

CAPÍTULO III

OBTENCION DE FIBRAS DE PET

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA EXTRUSORA.



Figura 3.1.- Extrusora monocilíndrica utilizada

La máquina utilizada para la obtención de fibras de RPET reciclado es una extrusora monocilíndrica propiedad de la Escuela Politécnica del Ejercito ESPE y resultado de un anterior proyecto de grado. Ésta trabaja con un husillo horizontal de capacidad de 1kg hora, posee un motor eléctrico helicoidal trifásico de 1680 rpm, 1.5 HP, 480 V y 2.4 A, montado en la parte posterior que transmite el movimiento de giro por medio de un sistema reductor (cadena – catalina) al husillo, el cual es de una etapa (sección constante) y tiene una relación L/D aproximadamente igual a 30:1. Este husillo es el encargado de recoger el material de la tolva de carga, en forma de escamas, lo mezcla, plastifica, comprime y desplaza por el canal helicoidal a lo largo del cilindro, para de esta manera forzar la salida del material reciclado por la boquilla.

Tabla 3.1.- Características técnicas de la extrusora.

Tipo de expulsor:	Husillo
Sistema motriz:	Eléctrico
Calentamiento	Resistencias eléctricas
Polímero	PET
Producto	RPET
Capacidad	1 Kg/hr
Diámetro del tornillo (D)	23,8 mm
Longitud total del tornillo	760 mm
Paso (t)	25,5 mm
Espesor del filete en sentido longitudinal (e)	4 mm
Holgura radial (δ)	0,1 mm
Ángulo de hélice (θ)	18,8°
Espesor del filete en el sentido transversal al canal (s)	3,786 mm
Ancho del canal (w)	20,34 mm

Fuente: Tesis “Proceso de reciclaje mecánico del PET, diseño y construcción de una extrusora con una capacidad de 1 kg/hr para el laboratorio de mecánica de materiales de la ESPE”

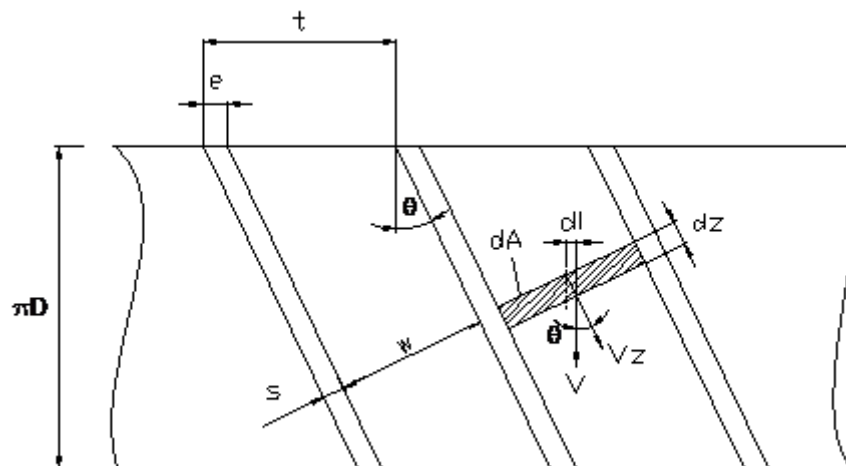


Figura 3.2.- Partes del tornillo de extrusión.

Para conseguir un flujo fácil y constante del material, es necesario a más de la presión ejercida por el tornillo, calentar dicho material muy por encima de su temperatura de transición vítrea (80°C) ; esto se consigue con la ayuda de seis resistencias eléctricas, cinco ubicadas a lo largo del cilindro y una en la matriz de extrusión.



Figura 3.3.- Resistencias eléctricas en el cilindro y la matriz de extrusión.

3.2 PET UTILIZADO COMO MATERIA PRIMA.

La máquina extrusora a la que se hace referencia está diseñada para procesar PET molido, es decir, PET en hojuelas (flakes).

Si bien son muchas las personas que de manera informal se dedican a la recolección de objetos hechos de PET, fundamentalmente botellas, son pocas e igualmente informales las que se dedican a moler estos objetos para posteriormente comercializarlo a manera de materia prima.



Figura 3.4.- Hojuelas de PET utilizadas como materia prima.

3.2.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL PET UTILIZADO COMO MATERIA PRIMA.

Las hojuelas de PET utilizadas en este estudio como materia prima, se adquieren en una bodega ubicada en la Panamericana Norte y Moncayo, en el sector de Calderón; en este sitio se almacenan las botellas que una vez

seleccionadas son procesadas para obtener hojuelas. El procedimiento empleado para esto es el siguiente:

- Este sitio posee un área grande donde depositan todas las botellas plásticas que, quienes las recolectan, llegan a venderles. Es aquí donde se hace la primera selección, retirando las tapas y adhesivos de los envases para posteriormente ubicarlos en pequeños galpones clasificados por color.
- La máquina donde se muele los envases es única, pero se procesan por separado los de PET transparente de los de color.
- Ésta máquina, a pesar de ser poco tecnificada, tiene el mismo principio funcional de la máquina moladora de la *figura 2.11* del capítulo anterior; está comprendida por una cuchilla hélice montada sobre un eje giratorio que a la vez que arrastra los envases de PET los va cortando y triturando.
- Para obtener los distintos tamaños de hojuelas (flakes) de PET molido, el molino cuenta con un tamiz intercambiable ubicado entre las cuchillas y la base que sirve de depósito de las hojuelas finales. Este tamiz permite el paso de las hojuelas de tamaño inferior al diámetro de los orificios que éste posee, a la vez que obliga a las hojuelas de mayor tamaño a que continúen pasando a través de las cuchillas hasta que adquieran el tamaño deseado.
- Para obtener hojuelas de menor tamaño se cambia el tamiz por uno más fino y viceversa.
- Para la obtención de hojuelas lavadas de PET, se vierte durante el proceso de molienda agua con detergente sobre las cuchillas y la materia prima. Las hojuelas finales son enjuagadas dejando correr agua sobre ellas por un período de aproximadamente de 30 minutos.

- Las hojuelas de PET lavado son almacenadas en un recipiente que permite se escurra el agua, para después ser secadas al sol y finalmente almacenarlas en costales organizadas por color y tamaño.

Esta bodega comercializa el PET molido por libras y su precio difiere en función del tamaño de las hojuelas, si son transparentes o de color y si son lavadas o no. Tomando en cuenta las características de la extrusora, fundamentalmente en la parte de la alimentación y con el afán de obtener fibras de buena calidad, se adquirió hojuelas pequeñas (diámetro medio 7mm), transparentes y lavadas.

Tabla 3.2.- Características del PET utilizado como materia prima.

Diámetro medio d (mm)	Espesor medio e (mm)	Color	Lavado
7	0.6	Transparente	sí

Fuente: Propia

Hojuelas pequeñas (diámetro medio 7mm): Permitirán que la extrusora cumpla con su función con el menor esfuerzo a la vez que se cuida la integridad física del tornillo.

Color transparente: Implica que no se han añadido pigmentos al PET que pudieran reaccionar durante el proceso perjudicando la calidad de las fibras obtenidas.

Hojuelas lavadas: Evita la presencia masiva de impurezas y suciedad en la materia prima, que pudieran complicar el proceso de extrusión afectando la homogeneidad y calidad de las fibras a obtener.

3.3 SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL APLICADA AL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FIBRAS DE RPET.

Dentro del proceso de obtención de fibras de RPET al igual que en cualquier otra actividad, más aún si esta involucra utilización de maquinaria y el empleo

de elevadas temperaturas, es necesario tomar en cuenta los riesgos intrínsecos al proceso y a la falibilidad del hombre.

Si bien son la industria farmacéutica y la alimenticia las más exigentes en cuanto a higiene industrial, todos los procesos industriales deberían tener una política de higiene industrial, tanto para el beneficio de los operarios como para evitar la contaminación ambiental y la contaminación de los mismos productos fabricados.

Tabla 3.3.- Malla referencial para análisis de higiene y seguridad industrial.

