Por todo lo anterior, se puede establecer que la primer combinación de parámetros de extrusión del caso 2 (175 °C y 40 RPM) proporcionan los valores óptimos de esfuerzo de cedencia, máximo y porcentaje de deformación.

Finalmente, con todos los resultados obtenidos, el GRUPO GYSAPOL puede conocer el efecto que tienen los parámetros de extrusión que utiliza, sobre las propiedades mecánicas de los perfiles analizados. Favoreciendo así, su constante interés y empeño por mejorar la calidad de sus productos.



**BIBLIOGRAFÍA**

1. ASTM Standards International. *D 638-03. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.*
2. ASTM Standards International. *D 792-00. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.*
3. Ashby, Michael F. *Engineering Materials 1: An Introduction to their Properties and Applications.* Ed. PERGAMON. Gran Bretaña 1980.
4. Askeland, Donald R. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Ed. THOMSON. México 2004.
5. Beer, Ferdinand P. *Mecánica de Materiales.* Ed. McGraw Hill. México 2001.
6. Callister, William D. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Ed. LIMUSA WILEY. México 2012.
7. Doyle, Lawrence E. *Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros.* Ed. Prentice Hall Hispanoamericana. México 1985.
8. *Enciclopedia del Plástico 2000, Tomo 1.* INSTITUTO MEXICANO DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL. Ed. Centro Empresarial del Plástico. México 2000.
9. Groover, Mikell P. *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas.* Ed. Prentice Hall. México 2007.
10. Kalpakjian, Serope. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.* Ed. Pearson-Prentice Hall. México 2008.
11. Morton-Jones. *Procesamiento de Plásticos.* Ed. LIMUSA. México 2006.
12. Schey, John A. *Procesos de Manufactura.* Ed. McGraw Hill. México 2000.

13. Shackelford, James F. *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros*. Ed. Pearson-Prentice Hall. España 2005.
14. Smith, William F. *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Ed. McGraw Hill. Colombia 2004.
15. <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/propiedades>
16. <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno>