

**MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN UNA
EXTRUSORA CONTRARROTATORIA DE DOBLE HUSILLO NO ENGRANADA**

MARÍA LUCÍA SILVA JAIMES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

**MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN UNA
EXTRUSORA CONTRARROTATORIA DE DOBLE HUSILLO NO ENGRANADA**

MARÍA LUCÍA SILVA JAIMES

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Químico**

Director

Ph.D. Dionisio A. Laverde Cataño

Tutor

Ph.D. David I. Bigio

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos y admiración a Arthur Dellheim de AdellPlastics, por la oportunidad y conocimiento que me brindó durante mi tiempo como practicante. Su experiencia, constante apoyo e interés no solo fortalecieron mi mentalidad como profesional, también me ayudaron a crecer como persona y a pensar siempre en el panorama más grande.

Quisiera también agradecer a mi director de proyecto de grado, Ph. D. Dionisio A. Laverde Cataño, quien sin duda alguna me ayudó a finalizar este último capítulo de mi vida de pregrado.

A JimLochary y ViorelAmariei, mis jefes directos en AdellPlastics, no tengo palabras para expresar mi gratitud, siempre aseguraron una vía de comunicación clara, directa y alegre. Su confianza en mi trabajo y potencial fue extraordinaria, fomentaron en mí una actitud de cuestionamiento hacia el conocimiento. Me enseñaron el verdadero significado de ser ingeniero, mantener la calma en momentos de adversidad y tener la habilidad para solucionar problemas lo más rápido posible, porque un problema es siempre una oportunidad de ingeniería.

Ésta investigación no habría sido posible sin mi tutor en la Universidad de Maryland, Ph.D. David I. Bigio. Su proceso de indagación y constante necesidad de ampliar el conocimiento me brindó una perspectiva de la investigación diferente. Mi más sincera gratitud hacia él. También inmensas gracias a Graeme, mi compañero en la Universidad de Maryland, quién tuvo paciencia y devoción en el proyecto. Esos fines de semana en el laboratorio analizando datos que pensamos nunca acabarían y ni mencionar esos viernes calculando hasta que ya ninguno podía pensar o ver derecho. A Harry por su constante compromiso con nosotros a la hora de correr los experimentos.

Por último, pero no menos importante, a todos mis amigos y familia que siempre me han apoyado incondicionalmente. Los quiero.

DEDICATORIA

Toda una vida de lecciones, de apoyo y amor incondicional. A ti, mamá, la dueña de mis triunfos.

Y a la improbabilidad, porque la vida tiene un sentido del humor y parece deleitarse en improbabilidades.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	14
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. EXTRUSIÓN.....	17
2.2. TIPOS DE EXTRUSORAS	17
2.3. EXTRUSORA CONTRARROTATORIA DE DOBLE HUSILLO NO ENGRANADA (NITSE)	19
2.4. DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA (RTD)	20
2.5. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS	21
3. METODOLOGÍA	22
3.1 EXTRUSORA, GEOMETRÍA Y EQUIPOS AUXILIARES	22
3.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	23
3.2.1. Experimentos preliminares	24
3.2.2. Experimentos para la medición de las distribuciones de tiempo de residencia (RTD)	25
3.2.3. Experimentos para la medición de las distribuciones de esfuerzos (RSD)	26
3.3. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO.....	27
3.4. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DEL FLUJO DE ARRASTRE	28
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	29
4.1. PORCENTAJE DE RUPTURA DE SENSORES CAMES	29
4.2. PORCENTAJE DEL FLUJO DE ARRASTRE O DE LLENADO	31

4.3. DISTRIBUCIONES DE TIEMPO DE RESIDENCIA Y DISTRIBUCIONES DE ESFUERZOS.....	34
5. CONCLUSIONES	40
6. BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS.....	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Extrusoras de doble husillo engranadas y no engranadas

Tabla 4.1. Dimensiones del canal

Tabla 4.2. Flujo de arrastre al 100% calculado y porcentaje de flujo de arrastre

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Extrusoras de doble husillo más usadas en la industria

