

## EFFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN SOBRE LA RELACIÓN ESTRUCTURA–PROPIEDADES DE PELÍCULAS TUBULARES DE PEBD

Ricardo A. Pérez<sup>1</sup>, Agustín Torres<sup>2</sup>, María Virginia Candal<sup>1\*</sup>

1) Grupo de Polímeros USB, Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Apartado 89000. Caracas 1080–A, Venezuela. Correo electrónico: [mcandal@usb.ve](mailto:mcandal@usb.ve)  
2) Indesca, Complejo Petroquímico AMC (El Tablazo), Edo. Zulia, Venezuela

Recibido: Julio 2013; Aceptado: Septiembre 2013

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal cuantificar el efecto de las variables de procesamiento tales como velocidad de extrusión, temperatura de fundido, relación de soplado (BUR), relación de estiramiento (TUR) y altura de la línea de enfriamiento (ALE) sobre las propiedades mecánicas y ópticas de las películas tubulares de polietileno de baja densidad (PEBD). Se determinó que el BUR afecta a la orientación en la dirección transversal (TD), afectando negativamente las propiedades de desgarro en esta dirección, así como el esfuerzo a la ruptura en la dirección de la máquina (MD) y favorablemente las propiedades de impacto, penetración y esfuerzo a la ruptura en TD, y propiedades ópticas. El TUR tiene un efecto sobre la orientación en MD, afectando negativamente las propiedades ópticas, la resistencia al desgarro en MD y el esfuerzo a la ruptura en TD y positivamente las propiedades de impacto, penetración y esfuerzo a la ruptura en MD. En cuanto al ALE, temperatura de fundido y caudal se presentan competencias de efectos que no muestran una tendencia clara de la modificación de estas variables sobre las propiedades finales de la película.

**Palabras claves:** BUR, TUR, ALE, polietileno de baja densidad.

### ABSTRACT

This main objective of this paper was to quantify the effect of process conditions (blow-up ratio (BUR), take-up ratio (TUR), frost line height (ALE), extrusion temperature and extrusion velocity) over the mechanical and optical properties of tubular low density polyethylene (LDPE) films. It was determined that the BUR affects the transverse direction orientation (TD), negatively affecting tear properties in TD, and the stress at break in the machine direction (MD) and favorably affects the impact properties, penetration and stress at break in TD, and optical properties. The TUR has an effect on the orientation in MD, negatively affecting the optical properties, tear resistance in MD and stress at break in TD and positively impact properties, penetration and stress at break in MD. On the ALE, melt temperature and flow effects are not showed a clear tendency over the final properties of the film.

**Keywords:** BUR, TUR, ALE, Low Density polyethylene.

### INTRODUCCIÓN

El sector procesador de película tubular debe modificar frecuentemente las variables de procesamiento para obtener la medida, espesor y propiedades requeridas por sus clientes; sin embargo, un inconveniente para ellos es que no cuentan, en la amplia mayoría de los casos, con los equipos necesarios para determinar la influencia de cada una de las variables involucradas en el proceso ni cuentan con la literatura para informarse acerca de la influencia de las variables. Esto trae como consecuencia que en ocasiones trabajen de forma empírica, generando elevadas cantidades de descarte, retraso en la entrega del producto y pérdidas de clientes por no cumplir con los estándares de calidad. De allí que es necesario tener conocimiento del efecto que tienen las

diferentes variables del proceso sobre las propiedades finales de la película.

El presente trabajo busca correlacionar las variaciones en propiedades finales de la película (resistencia a la tensión, al impacto, al desgarro, a la penetración y propiedades ópticas) con los parámetros de control del proceso, tales como velocidad de extrusión, temperatura de fundido, relación de soplado (BUR), relación de estiramiento (TUR) y altura de la línea de enfriamiento (ALE), con el fin de poder estimar los cambios en dichas propiedades que se generan al modificar las variables de trabajo.

**Fundamentos teóricos y antecedentes.** Uno de los procesos de transformación más importantes en la industria de los polímeros es la extrusión de película tubular, ya que la misma provee una gran flexibilidad en la producción de películas de diversas propiedades físicas y mecánicas, así como el uso de una amplia gama de materiales. Este proceso se puede definir como aquel mediante el cual una masa de resina fundida es formada en un perfil anular (tubular), para simultáneamente estirarla y enfriarla, hasta alcanzar el estado sólido. Hay que señalar que en este proceso se da una orientación biaxial, es decir, una orientación axial debido al estirado de la película y una dirección transversal producto del soplado de la misma. Estas dos orientaciones afectan las propiedades mecánicas de la película, por lo que el entendimiento del comportamiento del proceso es sumamente útil y explica la gran variedad de productos comerciales que se pueden obtener a partir del mismo [1].

El proceso de extrusión de película tubular puede describirse como una operación en la que una extrusora funde, dosifica, mezcla y bombea el material plástico a la sección de formado, que consiste en un cabezal con una boquilla de salida que proporciona al material fundido la forma de un perfil el cual, al ir saliendo a través de la boquilla, es inflado por medio de la introducción de aire por el cabezal, de manera que se forma una burbuja caliente que es enfriada por un flujo de aire a alta velocidad, suministrado por el anillo de enfriamiento. Esta burbuja se sigue enfriando, hasta que pasa a través de los rodillos de colapsamiento, donde es aplastada para formar una película plana, la cual progresó abajo en la línea gracias a otros rodillos y finalmente, es embobinada [2].

