

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Memoria Técnica:**

**“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA  
TEMPERATURA DE DEGRADACIÓN, ÍNDICE DE  
FLUIDEZ Y EL TORQUE MÁXIMO DEL POLIETILENO  
DE ALTA DENSIDAD EN MEZCLAS DE MATERIAL  
PURO CON PIGMENTOS Y MATERIAL RECICLADO.”**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:  
**INGENIERO MECÁNICO**

Autor:

Juan Andrés Arévalo Espinoza

Tutor:

Ing. Luis López López

Cuenca - Ecuador

2016

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, Pablo y Mercedes, que con su amor han probado que existe una manera de superar todo los problemas que la vida nos presenta.*

*A mis hermanos, Pablo Sebastian y María Mercedes, quienes han sido un apoyo en tiempos de dificultad.*

*Juan*

## **AGRADECIMIENTO**

*A familia entera, quienes me han inspirado para cumplir todos los sueños por más inalcanzables que parezcan.*

*Al Ingeniero Luis López, quién ha sido más que un tutor, un amigo y un mentor.*

*A todos aquellos que creyeron en este sueño.*

*Juan*

## DECLARATORIA

Yo, Juan Andrés Arévalo Espinoza, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual, correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana según lo establecido en la Ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

Juan Andrés Arévalo Espinoza

## CERTIFICADO

Certifico, que el presente trabajo de titulación con enfoque investigativo: “ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE DEGRADACIÓN, ÍNDICE DE FLUIDEZ Y EL TORQUE MÁXIMO DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD EN MEZCLAS DE MATERIAL PURO CON PIGMENTOS Y MATERIAL RECICLADO.” realizado por el estudiante: Juan Andrés Arévalo Espinoza, fue dirigido por mi persona.



---

Ing. Luis López López

## RESUMEN

Ante la creciente necesidad de reutilizar materia prima para la fabricación de nuevos productos en la industria de los plásticos, el presente estudio analiza el efecto que tienen la concentración de material reciclado y de pigmento sobre las propiedades reológicas de una mezcla polimérica. Se cuantificó y analizó de manera estadística la significancia de los efectos que estos componentes producen sobre las propiedades reológicas, tales como el índice de fluidez, el torque máximo y el tiempo de degradación en el polietileno de alta densidad (HDPE). El conocimiento de tales propiedades permitirá optimizar los parámetros de procesamiento al emplear mezclas poliméricas con material reciclado y pigmentos. Se evidenció un efecto mínimo de los componentes sobre el índice de fluidez.

***Palabras Clave:*** Propiedades Reológicas, Material Reciclado y Pigmentos.

## **ABSTRACT**

Given the growing request for reusing raw material in new manufactured products in the plastics industry, the present study analyzes the effect of the concentration of recycled materials and pigments on the rheological properties of the polymer blend. It was quantified and analyzed in a statistical way the significance of the effects that these components produce in the rheological properties, such as the melt flow index, the maximum torque and the degradation time on high density polyethylene (HDPE). Knowledge of such properties will optimize processing parameters by using polymer blends with recycled materials and pigments. A minimum effect of the components was evidenced on the melt flow index having the pigment content the greatest impact factor.

***Keywords:*** *Rheological Properties, Recycled Materials, Pigments.*

# Índice

<b>1. Título</b>	<b>4</b>
<b>2. Planteamiento del Problema.</b>	<b>4</b>
2.1. Situación Problemática. . . . .	4
2.2. Formulación del Problema. . . . .	4
2.3. Justificación del Trabajo. . . . .	4
<b>3. Objetivos</b>	<b>5</b>
3.1. Objetivo General. . . . .	5
3.2. Objetivos Específicos. . . . .	5
<b>4. Marco Teórico.</b>	<b>5</b>
4.1. Materiales Poliméricos. . . . .	5
4.2. Materiales Compuestos. . . . .	5
4.3. Polietileno de Alta Densidad. . . . .	6
4.4. Colorantes. . . . .	6
4.5. Propiedades Reológicas. . . . .	7
4.6. Índice de Fluidez. . . . .	7
4.7. Tiempo de Degradación. . . . .	8
<b>5. Hipótesis y Variables.</b>	<b>8</b>
5.1. Hipótesis General. . . . .	8
5.2. Hipótesis Específicas. . . . .	8
5.3. Operacionalización de Variables. . . . .	9
5.4. Matriz de Consistencia. . . . .	10
<b>6. Metodología</b>	<b>11</b>
6.1. Tipo de Investigación. . . . .	11
6.2. Diseño de la Investigación . . . . .	11
6.3. Técnicas de Recolección de Datos. . . . .	12
6.4. Análisis e interpretación de la información. . . . .	12
<b>7. Determinación del tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo en el material puro.</b>	<b>13</b>
7.1. Índice de Fluidez . . . . .	13
7.2. Torque Máximo y Tiempo de Degradación. . . . .	14

<b>8. Determinación del tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo en las diferentes mezclas de material puro, reciclado y colorante.</b>	<b>15</b>
8.1. Índice de Fluidez . . . . .	16
8.2. Torque Máximo y Tiempo de Degradación. . . . .	18
<b>9. Análisis correlacional de la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en las diferentes mezclas probadas.</b>	<b>20</b>
<b>10.Resultados y Discusión</b>	<b>21</b>
10.1. Índice de Fluidez . . . . .	22
10.2. Torque Máximo . . . . .	22
10.3. Tiempo de Degradación . . . . .	22
<b>11.Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>23</b>

# **1. Título**

Análisis de la variación de la temperatura de degradación, índice de fluidez y el torque máximo del Polietileno de Alta Densidad en mezclas de material puro con pigmentos y material reciclado.