Figura 2.2. Comparación del mezclado distributivo y dispersivo

Figura 3.1. Vista frontal Extrusora de 30 mm

Figura 3.2. Montaje de la extrusora

Figura 3.3. Red de diseño central compuesto a condiciones experimentales

Figura 3.4. Batch solidificado

Figura 3.5. Ejemplo de curva de distribución del tiempo de residencia

Figura 3.6. Sensores CAMES

Figura 4.1. Porcentaje de ruptura de sensores CAMES

Figura 4.2. Porcentaje del flujo de arrastre en la red de diseño experimental

Figura 4.3. Agrupación de flujos específicos en diagonales de derecha a izquierda

Figura 4.4. Distribución de tiempo de residencia y de esfuerzos para $Q= 10$ lb/hr y $N=250$ rpm

Figura 4.5. Distribución de tiempo de residencia y de esfuerzos para $Q= 20$ lb/hr y $N=350$ rpm

Figura 4.6. Curvas RTD y RSD medidas en una extrusora CoTSE

Figura 4.7. Curvas RTD y RSD normalizadas para $Q= 30$ lb/hr y $N=250$ rpm

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. GEOMETRÍA DE LA EXTRUSORA.....	45
ANEXO B. CONSIDERACIONES Y DEMOSTRACIÓN DE LA ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE FLUJO DE ARRASTRE EN UNA EXTRUSORA NITSE.....	46

RESUMEN

TÍTULO: MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN UNA EXTRUSORA CONTRARROTATORIA DE DOBLE HUSILLO NO ENGRANADA (NITSE).*

AUTOR: María Lucía Silva Jaimes.**

PALABRAS CLAVES: NITSE, esfuerzo, sensores CAMES, Distribución del tiempo de residencia, distribución de esfuerzos, porcentaje de ruptura, porcentaje de flujo de arrastre, flujo específico.

CONTENIDO:

Un experimento fue creado para medir la distribución de esfuerzos (RSD) en una extrusora contrarrotatoria de doble husillo no engranada (NITSE). Sensores calibrados micro-encapsulados (CAMES) son sensibles al esfuerzo, y fueron utilizados como el mecanismo para relacionar el esfuerzo que el polímero fundido experimenta dentro de la extrusora, a través del porcentaje de ruptura de los sensores. Las formas de las curvas RSD encontradas son útiles para entender la trayectoria y el comportamiento que las partículas siguen dentro de la extrusora y también aparece un comportamiento interesante en comparación con las curvas RSD medidas en una extrusora CoTSE. En general, se encontró que el aumento del flujo de alimentación (Q), genera un incremento del porcentaje de sensores rotos. El porcentaje promedio de ruptura de los sensores resultó ser significativamente menor (43%) que el calculado en extrusoras CoTSE (49% para bloques estrechos de amasado y 63% para bloques amplios de amasado). A valores bajos de Q/N (flujo específico) las formas de las curvas de RSD son muy similares a las formas generadas por una extrusora CoTSE en un estudio anterior. Sin embargo, a altos valores de Q/N (porcentaje superior de llenado del canal) la curva tiene una forma plana que se debe a dos factores principales: el elemento cilíndrico situado en la sección de mezclado y la formación de una "piscina de material" en el espacio libre entre los husillos de la extrusora, induciendo esfuerzos constantes a las partículas, que permite el mezclado del material sin generar mayor rompimiento entre partículas (como se presenta en la extrusora CoTSE). La forma plana encontrada es la razón por la cual se considera a la extrusora NITSE como un excelente mezclador distributivo.

* Trabajo de Grado. Modalidad pasantía de investigación.

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director Ph.D. Dionisio A. Laverde Cataño, Tutor Ph.D. David I. Bigio

ABSTRACT

TITLE: MEASUREMENT AND EVALUATION OF THE RESIDENCE STRESS DISTRIBUTION WITHIN A COUNTER ROTATING NON-INTERMESHING TWIN SCREW EXTRUDER (NITSE). *

AUTHOR: María Lucía Silva Jaimes.**

KEYWORDS: NITSE, stress, CAMES sensors, residence time distribution, residence-stress distribution, percent breakup, percent drag flow, specific throughput.