ANÁLISIS DE SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL														
DIAGNÓSTICO DE RIESGOS		ADQUISICIÓN DE MATERIA PRIMA	TRANSPORTE	ALMACENAMIENTO	DESPACHO	SECADO	ALIMENTACIÓN A LA EXTRUSORA	EXTRUSIÓN	RECOLECCIÓN DE FIBRAS	CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL OBTENIDO	MOLDEO	SECADO DE MOLDE	ENSAYOS	REDACCIÓN
TIPOS DE RIESGOS	PROCESOS													
# DE TRABAJADORES		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
FÍSICO	Radiaciones no ionizantes													
	Exposición a ruido													
	Exposición a vibraciones													
	Exposición a temperaturas elevadas													
	Exposición a temperaturas bajas													
	Exposición a iluminación deficiente													
	Riesgos de incendios													
Ventilación deficiente														
MECÁNICO	Trabajo en alturas													
	Pisos no adecuados													
	Manejo de herramientas inadecuadas													
	Exposición a equipos de presión													
	Exposición de equipos de elevación													
	Exposición a instalaciones eléctricas													
QUÍMICO	Exposición a gases													
	Exposición a vapores													
	Exposición a polvos													
	Exposición a nieblas													
BIOLÓGICO	Exposición a micro organismos													
	Exposición a vectores insectos -roedores													
	Exposición a bacterias													
	Exposición a derivados orgánicos													
ERGONÓMICO	Sobre esfuerzo físico / sobre tensión													
	Sobrecarga													
	Posturas inadecuadas													
	Movimientos repetitivos													
	Restricción de movimientos													
	Capacidad física inadecuada													
	Movimiento corporal limitado													
Levantar objetos en forma incorrecta														
PSICOSOCIAL	Apremio de tiempo													
	Complejidad - Rapidez													
	Exigencia de concentración / atención profunda													
	Monotonía - rutina repetitiva													
	Nivel de responsabilidad alto													
	Orientación / Entrenamiento deficiente													
	Falta de conocimiento / experiencia													
	Supervisión inadecuada													
	Jornadas de trabajo excesivos													
	Inseguridad laboral													
	Ausencia perspectiva de progreso													
Ausencia de motivación e incentivos														
Desplazamientos largos al trabajo														

Fuente: Ministerio de Trabajo y Empleo

3.3.1 MALLA REFERENCIAL PARA ANÁLISIS DE RIESGOS DE HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL.

En la actualidad la mayoría de industrias utilizan una malla en la que se toma en cuenta todos los posibles riesgos a los que están expuestos sus trabajadores. Esta malla (*tabla 3.3*) es en una buena herramienta para determinar los potenciales riesgos tanto a nivel industrial como en procesos.

3.3.2 RIESGOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FIBRAS.

De acuerdo al análisis de la malla de riesgos industriales se ha determinado que los riesgos involucrados en el proceso de obtención de fibras de RPET, son los indicados en la siguiente tabla (*tabla 3.4*):

Tabla 3.4.- Riesgos involucrados al proceso de obtención de fibras de RPET.

ANÁLISIS DE SEGURIDAD E HIGIENE														
DIAGNÓSTICO DE RIESGOS		ADQUISICIÓN DE MATERIA PRIMA	TRANSPORTE	ALMACENAMIENTO	DESPACHO	SECADO	ALIMENTACIÓN A LA EXTRUSORA	EXTRUSIÓN	RECOLECCIÓN DE FIBRAS	CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL OBTENIDO	MOLDEO	SECADO DE MOLDE	ENSAYOS	REDACCIÓN
TIPOS DE RIESGOS	PROCESOS													
# DE TRABAJADORES		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
FÍSICO	Exposición a ruido						✓	✓	✓					
	Exposición a vibraciones						✓	✓						
	Exposición a temperaturas elevadas					✓	✓	✓	✓		✓			
	Riesgos de incendios			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MECANICO	Exposición a instalaciones eléctricas					✓	✓	✓			✓		✓	
	Exposición a vapores						✓	✓	✓					
BIOLOGICO Y QUIMICO	Exposición a polvos						✓				✓			
	Exposición a bacterias	✓												
ERGONOMICO	Sobre esfuerzo físico / sobre tensión					✓								
	Posturas inadecuadas								✓		✓			
	Movimientos repetitivos								✓					
	Levantar objetos en forma incorrecta					✓								
PSICOSOCIAL	Apremio de tiempo													✓
	Exigencia de concentración / atención													✓
	Nivel de responsabilidad alto					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Falta de conocimiento / experiencia	✓									✓	✓		
	Desplazamientos largos al trabajo	✓	✓											

Fuente: Propia

3.3.3 ACCIONES PREVENTIVAS PARA LOS RIESGOS INVOLUCRADOS AL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FIBRAS.

Cada riesgo involucrado al proceso debe tener una acción de prevención, a continuación se detalla las acciones tomadas para cada uno de los potenciales riesgos involucrados en el proyecto.

3.3.3.1 Exposición a ruido.

Si bien se tomo en cuenta el ruido generado por la extrusora durante el proceso, no era tan fuerte como para la utilización de orejeras, que lejos de ser una ayuda hubiesen dificultado la comunicación entre quienes participamos del proyecto.

3.3.3.2 Exposición a vibraciones.

Debido a que el movimiento transmitido por el motor hacia el tornillo extrusor era ejecutado por una cadena, esto generaba un mínimo de vibraciones que fueron tomadas en cuenta en el análisis de riesgos, pero que no eran de una magnitud que exigiese algún tipo de medida cautelar.

3.3.3.3 Exposición a temperaturas elevadas.

Esta es una de las condiciones presentes durante la gran mayoría de eventos que conforman el proceso de extrusión, con el agravante de que, las temperaturas empleadas en él son muy altas para lo tolerable por el cuerpo humano, por ende, es la que genera mayor riesgo y requiere de acciones preventivas.

Las acciones de prevención aplicadas frente a este riesgo son:

- Uso de mandiles y guantes de cuero (*figura 3.5*), para evitar quemaduras durante la ejecución del proceso, manipulación de la materia prima y reacciones químicas exógenas como la de secado de la resina poliéster.



Figura 3.5.- Mandil de jean y guantes de cuero para prevenir quemaduras.

- Ejecución de los proceso en ambientes abiertos para evitar la concentración de calor.
- Distanciamiento de cualquier elemento inflamable o combustible cercano al horno y la extrusora.

3.3.3.4 Riesgos de incendios.

Este riesgo está presente siempre que estemos rodeados de material inflamable y está muy relacionado con el de exposición a altas temperaturas por lo que, las acciones tomadas para estos dos son complementarias:

- Buscar que cualquier material propenso a la combustión este alejado de elementos que generen temperaturas elevadas, chispa o que requieran de electricidad para su funcionamiento.
- Preocuparse del buen estado de las conexiones eléctricas en la extrusora, herramientas motrices y horno.
- Revisar que en el horno y la extrusora no estén depositados elementos ajenos al proceso.

3.3.3.5 Exposición a instalaciones eléctricas.

A más del riesgo de incendio relacionado a las instalaciones eléctricas, éstas presentan un riesgo de descargas sobre sus operadores, por lo que las prevenciones tomadas para este riesgo son:

- Todas las instalaciones e interruptores utilizados deben encontrarse en buen estado.
- Asegurarse que el voltaje de los tomacorrientes a utilizar corresponda al requerido por el equipo a ser conectado.
- No sobrecargar los toma corrientes conectando varios equipos que demanden de gran cantidad de energía.
- Verificar que los cables de las máquinas utilizadas se encuentren correctamente aislados.

3.3.3.6 Exposición a vapores.

Durante el proceso de extrusión, debido a las temperaturas que se alcanzan y la presencia de humedad en la materia prima extruida, existe emanación de vapores, sin embargo es mínima por lo que no amerita el uso de mascarillas o cualquier otra acción preventiva.

3.3.3.7 Exposición a polvos.

Durante todo el proceso existen dos momentos en que se está expuesto polvo, en la alimentación de la extrusora y el moldeo de las probetas de material compuesto; las acciones preventivas adoptadas frente a este riesgo son:

- Uso de mascarillas.
- Trabajo en áreas ventiladas.
- Empleo de gafas protectoras.



