

Introducción al estudio de la materia prima, de las condiciones de procesamiento y de las propiedades mecánicas, de las películas de polietileno de alta densidad fabricadas a través del proceso de extrusión de película sopladaö

José Adrián Tuárez Urquizo ⁽¹⁾
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ^{(1) (2)}
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) ^{(1) (2)}
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral ^{(1) (2)}
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador ^{(1) (2)}
Email: j-tuarez@hotmail.com ⁽¹⁾
Ing. Andrés Rigaíl Cedeño ⁽²⁾
e-mail: arigail@espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

El presente artículo muestra una introducción al estudio de parámetros de materia prima y de condiciones de procesamiento, que se utilizan para la fabricación de películas de HDPE, a través del proceso de extrusión de película soplada; por medio de este estudio y del estudio de las propiedades mecánicas de dichas películas, se pudo introducir a la manera con la cual influye cada uno de los parámetros mencionados, en las propiedades mecánicas de las películas de HDPE. Se obtuvieron películas de HDPE, como muestras, las cuales no fueron fabricadas sólo con resinas de HDPE, también se utilizó un pequeño porcentaje de LLDPE en la fabricación de las mismas, ya que generalmente se utiliza un pequeño porcentaje de este material, para obtener mayor elongación en la película. Un grupo de las películas que se obtuvieron, se fabricaron con 67% de HDPE y 33% de LLDPE; el otro grupo de películas que se obtuvieron, fueron fabricadas con 80% de HDPE y 20% de LLDPE. Como se observa, el porcentaje de HDPE en las películas, es considerablemente mayor al porcentaje de LLDPE en las mismas; es por esta razón que las películas que se utilizaron para el estudio en mención, se consideran películas de HDPE. El primer grupo de películas, se fabricaron con diferentes resinas de HDPE y de LLDPE, con lo cual se obtendrían películas con diferente Melt Index (MI) y con diferente Densidad (ρ); el segundo grupo de películas, se fabricaron con la misma resina de HDPE y con la misma resina de LLDPE, pero con diferentes condiciones de procesamiento: FLUJO, FH, DDR y BUR. Las películas de los dos grupos, se sometieron a ensayos de tensión y elongación (ASTM D-882), de impacto (ASTM D-1709, Método A) y de permeabilidad (ASTM E-96); los resultados que se obtuvieron de los ensayos, mostraron mejores propiedades mecánicas al aumentar el MI, al disminuir ρ , al disminuir FLUJO, al aumentar FH, al aumentar DDR ó al aumentar BUR.

Palabras Claves: Molécula, Cristalinidad, Película.

Abstract

The present article shows an introduction to the study of parameters of the raw material and the conditions of prosecution that are used for the manufactory of films HDPE across of extrusion process of blown film.

Through this study and the study of mechanical properties of these films, we could to introduce the manner which has influence every one of the parameters mentioned in the mechanical properties of the films HDPE. We used samples of films HDPE which were no manufactured with resin of HDPE only and using a small percentage of this material, to get more elongation in the film. One group of these films were manufactured with 67 percent of HDPE and 33 percent of LLDPE; the other groups of films were manufactured with 80 percent of HDPE and 20 percent of LLDPE as we can see the percent of HDPE in films is considerably higher the percentage of LLDPE. For this reason films used in the referred study were considered films of DHPE. The first group of films was manufactured with different resins of HDPE and LLDPE thus obtained films with different Melt Index (MI) and different density (ρ). The second group of films was manufactured with the same resin of HDPE and LLDPE but with different processing conditions: FLOW, FH, DDR and BUR. Films of two groups underwent to stress test and elongation (ASTM D-882) of impact (ASTM D-1709), method A) and permeability (ASTM E-96). The results obtained in essays show the best mechanical properties because MI increased when ρ and flow decreased and FH, DDR and BUR increased.

Key words: Molecule, crystallinity, film

1. Introducción

En la actualidad, el consumo de películas de HDPE está aumentando, ya que la resina de HDPE ofrece excelentes propiedades mecánicas, por la cristalinidad de la misma. Por esta razón, las películas de HDPE son utilizadas para transportar ó empacar productos, ya que la cristalinidad de estas películas, permite que las mismas soporten pesos considerables y protejan a los alimentos de los agentes que los deterioran.

La cristalinidad de las películas de HDPE, se debe a que la resina con la que se fabrican estas películas, tiene moléculas lineales, es decir, sin ramificaciones, lo cual le permite a las moléculas de HDPE estar más unidas, y así, las fuerzas de atracción entre las mismas, son mayores; la resina de HDPE, al tener moléculas más unidas entre sí, tiene mayor número de moléculas por unidad de volumen, es decir, tiene mayor densidad, razón por la cual, a esta resina, se la identifica con las siglas HDPE, las cuales indican el nombre de la resina en inglés, *High Density Polyethylene*, nombre que en español significa, *Polietileno de Alta Densidad*.

Existen resinas de polietileno de baja densidad, LLDPE y LDPE, las cuales, tienen baja densidad por las ramificaciones que tienen las moléculas de estas resinas; las moléculas, al tener más ramificaciones, ó, al tener ramificaciones más largas, menos unidas van a estar, lo cual genera que las fuerzas de atracción entre las mismas, sean menores. Las resinas de LLDPE y de LDPE, al tener menores fuerzas de atracción entre sus moléculas, ofrecen menores propiedades mecánicas, es decir, ofrecen menor resistencia a la tensión, menor resistencia al impacto y mayor permeabilidad, en relación a las propiedades mecánicas que puede ofrecer

la resina de HDPE.

Las resinas de polietileno de baja densidad, ofrecen mayor elongación que la resina de polietileno de alta densidad, razón por la cual, generalmente, en la fabricación de películas de HDPE, se mezcla un alto porcentaje de HDPE con un bajo porcentaje de LLDPE.

La resina de LLDPE, tiene ramificaciones menos largas que las ramificaciones de la resina de LDPE, lo cual significa que las moléculas de la resina de LLDPE, se encuentran más unidas que las moléculas de la resina de LDPE, es decir, la resina de LLDPE es más densa, o sea, más cristalina que la resina de LDPE, lo que le permite, a la resina de LLDPE, tener mejores propiedades mecánicas que la resina de LDPE. La resina de LLDPE, al ser más cristalina que la resina de LDPE, es la resina más adecuada para mezclarse con la resina de HDPE, para fabricar películas de HDPE con buena cristalinidad y elongación.