## **2. Planteamiento del Problema.**

### **2.1. Situación Problemática.**

En la producción de elementos poliméricos a nivel industrial se presentan problemas en los productos elaborados como roturas en las líneas de soldadura, decoloración, grietas, rechupes y vacuolas, zona mate cerca del punto de colada, estrías (estrías quemadas, estrías de oxidación, vetas en el material), pulido no uniforme, líneas de flujo, jetting (efecto chorro), efecto Diesel (áreas quemadas por concentración de gases), grietas o microgrietas, grietas de tensiones, falta de llenado completo de la pieza, estos son unos de los tantos problemas que se presentan en el producto final, por ende el material a obtener se presenta con bajas propiedades mecánicas, lo cual representa altos costos de producción debido a la necesidad de reprocesar productos defectuosos que no son competitivos en el mercado como consecuencia de su baja calidad.

### **2.2. Formulación del Problema.**

La preparación de mezclas poliméricas a diferentes porcentajes de material virgen, reciclado y colorante utilizados en la producción de productos poliméricos, no cumplen con las características necesarias que se requiere para obtener un producto de buena calidad sin presentar ninguna falla. Se requiere entonces una buena composición de estos tres elementos, que permita la homogenización de la mezcla para la obtención de un producto de buena calidad.

### **2.3. Justificación del Trabajo.**

El trabajo de investigación, buscará solucionar los inconvenientes que se presentan al realizar la mezcla de material virgen con materiales reciclados, con esto se buscara mejorar la calidad de los productos, disminuir costos de producción, costo de reproceso por medio de un estudio teórico practico con equipos especializados que nos permita obtener una información valida, concreta y precisa de las diferentes propiedades que adquiere el material con las diversas mezclas; buscando elevar la calidad del producto final conociendo las variables necesarias para su producción.

## **3. Objetivos**

### **3.1. Objetivo General.**

Analizar la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en mezclas del Polietileno de Alta Densidad a diferentes porcentajes de material puro, material reciclado y colorantes, con respecto a las mismas propiedades presentes en el material puro.

### **3.2. Objetivos Específicos.**

- Determinar el tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo en el material puro.
- Determinar la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en las diferentes mezclas de material puro, reciclado y colorante.
- Realizar un análisis correlacional de la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en las diferentes mezclas probadas.

## **4. Marco Teórico.**

### **4.1. Materiales Poliméricos.**

Los polímeros son materiales formados por moléculas orgánicas gigantes, las cuales están conformadas por pequeñas moléculas que se unen mediante un proceso de polimerización. Los polímeros tienen un gran número de aplicaciones donde se incluyen juguetes, elementos decorativos y estructurales, recubrimientos, pinturas, espumas entre otros [1]. Son generalmente materiales ligeros, resistentes a la corrosión, de baja resistencia y rigidez. Sin embargo con los correctos aditivos y mezclas se puede conseguir materiales poliméricos con altas propiedades mecánicas, físicas siendo posible que estos remplacen a diferentes materiales como metales y vidrios cerámicos [2].

### **4.2. Materiales Compuestos.**

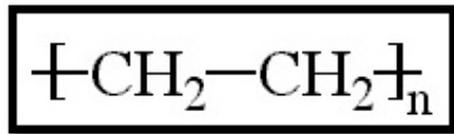
Se entiende por material compuesto al que está conformado por dos o más materiales distintos sin producirse reacciones químicas entre ellos con el fin de mejorar las propiedades del material. [3]

Generalmente se busca mejorar las propiedades funcionales como rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza, conductividad entre otros, pero también se busca conseguir mejora de propiedades estéticas como el color, apariencia, brillo entre otros.

### 4.3. Polietileno de Alta Densidad.

Los polímeros son compuestos formados por la unión de monómeros. De acuerdo a su origen o a otras características, es posible hablar de polímeros sintéticos, polímeros naturales y otros tipos. Entre los polímeros sintéticos, se encuentra el polietileno, que se obtiene mediante la polimerización de eteno (un compuesto también conocido como etileno) [4]. En la figura 1 se muestra la composición química del polietileno.

**Figura 1:** Composición química del polietileno.



**Fuente:** Tecnología de los Plásticos

El polietileno se clasifica en cuatro grupos:

- El polietileno de alta densidad (High density polyethylene, HDPE), es un material termoplástico parcialmente amorfo y parcialmente cristalino.
- El polietileno de baja densidad (Low density polyethylene, LDPE), es un termoplástico de cadena larga altamente ramificado.
- El polietileno lineal de baja densidad (Linear low density polyethylene, LLDPE), el cual es una especie de copolímero de etileno/a-olefina, que tiene una estructura molecular lineal.
- El polietileno de peso molecular ultraalto (Ultra-high molecular weight polyethylene, UHMW-PE), éste es un material termoplástico con propiedades químicas similares a las del HDPE [4].

### 4.4. Colorantes.

Las propiedades de un polímero se la pueden mejorar mediante la combinación del material con aditivos los cuales alteran su estructura molecular. El uso de colorantes en los polímeros nos da una ventaja sobre los materiales metálicos y cerámicos, ya que elimina operaciones posteriores de recubrimientos. Los pigmentos o colorantes son materiales insolubles que se mezclan en bajas concentraciones en la masa del polímero, los cuales añaden opacidad y color al plástico [5] [6]. En la figura 2 se observan pigmentos de diferentes colores.