CONTENT:

An experiment has been created to measure the residence stress distribution (RSD) and relate it with the Residence time distribution (RTD), and was carried on a Counter-rotating Non-Intermeshing Twin Screw extruder (NITSE). Calibrated Micro-encapsulated sensor (CAMES) beads are stress sensitive, and were utilized as the mechanism to relate the stress that the polymer melt experiences inside the extruder, through the percentage of broken sensors. The RSD shapes that were found are helpful to understand the flow path that the particles follow inside the extruder and also showed an interesting behavior in comparison of RSD shapes for a CoTSE extruder. Overall, It was found that as throughput (Q) increases, the percent breakup of the sensors also increases. The average percent breakup is proved to be significantly lower (43%) than the one for CoTSE extruders (49% for narrow kneading blocks and 63% for wide kneading blocks). At low values of Q/N (specific throughput) the shape of the RSD curves is very similar to shapes generated by a CoTSE extruder in a previous study. However, at high values of Q/N (higher percent channel fill) the curve has a flat shape that is due to two main factors: the cylindrical element located on the mixing section and the formation of a pool of material in the apex (gap between the screws) of the extruder, inducing constant stress to the particles which allows the material to mix without breaking as much as in a CoTSE. The flat shape found is the reason why NITSE is thought to be an excellent distributive mixer.

* Undergraduate Project

** Universidad Industrial de Santander. Physical and chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Director Ph.D. Dionisio A. LaverdeCataño, Advisor Ph.D. David I. Bigio

1. INTRODUCCIÓN

El mezclado es un paso determinante en el procesamiento de materiales poliméricos que afecta las propiedades físicas y químicas de un material y la apariencia del producto final deseado [1]. Debido a la alta viscosidad de los materiales poliméricos, el mezclado representa un problema complejo durante el procesamiento. El *compounding* (que es el mezclado de diferentes materiales poliméricos, fibras, arcillas y/o aditivos) es usado para producir una amplia gama de materiales plásticos con nuevas y mejores propiedades, ofreciendo una ruta más práctica y de menor costo que la creación y desarrollo de nuevos polímeros.

En el caso del mezclado reactivo, el grado de mezclado es crucial para producir materiales de buena calidad. Si el mezclado es insuficiente, la reacción no alcanza la conversión deseada, dando como resultado un producto que no cumple con el propósito inicial. Si el mezclado es demasiado, el producto puede volverse una mezcla inestable y potencialmente causar daños al equipo y a los operadores.

Por otra parte, la adición de materiales en grandes proporciones a polímeros ha sido una técnica ampliamente utilizada, ya sea para reducir el costo del producto sin arriesgar propiedades físicas/químicas o para reforzar el polímero. El refuerzo de plásticos mediante fibras de nanotubos de carbono tiene elevados costos de producción en la actualidad. El bajo grado de mezclado se traduce en la obtención de un material anisotrópico con un gran número de aglomerados, y el alto grado de mezclado hace que la fricción sobre las fibras destruya sus propiedades nanométricas. El riesgo económico genera la necesidad de cuantificar y conocer el grado de mezclado apropiado y eficiente antes del procesamiento.

El mezclado está relacionado con el esfuerzo inducido sobre el polímero fundido durante la extrusión. La habilidad de caracterizar este esfuerzo para una particular configuración geométrica es necesaria para predecir el grado de mezclado alcanzado. Esto es indispensable en numerosas aplicaciones donde los materiales son sensibles al esfuerzo cortante, un ejemplo de ellos son los concentrados de

agentes espumantes inflamables con bajas temperaturas de autoignición. En el procesamiento de estos concentrados, debe hallarse un nivel mínimo de esfuerzo inducido y mantener el mezclado a las condiciones halladas o de lo contrario los agentes se degradan y arden dentro de la extrusora, generando incendios y vapores peligrosos para la salud.