Las películas de HDPE que se obtienen del proceso de extrusión de película soplada, generalmente, son fabricadas sin ningún criterio objetivo, es decir, los parámetros de materia prima y de condiciones de procesamiento que se utilizan para la fabricación de dichas películas, se escogen empíricamente ó de manera subjetiva, lo cual, en algunas ocasiones, no ayuda a aprovechar las bondades ó cualidades de la resina de HDPE, ó, puede generar la fabricación de películas de HDPE de menor calidad y con mayores costos de producción.

Este estudio dará criterios de ingeniería a la industria de películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, para aprovechar las bondades de la resina de HDPE, y así

poder fabricar dichas películas con mayor eficiencia, es decir, fabricar películas de HDPE con mayor calidad y con menores costos de producción.

2. Parte Experimental

El desarrollo de este estudio, en su parte experimental, empieza con la obtención de las películas de HDPE, como muestras, las cuales se someterían a diferentes ensayos mecánicos, para analizar la influencia de los parámetros de materia prima y de condiciones de procesamiento, en las propiedades mecánicas de las películas de HDPE.

2.1 Materia prima.

Tabla 1. Materia Prima utilizada en la fabricación de las películas de HDPE.

Película	Composición	MI (g/10 min) 2,16 Kg _f	ρ (g/cm ³)	Proporción (%)
MI ₁	HDPE	0,050	0,952	67
	LLDPE	1,000	0,917	33
MI ₂	HDPE	0,076	0,952	67
	LLDPE	2,000	0,917	33
P ₁	HDPE	0,055	0,949	67
	LLDPE	1,000	0,918	33
P ₂	HDPE	0,050	0,952	67
	LLDPE	1,000	0,917	33
FLUJO ₁	HDPE	0,057	0,949	80
	LLDPE	1,100	0,918	20
FLUJO ₂	HDPE	0,057	0,949	80
	LLDPE	1,100	0,918	20
FH ₁	HDPE	0,057	0,949	80
	LLDPE	1,100	0,918	20
FH ₂	HDPE	0,057	0,949	80
	LLDPE	1,100	0,918	20
DDR ₁	HDPE	0,057	0,949	80
	LLDPE	1,100	0,918	20
DDR ₂	HDPE	0,057	0,949	80
	LLDPE	1,100	0,918	20
BUR ₁	HDPE	0,057	0,949	80
	LLDPE	1,100	0,918	20
BUR ₂	HDPE	0,057	0,949	80
	LLDPE	1,100	0,918	20

En la tabla 1, se observa que el primer grupo de películas se fabricaron con 67% de HDPE y 33% de LLDPE, y el segundo grupo de películas se fabricaron con 80% de HDPE y 20% de LLDPE; de acuerdo al porcentaje de resina de HDPE y de resina de LLDPE, y a sus valores de MI y de ρ , se calcula el MI y ρ , de la mezcla ó de la película, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2. MI y ρ de las películas de HDPE.

Película	MI (g/10 min) 2,16 Kg _f	ρ (g/cm ³)
MI ₁	0,142	0,940
MI ₂	0,232	0,940
P ₁	0,142	0,938
P ₂	0,142	0,940
FLUJO ₁	0,110	0,943
FLUJO ₂	0,110	0,943
FH ₁	0,110	0,943
FH ₂	0,110	0,943
DDR ₁	0,110	0,943
DDR ₂	0,110	0,943
BUR ₁	0,110	0,943
BUR ₂	0,110	0,943

2.2 Condiciones de procesamiento

Las condiciones de procesamiento que se modificaron para observar la influencia de éstas sobre las propiedades mecánicas de las películas, fueron las siguientes: FLUJO, FH, DDR y BUR.

Tabla 3. Condiciones de Procesamiento de las películas de HDPE.

Película	FLUJO (g/s)	FH (cm)	DDR	BUR
MI ₁	17,40	70	6,78	3,80
MI ₂	17,40	70	6,78	3,80
P ₁	17,40	70	6,78	3,80
P ₂	17,40	70	6,78	3,80
FLUJO ₁	32,71	97	5,25	4,20
FLUJO ₂	30,32	79	5,66	4,00
FH ₁	32,71	80	5,25	3,87
FH ₂	32,71	97	5,25	4,20
DDR ₁	32,71	97	5,25	4,20
DDR ₂	33,02	100	10,61	4,40
BUR ₁	44,14	47	1,83	1,47
BUR ₂	44,14	65	1,83	1,73

2.3 Ensayos mecánicos

A continuación se mostrará una tabla que indica las condiciones y los parámetros de los ensayos mecánicos que se realizaron para obtener las propiedades mecánicas de las películas de HDPE:

Tabla 4. Condiciones y parámetros de los ensayos mecánicos.

Ensayo	Norma	Condiciones	Parámetros	
Tensión y elongación	ASTM D-882	23 °C	Velocidad de elongación	500 mm/mín
		50 % HR	Fuerza	0 - 3 Kgf
Impacto	ASTM D-1709 (Método A)	23 °C	Altura de impacto	0,66 m
		50 % HR	Diámetro del dardo	38,1 mm
Permeabilidad	ASTM E-96	20 - 22 °C	Guayaquil	32 °C
		50 - 52 % HR	Quito	70 % HR
			Tiempo de medición	5 días

3. Resultados y Análisis de Resultados.

3.1 Influencia del Melt Index (MI) sobre las propiedades mecánicas de las películas MI₁ y MI₂.

3.1.1 Influencia de MI sobre la resistencia a la tensión y elongación

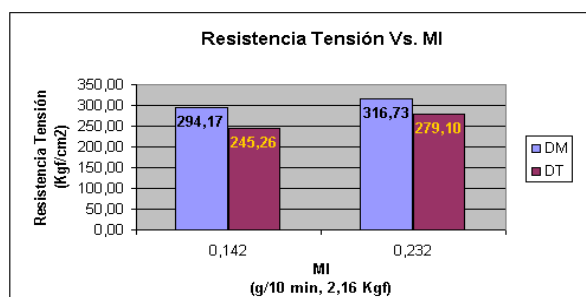


Figura 5. Resistencia a la tensión Vs. MI.