**Figura 2:** Colorantes



**Fuente:** [www.interempresas.net](http://www.interempresas.net)

#### **4.5. Propiedades Reológicas.**

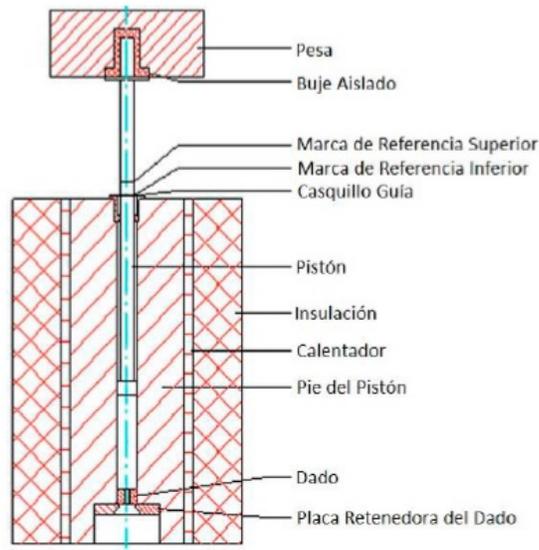
Se entiende por reología a la ciencia de la deformación y el flujo del material. En los polímeros un comportamiento reológico trae consigo diferentes fenómenos que se relacionan en algún grado con diferentes mecanismos moleculares. Estos fenómenos y sus principales mecanismos asociados se nombran a continuación:

- Flujo viscoso.
- Elasticidad de los cauchos.
- Viscoelasticidad.
- Elasticidad de Hooke [2].

#### **4.6. Índice de Fluidez.**

El índice de fluidez es el peso del material que atraviesa un orificio con un diámetro definido, a una temperatura y bajo un peso determinados en el lapso de 10 min. En la figura 3 se presenta un esquema del funcionamiento de un equipo para determinar el índice de fluidez tomado de la norma ASTM D1238-10 [7]. Esta propiedad es generalmente ocupada como medida del peso molecular siendo estos inversamente proporcionales, es decir, si tenemos un alto índice de fluidez tendremos un bajo peso molecular. Con esta propiedad también se puede determinar si el polímero es apto para el proceso de transformación en el que se pretende utilizar [8].

**Figura 3:** Esquema de Funcionamiento de un Equipo de Medición del Índice de Fluidez.



**Fuente:** Norma ASTM D1238-10

#### 4.7. Tiempo de Degradación.

El tiempo de degradación es el tiempo de permanencia máximo al cual un polímero puede trabajar a cierta temperatura sin perder sus propiedades, ya que la degradación reduce el peso molecular del material haciéndolo débil debido a que rompe los enlaces covalentes de las cadenas creadas en la polimerización.

### 5. Hipótesis y Variables.

#### 5.1. Hipótesis General.

En el procesamiento del Polietileno de Alta Densidad la adición de material reciclado y colorante al material virgen, afecta el tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo.

#### 5.2. Hipótesis Específicas.

- El tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo del Polietileno de Alta Densidad serán similares a los entregados por el proveedor del producto.
- El tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo del Polietileno de Alta Densidad virgen, reciclado y colorante tendrán un cambio drástico en sus valores comparado con los del material puro.

- El tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo del Polietileno de Alta Densidad virgen, reciclado y colorante obtenido durante el análisis de los resultados de la experimentación permitirán adecuar los parámetros de procesamiento para las diferentes mezclas.

### 5.3. Operacionalización de Variables.

**Tabla 1: Melt Flow Indexer**

VARIABLES DEPENDIENTES.		
Índice de Fluidez [g/10min] Se define como la cantidad de material (medido en gramos) que fluye a través del orificio de un dado capilar en 10 minutos, manteniendo constantes presión y temperatura estándares.		
VARIABLES INDEPENDIENTES	DEFINICION	DIMENSION.
Material	El polietileno de alta densidad es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como HD-PE (por sus siglas en inglés, High Density Polyethylene) o PEAD (polietileno de alta densidad).	
Temperatura de Fusión.	Temperatura o pequeño intervalo de temperaturas en los cuales los cristales desaparecen en un polímero semicristalino y este pasa rápidamente de sólido semicristalino a un líquido muy viscoso.	°C

**Fuente:** Autor

**Tabla 2: Plastógrafo**

VARIABLES DEPENDIENTES.		
Torque Máximo [Nm] se trata de una magnitud vectorial que se obtiene a partir del punto de aplicación de la fuerza. En este sentido, el torque hace que se produzca un giro sobre el cuerpo que lo recibe. La magnitud resulta propia de aquellos elementos donde se aplica torsión o flexión, como una viga o el eje de una máquina.		
Tiempo de Degradación [min] tiempo de permanencia del material a cierta temperatura antes de que dicho material se degrade.		
VARIABLES INDEPENDIENTES	DEFINICION	DIMENSION.
Material	El polietileno de alta densidad es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como HD-PE (por sus siglas en inglés, High Density Polyethylene) o PEAD (polietileno de alta densidad).	
Temperatura de Fusión.	Temperatura o pequeño intervalo de temperaturas en los cuales los cristales desaparecen en un polímero semicristalino y este pasa rápidamente de sólido semicristalino a un líquido muy viscoso.	°C

**Fuente:** Autor

## 5.4. Matriz de Consistencia.

**Tabla 3:** Matriz de Consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Indicadores
¿Cuáles son las variaciones del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo del Polietileno de Alta Densidad virgen cuando se lo mezcla con material reciclado y colorante?	Analizar la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en mezclas del Polietileno de Alta Densidad a diferentes porcentajes de material puro, material reciclado y colorantes, con respecto a las mismas propiedades presentes en el material puro.	En el procesamiento del Polietileno de Alta Densidad la adición de material reciclado y colorante al material virgen, afecta el tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo.	Tiempo de Degradación Torque Índice de Fluidez.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Indicadores
Verificar los valores del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en el material puro concuerde con las especificaciones del fabricante.	Determinar el tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo en el material puro.	El tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo del Polietileno de Alta Densidad serán similares a los entregados por el proveedor del producto.	Tiempo de Degradación Torque Índice de Fluidez.
¿Cuál es el índice de variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en la mezcla del material puro, reciclado y colorante?	Determinar la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en las diferentes mezclas de material puro, reciclado y colorante.	El tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo del Polietileno de Alta Densidad virgen, reciclado y colorante tendrán un cambio drástico en sus valores comparado con los del material puro.	Tiempo de Degradación Torque Índice de Fluidez.
Falta de información de la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo del Polietileno de Alta Densidad puro cuando es mezclado con material reciclado y/o colorantes	Realizar un análisis correlacional de la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en las diferentes mezclas probadas.	El tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo del Polietileno de Alta Densidad virgen, reciclado y colorante obtenido durante el análisis de los resultados de la experimentación permitirán adecuar los parámetros de procesamiento para las diferentes mezclas.	Tiempo de Degradación Torque Índice de Fluidez.