Evidentemente, la capacidad de medir la distribución de esfuerzos dentro de una extrusora tiene un impacto económico significativo para la industria del “compounding”. Con la correcta geometría e información del esfuerzo inducido máximo de un material, la calidad y el costo del producto mejoraría, disminuyendo esfuerzos en investigación y desarrollo del procesamiento y reduciendo la cantidad de material desperdiciado durante la producción de nuevos materiales (una problemática actual de industrias con procesos de extrusión).

El objetivo de este trabajo es medir la distribución de esfuerzos en una extrusora contrarrotatoria de doble husillo no engranada (NITSE, por sus siglas en inglés “Non-Intermeshingtwin screw extruder), identificar el comportamiento del material dentro de la extrusora y establecer la dirección para futuras investigaciones dirigidas al modelamiento de las curvas de distribución de esfuerzo en una NITSE. Mediante sensores sensibles al esfuerzo (sensores CAMES) puede conocerse la magnitud del esfuerzo inducido por la extrusora. Con la generación de las curvas de distribución del tiempo de residencia y de esfuerzos, se obtiene información valiosa acerca de los caminos que el material polimérico fundido sigue dentro de la extrusora. Este trabajo fue realizado en AdellPlastics, Inc, en asocio con la Universidad de Maryland en Baltimore, MD, EE.UU.

El capítulo 2 presenta el marco teórico necesario para la comprensión de la presente investigación y el trabajo que se ha hecho previamente en el intento de predecir el comportamiento de una extrusora NITSE. La metodología experimental (tipos de experimentos, equipos, materiales y montaje experimental) y analítica empleada se presenta en el capítulo 3. El capítulo 4 muestra los resultados

obtenidos durante el trabajo, incluye el porcentaje de ruptura de los sensores, el flujo de arrastre y las curvas de distribución del tiempo de residencia y de esfuerzos. El capítulo 5 está dirigido al resumen de los resultados obtenidos y al planteamiento de futuro trabajo necesario para modelar la distribución de esfuerzos en la extrusora NITSE.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. EXTRUSIÓN

La extrusión es un proceso ampliamente usado en la industria alimenticia, farmacéutica y de plásticos. El principal propósito del proceso de extrusión es la manufactura de productos con uniformidad dimensional y de calidad a flujos de alimentación económicamente eficientes [2]. La extrusión se define como el acto de darle forma a un material forzándolo a través de un orificio. Puede clasificarse en función de la materia prima: extrusión discontinua (ram) y continua (de husillo). Los materiales de baja viscosidad son extruidos de forma discontinua, después de su fusión pasan a un estado casi líquido y deben acumularse en un colector para luego expulsarse y así obtener el producto acabado. Los materiales viscosos, se funden y salen de forma continua con una preforma para su posterior procesamiento [3, 4], el proceso es continuo siempre y cuando la alimentación se mantenga constante. Éste trabajo está dirigido únicamente a la extrusión continua.

El rol de la extrusora en el procesamiento de plásticos, es fundir el material alimentado a su punto de fusión (presentado en polvos, gránulos, tiras, entre otros), permitir la adición de rellenos y/o aditivos y proveer forma al material fundido homogenizado mediante un dado. La extrusora de husillo, que consiste en uno o más husillos rotatorios dentro de un barril cilíndrico sometido a calentamiento, es la máquina más importante actualmente en la industria del procesamiento de polímeros. Una parte sustancial de todos los polímeros pasa a través de una extrusora por lo menos dos veces en su camino de producción, una vez a la salida del reactor de polimerización y otra vez para darle la forma final al producto [5, 6]. Éste tipo de extrusora será el objeto del siguiente estudio.