Figura 3.6.- Mascarilla y gafas para protección contra polvo.

3.3.3.8 Exposición a bacterias.

El PET durante el periodo de almacenamiento, por el hecho de ser molido, es propenso a almacenar humedad, lo que lo convierte en un elemento expuesto a la proliferación de bacterias. Debido a las temperaturas alcanzadas durante el precalentamiento de la materia prima y en el proceso mismo de extrusión, estas bacterias son eliminadas casi en su totalidad, sin embargo es importante que:

- El sitio de almacenamiento de la materia esté libre de humedad.
- La materia prima reciba la suficiente ventilación e iluminación para dificultar la generación de bacterias.

3.3.3.9 Sobre esfuerzo físico / sobre tensión.

Una parte fundamental del proceso es el precalentamiento de la materia prima, esta requiere de la presencia de un horno de mufla que debía ser transportado desde el laboratorio de ciencia de los materiales; debido al peso del horno, exigía un sobre esfuerzo por quienes lo transportaban hasta el sitio del proceso, por lo que:

- Se busca el mayor número de personas que puedan colaborar en el traslado del horno.

- Se procura optimizar el tiempo de uso del horno para no tener que transportarlo más de una vez.

3.3.3.10 Posturas inadecuadas.

El estiramiento y recolección de fibras a la salida de la extrusora, exige del operario una postura incómoda y que se debe mantener hasta conseguir la cantidad de fibra deseada; para reducir el riesgo que esto implica se busca:

- Alternar, repetidamente entre los participantes del proyecto, el encargado de ejecutar esta etapa del proceso general.
- Adoptar una posición que exija el menor esfuerzo de parte de la espalda fundamentalmente.
- Optimizar el tiempo empleado en este paso, con una preparación adecuada de la máquina, de manera que sea el mínimo posible.



Figura 3.7.- Postura adecuada e inadecuada, respectivamente, durante la recolección de fibra.

3.3.3.11 Movimientos repetitivos.

Este riesgo se presenta en el proceso, durante la misma etapa en la que aparece el riesgo por posturas inadecuadas, por lo que las acciones adoptadas para este riesgo anterior, son parte de la prevención de este último.

3.3.3.12 Levantar objetos en forma incorrecta.

Este riesgo aparece fundamentalmente cuando el objeto a levantar es de un peso considerable, esto se da durante el proceso, cuando se tiene que reubicar el horno de mufla para lo que se toma las siguientes precauciones:

- Tratar de flexionar las piernas y mantener la espalda recta durante la acción de levantar, para reducir el riesgo de lesiones en la espalda.
- Debido al peso del horno y las distancias que se lo tiene que transportar, se utiliza guantes y cinturones de soporte para la espalda.

3.3.3.13 Apremio de tiempo.

Este riesgo se presenta durante toda la ejecución del proyecto, pero de manera fundamental en la etapa de redacción, para evitar cualquier tipo de problema como consecuencia de este riesgo, se opta por:

- Realizar una planificación detallada de avance en la redacción de este proyecto.
- Respetar el cronograma y tiempos pactados para todas las actividades prevista a ejecutar.
- Acudir a fuentes adecuadas para la obtención de información requerida para resolver alguna inquietud presentada durante la redacción.

3.3.3.14 Exigencia de concentración / atención profunda.

Esto se experimenta fundamentalmente durante la realización de los ensayos a las probetas y en la parte de la redacción correspondiente a los cálculos realizados. Las acciones tomadas para minimizar este riesgo fueron:

- Los ensayos en los laboratorios se los hacía en un horario donde no haya mayor afluencia de gente.

- Se planificaron cuidadosamente la realización de los ensayos para que no se presenten imprevistos que restaran atención en la ejecución de éstos.
- Para la redacción de este proyecto se procuro siempre un sitio con el mínimo de distracciones y ruidos, de manera que colaborase con la concentración.

3.3.3.15 Nivel de responsabilidad alto.

Este riesgo está presente prácticamente durante todo el desarrollo del proyecto, ya que un proyecto de investigación demanda de un alto nivel de responsabilidad para que los resultados correspondan a la verdad. Tomando en cuenta esto:

- Se trata de que toda la información utilizada como fundamento teórico del proyecto provenga de fuentes confiables.
- Todos los ensayos y toma de datos se hacen a conciencia.
- Todo lo expuesto en el texto del proyecto corresponde únicamente a lo arrojado por el estudio experimental realizado.

3.3.3.16 Falta de conocimiento / experiencia.

El manejo de la resina poliéster y la fibra de vidrio como material compuesto, al igual que todo el proceso de moldeo de las probetas era un tema en el que no se tenía el conocimiento y menos aun la experiencia necesaria, por lo que:

- Se busca la información necesaria sobre el tema.
- Es indispensable solicitar la supervisión de una persona que si cuente con la información y experiencia necesaria en este tema.

- Se busca un sitio adecuado para la elaboración de las probetas de material compuesto.



Figura 3.8.- Persona y taller con experiencia en trabajos de fibra de vidrio.

3.3.3.17 Desplazamientos largos al trabajo.

La única distancia larga cubierta dentro del proceso de obtención de fibras de RPET, es durante la adquisición y transporte de este, pues la bodega donde se adquiere el PET molido está ubicada en Calderón como a 50km de los laboratorios de la ESPE, esta tarea no es de repetición constante, es decir no involucra un riesgo psicosocial.

3.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO MÁQUINA EXTRUSORA.

Una vez identificados los componentes fundamentales de la extrusora y familiarizados con su función, es necesario comprobar que ésta se encuentra en plenas condiciones de funcionamiento tanto en la parte mecánica como los instrumentos de control que la componen.

El procedimiento a seguir para las pruebas de funcionamiento de la máquina extrusora consiste en:

- Encender las resistencias eléctricas que la componen, y comprobar con la ayuda de una termocupla (*figura 3.9*) que las temperaturas mostradas

por los controladores digitales correspondan a la lectura obtenida en el multímetro.



Figura 3.9.- Controles digitales y termocupla conectada a un multímetro.

- Establecer el tiempo que la máquina requiere para alcanzar la temperatura necesaria para el proceso de extrusión del PET (*Teóricamente 240°C*).
- Para evitar daños en la extrusora, una vez que el husillo alcanza la temperatura necesaria de trabajo y con el variador de frecuencia en su mínimo valor, se enciende el motor eléctrico que induce el movimiento al tornillo.
- Iniciando con revoluciones bajas y subiéndolas paulatinamente, con la ayuda del variador de frecuencia (*figura 3.10*), se hace girar al tornillo de manera que este evacue del husillo todo el material remanente ahí existente, al tiempo que comprobamos el correcto funcionamiento del sistema.



Figura 3.10.- Variador de frecuencia y motor eléctrico.

- Una vez evacuado todo el material residual, se coloca en la tolva de alimentación hojuelas de PET para así comprobar que el tornillo cumpla con las funciones de arrastre, compresión y empuje; se modifica, con la ayuda del variador de frecuencia, la velocidad del motor hasta obtener un flujo de material constante a través del orificio de la matriz.

3.4.1 OBSERVACIONES Y CORRECCIONES POSTERIORES A LA PRIMERA PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO.

A pesar del correcto desempeño mecánico mostrado por la extrusora, se avizoraba una gran dificultad para la obtención de fibras debido a que la geometría de la matriz no era la adecuada para el efecto como se observa en la *figura 3.11*.



Figura 3.11.- Matriz de salida inadecuada para la obtención de fibras.

La geometría de la matriz existente en la extrusora provocaba que el material que fluía a través de ella, se deslizase por la superficie de su sección transversal y una vez que se acumulaba cayera a manera de gotas gruesas, y no de forma constante y con un diámetro acorde a la del orificio de la matriz. Para corregir esta dificultad encontrada en el proceso de obtención de las fibras de RPET, se diseño y adapto una boquilla, a la matriz de la extrusora, que permita un flujo constante y evite que el fluido se cole por las paredes de la matriz, manteniendo de esta manera un diámetro acorde al de el orificio de salida.