**Fuente:** Autor

## 6. Metodología

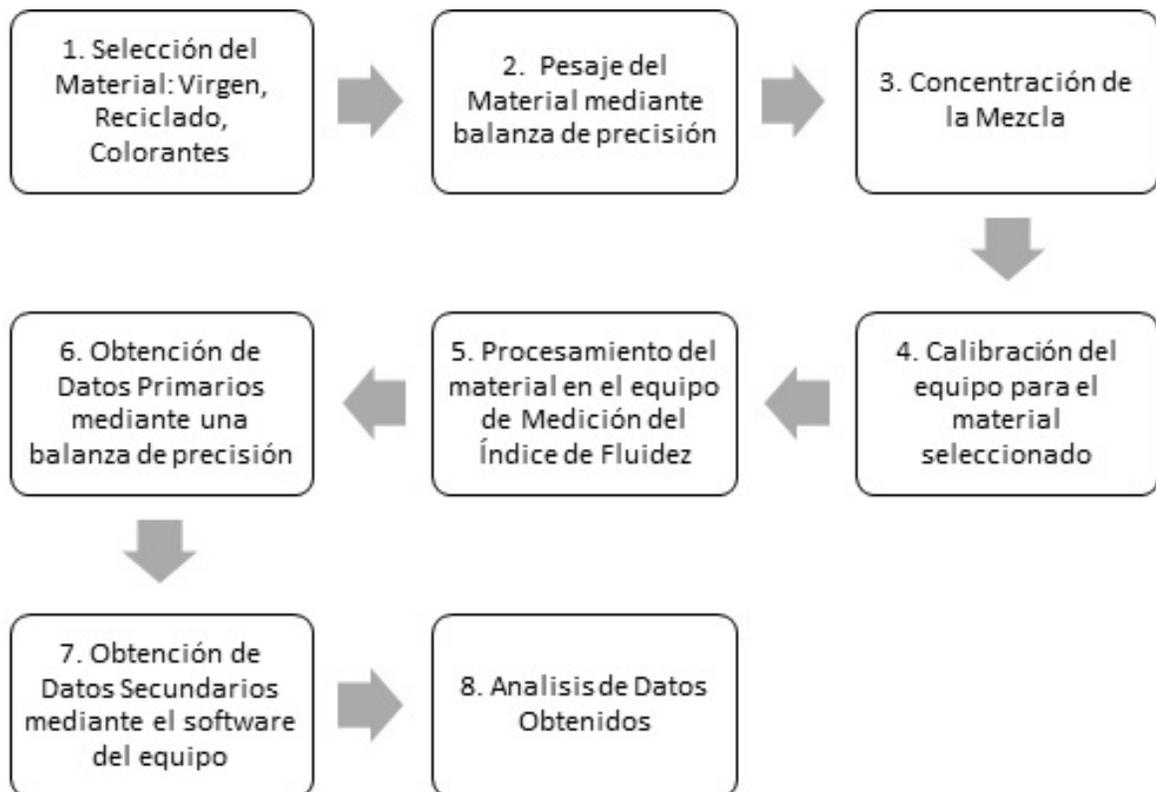
### 6.1. Tipo de Investigación.

Para poder realizar un análisis de las variaciones de las propiedades antes mencionadas la investigación que se va a realizar es de tipo experimental pero dividida en cuatro etapas:

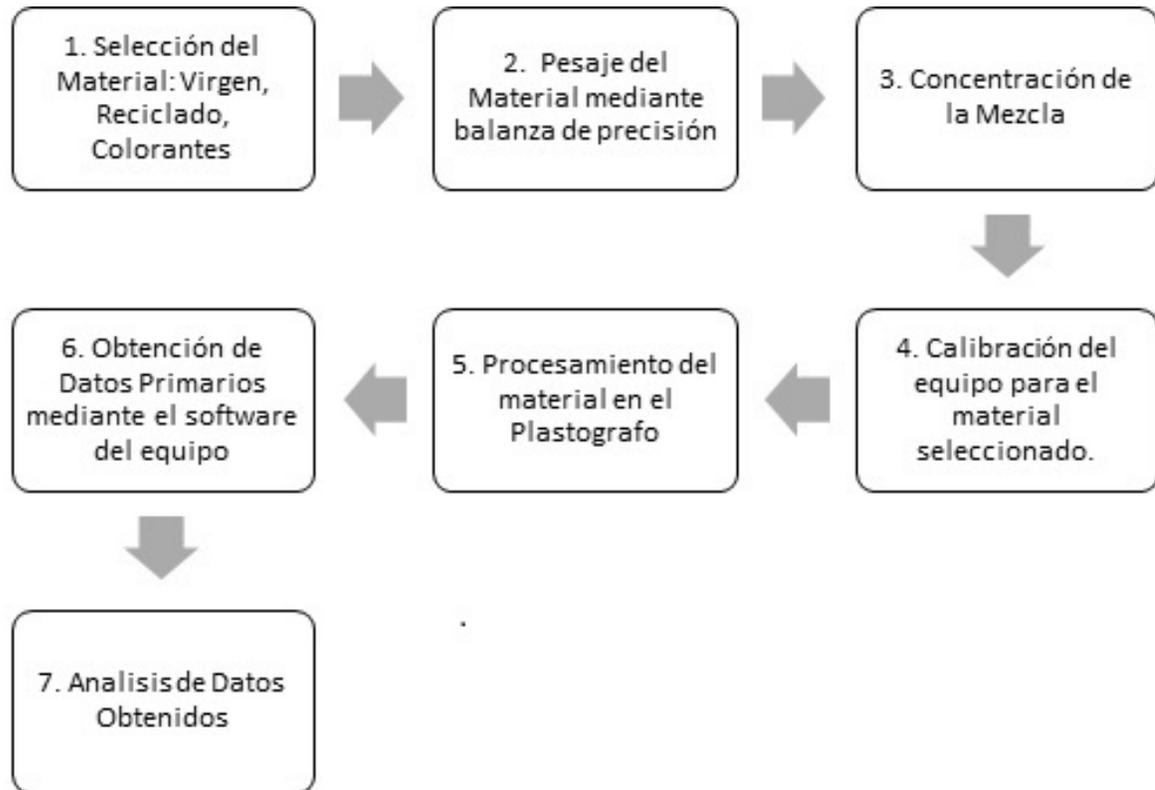
1. Descriptiva.- en este punto se recolectara información sobre las propiedades que se van a estudiar para realizar una descripción del fenómeno que se investiga.
2. Exploratoria.- es necesario realizar un análisis exploratorio para solventar algunas interrogantes en los niveles iniciales de calibración y uso adecuado de los equipos.
3. Experimental.- donde el efecto producido por la manipulación de las variables independientes en los procesos para determinar el tiempo de degradación, torque máximo y el índice de fluidez presentarán variaciones con respecto a sus valores originales.
4. Correlacional.- se pretende establecer la relación entre las variables, es decir en el proyecto se determinan las causas de los fenómenos provocados por el control de las variables independientes en sus respectivas variables dependientes.