2.2. TIPOS DE EXTRUSORAS

Según el número de husillos, las extrusoras pueden clasificarse de la siguiente manera: extrusoras de husillo simple y de múltiples husillos (doble, triple, etc.). La **extrusora de husillo simple** es el tipo de extrusora más simple y de bajo costo en

la industria de polímeros. En general es usada para procesos que no requieran mayor grado de mezclado. La creación de **extrusoras de múltiples husillos** surgió debido al comportamiento de la extrusora simple frente a nuevos materiales. Algunos de los problemas principales fueron la necesidad de mayores presiones dentro de la extrusora, la tendencia de los materiales a adherirse y acumularse en el husillo, la degradación rápida de los materiales a altas temperaturas, y la necesidad económica de: mezclar eficientemente diferentes materiales de manera directa durante la extrusión, devolatilizar el material fundido y de permitir una extrusión reactiva [6, 7]. Dentro de ésta categoría, las extrusoras de doble husillo, son las más usadas comercialmente. La extrusora tiene dos husillos de igual diámetro que rotan lado a lado a una misma rapidez. Estas extrusoras se pueden clasificar según la rotación relativa de los dos husillos: corrotatorios y contrarrotatorios y según el grado de engranaje de los husillos [4, 8]. En la tabla 2.1 se presentan las configuraciones posibles e imposibles.

Tabla 2.1. Extrusoras de doble husillo engranadas y no engranadas [9]. **Figura 2.1.** Extrusoras de doble husillo más usadas en la industria [6].

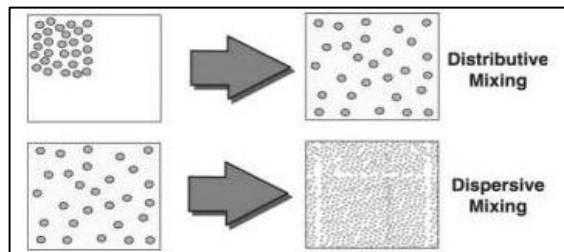
Screw Distance	Material Flow	Counterrotating	Corotating
Fully Intermeshing	Closed to Length and Cross		Impossible
	Open to Length Closed to Cross	Impossible	
	Open to Length and Cross	Possible, Not Practical	Kneading Blocks and Gear Mixers
Partially Intermeshing	Open to Length Closed to Cross		Impossible
	Open to Length and Cross		
Nonintermeshing	Open to Length and Cross		

A pesar de las múltiples configuraciones presentadas en la tabla anterior, la figura 2.1 presenta las tres configuraciones destacadas en la industria: la extrusora de doble husillo corrotatoria engranada (CoTSE-por sus siglas en inglés Co-Rotatingtwinscrewextruder), contrarrotatoria engranada y contrarrotatoria no

engranada (NITSE-por sus siglas en inglés Non-Intermeshingtwin screw extruder), extrusora objetivo del proyecto.

Antes de explicar las ventajas y desventajas de la extrusora NITSE en la sección 2.3, se debe aclarar la diferencia entre el mezclado distributivo y el mezclado dispersivo. El mezclado distributivo es la distribución espacial uniforme de los componentes del material fundido [4], y el mezclado dispersivo es el rompimiento de partículas grandes seguido de la dispersión uniforme de éstas a lo largo del material fundido, teniendo como resultado un cambio en las características físicas de la mezcla [4, 9]. La representación gráfica se encuentra en la Figura 2.2.

Figura 2.2. Comparación del mezclado distributivo y dispersivo [9]



2.3. EXTRUSORA CONTRARROTATORIA DE DOBLE HUSILLO NO ENGRANADA (NITSE)

La extrusora NITSE corresponde a la tercera configuración en la figura 2.1. Es un excelente dispositivo de mezclado distributivo con alta capacidad. Es única en el sentido que combina la mayoría de las ventajas de procesamiento ofrecidas por las configuraciones de doble husillo con muchas de las ventajas de construcción mecánica de extrusoras simples [10]. Su carácter contrarrotatorio facilita en gran medida la alimentación de materiales a la extrusora, incluyendo materiales con baja densidad aparente. Tiene un buen carácter de auto-limpieza o barrido debido al arrastre del polímero viscoso. Presenta alta área interfacial, debido a esto halla gran aplicación en procesos de devolatilización [4]. A diferencia de otras extrusoras de doble husillo, NITSE puede tener husillos excepcionalmente largos (hasta $L/D=100$) para permitir tiempos de residencia más largos, característica de gran beneficio en extrusión reactiva con velocidades de reacción lentas [1, 11].