En la extrusión de película tubular intervienen variables propias de cualquier proceso de extrusión como son la temperatura y la velocidad del tornillo (caudal) y además intervienen variables específicas de este proceso de transformación como [2–4]:

**Relación de soplado.** Es un parámetro adimensional que se obtiene del cociente entre el diámetro de la burbuja (D) y el diámetro del cabezal ( $D_0$ ) como se muestra la ecuación:

$$BUR = \frac{D}{D_o} \quad (1)$$

En la industria, este parámetro es conocido por sus siglas en inglés BUR (“*blow-up ratio*”) y nos proporciona una idea del grado de orientación transversal de la película. En principio, un aumento de la relación de soplado se traducirá en una mayor orientación transversal.

**Relación de estiramiento.** Este parámetro se define como el cociente entre la velocidad de estirado de los rodillos de colapsamiento (V) y la velocidad del extrudado a la salida de la boquilla ( $V_0$ ). Este parámetro nos indica el estirado que ha sufrido el material en la dirección de extrusión (MD) una vez que ha salido de la boquilla. En la industria es común utilizar las siglas en inglés del término equivalente “*take-up ratio*” (TUR)

$$TUR = \frac{V}{V_0} \quad (2)$$

Las velocidades anteriormente mencionadas no son fáciles de medir, sin embargo, a través de la relación de adelgazamiento ( $R_a$ ) puede determinarse el TUR. También pueden calcularse mediante cálculos de balance de masa, en función de la geometría de la película, empleando densidades de referencia.

**Relación de adelgazamiento.** Este parámetro mide la reducción del espesor en la resina fundida después de ser soplada. Está definida por el cociente entre la abertura de los labios de la boquilla ( $E_0$ ) y el espesor de la película (E):

$$R_a = \frac{E_o}{E} = BUR \cdot TUR \quad (3)$$

**Altura de la línea de enfriamiento.** Se define como la distancia medida desde la salida del cabezal hasta que el material solidifica. Esta línea coincidirá con la cristalización en el caso de polímeros semi-cristalinos. Una mayor altura de la línea de enfriamiento supone un mayor tiempo de relajación del material antes de solidificar, pudiendo perderse parte de la orientación aportada por el estirado, aunque por otro lado, esto también puede promover la formación de más o mayores estructuras cristalinas. Otros aspectos que caracterizan la altura de la línea de enfriamiento son, por un lado, que a partir de esta zona el diámetro de la burbuja se mantiene constante, y por otro, que el perfil de temperaturas a lo largo de la burbuja muestra un punto de inflexión debido a la

cristalización del material.

**Velocidad del tornillo.** Este parámetro está relacionado con la obtención de un mayor o menor caudal, o con la cantidad de material obtenido en un determinado tiempo. Trabajar a altos caudales permite obtener un incremento de la producción que es lo deseado en cualquier proceso productivo comercial. Sin embargo, el incremento del caudal trae efectos como el aumento de la orientación molecular a la salida de la boquilla, aumento del consumo de potencia y presión, aumento del calentamiento por disipación viscosa y reducción de la estabilidad de la burbuja. En adición, una vez que se supera un esfuerzo crítico (dependiente del material y la temperatura de procesamiento), se presenta el fenómeno conocido como fractura de fundido o “piel de naranja”, que afecta de modo importante la apariencia de la película.

**Temperatura de extrusión.** El principal efecto de la modificación de la temperatura de extrusión es el ajuste de la viscosidad (resistencia al fundido) del polímero. De manera general, a mayor temperatura, menor viscosidad y por ende, menor resistencia del fundido, lo cual puede crear dificultades para mantener la geometría de la burbuja estable y libre de defectos superficiales como rayas y fractura en fundido. Por otra parte, si se emplea una menor temperatura de extrusión la potencia consumida por parte del motor será mayor, debido a que trabajar con una menor temperatura se traduce en un material más viscoso, el cual requerirá mayor potencia para lograr su avance a través de la extrusora.

**Relación entre las distintas variables de procesamiento.** El objetivo del proceso es producir una película delgada de espesor uniforme y con unas buenas propiedades ópticas y mecánicas. Con el fin de minimizar costos se intenta trabajar con altos caudales de producción, lo que se traduce en aplicar elevados valores de TUR, para obtener películas de reducido espesor. Adicionalmente, la reducción del espesor puede lograrse con altos valores de BUR, que además compensarán la tendencia a generar películas muy orientadas en MD a causa del alto TUR aplicado. Una orientación desbalanceada en la película final puede resultar en una reducida resistencia al impacto, así como la tendencia de que las películas se desgarran con mayor facilidad en la dirección de extrusión [5].

Por otra parte, al modificar el espesor de la película por medio de la variación de TUR y BUR, el ALE también variará, a no ser que se intente mantener constante aumentando o disminuyendo el flujo de aire del sistema de enfriamiento. Sin embargo, hay que tener en cuenta que altos caudales de refrigeración pueden volver inestable el proceso, afectando el perfil del espesor de la película, o incluso rompiendo la burbuja a causa de vibraciones por el alto volumen

de aire empleado.

En resumen, la extrusión de película tubular es un proceso de fabricación complejo en el cual las propiedades finales de las películas obtenidas están muy influenciadas por los parámetros del proceso. Para comprender la variación que sufren estas propiedades es de vital importancia conocer como las características del polímero, el equipo utilizado y las variables de procesamiento afectan la morfología, la cristalinidad y la orientación desarrollada por las películas.

En busca de dicha comprensión del proceso, se han realizado diversos estudios acerca de los efectos de las variables de procesamiento sobre las propiedades mecánicas en polietilenos (PEs). Estos estudios se han basado en la variación del BUR [5, 6], TUR [5, 6] y ALE [7], así como la variación del tipo de PE [5–8] o de su índice de fluidez (MFI) [9–11] cuantificándose efectos sobre propiedades tensiles [5–7], impacto [5, 6], desgarro [8, 9] y propiedades ópticas [6,10,11].