3.4.2 DISEÑO DE LA BOQUILLA DE SALIDA.

Analizando la geometría de la matriz de la extrusora, se considera que la solución más adecuada para conseguir que el flujo del material extruido no se adhiera a las paredes de la misma, es acoplar una boquilla con forma cónica que permita la libre caída del material a la salida. El diámetro del orificio de la matriz original era el adecuado, por lo que era necesario mantener el mismo diámetro en la boquilla a adaptar. Es necesario también, hacer la boquilla del mismo material de la matriz para de esta manera evitar la aparición de esfuerzos en el área de acople, debidos a diferencias en el coeficiente de dilatación.

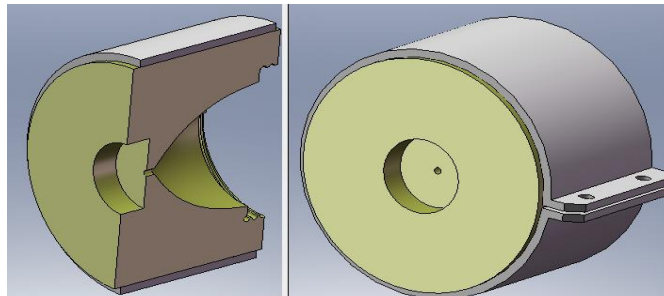


Figura 3.12.- Geometría de la matriz original.

Para acoplar la boquilla a la matriz original, se realizó un agujero pasante y roscado en la matriz de manera que permita el montaje de la nueva pieza diseñada.

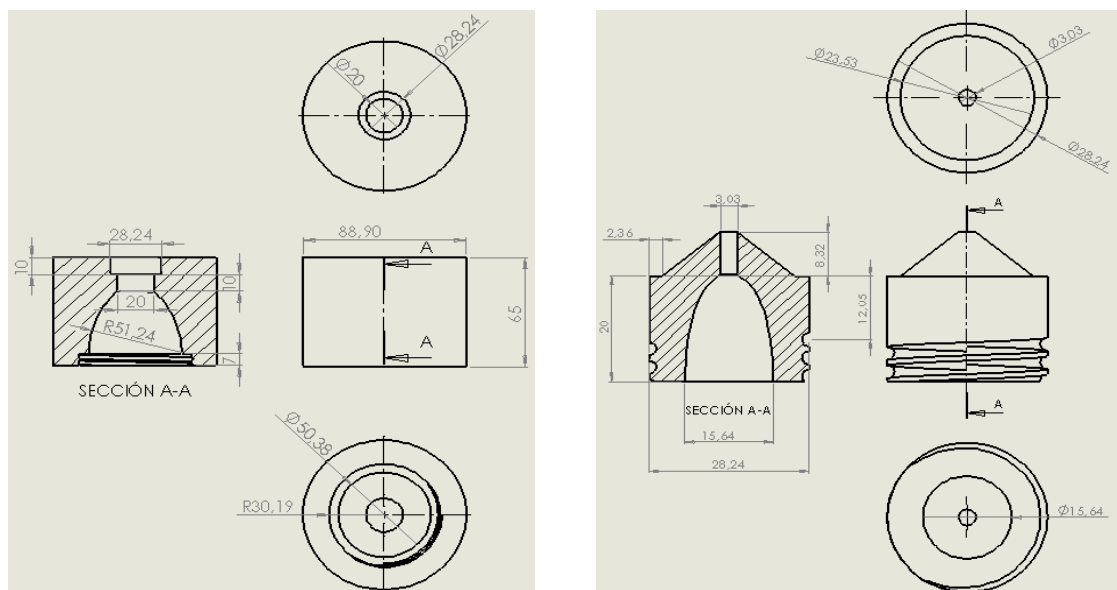


Figura 3.13.- Diseño de la boquilla.

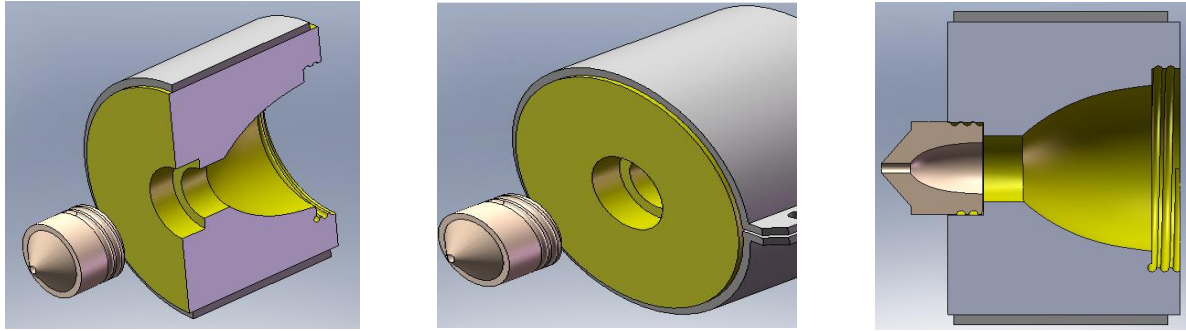


Figura 3.14 .- Montaje de la boquilla en la matriz.

Una vez montada la boquilla en la matriz de salida se realizan las pruebas pertinentes con el fin de comprobar si la boquilla hace el aporte esperado facilitando la obtención de fibras de RPET. Se puede observar entonces que la boquilla cumple con el propósito para la que fue diseñada, facilitando considerablemente el proceso de obtención de fibras de RPET.



Figura 3.15.- Pruebas con la boquilla montada en la Matriz de salida.

3.5 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE FIBRAS.

Una vez hechas las adaptaciones necesarias a la extrusora, faltaba por determinar el procedimiento para la fabricación de las fibras de RPET más idóneas, que posteriormente se constituirán en el refuerzo del material compuesto al que se le realizaran los ensayos de flexión.

El procedimiento adoptado para la fabricación de fibras de RPET es el descrito a continuación:

3.5.1 PRECALENTAMIENTO DE HOJUELAS DE PET A SER EXTRUIDAS.

El objetivo principal del precalentamiento de la materia prima es eliminar la humedad existente en las hojuelas de PET, humedad que durante el proceso genera vapor de agua, mismo que ocasiona la presencia de burbujas en las fibras obtenidas y afecta la continuidad del flujo, dificultando con esto la obtención de fibras. También contribuye favorablemente al proceso el que la materia prima ya posea una temperatura elevada para el inicio del proceso.

Este paso se lleva a cabo con la ayuda de un horno de mufla perteneciente al laboratorio de ciencia de materiales.

3.5.2 PROCESO DE PRECALENTAMIENTO DE LAS HOJUELAS DE PET.

- Para el precalentamiento de la materia prima se determina, en base a las pruebas de funcionamiento previas, la cantidad de material que será empleado durante la etapa de extrusión (*Aprox. 350 g*), pues debido al tiempo que toma un adecuado precalentamiento, éste no se puede ser realizado de forma inmediata en caso de que faltase materia prima para completar el proceso.
- Una vez determinada la cantidad de material, es necesario fabricar un recipiente que permita depositar ésta cantidad dentro del horno, para éste propósito, con una lámina de acero inoxidable de 1mm de espesor se fabrico una bandeja de 300 mm de largo, 150 mm de ancho y 20 mm de alto, donde se depositan las hojuelas a ser precalentadas dentro del horno.
- El proceso de precalentamiento debe ser a temperatura constante, lo que implica dejar al horno de mufla (*figura 3.16*) que alcance la temperatura de precalentamiento (180°) antes de introducir en él la materia prima.
- Cuando el horno haya alcanzado la temperatura deseada, se introduce el recipiente con las hojuelas de PET y se lo deja ahí por el tiempo determinado para el precalentamiento (*3 horas*).

- Cumplido el tiempo de precalentamiento, se apaga el horno y se extrae de a poco (*Aprox. 110 g*) y progresivamente, la materia prima para ser depositada en la tolva de alimentación de la extrusora.
- La cantidad de material depositado en la tolva está limitada por la velocidad de alimentación de la máquina, ya que si la materia prima queda depositada en la tolva de alimentación por más de un minuto, esta empieza a enfriarse y absorber humedad, dejando inútil el proceso anterior.