En una NITSE, el polímero puede fluir a través del espacio entre los husillos, donde puede transferirse al husillo opuesto o seguir en el mismo. Trabaja a bajas o moderadas velocidades de corte inclusive a altas velocidades de husillo (N) sin sacrificar velocidades de producción y propiedades físicas, lo cual la hace ideal para: aplicaciones de mezclado de aditivos sensibles al esfuerzo cortante, refuerzo de polímeros mediante materiales fibrosos (fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de aramida, entre otros) y mezclado con rellenos en altas proporciones (Mica, Carbonato de Calcio, entre otros) [9].

2.4. DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA (RTD)

El tiempo que una partícula de fluido pasa dentro de una extrusora puede ser calculado de la velocidad de distribución. El problema radica en que los caminos que siguen las partículas de fluidos en una extrusora no son siempre los mismos, constantemente cambian de dirección y pueden requerir diferentes cantidades de tiempo para moverse a través de la extrusora. La distribución del tiempo de residencia (RTD por sus siglas en inglés “Residence-time distribution”) es el resultado de los patrones del flujo dentro de una extrusora y su forma varía de acuerdo a las condiciones de operación [5]. Existen dos maneras de hallar esta distribución experimentalmente en la actualidad. El primer método es hacer un experimento en el que se inyecta un pulso de tinta u otro trazador (reactivo, reflector, aluminio) y se mide la concentración del trazador mediante una sonda óptica [12, 13]. Este método ha sido ampliamente investigado y duplicado [14, 18]. El otro método sólo indica el promedio del tiempo de residencia y consiste en estimar la cantidad de material presente en la extrusora y dividirlo en la cantidad de material a la salida de la extrusora.

Son muy importantes en aplicaciones donde el tiempo que un material pasa dentro de la extrusora es una variable importante para la calidad del producto, como por ejemplo en extrusión reactiva, pero no está relacionado con el grado de mezclado.

2.5. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS

Es de gran importancia conocer las magnitudes de esfuerzo que un material experimenta dentro de una extrusora de doble husillo pues permite conocer más acerca del grado de mezclado. Sin embargo, esta caracterización es extremadamente compleja. El procedimiento presentado en los siguientes capítulos busca caracterizar indirectamente el esfuerzo mediante las distribuciones de esfuerzos y las distribuciones del tiempo de residencia. Numerosos estudios se han realizado para avanzar en el conocimiento de la extrusora NITSE [19, 24], sin embargo, se encontraron números limitados de experimentos directos para la medición de las distribuciones de esfuerzos en extrusoras de doble husillo mediante materiales sensibles al esfuerzo. La investigación ha sido principalmente dirigida a la extrusora CoTSE debido a su popularidad en la industria. Dos experimentos usaron esferas de vidrio huecas para determinar el esfuerzo dentro de una extrusora [25, 26]. Usando dos configuraciones geométricas, dos materiales con diferente viscosidad y tres diferentes tipos de esferas, se manipuló el flujo de alimentación y la velocidad de rotación de los husillos. En este estudio fue evidente que el porcentaje de esferas rotas aumentaba con el incremento de la velocidad de rotación de los husillos. También se reportó que el material con mayor viscosidad genera un mayor rompimiento de las esferas. El principal problema que estos experimentos presentaron fue que la medición del rompimiento de las esferas se hacía mediante el conteo manual de las esferas rotas a la salida de la extrusora y no en tiempo real. Otro experimento consistió en el modelamiento de distribuciones de esfuerzos, pero el modelo no pudo ser comprobado experimentalmente [27]. El presente experimento fue hecho de la mano de los experimentos realizados en extrusoras CoTSE por D. Bigio y demás en la Universidad de Maryland [28, 29].

3. METODOLOGÍA

Se creó un experimento para medir la distribución del tiempo de residencia y la distribución de esfuerzos. Primero se presenta una breve descripción de la extrusora y de los equipos auxiliares utilizados. Posteriormente se describe el procedimiento experimental de forma cronológica y el procedimiento analítico llevado a cabo. Finalmente se presenta el procedimiento para calcular el porcentaje de flujo de arrastre.