Específicamente, *Ghaneh y Fard* [5] estudiaron el efecto de las variables de proceso BUR y TUR de películas de polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD) y polietileno lineal de baja densidad (PELBD) sobre las propiedades mecánicas de tracción e impacto  $R_a = E_0/E = BUR \cdot TUR$ . Se consiguió que el impacto *Dart* mejorara significativamente con el incremento de la relación BUR/TUR. Por otra parte, en propiedades tensiles, encontraron fuertes interacciones entre las orientaciones en MD y TD. Interacciones similares también fueron encontradas por *Fatahi et al.* [6].

*Johnston et al.* [7] ensayaron varios PE metalocénicos con distintos comonómeros, empleando un BUR y TUR constantes y realizando solo variaciones en el ALE estudiadas por medio del análisis de propiedades tensiles. Se determinó que un incremento del ALE produce un decremento en la orientación de las cadenas, lo cual está relacionado con la relajación de las mismas, y puede producir cambios en las propiedades finales de la película.

*Krishnaswamy y Sukhadian* [9] ensayaron la resistencia al desgarro de distintas películas de PELBD, encontrando que a bajas velocidades de extensión en MD las películas tendían a presentar una mayor resistencia al desgarro, mientras que a mayores se encuentra una disminución significativa de esta propiedad producto de la cristalización inicial de dichos PE. La resistencia al desgarro en TD se ve favorecida a mayores velocidades de extensión impuestas en TD.

*Zhang et al.* [8] ensayaron la resistencia al desgarro varios tipos de PELBD, PEBD y PEAD, variando las condiciones de ensayos y cuantificándolas mediante el “*draw up ratio*” (DDR), el cual está relacionado con la orientación de la película. En ensayos de resistencia al desgarro encontraron que a bajos niveles de DDR los PELBDs presentaron el mejor balance de resistencia

al desgarro entre MD y TD, sin embargo, al incrementarse la relación la resistencia al desgarro en TD supera al MD. La tendencia contraria fue descrita para el PEBD, mientras que la mayor anisotropía se encontró en el PEAD. Resultados similares fueron reportados para la relación de esfuerzo tensil MD/TD, donde los PELBDs presentaron un buen balance de dicha propiedad, el PEBD exhibió una fuerte anisotropía a altos niveles de DDR y el PEAD presentó mayores esfuerzos en MD en comparación a TD. Dichos comportamientos fueron atribuidos a los distintos desarrollos morfológicos alcanzados por los PE empleados.

En cuanto a las variaciones en propiedades ópticas, *Hucky y Clegg* [10] determinaron que el porcentaje de turbidez está relacionado tanto con la cristalización de la película como con la superficie de la misma, además los resultados obtenidos por este autor reflejan una relación inversa entre esta propiedad y el brillo de la película.

*Fatahi et al.* [6] examinaron películas de PEBD, PELBD y PEAD encontrando que la nublación y la claridad están relacionadas con la cristalización y con las funciones de orientación en la dirección de la máquina. El efecto de las condiciones de procesamiento parece ser el factor de mayor peso en las propiedades ópticas. *Doelder et al.* [11] emplearon PEBD en un intervalo de propiedades físicas, hallando que las propiedades ópticas se mantienen inalteradas ante dichas variaciones; las buenas propiedades ópticas están relacionadas a distribuciones de peso molecular estrechas, mientras que el índice de fluidez y la densidad juegan un papel secundario.

En los estudios descritos anteriormente se puede observar como los mismos han estado enfocados sólo a algunas propiedades relacionándolos con los efectos orientacionales que puede tener la variación del tipo de PE ó la variación de MFI e índice de polidispersidad en un mismo tipo de PE, lo que representa una dificultad al discriminar el efecto individual de cada variable de procesamiento.

En este trabajo se busca por medio del estudio de un solo material discriminar los efectos individuales de las variables de procesamiento y cuantificar su efecto por medio de un análisis físico integral que pueda brindar un amplio panorama acerca de las ventajas y desventajas de trabajar bajo condiciones específicas. Este trabajo es la primera parte de una serie de proyectos que pretenden desarrollar modelos empíricos de predicción de propiedades de poliolefinas en extrusión de película tubular y plana.

## PARTE EXPERIMENTAL

**Materiales.** En el presente trabajo fueron analizados los diferentes efectos del cambio de

variables de extrusión en un PEBD FB3003 grado película, provisto por *POLINTER*. Su MFI es de 0,27 g/10 min (190/2,16) medido de acuerdo a la norma ASTM D 1238–04c [11] y posee una densidad de 0,9220 g·cm<sup>-3</sup> medida de acuerdo a la norma ASTM D792–08 [13].

**Procedimiento.** El proyecto se llevó a cabo siguiendo las siguientes etapas:

**a) Extrusión de películas.** El equipo empleado para extrudir las películas fue una extrusora de película tubular *DOLCI* modelo KRC con difusor de aire de doble labio *SATURNO* modelo SAT 1 80 MM boquilla de 1,8 mm de abertura y 80 mm de diámetro. El primer paso para la extrusión de películas fue la búsqueda de una condición estándar (robusta), la cual fue tomada como referencia. Esta condición es aquella que aceptó variaciones en sus condiciones sin afectar dramáticamente sus propiedades, y produjo una película de buena apariencia. Una vez lograda la referencia, se procedió a modificar las variables, de manera de obtener tres puntos, en cada caso, uno correspondiente a la referencia, un valor mayor y uno menor a la misma, manteniendo el resto de las condiciones constantes y partiendo de la suposición de que cada variable puede ser aislada del resto. Las modificaciones realizadas se presentan en la Tabla 1, en ella los perfiles de temperatura son representados por números arábigos los cuales corresponden a los perfiles presentes en la Tabla 2. Todo esto se hizo para individualizar cada uno de los efectos tomados en cuenta en este estudio.

Tabla 1. Diseño de experimentos planteado para el estudio.