Figura 3.16.- Horno de mufla utilizado para el precalentamiento.

3.5.3 PUESTA A PUNTO DE LA EXTRUSORA.

Previo a iniciar el proceso, la extrusora debe alcanzar la temperatura de trabajo, que para el caso del PET no será inferior a 215 ni mayor a 260 °C (*figura 3.17*); es decir, no se puede iniciar el proceso, poner el motor en movimiento, si las resistencias del husillo y la matriz no han alcanzado antes esta temperatura.



Figura 3.17.- Extrusora dentro de la temperatura de trabajo.

3.5.4 EVACUACIÓN DE MATERIAL RESIDUAL.

Después de cada proceso de extrusión, una pequeña cantidad del material trabajado se queda a manera de remanente alojado en los espacios existentes entre el tornillo y el cilindro; para la evacuación de este residual (*figura 3.18*) es necesario permitir que la extrusora alcance su temperatura de trabajo, caso contrario se atentaría contra la integridad física de ésta ya que el material residual una vez enfriada la máquina se solidifica perdiendo totalmente su capacidad de fluir. Este proceso debe ser iniciado con el motor a baja velocidad, ir incrementando paulatinamente y cuando ya parece no quedar material residual, incrementar la velocidad hasta que un valor de 35 en el variador de frecuencia por unos 10 segundos.



Figura 3.18.- Evacuación de material residual.

3.5.5 ALIMENTACIÓN DE LA EXTRUSORA.

Una vez evacuado todo el material residual del husillo de la extrusora, se fija una temperatura y se procede a alimentarla con las hojuelas de PET precalentado (*figura 3.19*). Es fundamental para el buen desarrollo del proceso el preocuparse de que la alimentación sea continua, de esta manera se consigue que el flujo del material a la salida de la matriz también sea homogéneo y que se facilite la obtención de fibras continuas y no retazos de éstas.



Figura 3.19.- Alimentación de la extrusora.

3.5.6 ESTABILIZACIÓN DE LA EXTRUSORA.

Al inicio de la alimentación la extrusora genera un flujo intermitente de RPET fundido de caudal inconstante, para estabilizar el flujo de salida y el proceso en sí, es necesario variar la velocidad de giro del tornillo de manera aleatoria hasta que se regule el flujo, para finalmente estabilizar el motor en la velocidad que preste las mejores facilidades para la generación de fibras.

3.5.7 ESTIRAMIENTO Y RECOLECCIÓN DE LAS FIBRAS.

Cuando se ha conseguido que el flujo en la boquilla de salida de la extrusora sea lo más constante y homogéneo posible, se estira el material de forma manual (*figura 3.20*), buscando obtener fibras continuas de diámetro constante. Debido a que, por más que se busque, tanto el flujo como el caudal de salida de la boquilla no son completamente homogéneos, es necesario que el estiramiento al igual que la recolección sean hechos de manera manual, con el fin de que puedan ser variados en función de los cambios del flujo y así obtener fibras de diámetro, a la vista, homogéneo.

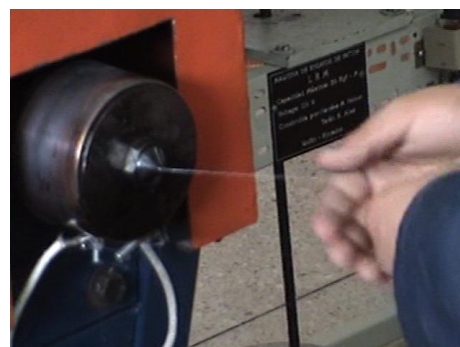


Figura 3.20.- Estiramiento del fluido para formar fibras.

3.6 PARÁMETROS IDEALES PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.

Para determinar los parámetros ideales del proceso, se repite el “procedimiento para obtención de fibras”, variando los parámetros que se involucran en éste y sus diferentes combinaciones. Se adopta como parámetros óptimos del proceso a aquellos que brindan las mejores facilidades para la fabricación de fibras de RPET. Los parámetros más importantes involucrados en el proceso son:

- Temperatura de precalentamiento.
- Tiempo de precalentamiento.
- Temperatura de las resistencias del husillo.
- Temperatura de la resistencia en la matriz.
- Velocidad del motor (regulada por el variador de frecuencia).
- Estiramiento del fluido a la salida de la boquilla.

Tabla 3.5.- Variación de parámetros durante el procedimiento.

Tiempo de secado a 180°C (h)	color al salir del horno	temperatura del tornillo (°C)	temperatura del dado (°C)	color del fluido al salir de la extrusora	Frecuencias utilizadas para el motor			Se obtuvieron fibras
					10	20	30	
					flujo a la salida de el dado			
2.5	blanco	240	240	transparente	inconstante	inconstante	inconstante	no
		230	240	transparente	inconstante	inconstante	inconstante	
		240	230	transparente	inconstante	inconstante	inconstante	
		230	230	turbio	inconstante	inconstante	constante	
		220	220	blanco	constante	constante	constante	
4	amarillento	240	240	crema	inconstante	inconstante	inconstante	no
		230	240	crema	inconstante	inconstante	inconstante	
		240	230	amarillento	inconstante	constante	inconstante	
		230	230	amarillento	constante	constante	inconstante	si
		220	220	amarillento	constante	constante	constante	
3.5	blanco	240	240	amarillento	inconstante	inconstante	inconstante	no
		230	240	amarillento	inconstante	inconstante	constante	
		240	230	amarillento	inconstante	constante	constante	si
		230	230	transparente	constante	constante	constante	
		220	220	transparente	constante	constante	constante	
3	blanco	240	240	amarillento	inconstante	inconstante	inconstante	no
		240	230	amarillento	inconstante	constante	constante	
		230	240	amarillento	constante	inconstante	constante	si
		230	230	transparente	constante	constante	constante	
		220	220	transparente	constante	constante	constante	

Fuente: Propia

En base a los resultados obtenidos de las distintas combinaciones se pudo concluir que:

Tabla 3.6.- Parámetros ideales para la obtención de fibras de RPET.

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de precalentamiento.	180	°C
Tiempo de precalentamiento.	3	horas
Temperatura de las resistencias del husillo.	225	°C
Temperatura de la resistencia en la matriz.	225	°C
Velocidad del motor (regulada por el variador de frecuencia).	30 (10)	RPM (Hz)
Estiramiento del fluido a la salida de la boquilla.	variable	-----

Fuente: Propia

- La temperatura óptima de precalentamiento para 350 g de hojuelas de PET lavado es 180 °C (*figura 3.21*), obviamente esta temperatura está íntimamente relacionada con el tiempo que se emplee para el precalentamiento.

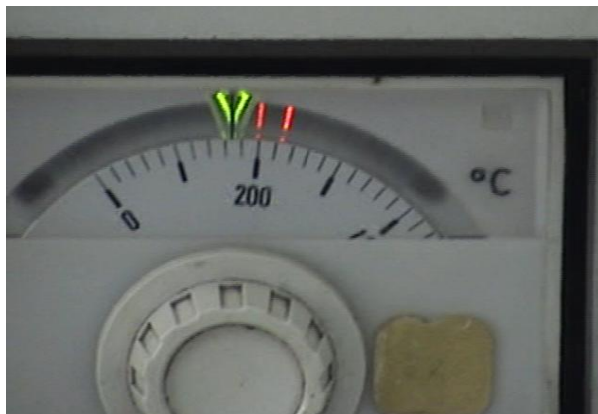


Figura 3.21.- Temperatura de precalentamiento.

- Si no se alcanza esta temperatura se dificulta la obtención de un flujo constante a la salida de la extrusora y consecuentemente la obtención de fibras de RPET.
- Si se excede los 180 °C durante el precalentamiento, se evidencia un cambio en las propiedades fundamentales de la materia prima,

tornándose amarillenta, frágil e incluso llegando a aglutinarse formando una sola masa (*figura 3.22*) que resulta imposible procesar en la extrusora.



Figura 3.22.- Materia prima precalentada a excesiva temperatura.