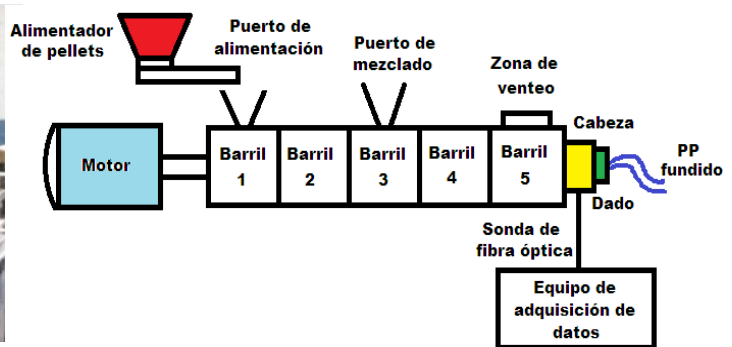
3.1 EXTRUSORA, GEOMETRÍA Y EQUIPOS AUXILIARES

La extrusora NITSE utilizada en este estudio fue manufacturada por NFM/WeldingEngineers, Inc., localizada en el laboratorio de Servicio al cliente de AdellPlastics, en la planta de Baltimore, EE.UU (ver figura 3.1). Tiene un diámetro de 30 mm y una relación largo-diámetro (L/D) de 42, la geometría completa de la extrusora y los husillos se encuentra en el anexo A.

Figura 3.1. Vista frontal Extrusora de 30 mm



Figura 3.2. Montaje de la extrusora



La figura 3.2 muestra el montaje general de la extrusora en el laboratorio. La primera sección (barril 1) consiste de un puerto de alimentación utilizado para la dosificación del material a extrudir mediante un alimentador de pellets por pérdida de peso. La segunda sección o zona de compresión (barriles 2 y 3) es utilizada para derretir el material alimentado a la extrusora. El barril 3 tiene un puerto de mezclado que permite adicionar polvos, fibras y aditivos sensibles al calor. En la tercera sección o zona de mezclado (barriles 4 y 5), el material fundido se

convierte en una mezcla homogénea. La cuarta sección o cabeza es utilizada como puerto para la conexión de una sonda de fibra óptica. Por último, la quinta sección tiene un dado de dos orificios circulares que le confiere la forma al material extruido para su posterior recolección. La primera sección se fijó a 300°F (149°C) y las siguientes secciones a 400°F (204°C). El montaje experimental consistió además de un panel de control, un tanque de enfriamiento debajo del dado para recoger las muestras con mayor facilidad y equipos para la adquisición de datos (computador, fuente de luz con sonda óptica reflectora, amplificador, generador de señal de pico y bloque conector).

3.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El polímero seleccionado para el trabajo fue Polipropileno Homopolímero en forma de pellet proveniente de Prime PolymerServices ubicada en Cheshire, CT, debido a su alta densidad ($0,9 \text{ g/cm}^3$) y a su índice de fluidez en masa (20,0 g/10 min). En la industria se utiliza típicamente para aplicaciones de moldeo por inyección debido a su fácil liberación del molde y tiempos de ciclo rápidos [30].

En este experimento se manipularon dos condiciones de operación:

Flujo o velocidad de alimentación (Q) y velocidad de rotación del husillo (N). Para el diseño del experimento se escogió una red experimental de diseño central compuesto, debido a la relación no lineal de las variables. El diseño está presentado en la figura 3.3. Los rangos de las condiciones de operación fueron determinados de acuerdo a la capacidad de la extrusora (dimensiones, motor y diseño de husillo) como se indica en la sección 3.2.1.

Los ejes de la red experimental son: velocidad de rotación del husillo (N) a lo largo del eje horizontal y flujo de alimentación (Q) a lo largo del eje vertical. El rango N investigado fue entre 150 y 350 rpm en intervalos de 50 rpm, y el rango de Q fue entre 10 lb/h (1,4 mL/s) y 30 lb/h (4,2 mL/s) en intervalos de 5 lb/h.