En la figura 5, se observa que mientras mayor es el MI, mayor es la resistencia a la tensión, en DM y en DT. La razón por la cual influye el MI sobre la resistencia a la tensión, de esta manera, se encuentra en la diferencia que existe entre la longitud de las moléculas de la materia prima que se utilizó para la fabricación de la película MI₁, y la longitud de las moléculas de la materia prima que se utilizó para la fabricación de la película MI₂; la película MI₂, al tener mayor MI, tiene moléculas más cortas, lo cual facilita el estiramiento de dichas moléculas y así la película MI₂ tiene mayor resistencia a la tensión en DM y en DT.

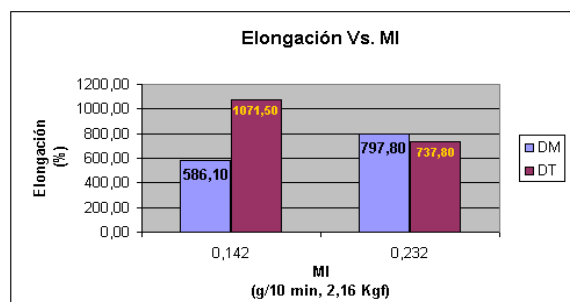


Figura 6. Elongación Vs. MI.

En la figura 6, en DM, se observa que mientras mayor es el MI, mayor es la elongación; en cambio, en DT, mientras menor es el MI, mayor es la elongación. La razón por la cual cambia la manera en la cual influye el MI sobre la elongación, al cambiar la dirección en la cual se evalúa dicha propiedad mecánica, se encuentra en el tiempo de estiramiento. En DM, el tiempo de estiramiento es mayor que el tiempo de estiramiento en DT, razón por la cual, las moléculas de la película MI₂, las cuales tienen mayor facilidad para estirarse, logran ser más largas que las moléculas de la película MI₁, en DM, luego del estiramiento; esto genera un mayor número de enlaces secundarios en las moléculas de MI₂, es decir, una mayor elongación de la película MI₂, en DM. En DT, las moléculas de MI₂, también se estiran más que las moléculas de MI₁, pero, por el menor tiempo de estiramiento que existe en esta dirección, la longitud que alcanzan las moléculas de MI₂, es menor que la longitud que alcanzan las moléculas de MI₁, luego del estiramiento en DT; es decir, el número de enlaces secundarios que se logra formar entre las moléculas de MI₁, es mayor que el número de enlaces secundarios que se logra formar entre las moléculas de MI₂, en DT, luego del estiramiento, razón por la cual, la elongación de la película MI₁ es mayor en DT.

3.1.2 Influencia de MI sobre la resistencia al impacto

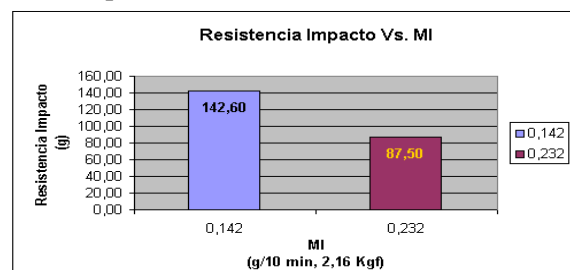


Figura 7. Resistencia al impacto Vs. MI.

En la figura 7, se observa que mientras menor es el MI, mayor es la resistencia al impacto; esto se debe a que la película MI₁ tiene mayor capacidad para absorber energía de impacto, por la mayor capacidad

que tiene para deformarse, capacidad que alcanza por la longitud que logran obtener sus moléculas después de haber sido estiradas en DT.

3.1.3 Influencia de MI sobre la permeabilidad

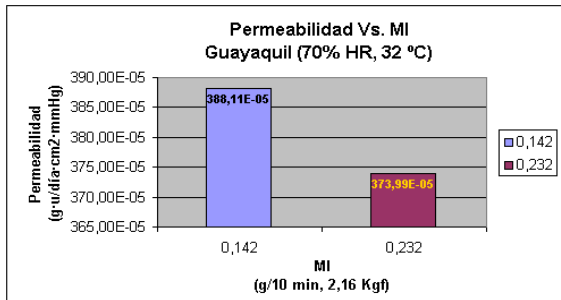


Figura 8. Permeabilidad Vs. MI, en Guayaquil.

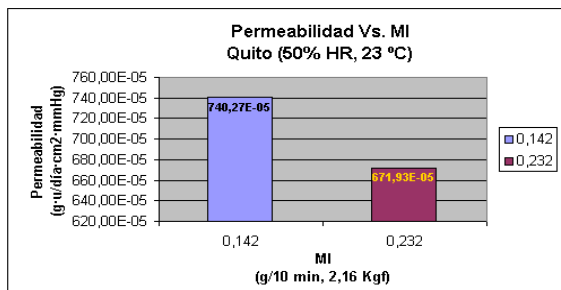


Figura 9. Permeabilidad Vs. MI, en Quito.

En las figuras 8 y 9, se observa que mientras mayor es el MI, menor es la permeabilidad; esto se debe a la mayor cristalinidad que alcanzó la película MI₂, por la facilidad que presentaron sus moléculas para estirarse.

3.2 Influencia de la Densidad () sobre las propiedades mecánicas de las películas 1 y 2.

3.2.1 Influencia de sobre la resistencia a la tensión y elongación

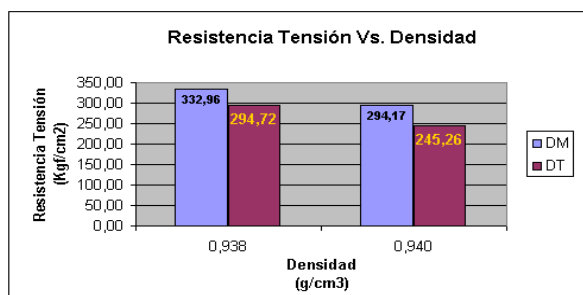


Figura 10. Resistencia a la tensión Vs. .

En la figura 10, se observa que mientras menor es , mayor es la resistencia a la tensión, en DM y en DT. La

razón por la cual influye sobre la resistencia a la tensión, de esta manera, se encuentra en la diferencia que existe entre el número de moléculas por unidad de volumen de la materia prima que se utilizó para la fabricación de la película 1, y el número de moléculas por unidad de volumen de la materia prima que se utilizó para la fabricación de la película 2; la película 1 tiene menor , lo cual facilita el estiramiento de sus moléculas, y así la película 1 tiene mayor resistencia a la tensión en DM y en DT.