- El tiempo ideal de precalentamiento a 180 °C para 350 g de hojuelas de RPET lavado es de tres horas, este tiempo requiere que el horno ya haya alcanzado previamente la temperatura mencionada.
- Un tiempo inferior de precalentamiento no elimina por completo la humedad presente en la materia prima, generando problemas durante el proceso de extrusión.
- Un tiempo mayor a tres horas implicaría un gasto innecesario de energía y un tiempo excesivamente prolongado alteraría las propiedades fundamentales del material impidiendo un buen resultado en la extrusión (*figura 3.23*).



Figura 3.23.- Material obtenido de la extrusión de PET precalentado a 180°C por un tiempo mayor a 4 horas.

- El trabajar con una misma temperatura (225°C) en el husillo y la matriz, proporciona las mejores condiciones para la obtención de fibra de RPET, pues brinda las facilidades de flujo adecuadas y la consistencia del material idónea para la formación de fibras.
- El trabajar con temperaturas distintas para el husillo (*figura 3.24*) y la matriz perjudica el flujo del material, haciéndolo irregular y dificultando así la obtención de fibras.



Figura 3.24.- Temperatura del husillo inferior a temperatura de la matriz.

- Una temperatura inferior a 225°C afecta la consistencia necesaria del fluido para la formación de fibras, lo que repercute en un flujo incontrolado a la salida de la boquilla.
- Si se excede los 225°C de temperatura de trabajo, el material a la salida de la boquilla no posee la viscosidad necesaria y lejos de fluir empieza a gotear impidiendo el que se pueda conseguir fibras (*figura 3.25*).



Figura 3.25.- Flujo poco viscoso por elevada temperatura de trabajo.

- La velocidad de giro del motor es controlada con la ayuda de un variador de frecuencia. Durante la etapa de evacuación de material residual se emplea una velocidad alta con el fin de ahorrar tiempo.
- Durante la fabricación de fibras y una vez que se ha estabilizado la máquina y el flujo del material, tanto en la alimentación cuanto en la salida, la velocidad ideal es la correspondiente a un valor de frecuencia de alrededor de 10Hz, equivalente a 30 RPM velocidad a la que el flujo de salida es regular y permite una fácil obtención de fibras.
- Si bien es necesario el variar la velocidad de manera aleatoria hasta obtener las mejores condiciones de flujo, el valor mostrado en el display del variador de frecuencia, no debe alejarse mucho de 10 para alcanzar buenos resultados.
- El fluido que cae, a través del orificio de la matriz al final del proceso, debe ser estirado con el propósito de formar las fibras. El diámetro y propiedades de las fibras dependerán de cuanto sean estiradas en la parte final del proceso.
- Si el estiramiento es mínimo se forman fibras de sección irregular.
- Si el estiramiento es excesivo las fibras obtenidas son muy finas (*figura 3.26*) y se pueden arrancar durante el proceso impidiendo el obtener buena cantidad de fibra continua y reduciendo significativamente su capacidad de deformación frente a la tracción.

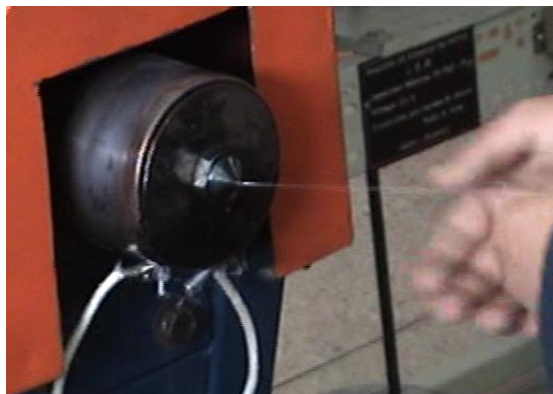


Figura 3.26.- Excesivo estiramiento durante la fabricación de fibras.

3.7 EVALUACIÓN DE LAS FIBRAS OBTENIDAS.

Para determinar las características mecánicas que presentaban las fibras de RPET, se procede a separarlas en función de los valores de las variables (parámetros) con las que son obtenidas en la extrusora (*figura 3.27*) y se las somete a un ensayo de tracción.



Figura 3.27.- Fibras de RPET obtenidas.

3.7.1 ENSAYOS DE TRACCIÓN A LAS FIBRAS DE RPET.

La máquina seleccionada para los ensayos de tracción a las fibras, fue la máquina de tracción horizontal (*figura 3.28*) y el procedimiento seguido fue el siguiente:



Figura 3.28.- Máquina de tracción horizontal.

- Se tomaron varios pedazos de las fibras de RPET (*figura 3.29*) obtenidas con cada uno de las distintas combinaciones de valores de de los parámetros.



Figura 3.29.- Pedazo de fibra sometida a tracción.

- Con la ayuda de un pie de rey digital (*figura 3.30*), se tomaron 5 medidas de su diámetro a lo largo de toda su longitud, para obtener un valor promedio de éste.



Figura 3.30.- Diámetro promedio de las fibras de RPET obtenidas.

- Una vez colocadas las fibras en la máquina, se realizan marcas que delimitan pedazos de 10 cm (*figura 3.31*), valor adoptado como longitud inicial.



Figura 3.31.- Máquina de tracción horizontal.

- Se coloca una hoja de papel milimetrado (*figura 3.32*), para de esta manera facilitar la interpretación del gráfico arrojado por la máquina.

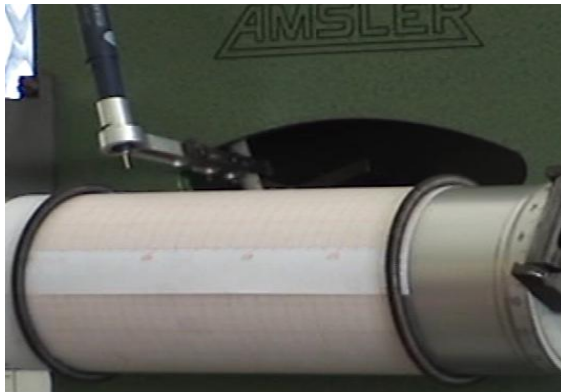


Figura 3.32.- Papel milimetrado montado en la máquina de tracción horizontal.

- Con el fin de obtener una mayor apreciación en los gráficos se selecciona la escala más baja proporcionada por la máquina (*figura 3.33*), misma que posterior al ensayo demostró ser la adecuada.

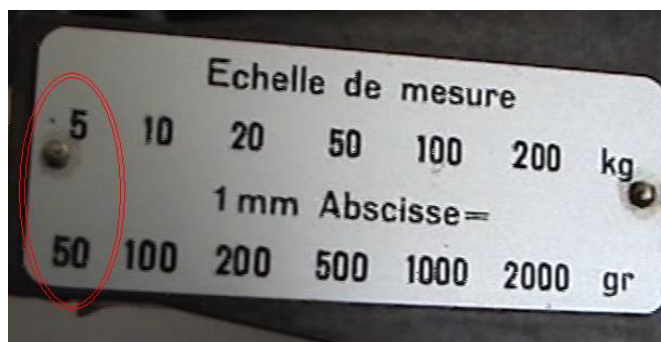


Figura 3.33.- Placa de escalas de la máquina de tracción horizontal.

- Una vez encerrada la máquina se procedió a realizar el ensayo a los diferentes grupos de fibras, hasta de terminar un patrón de comportamiento para las fibras obtenidas bajo los mismos parámetros.
- Finalizado el ensayo se retiraron las fibras de la máquina para determinar la deformación que estas sufrieron.
- Con la interpretación del gráfico en el papel milimetrado (*figura 3.34*) proporcionado por la máquina, se puede determinar el comportamiento a tracción de las fibras de RPET.

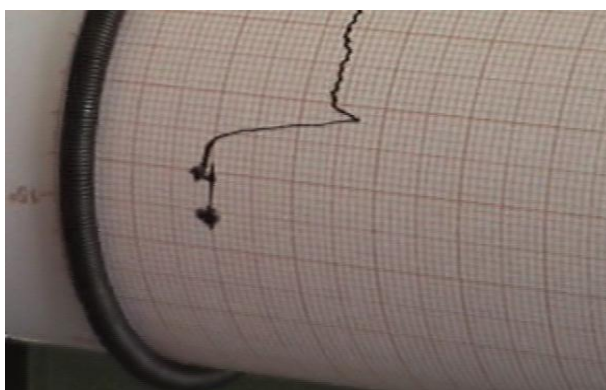


Figura 3.34.- Gráfico arrojado por la máquina de tracción horizontal.