<i>Muestra</i>	<i>Efecto simulado</i>	<i>Variable</i>				
		<i>ALE</i> <i>cm</i>	<i>BUR</i>	<i>TUR</i>	<i>Caudal</i> <i>kg/hr</i>	<i>Perfil de</i> <i>temperatura</i>
1	Estándar	50	3,0	6,0	30	1
2	Mayor BUR	50	3,5	6,0	30	1
3	Menor BUR	50	2,5	6,0	30	1
4	Mayor Espesor	50	3,0	7,5	30	1
5	Menor Espesor	50	3,0	5,0	30	1
6	Mayor Caudal	50	3,0	6,0	35	1
7	Menor Caudal	50	3,0	6,0	25	1
8	Mayor Temperatura	50	3,0	6,0	30	2
9	Menor Temperatura	50	3,0	6,0	30	3
10	Menor ALE	40	3,0	6,0	30	1
11	ALE intermedia	45	3,0	6,0	30	1

**b) Ensayos de propiedades físicas.** A las diferentes películas extruidas (11 en total) se les

realizó un análisis físico. En las tablas de resultados de cada uno de los ensayos se presenta el valor promedio y la desviación estándar. Los diferentes ensayos realizados fueron:

i) **Ensayo de desgarro:** fue realizado con una máquina de ensayos *Elmendorf* (*Elmendorf Tearing Tester*) marca *Thwing–Albert Instruments Company*, como establece la norma ASTM–D–1922 [13]. Los péndulos empleados en la evaluación de la mayoría de las películas fue de 800 g exceptuando el caso de la película en que se trabajó con menor BUR, para el cual se empleó el péndulo de 1.600 g.

Tabla 2. Perfiles de temperaturas empleados (las Zonas 1 a 4 están referidas a la extrusora y A a W al cabezal).

Perfil	Temperatura de zonas/°C								
	4	3	2	1	W	D	C	B	A
1 (Estándar)	190	200	210	220	220	220	220	220	220
2 (Alta temperatura)	200	210	220	230	230	230	230	230	230
3 (Baja temperatura)	180	190	200	210	210	210	210	210	210

Tolva Boquilla

ii) **Ensayo de penetración:** el ensayo de penetración fue realizado en el mismo equipo empleado para desgarro. La diferencia en este caso fue que se utilizó un péndulo de 3.200 g, el cual se dejó caer sobre una muestra con un diámetro de  $110 \pm 0,01$  mm. Las condiciones respecto al péndulo son análogas a las establecidas en la norma ASTM D–1922 [13], mientras que la fuerza de penetración se reportó en gramos y fue calculada por medio del producto de la lectura realizada por un factor de corrección F que viene dado por el peso del péndulo entre 100.

iii) **Ensayo de propiedades ópticas:** se empleó un equipo para la determinación de la transmisión luminosa y turbidez marca *BYK Gardner* modelo *Haze–Gard Dual* y un equipo para la determinación de brillo marca *BYK Gardner*, modelo *Micro–Tri–Gloss*. Para la determinación de la transmisión luminosa y turbidez se utilizó la norma ASTM D 1003–00 [14]. Para la determinación de brillo debido a que se trataba de películas sin impresión se emplearon muestras de mínimo 6 cm por lado y luego de la verificación del equipo se procedió a realizar la medida sobre las mismas, en un total de 5 muestras por condición, reportándose el porcentaje promedio de brillo y su respectiva desviación estándar.

iv) **Ensayo de impacto:** se realizó en un impactómetro instrumentado marca

*Rosand*, modelo Type 4, con el software *Rosand Instrument Falling Weight Impact Tester* para su manejo. El tipo de impacto empleado fue el impacto *Dart*, cuya metodología corresponde a la norma ISO 7765–2 [17]. Las condiciones de ensayo son establecidas de acuerdo a las normas en el equipo, estas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros empleados en el ensayo de impacto *Dart*.

Parámetro	Valor
Velocidad	4,43 m/s
Masa	9,5 kg
Altura	1 m

v) **Ensayo de tensión.** Se utilizó un equipo de ensayos universales marca *Instron* modelo 1123, con el software *Merlin* para su manejo y accesorios: celda de 200 kg reversible y juego de mordazas neumáticas con límite de resistencia hasta los 500 kg. El ensayo se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D882–12 [18]. Las condiciones empleadas se muestran específicamente en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros empleados en el ensayo de tensión.

Parámetro	Valor
Distancia entre mordazas	50 mm
Velocidad de ensayo	500 mm/min
Celda de carga	2 kN
Humedad	60%
Temperatura	21°C

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

La influencia de las distintas variables de procesamiento sobre las propiedades finales de la película fue analizada en fase cristalina por medio del modelo *Keller–Machin I*, el cual propone la formación de núcleos lineales orientados en la dirección del estirado (que en el caso de película tubular es principalmente en MD y en una muy pequeña proporción en TD producto del BUR), a causa de la tensión ejercida por el estirado durante la solidificación. A partir de este núcleo lineal

tiene lugar una nucleación secundaria que propicia la formación de lamelas que pueden tener lugar solo en el sentido perpendicular de la superficie [18] de los núcleos orientados en la dirección de la extrusión, tal como se muestra en la Figura 1 [20]. Por lo general, este modelo es aplicable a PELBD [9, 21–24]; éste presenta lamelas cuyo eje cristalográfico se encuentra preferentemente orientadas en dirección MD, con el eje cristalográfico *c* (eje de la cadena) en el plano perpendicular a MD [25]. En el caso de PEBD también se reporta el uso de este modelo [23] con altas relaciones de DDR mientras que a bajas DDR la orientación es relativamente al azar [8]. Para el PEAD antes del estiramiento se tiene una orientación similar al modelo de *Keller Machin I*, mientras que al estirar ocurre un proceso de reorientación lamelar [24], que conduce a que el eje *c* este orientado en MD, lo cual corresponde con el modelo de *Keller Machin II* [8]. En fase amorfa se toma en cuenta el principio de conservación de volumen: una contracción en MD se traduce o se compensa con una expansión en TD [26].