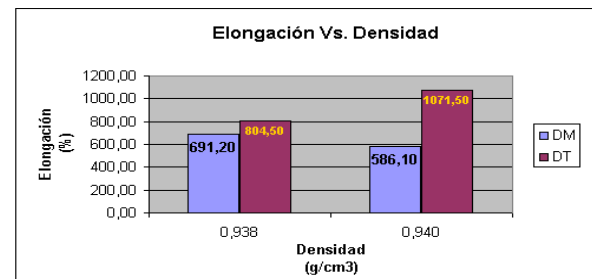


Figura 11. Elongación Vs. .

En la figura 11, en DM, se observa que mientras menor es , mayor es la elongación; en cambio, en DT, mientras mayor es , mayor es la elongación. La razón por la cual cambia la manera en la cual influye sobre la elongación, al cambiar la dirección en la cual se evalúa dicha propiedad mecánica, se encuentra en el tiempo de estiramiento. En DM, el tiempo de estiramiento es considerablemente mayor que el tiempo de estiramiento en DT, razón por la cual, las moléculas de la película 1, las cuales tienen mayor facilidad para estirarse, logran ser considerablemente más largas que las moléculas de la película 2, en DM, luego del estiramiento; esto genera mayor número de enlaces secundarios en las moléculas de la película 1, es decir, mayor elongación de la película 1, en DM. En DT, las moléculas de la película 1, también se estiran más que las moléculas de la película 2, pero, por el menor tiempo de estiramiento que existe en esta dirección, la longitud de las moléculas de la película 1, no logra ser considerablemente mayor que la longitud de las moléculas de la película 2, lo cual ocasiona que el número de enlaces secundarios que logran formar las moléculas de la película 1, por la mayor longitud que éstas alcanzan luego del estiramiento, sea menor que el número de enlaces secundarios que logran formar las moléculas de la película 2, por el mayor número de moléculas por unidad de volumen que tiene la película 2; ésta es la razón por la cual, la elongación de la película 2, es mayor que la elongación de la película 1, en DT.

3.2.2 Influencia de sobre la resistencia al impacto

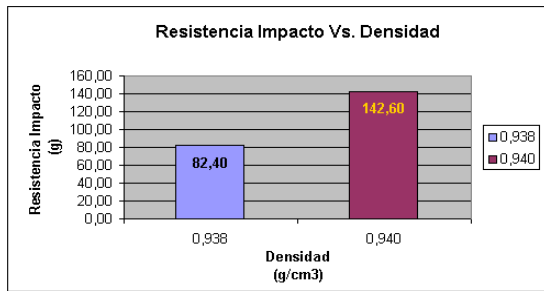


Figura 12. Resistencia al impacto Vs. .

En la figura 12, se observa que mientras mayor es , mayor es la resistencia al impacto; esto se debe a que la película ₂ tiene mayor capacidad para absorber energía de impacto, por la mayor capacidad que tiene para deformarse, capacidad que alcanza por su mayor número de moléculas por unidad de volumen.

3.2.3 Influencia de sobre la permeabilidad

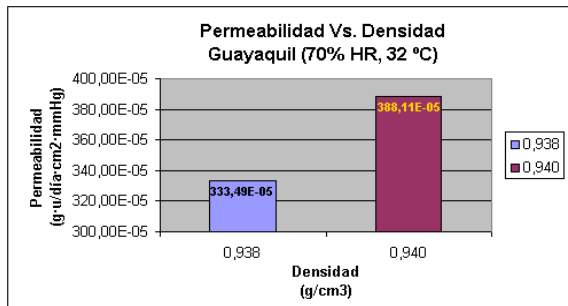


Figura 13. Permeabilidad Vs. , en Guayaquil.

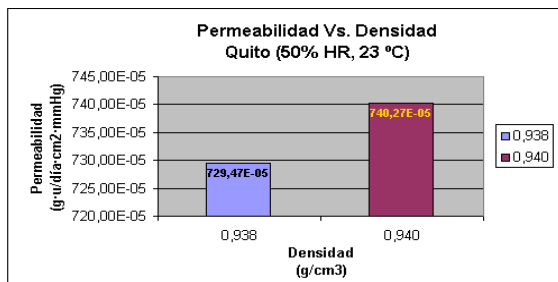


Figura 14. Permeabilidad Vs. , en Quito.

En las figuras 13 y 14, se observa que mientras menor es , menor es la permeabilidad; esto se debe a la mayor cristalinidad que alcanzó la película ₁, por la facilidad que presentaron sus moléculas para estirarse, facilidad que se debe al menor número de moléculas por unidad de volumen que tiene la película ₁.

3.3 Influencia del FLUJO sobre las propiedades mecánicas de las películas

FLUJO₁ y FLUJO₂.

3.3.1 Influencia del FLUJO sobre la resistencia a la tensión y elongación

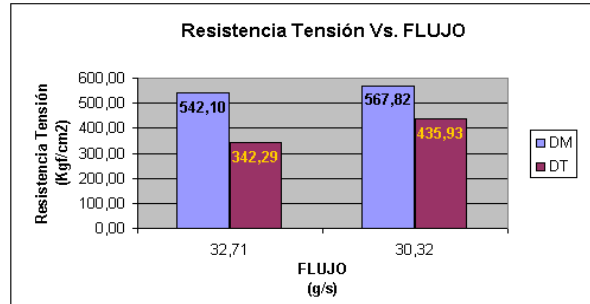


Figura 15. Resistencia a la tensión Vs. FLUJO.

En la figura 15, se observa que mientras menor es el FLUJO, mayor es la resistencia a la tensión, en DM y en DT. La razón por la cual influye el FLUJO sobre la resistencia a la tensión, de esta manera, se encuentra en la cantidad de masa fundida que sale del cabezal, por unidad de tiempo; mientras menor es el FLUJO, hay menor masa por unidad de tiempo saliendo del cabezal, lo cual implica que las moléculas están menos enrolladas al salir del cabezal. La película FLUJO₂ tiene menor FLUJO, razón por la cual se facilita el estiramiento de sus moléculas, es decir, tiene mayor resistencia a la tensión, en DM y en DT.