3.7.2 Comportamiento de las fibras de RPET frente a los ensayos de tracción.

El comportamiento mostrado por las fibras de RPET durante el ensayo de tracción, difiere mucho entre fibras obtenidas con parámetros de trabajo, de la extrusora, distintos; es decir, las fibras obtenidas con unos parámetros de trabajo respondían diferente a los ensayos de tracción que las fibras obtenidas con otros parámetros.

Las fibras obtenidas bajo parámetros diferentes a los ideales (*tabla 3.6*), al ser sometidas a tracción presentaban una deformación mínima o nula, en su mayoría, previo a la ruptura (*figura 3.35*).

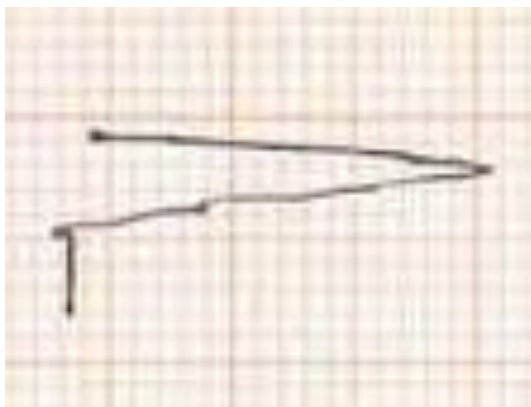


Figura 3.35.- Gráfico arrojado por la máquina de tracción horizontal para fibras sin deformación elástica.

En base a los resultados arrojados por las fibras obtenidas bajo parámetros no ideales se realizaron los siguientes cálculos:

Cálculo del alargamiento porcentual

$$A\% = (L - L_0) / L_0 * 100$$

Ecuación 3.1

Donde:

A%=alargamiento porcentual

L= longitud final

L₀= longitud inicial

Ejemplo de cálculo:

$$A\%_2 = [(2.06 - 2) / 2] * 100$$

$$A\%_2 = 3.20$$

Cálculo del Esfuerzo último

$$\sigma_u = P_u / A$$

Ecuación 3.2

Donde:

σ_u =Esfuerzo último

P_u =Fuerza última

A= Área transversal

Ejemplo de cálculo:

$$\sigma_{u_2} = 1 \text{ kg} / 3.215 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{u_2} = 311 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$10 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_{u_2} = 31.10 \text{ MPa}$$

Tabla 3.7.- Resultados frente a la tracción de fibras obtenidas bajo parámetros de fabricación no ideales.

#	Diámetro (cm)	Lo (cm)	A(cm ²)	L (cm)	Alargamiento Porcentual (A%)	Fuerza última P _u (kg)	Esfuerzo último σ_u (MPa)
1	0.062	2	0.003018	2.00	0.00	0.45	14.91
2	0.064	2	0.003215	2.06	3.20	1	31.10
3	0.065	2	0.003317	2.13	6.45	2	60.30
4	0.062	2	0.003018	2.00	0.00	0.45	14.91
5	0.063	2	0.003116	2.00	0.00	0.45	14.44
Promedio						0.87	27.13

Fuente: Propia

Las fibras obtenidas dentro de los parámetros de trabajo catalogados como ideales, durante el ensayo de tracción, presentaban gran deformación previa a la ruptura, deformación que era uniforme a lo largo de toda la fibra (*figura 3.36*).

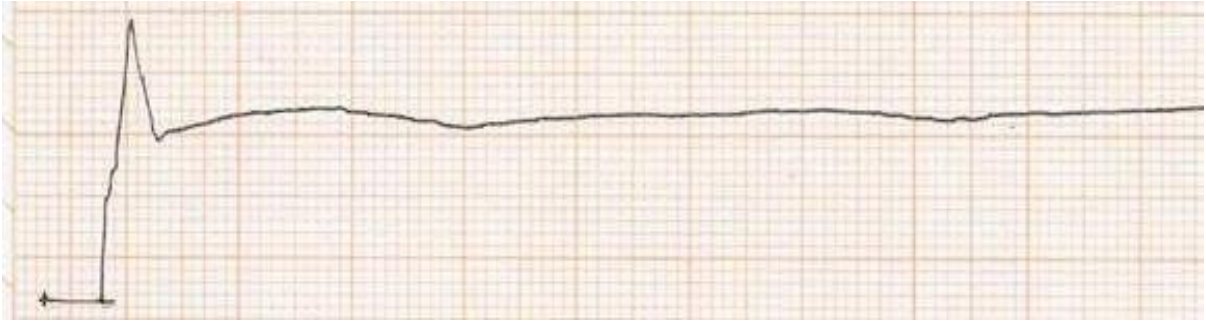


Figura 3.36.- Gráfico arrojado por la máquina de tracción horizontal para fibras con deformación elástica.

Analizando las gráficas obtenidas de los ensayos, se puede advertir el valor promedio de deformación unitaria (*figura 3.37*) correspondiente a las fibras obtenidas dentro de los parámetros ideales. Deformaciones con las que se procede a realizar los siguientes cálculos:

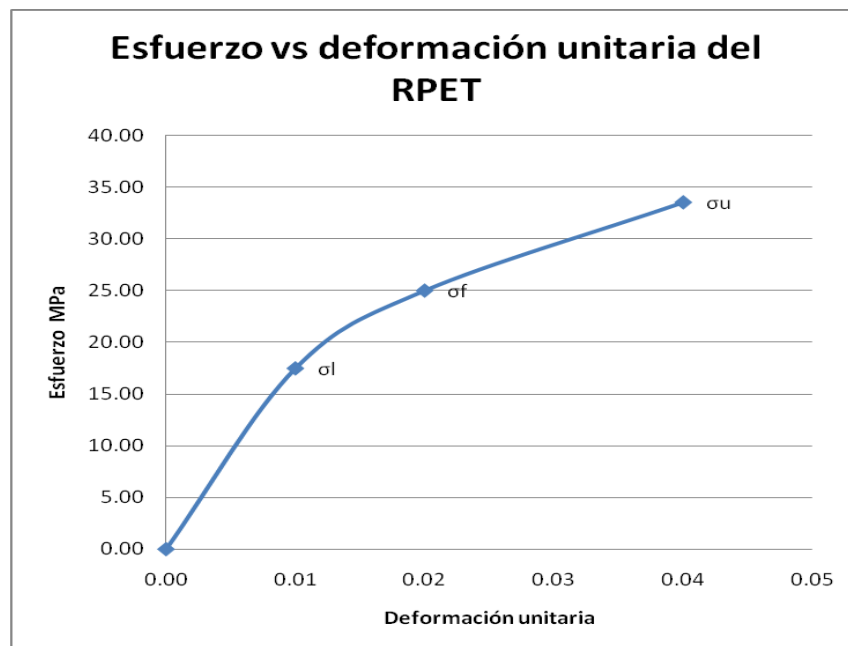


Figura 3.37.- Gráfico esfuerzo vs Deformación unitaria en base a los datos obtenidos.

Cálculo del Esfuerzo en el límite de elástico

$$\sigma_l = P_l/A$$

Ecuación 3.3

Donde:

σ_l =Esfuerzo en el límite elástico.

P_l =Fuerza aplicada en el límite elástico.

A = Área transversal de la fibra.

Ejemplo de cálculo:

$$\sigma_l = 0.55\text{kg} / 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_l = 151.4\text{Kg} / \text{cm}^2$$

$$\sigma_l = 15.14 \text{ MPa}$$

Cálculo del Módulo de Elasticidad

$$E = \sigma_l/\epsilon$$

Ecuación 3.4

Donde:

E = Módulo de elasticidad.

σ_l = Esfuerzo en el límite elástico.

ϵ = Deformación unitaria.

Ejemplo de cálculo:

$$E_g = 15.14 \text{ MPa} / 0.02$$

$$E_g = 757.23 \text{ MPa}$$

Tabla 3.8.- Resultados frente a la tracción de fibras obtenidas bajo parámetros ideales de trabajo (ANEXO A).