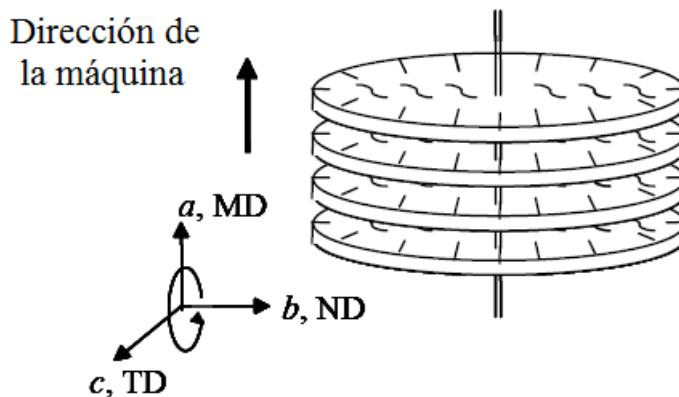


Figura 1. Estructura *Keller–Machin I* para películas de polietileno [20].

**Efecto del BUR sobre propiedades finales de la película.** El principal efecto del BUR es la orientación de las cadenas poliméricas en TD. La Tabla 5 muestra el efecto de la modificación del BUR sobre las distintas propiedades de la película. Éstas no influyen significativamente sobre la fuerza de desgarro, esfuerzo a la ruptura ni penetración en MD. Mientras que en las otras propiedades analizadas el comportamiento se debe a lo esperado según el modelo de *Keller–Machin* de acuerdo a cada propiedad. En la fuerza de desgarro en TD la propagación de la grieta se produce de una manera más sencilla en la dirección de las cadenas poliméricas con mayor orientación molecular [27], en este caso la mayor orientación es en TD razón por la cual la fuerza de desgarro en esta dirección disminuye.

En esfuerzo a la ruptura, se registran mayores valores a medida que la película se encuentre mayormente orientada en una dirección específica, y en este caso una mayor orientación en TD se traduce en un mayor esfuerzo a la ruptura en esta dirección. La resistencia al impacto se ve incrementada debido a que una mayor orientación en TD contrarresta la excesiva orientación en MD que tiene la película.

Tabla 5. Efecto de modificación del BUR sobre propiedades finales de la película.

Propiedad	BUR		
	2,5	3,0	3,5
Desgarro [g/μm]			
MD	1,83 ± 0,43	1,77 ± 0,14	1,22 ± 0,09
TD	3,60 ± 0,15	3,30 ± 0,08	3,16 ± 0,12
Impacto [KJ/m]	31,3 ± 0,9	32,4 ± 0,9	35 ± 1
Penetración [g/μm]	11,6 ± 0,3	10,8 ± 0,3	10,9 ± 0,5
Esfuerzo a la ruptura [MPa]			
MD	17,6 ± 0,4	16,5 ± 0,3	17,7 ± 0,4
TD	12 ± 2	22,3 ± 0,8	20,4 ± 1,1
Transmisión luminosa [%]	70 ± 1	72 ± 2	75 ± 2
Turbidez [%]	49 ± 3	43 ± 2	43 ± 2
Brillo [%]	16,2 ± 0,5	19,0 ± 0,6	21,0 ± 0,7

Las propiedades ópticas se ven afectadas por la cristalización desarrollada, ya que, la mayor orientación en TD impartida por un mayor BUR dificulta la cristalización en MD de acuerdo al modelo de *Keller–Machin*, incrementándose el dominio amorfo, por lo que aumenta la transmisión luminosa como encontraron *Ghaneh y Fard* [5]. En cuanto a la turbidez se espera que un material con menor porcentaje de cristalización posea menor turbidez, aunque se debe tomar en cuenta que *Huck y Clegg* [10] encontraron que esta propiedad tiene un componente relacionado con la superficie de la película. *Johnston et al.* [7] encontraron una relación inversa entre el brillo y la turbidez, mientras que *Stehling et al.* [28] determinaron que el brillo depende principalmente de la superficie de la película, y es claramente afectado por los defectos superficiales de la boquilla de extrusión [29]. En este caso los resultados de la Tabla 5 indican la relación inversa propuesta por *Johnston et al.* [7].

**Efecto del TUR sobre propiedades finales de la película.** Un incremento del TUR imparte a las cadenas poliméricas una mayor orientación en MD. Los efectos de esa mayor orientación se observan en la Tabla 6. En las propiedades ópticas se puede observar cómo se cumple el modelo

de *Keller–Machin*, ya que una mayor orientación en MD contribuye a una mayor cristalización, disminuyendo así la transmisión luminosa, aumentando la turbidez y disminuyendo el brillo.

A mayores valores del TUR se refleja una disminución de la fuerza de desgarro en MD y TD, y en esta última el resultado es atribuido a que existan puntos en esta dirección donde las cadenas también cristalizan, disminuyendo el dominio amorfo y con ello la fuerza de desgarro, lo cual se ve favorecido debido a que en el desgarro en MD se combina la velocidad de extensión y la cristalinidad inherente del material como ocurre en el PELBD [9]. Las propiedades de impacto y penetración no sufrieron mayores cambios, lo cual se debe a que el BUR empleado puede estar atenuando la orientación impartida en MD. Asimismo ocurre en los primeros puntos de esfuerzo a la ruptura, sin embargo, en el último punto (mayor TUR) se observa un mayor valor en MD debido a la mayor orientación en esta dirección y un menor esfuerzo en TD debido a conservación de volumen.

Tabla 6. Efecto de la modificación del TUR sobre las propiedades finales de la película.