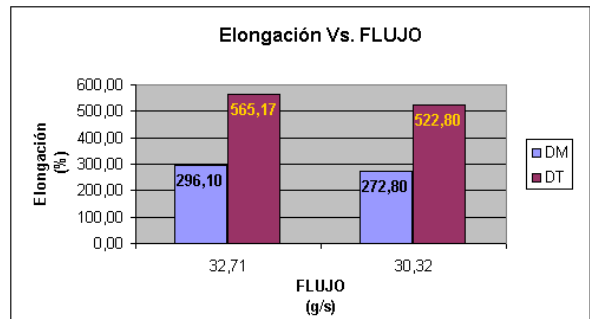


Figura 16. Elongación Vs. FLUJO.

En la figura 16, se observa que mientras mayor es el FLUJO, mayor es la elongación; esto se debe a la mayor cantidad de masa fundida que sale del cabezal, por unidad de tiempo. Al haber mayor cantidad de masa fundida saliendo del cabezal, hay mayor cantidad de moléculas saliendo del mismo, lo cual implica que hay mayor cantidad de enlaces secundarios entre las moléculas, razón por la cual, la película FLUJO₁ tiene mayor elongación, en DM y en DT.

3.3.2 Influencia del FLUJO sobre la resistencia al impacto

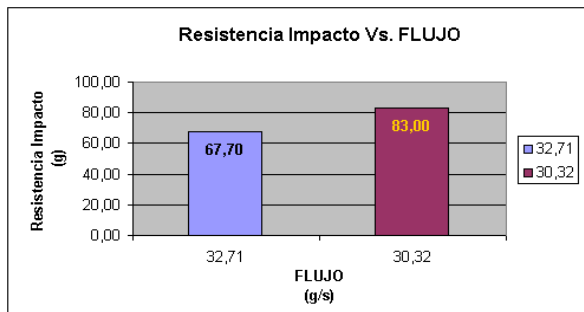


Figura 16. Resistencia al impacto Vs. FLUJO.

En la figura 16, se observa que mientras menor es el FLUJO, mayor es la resistencia al impacto; esto se debe a la resistencia a la tensión que alcanzó la película FLUJO₂ en DM. Al tener, la película FLUJO₂, la más alta resistencia a la tensión, obtiene la mayor tenacidad, es decir, la mayor capacidad para absorber energía transmitida por una carga mecánica, en este caso, la energía transmitida por la carga de impacto.

3.3.3 Influencia del FLUJO sobre la permeabilidad

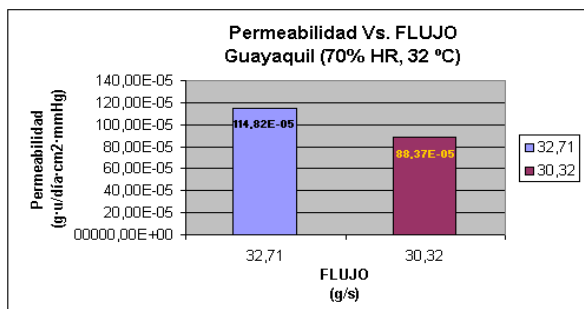


Figura 17. Permeabilidad Vs. FLUJO, en Guayaquil.

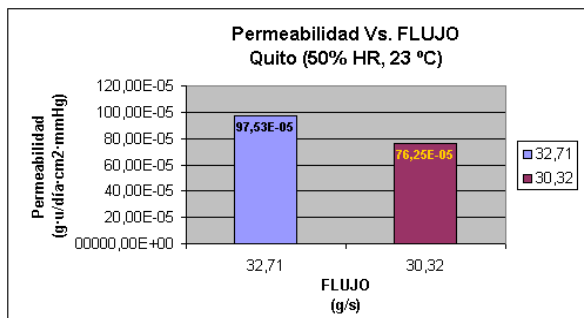


Figura 18. Permeabilidad Vs. FLUJO, en Quito.

En las figuras 17 y 18, se observa que mientras menor es el FLUJO, menor es la permeabilidad; esto se debe a la mayor cristalinidad que alcanzó la película FLUJO₂, por la facilidad que presentaron sus moléculas para estirarse, facilidad que se debe a la menor masa fundida que sale del cabezal, por unidad de tiempo.

3.4 Influencia de la Altura de Enfriamiento (FH) sobre las propiedades mecánicas de

las películas FH₁ y FH₂.

3.4.1 Influencia de FH sobre la resistencia a la tensión y elongación

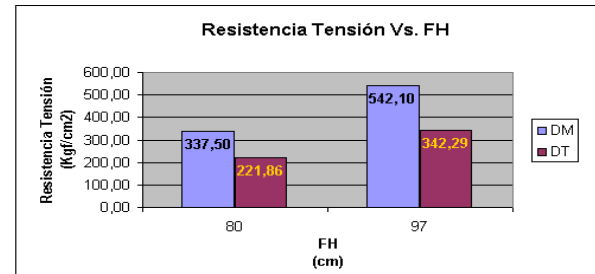


Figura 19. Resistencia a la tensión Vs. FH.

En la figura 19, se observa que mientras mayor es FH, mayor es la resistencia a la tensión, en DM y en DT. En DM, la razón por la cual influye FH sobre la resistencia a la tensión, de esta manera, se encuentra en el tiempo de estiramiento que tiene la película en su proceso de enfriamiento; mientras mayor es FH, hay mayor tiempo de estiramiento, por ende, hay mayor tiempo de estiramiento, lo cual genera que la película FH₂, que tiene mayor FH, tenga mayor resistencia a la tensión en DM. En DT, la razón por la cual influye FH sobre la resistencia a la tensión, de la manera como se muestra en la figura 19, se encuentra en el BUR; para aumentar FH, se reduce el caudal de aire de enfriamiento, lo cual genera una expansión de la película soplada en DT, y así, las moléculas de la película se estiran con mayor intensidad en DT, razón por la cual, la película FH₂ tiene mayor resistencia a la tensión en DT.

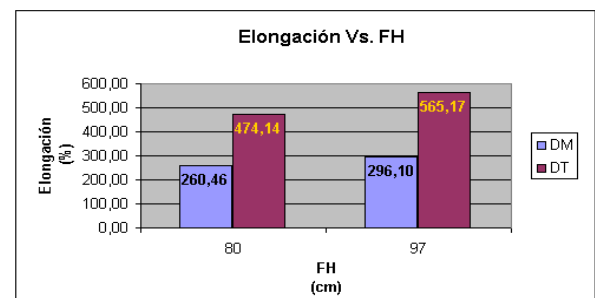


Figura 20. Elongación Vs. FH.