### 6.2. Diseño de la Investigación

- Índice de Fluidez



- Plastógrafo



### 6.3. Técnicas de Recolección de Datos.

- Índice de Fluidez

Para la recopilación de datos primarios se utilizara una balanza electrónica de precisión. Para la recopilación de datos secundarios se utilizara el software propio del equipo.

- Plastógrafo

Para la recopilación de datos primarios se utilizara el software propio del equipo.

### 6.4. Análisis e interpretación de la información.

Con la información recolectada se realizara un análisis estadístico de cada una de las muestras tomadas correspondientes a cada concentración, obteniendo así un valor aproximado de las propiedades que dicho material adquiere.

## 7. Determinación del tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo en el material puro.

El material utilizado durante la experimentación fue un HDPE con una densidad de 0,955 g/cm<sup>3</sup>, índice de fluidez de 20 g/10min, provisto por Braskem®.

### 7.1. Índice de Fluidez

Para determinar el índice de fluidez se utilizó el equipo Melt Flow Indexer Serie 3000 ubicado en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana. El equipo tiene un rango de control de temperatura de 120 °C a 450 °C y una precisión de  $\pm 0,5$  °C. El equipo se presenta en la figura 4.

**Figura 4:** Melt Flow Indexer Serie 3000



**Fuente:** www.worldoftest.com

El proceso de ensayo se realizó en base a la norma ASTM D1238-10 para el cual se utilizaron los valores indicados en el catálogo del producto que se presentan en la Tabla 4 [7].

**Tabla 4:** Valores de Catalogo HDPE

	Temperatura [ °C]	Peso [kg]	Valor [g/10min]
Índice de fluidez	190	2,16	20

**Fuente:** Braskem®

Se realizaron cinco replicas en el equipo para la comprobación del valor del catálogo cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Resultados Índice de Fluidez HDPE

Replica	Masa [g]	MFI [g/10min]
1	1,6443	19,732
2	1,6206	19,447
3	1,6329	19,595
4	1,6356	19,627
5	1,6356	19,627

**Fuente:** Autor

## 7.2. Torque Máximo y Tiempo de Degradación.

Para determinar el torque máximo y el tiempo de degradación del material se utilizó el Plastógrafo EC 50 Plus ubicado en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana. El equipo presenta un rango de control de temperatura de 5 °C a 200 °C y una capacidad de carga de 50 g. El equipo se presenta en la figura 5.

**Figura 5:** Plastógrafo



**Fuente:** [www.brabender.com](http://www.brabender.com)

El proceso de ensayo se realizó en base a la norma ASTM D2396-94 y al manual de usuario del equipo [9] [10]. Para determinar estos valores se trabajó bajo las condiciones presentadas en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Valores de Trabajo

Temperatura [ °C]	Tiempo [min]	Carga [g]	Velocidad [rpm]
190	15	35	80

**Fuente:** Autor

Se realizaron dos replicas para determinar el torque máximo y el tiempo de degradación cuyos resultados se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7:** Resultados Plastógrafo HDPE

Replica	Torque Máximo	Tiempo de Degradación
1	4,60	14,50
2	5,00	14,57

**Fuente:** Autor

## 8. Determinación del tiempo de degradación, el índice de fluidez y el torque máximo en las diferentes mezclas de material puro, reciclado y colorante.

En las mezclas se utilizó como material reciclado HDPE peletizado y como colorante se utilizó un masterbatch con resina base HDPE, concentración del 70 %, densidad de 0,923 g/cm<sup>3</sup> e índice de fluidez de 20 g/10min. Se realizaron 16 diferentes mezclas del polietileno de alta densidad con material reciclado y colorante los cuales son presentados en la tabla 8 como porcentajes en masa de la concentración.