#	D (cm)	Lo (cm)	A (cm ²)	L (cm)	A%	PI (kg)	Pf (kg)	P u (kg)	σ_l (MPa)	σ_f (MPa)	σ_u (MPa)	E (Mpa)	
1	0.06	10.00	0.0030	33.25	232.53	0.55	0.80	1.15	18.22	26.50	38.09	910.88	
2	0.07	10.00	0.0033	32.60	226.00	0.60	0.85	1.20	18.08	25.62	36.16	904.08	
3	0.07	10.00	0.0040	36.82	268.22	0.65	0.90	1.20	16.42	22.73	30.31	820.87	
4	0.07	10.00	0.0036	35.68	256.79	0.60	0.85	1.25	16.52	23.41	34.42	826.06	
5	0.07	10.00	0.0036	37.75	277.47	0.60	0.85	1.00	16.52	23.41	27.54	826.06	
6	0.07	10.00	0.0036	33.78	237.76	0.60	0.85	1.20	16.52	23.41	33.04	826.06	
7	0.07	10.00	0.0033	34.49	244.90	0.55	0.80	1.15	16.57	24.11	34.66	828.74	
8	0.07	10.00	0.0035	34.64	246.37	0.60	0.85	1.10	17.02	24.11	31.20	850.91	
9	0.07	10.00	0.0036	33.78	237.76	0.55	0.80	1.10	15.14	22.03	30.29	757.23	
10	0.06	10.00	0.0030	35.30	252.98	0.60	0.85	1.00	19.87	28.15	33.12	993.68	
11	0.06	10.00	0.0032	33.44	234.37	0.60	0.85	1.15	18.65	26.42	35.75	932.55	
12	0.07	10.00	0.0034	33.61	236.11	0.60	0.85	1.00	17.54	24.85	29.23	876.89	
13	0.07	10.00	0.0033	34.49	244.90	0.60	0.85	1.15	18.08	25.62	34.66	904.08	
14	0.06	10.00	0.0030	31.38	213.80	0.55	0.80	1.15	18.22	26.50	38.09	910.88	
15	0.06	10.00	0.0026	35.01	250.05	0.55	0.80	1.00	20.82	30.28	37.85	1040.85	
16	0.06	10.00	0.0029	34.17	241.69	0.60	0.85	1.00	20.53	29.09	34.22	1026.53	
17	0.06	10.00	0.0028	33.06	230.58	0.55	0.80	1.15	19.45	28.29	40.67	972.61	
18	0.06	10.00	0.0030	35.30	252.98	0.55	0.80	1.10	18.22	26.50	36.44	910.88	
19	0.06	10.00	0.0031	34.33	243.34	0.55	0.80	1.10	17.64	25.66	35.29	882.19	
20	0.07	10.00	0.0036	33.78	237.76	0.60	0.85	1.20	16.52	23.41	33.04	826.06	
								PROMEDIO	1.12	17.83	25.50	34.20	891.40

Fuente: Propia

Si bien existen fibras con un comportamiento ambiguo, no se considera de mayor aporte el generar una tabla con dichos datos, pues son fibras que presentan un comportamiento similar al de las obtenidas bajo parámetros de trabajo ideales, pero que poseen puntos frágiles (fallas) en determinados sitios de su longitud, lo que implica que su deformación estará supeditada a la distancia en que se encuentre la falla respecto al punto donde inicia la deformación.

3.7.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN A LAS FIBRAS DE RPET.

En base a los resultados obtenidos de los ensayos de tracción realizados a las fibras de RPET, se puede concluir que:

- Las fibras que presentan mejores características plásticas, es decir, gran deformación previa a la ruptura, son aquellas obtenidas bajo los parámetros considerados como ideales de trabajo. Estas fibras experimentan una deformación secuencial y uniforme, frente a la tracción, en toda su extensión antes de llegar a fallar (*figura 3.38*).

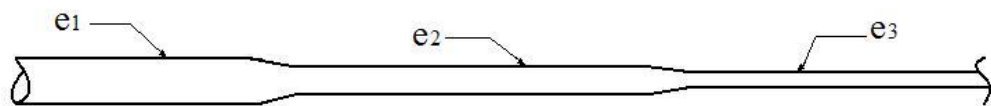


Figura 3.38.- Deformación progresiva de las fibras de RPET.

- Las fibras obtenidas de un proceso de producción donde se excedió el tiempo óptimo de precalentamiento de la materia prima o la temperatura óptima de trabajo; mostraron un comportamiento netamente plástico, con deformación nula previa a la ruptura (*figura 3.39*) y un valor medio de resistencia a la tracción de 23 MPa.

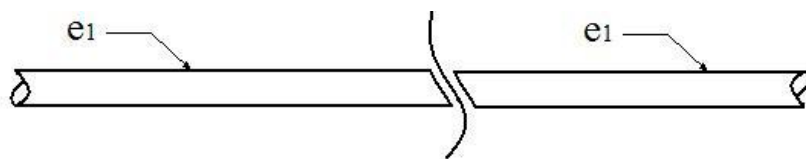


Figura 3.39.- Falla en las fibras de RPET sin deformación previa durante el ensayo de tracción.

- Las pocas fibras que resultaron de un proceso de fabricación donde el precalentamiento de la materia prima no fue el suficiente para eliminar la humedad existente en ella, presentan fallas en el recorrido de su longitud, fallas debidas a la presencia de vapor de agua durante el proceso de extrusión, vapor que genera burbujas a lo largo de las fibras

obtenidas (*figura 3.40*). Estas burbujas se convierten en los puntos de desfogue de tensión del material, lo que lo convierte en frágil y hace que presente un comportamiento ambiguo durante el ensayo de tracción.

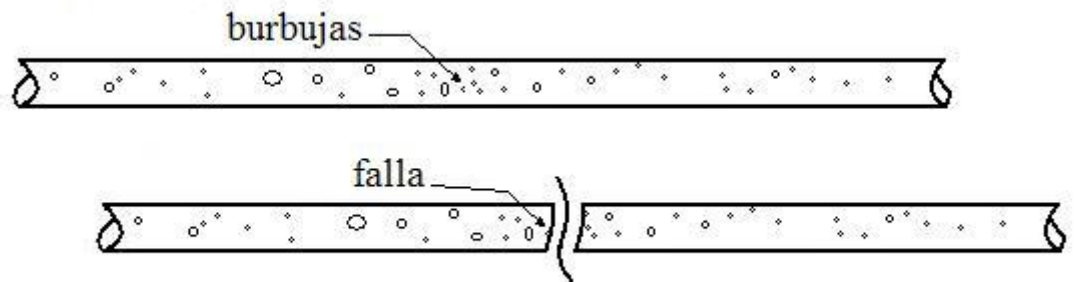


Figura 3.40.- Falla en la fibra de RPET durante el ensayo de tracción debido a la presencia de burbujas.

- Las fibras obtenidas con temperaturas de trabajo distintas a las consideradas como ideales, son fibras de sección no uniforme, es decir, el diámetro de las fibras no es constante en toda su longitud (*figura 3.41*). La presencia de secciones de diámetro menor al promedio debilita considerablemente la resistencia de la fibra frente a fuerzas de tracción al convertirse en el elemento fusible de la fibra.

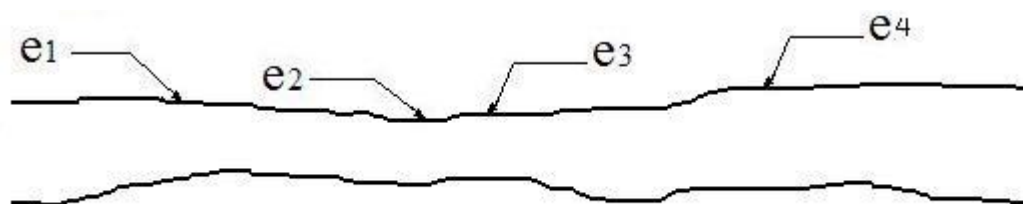


Figura 3.41.- Fibras de sección (diámetro) irregular.