En la figura 20, se observa que mientras mayor es FH, mayor es la elongación, en DM y en DT; esto se debe al mayor tiempo de estiramiento que hay en DM y al mayor BUR que hay en DT. En DM, al haber mayor tiempo de estiramiento por el mayor FH, las moléculas se estiran más, y así, las moléculas logran formar un mayor número de enlaces secundarios, es decir, la película FH₂ logra obtener mayor elongación en DM. En DT, el mayor BUR que se genera al aumentar FH, indica que las moléculas se estiran con mayor

intensidad en DT, lo cual provoca que las moléculas se estiren más en esta dirección, y así, se formen más enlaces secundarios entre ellas, razón por la cual, la película FH₂ obtiene mayor elongación en DT.

3.4.2 Influencia de FH sobre la resistencia al impacto

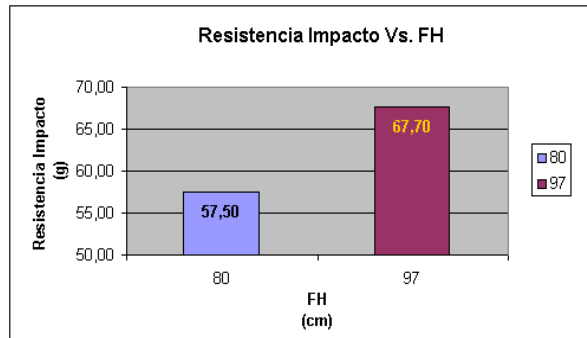


Figura 21. Resistencia al impacto Vs. FH.

En la figura 21, se observa que mientras mayor es FH, mayor es la resistencia al impacto; esto se debe al mayor tiempo de estiramiento que hay en DM y al mayor BUR que hay en DT. Al tener, la película FH₂, mayor FH, obtiene mayor tiempo de estiramiento en DM y mayor BUR, lo cual genera que las moléculas se estiren más y se acerquen más entre ellas, en DM y en DT, razón por la cual, la película FH₂ obtiene mayor capacidad para absorber energía transmitida por una carga mecánica, en este caso, la energía transmitida por la carga de impacto.

3.4.3 Influencia de FH sobre la permeabilidad

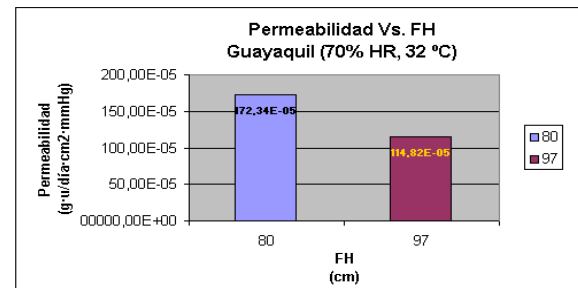


Figura 22. Permeabilidad Vs. FH, en Guayaquil.

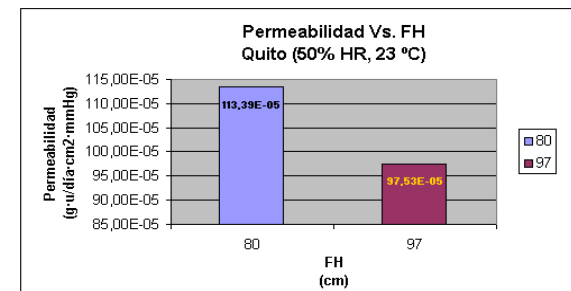


Figura 23. Permeabilidad Vs. FH, en Quito.

En las figuras 22 y 23, se observa que mientras mayor es FH, menor es la permeabilidad; esto se debe a la mayor cristalinidad que alcanzó la película FH₂, por su mayor tiempo de estiramiento en DM y por su mayor BUR.

3.5 Influencia del DDR sobre las propiedades mecánicas de las películas DDR₁ y DDR₂.

3.5.1 Influencia del DDR sobre la resistencia a la tensión y elongación

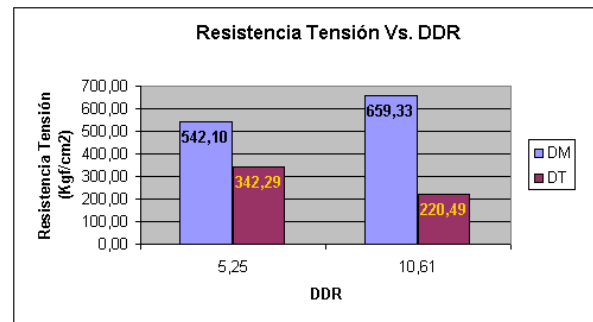


Figura 24. Resistencia a la tensión Vs. DDR.

En la figura 24, en DM, se observa que mientras mayor es el DDR, mayor es la resistencia a la tensión; en cambio, en DT, mientras menor es el DDR, mayor es la resistencia a la tensión. La diferencia en el DDR, que se observa en la figura 24, se debe a la diferencia en la velocidad de los rodillos haladores, razón por la cual, el cambio en el DDR, que se realizó para la fabricación de la película DDR₂, sólo influyó en DM; es decir, el aumento en el DDR que se obtiene por el aumento en la velocidad de los rodillos haladores, sólo influye en DM, aumentando la intensidad de estiramiento de las moléculas en dicha dirección, lo cual genera que éstas se acerquen más entre ellas, razón por la cual, la película DDR₂ obtiene mayor resistencia a la tensión en DM. El operador de la extrusora donde se fabricó el segundo grupo de películas que se obtuvieron como muestras, a parte de cambiar el DDR para la fabricación de la película DDR₂, cambió arbitrariamente el FLUJO, razón por la cual, el FLUJO con el que se fabricó la película DDR₂, es mayor que el FLUJO con el que se fabricó la película DDR₁; la película DDR₁, al haberse fabricado con un menor FLUJO, tiene mayor ventaja para el estiramiento de sus moléculas en DT, lo cual genera que sus moléculas se estiren más que las moléculas de la película DDR₂, en DT, razón por la cual, la película DDR₁ obtiene mayor resistencia a la tensión en DT.