Propiedades	TUR		
	5	6	7,5
Desgarro [g/μm]			
MD	1,75 ± 0,14	1,77 ± 0,14	1,37 ± 0,12
TD	2,80 ± 0,23	3,30 ± 0,08	2,55 ± 0,13
Impacto [kJ/m]	31,9 ± 0,7	32,4 ± 0,9	34,9 ± 1,7
Penetración [g/μm]	11,5 ± 0,3	10,8 ± 0,3	13,3 ± 0,2
Esfuerzo a la ruptura [MPa]			
MD	16,1 ± 0,3	16,5 ± 0,3	18,4 ± 0,6
TD	18,7 ± 1,4	22,3 ± 0,8	16,3 ± 1,1
Transmisión luminosa [%]	72,7 ± 2,3	72,2 ± 2,5	69,6 ± 1,7
Turbidez [%]	40,6 ± 1,8	42,8 ± 2,3	45,3 ± 2,0
Brillo [%]	20,6 ± 0,7	19,0 ± 0,6	18,8 ± 0,5

**Efecto del ALE en propiedades finales de la película.** El ALE afectará la velocidad a la cual la película fundida es enfriada y esto a su vez determinará la cantidad de orientación residual que quedará en la misma después de pasar por la boquilla y ser soplada. La influencia de un mayor o menor ALE tendrá un comportamiento complejo, ya que por un lado se encuentran los efectos de la misma sobre la orientación, mientras que por otro se encuentran los efectos sobre la cristalización. Según *Johnston et al.* [7] para un bajo ALE el principal efecto es el congelamiento de la orientación en MD, lo cual puede ocasionar un desbalance en propiedades mecánicas.

Por otra parte, un mayor ALE permite una relajación de fundido pudiéndose perder parte de la orientación aportada por el estirado, aunque, esto también puede promover la formación de más y mejores estructuras cristalizadas, ya que el fundido tiene mayor tiempo para orientarse según el estirado al que esté sometido [5]. En la Tabla 7 se observa esta complejidad de comportamiento. En las propiedades de impacto y penetración a menores valores de ALE la orientación se congela quedando esta balanceada (mayores valores de impacto y penetración) debido a los valores de BUR y TUR empleados. A medida que aumenta la ALE de 40 a 45 cm se permite la relajación de dicha orientación lo que favorece un desbalance (menores valores de impacto y penetración).

Tabla 7. Efecto de la modificación de la ALE sobre las propiedades finales de la película.

Propiedad	ALE [cm]		
	40	45	50
Desgarro [g/μm]			
MD	1,81 ± 0,16	1,47 ± 0,10	1,77 ± 0,14
TD	2,76 ± 0,12	3,48 ± 0,33	3,30 ± 0,08
Impacto [kJ/m]	34 ± 1	34 ± 1	32,4 ± 0,9
Penetración [g/μm]	13,2 ± 0,3	12,8 ± 0,4	10,8 ± 0,3
Esfuerzo a la ruptura [MPa]			
MD	15,8 ± 0,8	19,3 ± 0,9	16,5 ± 0,3
TD	17 ± 2	21 ± 1	22,3 ± 0,8
Transmisión luminosa [%]	78 ± 3	73 ± 3	72 ± 2
Turbidez [%]	51,5 ± 1,3	47 ± 1	43 ± 2
Brillo [%]	15,0 ± 0,8	20 ± 1	19,0 ± 0,6

Las propiedades que dependen de la fase amorfía se van a ver favorecidas por un aumento del ALE de 45 a 50 cm debido a la relajación de las cadenas, y así se refleja en el aumento de los valores de fuerza de desgarro tanto en MD como en TD. Sin embargo, una relajación de las cadenas poliméricas puede favorecer la cristalización de las mismas, lo que explica los resultados obtenidos en esfuerzo a la ruptura, donde el mismo aumenta, y ya en un punto final disminuye lo que se puede deber a que estructuras cristalinas se afecten entre ellas. Esto también denota que en este caso no solo existe una competencia entre los valores de ALE sino que también existe una competencia entre la orientación adoptada en la película tanto en MD como en TD, lo que refleja que esta variable no puede ser aislada totalmente. En futuros trabajos, se analizará el efecto

combinado de esta variable con el resto de las variables independientes del proceso de extrusión.

En las propiedades ópticas, se deben analizar los cambios obtenidos de acuerdo al sub–enfriamiento aplicado, se observa que a menores valores de ALE, un mayor sub–enfriamiento conducirá a estructuras de menor tamaño (igual o menor a la longitud de onda de la luz visible), y por ende mayor transmisión luminosa. A mayores valores el sub–enfriamiento será menor obteniéndose estructuras de mayor tamaño y menor transmisión luminosa. Sin embargo, en la turbidez fue más determinante el efecto superficial, por ende en este caso la mayor ALE hizo el efecto de una mayor temperatura de fundido atenuando los problemas superficiales de la película, disminuyendo así los valores de turbidez y aumentando el brillo.

**Efecto de la temperatura de fundido en las propiedades finales de la película.** El principal efecto de la modificación de la temperatura de fundido es una variación de la viscosidad [2] lo cual modifica la resistencia de fundido, y esto producirá que las modificaciones en orientación impuestas en otras variables como el soplado y el estirado sean más notorias. Así como el polímero puede adoptar fácilmente dichas orientaciones, también puede relajar las cadenas de forma tal de cristalizar, por lo tanto la modificación de temperatura de fundidos desembocara en una competencia de estos dos efectos, como se observa en los resultados obtenidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Efecto de la modificación de la temperatura de fundido sobre las propiedades de la película.