**Tabla 8:** Porcentajes de los componentes de la mezcla.

Composición	HDPE % m/m	Reciclado % m/m	Colorante % m/m
1	100	0	0
2	90	10	0
3	85	15	0
4	80	20	0
5	98	0	2

Composición	HDPE % m/m	Reciclado % m/m	Colorante % m/m
6	88	10	2
7	83	15	2
8	78	20	2
9	95	0	5
10	85	10	5
11	80	15	5
12	75	20	5
13	93	0	7
14	83	10	7
15	78	15	7
16	73	20	7

**Fuente:** Autor

## 8.1. Índice de Fluidez

El procedimiento de ensayo fue realizado de igual manera que para el material puro, ya que se quiere observar si existe una variación con los valores del material puro bajo las mismas condiciones de trabajo y los resultados de estos se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9:** Resultados Índice de Fluidez Mezclas

Replica	% Virgen	% Colorante	% Reciclado	Masa [g]	MFI [g/10min]
1	98 %	2 %	0 %	1,6677	20,012
2	98 %	2 %	0 %	1,6564	19,877
3	98 %	2 %	0 %	1,6427	19,712
4	98 %	2 %	0 %	1,6511	19,813
5	98 %	2 %	0 %	1,6621	19,945
1	95 %	5 %	0 %	1,7091	20,509
2	95 %	5 %	0 %	1,6808	20,17
3	95 %	5 %	0 %	1,686	20,232
4	95 %	5 %	0 %	1,7178	20,614
5	95 %	5 %	0 %	1,7136	20,563

Replica	% Virgen	% Colorante	% Reciclado	Masa [g]	MFI [g/10min]
1	93%	7%	0%	1,6634	19,961
2	93%	7%	0%	1,6741	20,089
3	93%	7%	0%	1,6602	19,922
4	93%	7%	0%	1,6609	19,931
5	93%	7%	0%	1,6782	20,138
1	90%	0%	10%	1,634	19,608
2	90%	0%	10%	1,6348	19,618
3	90%	0%	10%	1,6263	19,516
4	90%	0%	10%	1,6191	19,429
5	90%	0%	10%	1,6021	19,225
1	85%	0%	15%	1,615	19,38
2	85%	0%	15%	1,6136	19,363
3	85%	0%	15%	1,5986	19,183
4	85%	0%	15%	1,6341	19,609
5	85%	0%	15%	1,6444	19,733
1	80%	0%	20%	1,6342	19,61
2	80%	0%	20%	1,6682	20,018
3	80%	0%	20%	1,6815	20,17
4	80%	0%	20%	1,6161	19,393
5	80%	0%	20%	1,6061	19,273
1	88%	2%	10%	1,6096	19,315
2	88%	2%	10%	1,6068	19,282
3	88%	2%	10%	1,6137	19,364
4	88%	2%	10%	1,6193	19,432
5	88%	2%	10%	1,6173	19,408
1	83%	2%	15%	1,5822	18,986
2	83%	2%	15%	1,5888	19,066
3	83%	2%	15%	1,597	19,164
4	83%	2%	15%	1,618	19,416
5	83%	2%	15%	1,6098	19,318
1	78%	2%	20%	1,6095	19,314
2	78%	2%	20%	1,6064	19,277
3	78%	2%	20%	1,6086	19,303
4	78%	2%	20%	1,6217	19,46
5	78%	2%	20%	1,6181	19,417

Replica	% Virgen	% Colorante	% Reciclado	Masa [g]	MFI [g/10min]
1	85 %	5 %	10 %	1,6524	19,829
2	85 %	5 %	10 %	1,6387	19,664
3	85 %	5 %	10 %	1,6292	19,55
4	85 %	5 %	10 %	1,642	19,704
5	85 %	5 %	10 %	1,6474	19,769
1	80 %	5 %	15 %	1,6452	19,742
2	80 %	5 %	15 %	1,6376	19,651
3	80 %	5 %	15 %	1,6442	19,73
4	80 %	5 %	15 %	1,6484	19,781
5	80 %	5 %	15 %	1,6337	19,604
1	75 %	5 %	20 %	1,5935	19,122
2	75 %	5 %	20 %	1,581	18,972
3	75 %	5 %	20 %	1,5979	19,175
4	75 %	5 %	20 %	1,5992	19,19
5	75 %	5 %	20 %	1,6062	19,274
1	83 %	7 %	10 %	1,6572	19,886
2	83 %	7 %	10 %	1,6652	19,982
3	83 %	7 %	10 %	1,6579	19,895
4	83 %	7 %	10 %	1,6684	20,021
5	83 %	7 %	10 %	1,6729	20,075
1	78 %	7 %	15 %	1,6274	19,529
2	78 %	7 %	15 %	1,623	19,476
3	78 %	7 %	15 %	1,6397	19,676
4	78 %	7 %	15 %	1,6395	19,674
5	78 %	7 %	15 %	1,6274	19,529
1	73 %	7 %	20 %	1,6483	19,78
2	73 %	7 %	20 %	1,6356	19,627
3	73 %	7 %	20 %	1,6407	19,688
4	73 %	7 %	20 %	1,6333	19,6
5	73 %	7 %	20 %	1,6159	19,391

Fuente: Autor

## 8.2. Torque Máximo y Tiempo de Degradación.

El procedimiento de ensayo fue realizado de igual manera que para el material puro, ya que se quiere observar si existe una variación con los valores del material puro bajo las mismas condiciones

de trabajo y los resultados de estos se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10:** Resultados Plastógrafo Mezclas

Virgen %	Colorante %	Reciclado %	Torque Máximo [Nm]	Tiempo de Degradación [min]
90 %	0 %	10 %	4,60	14,63
85 %	0 %	15 %	4,70	14,70
80 %	0 %	20 %	4,60	14,67
98 %	2 %	0 %	4,70	14,47
88 %	2 %	10 %	4,80	14,67
83 %	2 %	15 %	4,60	14,60
78 %	2 %	20 %	4,70	14,63
95 %	5 %	0 %	4,70	14,63
85 %	5 %	10 %	4,50	14,63
80 %	5 %	15 %	4,40	14,67
75 %	5 %	20 %	4,60	14,63
93 %	7 %	0 %	4,50	14,67
83 %	7 %	10 %	4,60	14,63
78 %	7 %	15 %	4,50	14,67
73 %	7 %	20 %	4,40	14,70
90 %	0 %	10 %	4,70	14,67
85 %	0 %	15 %	4,50	14,67
80 %	0 %	20 %	4,60	14,73
98 %	2 %	0 %	4,70	14,70
88 %	2 %	10 %	4,60	14,70
83 %	2 %	15 %	4,50	14,70
78 %	2 %	20 %	4,70	14,67
95 %	5 %	0 %	4,60	14,60
85 %	5 %	10 %	4,60	14,70
80 %	5 %	15 %	4,50	14,63
75 %	5 %	20 %	4,50	14,70
93 %	7 %	0 %	4,60	14,73
83 %	7 %	10 %	4,40	14,70
78 %	7 %	15 %	4,50	14,70
73 %	7 %	20 %	4,70	14,63