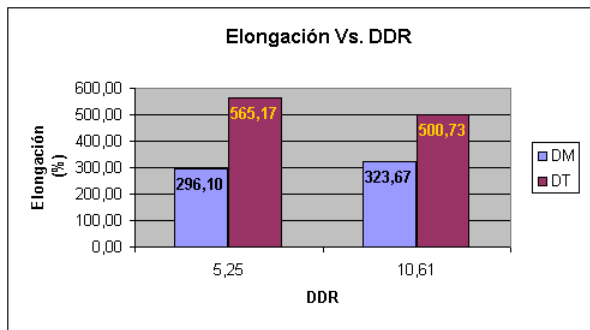


Figura 25. Elongación Vs. DDR

En la figura 25, en DM, se observa que mientras mayor es el DDR, mayor es la elongación; en cambio, en DT, mientras menor es el DDR, mayor es la elongación. En DM, la película DDR₂ tiene mayor elongación por el mayor DDR con el cual fue fabricada, ya que al haber un mayor DDR, las moléculas se estiran más en DM, formando más enlaces secundarios entre ellas, razón por la cual, la película DDR₂, obtiene mayor elongación en DM. En DT, la película DDR₁ tiene mayor elongación por el menor FLUJO con el cual fue fabricada, FLUJO con el cual obtuvo mayor ventaja para el estiramiento de sus moléculas en DT, es decir, las moléculas de la película DDR₁ se estiraron más que las moléculas de la película DDR₂, en DT, lo cual generó que las moléculas de la película DDR₁, formen más enlaces secundarios entre ellas.

3.5.2 Influencia del DDR sobre la resistencia al impacto

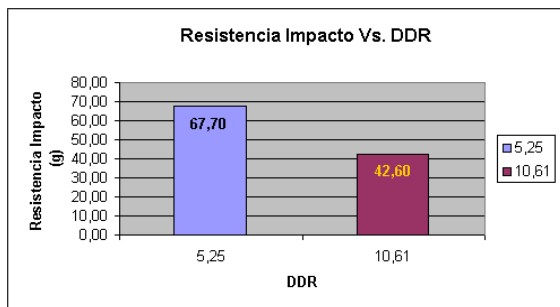


Figura 26. Resistencia al impacto Vs. DDR.

En la figura 26, se observa que mientras menor es DDR, mayor es la resistencia al impacto; esto se debe al menor FLUJO con el cual se fabricó la película DDR₁. La película DDR₁, al haberse fabricado con un menor FLUJO, sus moléculas se estiran con mayor facilidad en DT, lo cual genera que éstas se estiren más, acercándose más entre ellas y formando más enlaces secundarios, hasta tal punto, que su capacidad para absorber la energía transmitida por una carga mecánica, logra ser mayor que la capacidad que obtiene la película DDR₂; es decir, la película DDR₁ logra obtener

mayor resistencia al impacto que la película DDR₂.

3.5.3 Influencia del DDR sobre la permeabilidad

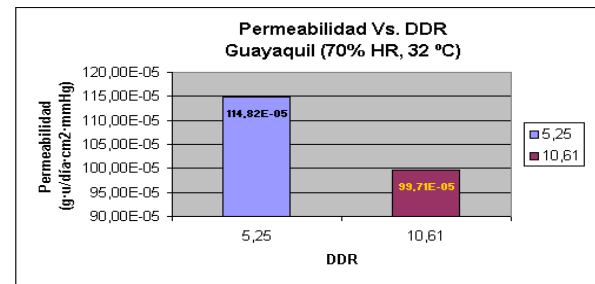


Figura 27. Permeabilidad Vs. DDR, en Guayaquil.

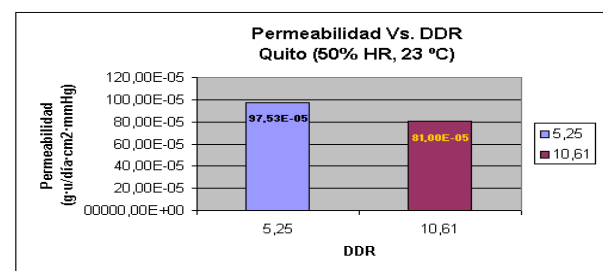


Figura 28. Permeabilidad Vs. DDR, en Quito.

En las figuras 27 y 28, se observa que mientras mayor es DDR, menor es la permeabilidad; esto se debe a la mayor cristalinidad que alcanzó la película DDR₂, por la mayor intensidad de estiramiento que tuvieron sus moléculas en DM.

3.6 Influencia del BUR sobre las propiedades mecánicas de las películas BUR₁ y BUR₂.

3.6.1 Influencia del BUR sobre la resistencia a la tensión y elongación

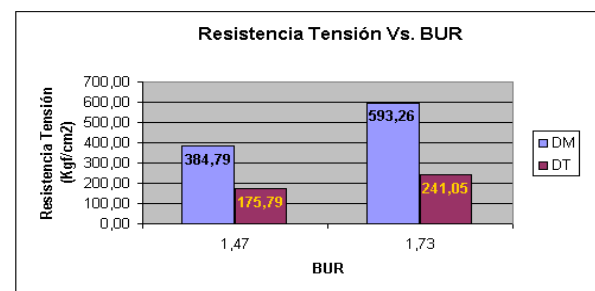


Figura 29. Resistencia a la tensión Vs. BUR.

En la figura 29, se observa que mientras mayor es el BUR, mayor es la resistencia a la tensión, en DM y en DT. El BUR y FH dependen del caudal de aire de enfriamiento, razón por la cual, al cambiar el BUR, cambia FH, y viceversa; para aumentar el BUR, se disminuye el caudal de aire de enfriamiento, lo cual, también genera un aumento en FH, es decir, un

aumento en el tiempo de enfriamiento. Al haber un aumento en el tiempo de enfriamiento en DM, hay un aumento en el tiempo de estiramiento en DM, lo cual genera que las moléculas de la película se estiren más en dicha dirección, y así, se acerquen más entre ellas, es decir, la resistencia a la tensión de la película BUR₂, sea mayor en DM. En DT, la razón por la cual influye el BUR sobre la resistencia a la tensión, de la manera como se muestra en la figura 29, se encuentra en la intensidad de halado que tiene la película en DT; un aumento en el BUR, implica una expansión de la película soplada en DT, lo cual significa, mayor intensidad de estiramiento en dicha dirección, mientras se enfría la película, razón por la cual, las moléculas de la película con mayor BUR, se estiran más, es decir, la película BUR₂ alcanza una mayor resistencia a la tensión en DT.