Propiedad	Temperatura de fundido [°C]		
	202	216	232
Desgarro [g/μm]			
MD	1,51 ± 0,13	1,77 ± 0,14	1,54 ± 0,12
TD	2,75 ± 0,13	3,30 ± 0,08	2,99 ± 0,24
Impacto [kJ/m]	35 ± 1	32,4 ± 0,9	33,3 ± 0,8
Penetración [g/μm]	12,6 ± 0,3	10,8 ± 0,3	12,4 ± 0,5
Esfuerzo a la ruptura [MPa]			
MD	17,5 ± 0,3	16,5 ± 0,3	18,3 ± 0,5
TD	18,6 ± 0,5	22,3 ± 0,8	19,7 ± 0,3
Transmisión luminosa [%]	70 ± 3	72 ± 3	64,2 ± 1,3
Turbidez [%]	47 ± 2	43 ± 2	56,5 ± 1,3
Brillo [%]	19,0 ± 0,5	19,0 ± 0,6	15,0 ± 0,6

En estos resultados se observa la presencia de un máximo o un mínimo dependiendo de la

propiedad evaluada a temperaturas intermedias. Por ejemplo, en fuerza de desgarro el valor intermedio refleja una relajación de la orientación dificultando la propagación de la grieta pero a mayor temperatura las cadenas logran orientarse de manera tal que la propagación de la grieta ocurre a menores valores tanto en MD como en TD. Similar comportamiento se observa en impacto y penetración, se tiene un valor inicial, las cadenas se relajan perdiendo balance y decreciendo así los valores de las propiedades y luego a mayor temperatura las cadenas se orientan fácilmente aumentando el balance y los valores de estas propiedades.

Un proceso similar ocurre con las propiedades ópticas, pero la diferencia en este caso es que se observa a mayor temperatura, lo cual implica un menor sub–enfriamiento, y por tanto estructuras de mayor tamaño que implicarían una disminución de la transmisión luminosa, a su vez, un menor sub–enfriamiento podría favorecer la cristalización del material, aumentando turbidez y disminuyendo brillo. En el esfuerzo a la ruptura, el comportamiento obtenido difiere al de las otras propiedades, debido a que inicialmente los resultados muestran una mayor orientación en TD que en MD, luego a mayores temperaturas la situación se invierte lo que indica que una mayor temperatura favorece la cristalización, por ende, mayor valor de esfuerzo en MD y por conservación de volumen en TD disminuye.

Tabla 9. Efecto de la modificación del caudal sobre propiedades finales de la película.

Propiedad	Caudal		
	25	30	35
Desgarro [g/μm]			
MD	1,46 ± 0,13	1,77 ± 0,14	1,45 ± 0,12
TD	2,80 ± 0,20	3,30 ± 0,08	2,55 ± 0,13
Impacto [kJ/m]	32 ± 1	32,4 ± 0,9	31,8 ± 1,0
Penetración [g/μm]	11,5 ± 0,4	10,8 ± 0,3	12,4 ± 0,5
Esfuerzo a la ruptura [MPa]			
MD	16,5 ± 0,2	16,5 ± 0,3	17,3 ± 0,1
TD	19,0 ± 0,2	22,3 ± 0,8	15,5 ± 1,1
Transmisión luminosa [%]	75 ± 3	72 ± 2	64 ± 3
Turbidez [%]	54,6 ± 0,8	43 ± 2	58 ± 1
Brillo [%]	16,2 ± 0,3	21,0 ± 0,4	15,0 ± 0,3

### Efecto de la velocidad del tornillo (Caudal) sobre las propiedades finales de la película.

El aumento de la velocidad del tornillo se traduce en un aumento de la orientación molecular en MD [27] a la salida de la boquilla. Sin embargo, el aumento de la velocidad del tornillo también produce un mayor calentamiento por disipación viscosa, lo que tendría un efecto similar al de trabajar con una temperatura de fundido más alta. En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos al modificar esta variable.

La fuerza de desgarro registra mayores valores en TD que en MD a menor caudal, debido a la orientación extra impartida por el tornillo, mientras que a mayores caudales (mayor velocidad del tornillo) aumenta la temperatura, disminuye resistencia de fundido, las cadenas se orientan facilitando la propagación de la grieta, por ello caen los valores de desgarro tanto en MD como en TD. Un mayor caudal también favorece la cristalización según el modelo de *Keller–Machin* como lo refleja la caída en la transmisión luminosa, el aumento de turbidez y disminución de brillo a mayores valores de caudal. En las propiedades de impacto y penetración los valores obtenidos no muestran gran influencia del aumento de la velocidad del tornillo, al igual que en esfuerzo a la ruptura, sin embargo en este último a mayor caudal aumentan el valor en MD y disminuye en TD.

## CONCLUSIONES

El BUR afecta directamente a la orientación en TD de la película. Una mayor orientación en TD incide positivamente en las propiedades ópticas de la película, la resistencia al desgarro en MD, el esfuerzo a la ruptura en TD, en la resistencia al impacto y la resistencia a la penetración, mientras que por otra parte incide negativamente sobre la fuerza al desgarro en TD y el esfuerzo a la ruptura en MD.

El TUR afecta directamente a la orientación en MD de la película. Una mayor orientación en MD bajo las condiciones estudiadas incide negativamente en las propiedades ópticas, la resistencia al desgarro en MD y el esfuerzo a la ruptura en TD. Por otro lado, se encuentran resultados positivos en resistencia al impacto, penetración y esfuerzo a la ruptura en MD.

La ALE tiene una influencia compleja sobre las propiedades finales de la película, debido a la competencia entre el efecto de relajación de la orientación y la formación de cristales. Es así como la competencia entre efectos se refleja en propiedades como fuerza de desgarro y esfuerzo a la ruptura. Mientras que en propiedades ópticas, resistencia al impacto y penetración, no se observa dicha competencia por lo que una mayor ALE influye negativamente sobre las mismas.