**Fuente:** Autor

## 9. Análisis correlacional de la variación del tiempo de degradación, del índice de fluidez y del torque máximo en las diferentes mezclas probadas.

Se analizaron los datos mediante el modelo lineal general univariante con dos factores representados por el material reciclado y el colorante. Cada factor tiene cuatro niveles los cuales son representados como porcentajes de masa que entran en la concentración como se pudo observar en la tabla 8, donde tuvimos un total de 16 concentraciones. Los resultados de las experimentaciones para las 3 propiedades: índice de fluidez, torque máximo y tiempo de degradación fueron presentados en los puntos 7 y 8 por lo cual se procede a su respectivo análisis. Para el análisis se tomó cada propiedad por separado y se aplicó el modelo antes mencionando en el software SPSS® del cual se presentan los resultados en la tabla 11 del índice de fluidez, en la tabla 12 del torque máximo y en la tabla 13 del tiempo de degradación.

**Tabla 11:** Variable dependiente: Índice de Fluidez

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	p- value
Modelo corregido	7,932a	15	0,529	20,833	0
Intersección	30,84x10 <sup>3</sup>	1	30,84x10 <sup>3</sup>	1,21x10 <sup>6</sup>	0
Colorante	1,581	3	0,527	20,761	0
Reciclado	3,466	3	1,155	45,514	0
(Colorante x Reciclado)	2,885	9	0,321	12,629	0
Error	1,624	64	0,025		
Total	30850,329	80			
Total corregida	9,556	79			

a. R cuadrado = 0,830 (R cuadrado corregida = 0,790)

**Fuente:** Autor

**Tabla 12:** Variable dependiente: Torque Máximo

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	p- value
Modelo corregido	0,260a	15	0,017	1,261	0,325
Intersección	677,12	1	677,12	49,24x10 <sup>3</sup>	0,000
Colorante	0,128	3	0,043	3,091	0,057
Reciclado	0,09	3	0,03	2,182	0,130
(Colorante x Reciclado)	0,042	9	0,005	0,343	0,946
Error	0,22	16	0,014		
Total	677,6	32			
Total corregida	0,48	31			

a. R cuadrado = 0,542 (R cuadrado corregida = 0,112)

**Fuente:** Autor

**Tabla 13:** Variable dependiente: Tiempo de Degradación

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	p- value
Modelo corregido	0,056a	15	0,004	1,164	0,382
Intersección	6870,850	1	6870,850	2,13x10 <sup>6</sup>	0,000
Colorante	0,007	3	0,002	0,747	0,540
Reciclado	0,021	3	0,007	2,181	0,130
(Colorante x Reciclado)	0,028	9	0,003	0,964	0,502
Error	0,051	16	0,003		
Total	6870,958	32			
Total corregida	0,108	31			

a. R cuadrado = 0,522 (R cuadrado corregida = 0,073)

**Fuente:** Autor

## 10. Resultados y Discusión

Se planteó que la concentración de material reciclado y colorante en las mezclas de polietileno de alta densidad afecta de manera significativa al índice de fluidez, torque máximo y tiempo de degradación. Para la aceptación o rechazo de la hipótesis planteada necesitamos realizar una comprobación mediante el uso del valor de la distribución F de Fisher, el cual depende de los grados de libertad que presentan los factores. Los valores calculados de la distribución F ingresan a la tabla estadística "Valores Críticos de la Distribución F (0.05)". Se comparan los valores calculados con los valores críticos que se encuentran en la tabla donde se acepta la hipótesis si el valor de F calculado es superior al F crítico de la tabla [11] [12].

Tomando los valores de la distribución F calculados mediante el software, se los comparó con los valores críticos que se obtienen utilizando los valores de los grados de libertad que se encuentran en las tablas 11, 12 y 13 ingresándolos a la tabla antes mencionada para realizar su comparación que se resume en la tabla 14 para el índice de fluidez, en la tabla 15 para el torque máximo y en la tabla 16 para el tiempo de degradación.

**Tabla 14:** Comparación de Valores de F para el Índice de Fluidez.

Factores	F calculada	F crítica
Colorante	20,761	2,7502
Reciclado	45,514	2,7502
(Colorante x Reciclado)	12,629	2,0318

**Fuente:** Autor

**Tabla 15:** Comparación de Valores de F para el Torque Máximo.

Factores	F calculada	F crítica
Colorante	3,091	3,007
Reciclado	2,182	3,007
(Colorante x Reciclado)	0,343	2,538

**Fuente:** Autor

**Tabla 16:** Comparación de Valores de F para el Tiempo de Degradación.

Factores	F calculada	F crítica
Colorante	0,747	3,007
Reciclado	2,181	3,007
(Colorante x Reciclado)	0,964	2,538

**Fuente:** Autor

### 10.1. Índice de Fluidez

Como se puede observar en la tabla 14, los valores de la F calculada son superiores a los valores de la F crítica por lo cual, se acepta por tanto que la variación de la concentración del material reciclado y el colorante en las mezclas de polietileno de alta densidad si afecta al índice de fluidez aunque no de manera significativa como se esperaba. Esta falta de variación se debería a que el colorante tiene la misma resina base que el material y una densidad menor.