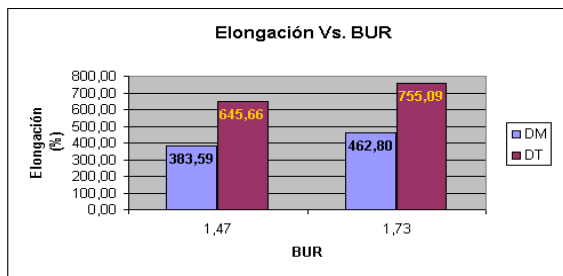


Figura 30. Elongación Vs. BUR.

En la figura 30, se observa que mientras mayor es el BUR, mayor es la elongación, en DM y en DT; esto se debe al mayor tiempo de estiramiento que hay en DM y a la mayor intensidad de estiramiento que hay en DT. En DM, al haber mayor tiempo de estiramiento por el mayor FH, las moléculas se estiran más, y así, las moléculas logran formar un mayor número de enlaces secundarios, es decir, la película BUR₂ obtiene mayor elongación en DM. En DT, la mayor intensidad de estiramiento que se genera por la expansión de la película soplada en dicha dirección, ocasiona que las moléculas de la película se estiren más, y así, se formen más enlaces secundarios entre ellas, razón por la cual, la película BUR₂, obtiene mayor elongación en DT.

3.6.2 Influencia del BUR sobre la resistencia al impacto

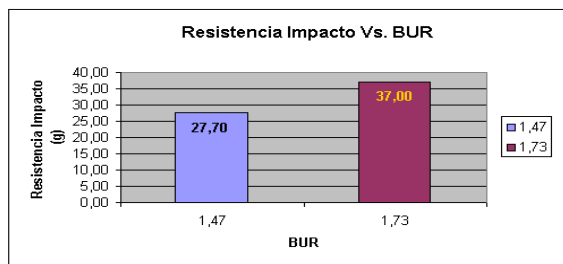


Figura 31. Resistencia al impacto Vs. BUR.

En la figura 31, se observa que mientras mayor es el BUR, mayor es la resistencia al impacto; esto se debe al mayor tiempo de estiramiento que hay en DM y a la mayor intensidad de estiramiento que hay en DT. Al tener, la película BUR₂, mayor BUR, obtiene mayor tiempo de estiramiento en DM y mayor intensidad de estiramiento en DT, lo cual genera que las moléculas se estiren más y se acerquen más entre ellas, en DM y en DT, razón por la cual, la película BUR₂ obtiene mayor capacidad para absorber energía transmitida por una carga mecánica, en este caso, la energía transmitida por la carga de impacto.

3.6.3 Influencia del BUR sobre la permeabilidad

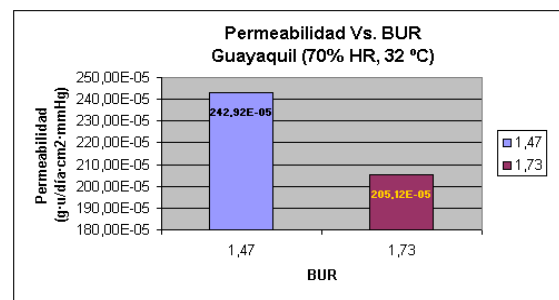


Figura 32. Permeabilidad Vs. BUR, en Guayaquil.

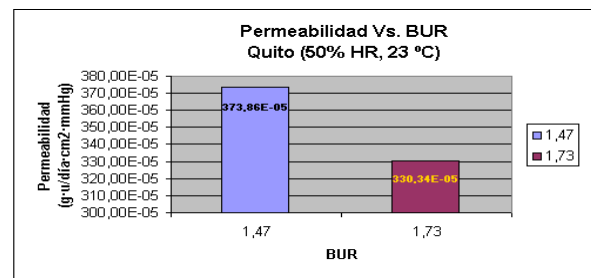


Figura 33. Permeabilidad Vs. BUR, en Quito.

En las figuras 32 y 33, se observa que mientras mayor es el BUR, menor es la permeabilidad; esto se debe a la mayor cristalinidad que alcanzó la película BUR₂, por su mayor tiempo de estiramiento en DM y por su mayor intensidad de halado en DT.

4. Conclusiones

- Los resultados que se obtuvieron de los ensayos, mostraron mejores propiedades mecánicas al aumentar el MI, al disminuir , al disminuir FLUJO, al aumentar FH, al aumentar DDR ó al aumentar BUR.
- Para que, al aumentar el MI, ó, al disminuir , también mejore la elongación en DT y la resistencia al impacto, hay que disminuir el caudal de aire de enfriamiento junto con el aumento del MI, ó, junto con la disminución de .

- Entre los parámetros de condiciones de procesamiento, el FLUJO es el parámetro con el cual se puede obtener el más alto mejoramiento en la mayoría de las propiedades mecánicas de la película de HDPE.
- Mientras mayor es la resistencia a la tensión de la película de HDPE, la película es más cristalina, por ende, es menos permeable.

5. Agradecimientos

EXPOPLAST
TRILEX
PLÁSTICOS INTERNACIONALES
PORCONECU
Carlos Correa

6. Referencias

- [1]. S. SELKE, J. CUTER AND R. HERNÁNDEZ; *Plastics Packaging*, 2nd Edition, Carl Hanser Verlag, Munich, 2004.
- [2]. T. KANAI AND G.A. CAMPBELL; *Film Processing*, 1st Edition, Carl Hanser Verlag, Munich, 1999.
- [3]. O. SCHWARZ; *Ciencia de los Plásticos*, 1ra Edición, Editorial Costa Nogal, Montevideo ó Uruguay, 2002.
- [4]. O. SCHWARZ, F-W. EBELING Y B. FURTH; *Procesamiento de los Plásticos*, 1ra Edición, Editorial Costa Nogal, Montevideo ó Uruguay, 2003.
- [5]. W.G. TODD; *Variables that Affect/Control High-density Polyethylene Film Oxygen-Moisture Barrier*, Journal of Plastic Film and Sheeting, Vol. 19-July 2003.
- [6]. U.S.I. CHEMICALS; *Petrothene Polyolefins ó Processing Guide*, 4th Edition.