La temperatura de extrusión tiene un efecto complejo sobre las propiedades finales de la

película. A mayor temperatura la disminución de la viscosidad puede favorecer la adopción de orientaciones en MD y TD pero a su vez puede favorecer la cristalización del material, lo cual se refleja en todas las propiedades estudiadas.

La velocidad del tornillo tiene su efecto principal sobre la orientación de las cadenas en MD. Un mayor caudal incide positivamente en la fuerza de desgarro y esfuerzo a la ruptura en MD, y las propiedades ópticas. Por otra parte incide negativamente en la fuerza de desgarro y esfuerzo a la ruptura en TD, resistencia al impacto y penetración. Sin embargo, altos valores de velocidad de tornillo podría estar generando calentamiento por disipación viscosa que se traduce en un comportamiento opuesto al descrito, por lo que existe competencia entre estos efectos.

Los resultados de propiedades mecánicas y ópticas de las distintas variables estudiadas reflejaron que existe una compleja interacción existente entre ellas, por lo que un diseño experimental de variables confundidas podría brindar mayor información de cada variable y sus interacciones, aspecto que se evaluará en próximos proyectos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Middleman S “*Fundamentals of Polymer Processing*”. McGraw–Hill. USA, 1977
- [2] Rauwendaal C “*Polymer Extrusion 4E*”. Hanser Publications. Múnich (Alemania), 2011
- [3] Rauwendaal C “*Understanding Extrusion*”. Hanser Publications. Múnich (Alemania), 2010
- [4] Kim S, Fang Y, Lafleur P, Carreau P, *Polym. Eng. Sci.*, **44**(2), 283 (2004)
- [5] Ghaneh–Fard A, *J. Plastic film & sheeting*, **15**, 194 (1999)
- [6] Fatahi S, Ajji A, Lafleur P, *J. Plastic Film & Sheet*, **21**, 281 (2005)
- [7] Johnston A, McNally G, Murphy W, Billham M, Garrett G “*The Effect of Frostline Height Changes on Blown Film Using Metallocene Catalysed Polyethylene*” en *Proceedings del 67th Annual SPE Technical Conference (ANTEC) 2003*. Nashville (USA). Society of Plastics Engineers, 2003
- [8] Zhang X, Elkoun S, Ajji A, Huneault M, *Polymer*, **45**, 217 (2004)
- [9] Krishnaswamy R, Sukhadia A, *Polymer*, **41**(26), 9205 (2000)
- [10] Huck N, Clegg P “*The effect of extrusion variables on the fundamental properties of tubular polyethylene Film*” en *Proceedings del 67th Annual SPE Technical Conference (ANTEC) 1962*. Pittsburgh (USA). Society of Plastics Engineers
- [11] Doelder J, Benelux D, Terneuzen NL, Karjala T, Demirors M “*The Relationship Between Tubular Low–Density Polyethylene (PEBD) Blown–Film Optics and Molecular Structure*” en *Proceedings del 67th Annual SPE Technical Conference (ANTEC) 2009*. Chicago (USA)
- [12] Norma ASTM D1238–04c, *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*. Vol. 8.01, Filadelfia (USA): American Society for Testing and Materials, 2004
- [13] Norma ASTM D792–08, *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement* Vol. 8.01, Filadelfia (USA). American Society for Testing and Materials, 2008
- [14] Norma ASTM D1922 – 09, *Standard Test Method for Propagation Tear Resistance of Plastic Film and Thin Sheet by Pendulum Method* Vol. 8.01, Filadelfia (USA): American Society for Testing and Materials, 2009
- [15] Norma ASTM 1003–00, *Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics* Vol. 8.01, Filadelfia (USA): American Society for Testing and Materials, 2003
- [16] Norma ASTM 1709–01, *Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic Film by the Free Falling Dart Method* Vol. 8.01, Filadelfia (USA): American Society for Testing and Materials, 2001
- [17] Norma ISO 7705–2:1994 (E), *Plastic Film and Sheet: Determination of impact resistance by the free–falling dart method: Part 2: Instrument puncture test*, USA. Elsevier, 1994

- [18] Norma ASTM D-882-12: *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting* Vol. 8.01, Filadelfia (USA). American Society for Testing and Materials, 2012.
- [19] Keller A, Machin M, *J. Macromolecular Sci., Part B: Physics*, **1**(1), 41 (1967)
- [20] Feijoo J, Sánchez J, Müller A, *Polymer Bulletin*, **39**, 125 (1997)
- [21] Krishnaswamy R, Lambord M, *Polym. Eng. Sci.*, **40** (11), 2385 (2000)
- [22] Krishnaswamy R, Rohlfing D, Hauger BE, *J. Plastic Film & Sheeting*, **17**, 35 (2001)
- [23] Krishnaswamy R, *J. Polym. Sci.: Part B: Polymer Physics*, **38**, 182 (2000)
- [24] Feijoo J, Sánchez J, Müller A, *J. Materials Sci. Lett.*, **16**, 1721 (1997)
- [25] Cañizares R, Serrano P, Sánchez J, Gordillo A, Salazar D, Santana O “*Influencia de las condiciones de procesamiento en el comportamiento a fractura de películas de PEBD evaluado mediante trabajo esencial de fractura (EWF)*” en *Anales de Mecánica de la Fractura*. España. Grupo Español de Fractura, 2002
- [26] Patel R, Butler T, Walton K, Knight G, *Polym Eng Sci.*, **34**(19), 1506 (1994)
- [27] Cantor K “*Blow Film Extrusion, an introduction*”. Hanser Publishers. Cincinnati (USA) 2006
- [28] Stehling F, Speed S, Westerman L, *Macromolecules*, **14**(3), 698 (1981)
- [29] Méndez F, Torres A “*Extrusión de película tubular*”, Indesca, Venezuela (2004)