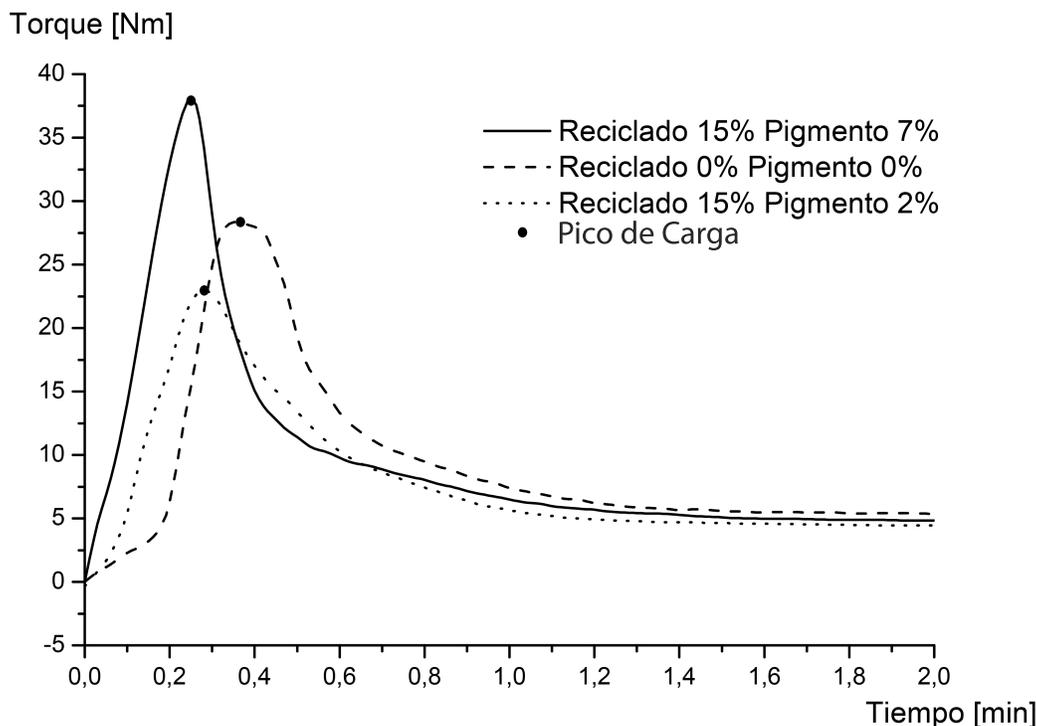
### 10.2. Torque Máximo

En la tabla 15 se observa como los valores de la F calculada son menores que la F critica por lo cual se rechaza la hipótesis planteada y se toma la hipótesis nula la cual nos dice que la variación de la concentración del material reciclado y el colorante en las mezclas de polietileno de alta densidad no afecta al torque máximo, no obstante donde se pudo notar una variación significativa fue en el valor del torque de carga como se observa en la figura 6.

### 10.3. Tiempo de Degradación

En la tabla 16 se observa que al igual que en el torque máximo los valores de la F calculada son menores que la F crítica por lo cual se acepta la hipótesis nula la cual nos dice que la variación de la concentración del material reciclado y el colorante en las mezclas de polietileno de alta densidad

**Figura 6:** Torque de Carga vs Tiempo



**Fuente:** Autor

no afecta al tiempo de degradación. Aunque la hipótesis planteada no haya sido aceptada este resultado se considera positivo, ya que el tiempo de permanencia de la mezcla a la temperatura de trabajo no se ve afectada.

## 11. Conclusiones y Recomendaciones

La variación del contenido de material reciclado y colorante en las mezclas de polietileno de alta densidad tiene un efecto mínimo sobre el índice de fluidez, siendo la concentración del colorante el factor más significativo. El torque máximo y el tiempo de degradación no presentaron cambios significativos en sus propiedades por lo cual se rechazó la hipótesis planteada durante el trabajo, por lo cual se recomienda utilizar mayores concentraciones de material reciclado, ya que en este caso el colorante utilizado tiene la misma resina base que el HDPE.

En este contexto se evidencia la necesidad de encontrar el punto óptimo donde la combinación de ambos factores presente mejoras importantes para las propiedades reológicas.

## Referencias

- [1] D. R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Thomson-Paraninfo, 2001.
- [2] F. W. Billmeyer, *Ciencia de los polímeros*. Reverté, 1975.
- [3] M. Campo, M. D. Escalera, B. Torres, J. Rams, and A. Ureña, “Comportamiento a desgaste de recubrimientos de material compuesto de matriz de aluminio fabricados por proyección térmica,” *Revista de metalurgia*, vol. 43, no. 5, pp. 359–369, 2007. [Online]. Available: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewArticle/80>
- [4] F. M. Coutinho, I. L. Mello, and L. De Santa Maria, “Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações,” *Polímeros Ciência e Tecnologia*, vol. 13, no. 1, pp. 1–13, 2003.
- [5] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997.
- [6] F. Catalina, R. Santamaria, P. Bosch, and C. Peinado, “Pigmentos y colorantes en polímeros,” *Revista de Plasticos Modernos*, vol. 80, no. 529, pp. 38–46, 2000.
- [7] ASTM D1238-13, *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*, ASTM International Std., 2013. [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [8] M. B. Rico and A. M. Gomis, *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Universidad de Alicante, 2012.
- [9] ASTM D2396-94, *Standard Test Method for Powder-Mix Time of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Resins Using a Torque Rheometer*, ASTM International Std., 2012. [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [10] B. G. . Co., *Measuring Mixer Type 50 EHT Instruction Manual*, Duisburg: Brabender GmbH & Co., 2011.
- [11] J. L. Devore, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 8th ed. Cengage Learning, 2012.
- [12] R. E. Walpole, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 9th ed. Pearson, 2012.