Los puntos en la red representan los experimentos realizados, 9 en total. Cada punto es presentado con dos números.

El primero representa el flujo específico, Q/N , medido en mL/rev, que es la relación entre el flujo de alimentación y la velocidad de rotación de los husillos y será un valor de gran importancia en la interpretación de los resultados obtenidos. El rango de flujo específico fue entre 0,336 y 1,12 mL/rev. El segundo es la velocidad de rotación del husillo, N , medida en rpm.

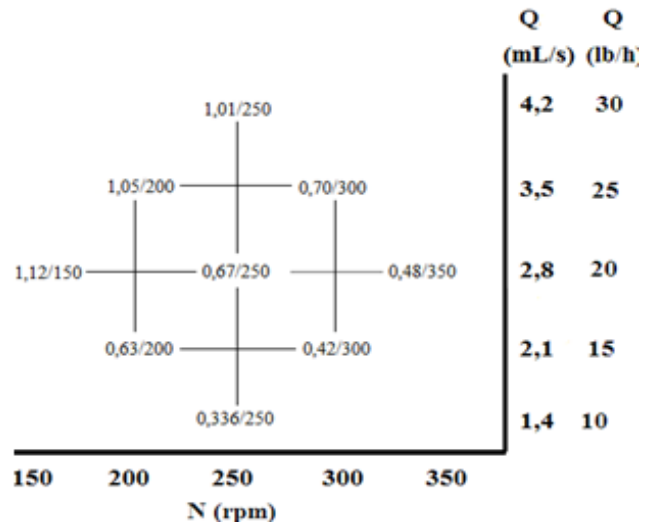
En las siguientes secciones se presentan los 3 tipos de experimentos realizados en AdellPlastics.

3.2.1. Experimentos preliminares

La selección de los rangos del flujo de alimentación y de velocidad de rotación de los husillos fue realizada empíricamente con el fin de evitar la acumulación de material dentro de la extrusora. De acuerdo a lo anterior, había dos puntos de riesgo en la red experimental planteada que debían evaluarse: el punto donde el flujo de alimentación es mayor (30 lb/h a 250 rpm) y el punto donde la velocidad de rotación es menor (20 lb/h a 150 rpm). Cada una de las condiciones se analizó de la siguiente manera:

Se fijaron las condiciones de temperatura mencionadas anteriormente. Se purgó con polipropileno a 500 rpm para comprobar la limpieza de la extrusora. Luego se indicó el flujo de polipropileno deseado en el alimentador por pérdida de peso y la velocidad de rotación a trabajar en el panel de control. Se revisaron continuamente los puertos de la extrusora en busca de material acumulado en alguno de ellos. Minutos después el sistema se estabilizó y se procedió a encender los equipos de adquisición de datos. Las señales generadas por la sonda tuvieron que ser amplificadas para observar de forma eficaz las variaciones pequeñas y luego se enviaron al computador mediante el bloque conector. El laboratorio AML

Figura 3.3. Red de diseño central compuesto para condiciones experimentales



(Advancedmanufacturinglaboratory) de la Universidad de Maryland diseñó un programa para la recolección de datos en la interfaz LabVIEW, que consistía en recolectar los datos de voltaje por unidad de tiempo en una hoja de cálculo de Excel y graficarlos. Debido a la transparencia del polipropileno fundido, la luz de la sonda óptica atravesaba el material y reflectaban los husillos de la extrusora, generando señales indeseables en los datos. Para resolver el problema se añadió manualmente un concentrado de Dióxido de Titanio (TiO_2) al 74% en peso de fácil dispersión (White masterbatch PE105B de la manufacturera ShantouMeilianChemical Cp., Ltd.) a través del puerto de alimentación [31]. Se encontró que la adición de 2 pellets cada 10 segundos durante todo el experimento, teñía el material fundido de blanco sin que cambiaran sus propiedades y además generaba una línea recta o línea base, comprobando que todo el sistema se encontraba en estado estable. Por último se añadió un generador de señal de pico que actuó a lo largo de los experimentos como botón “Reset” con el fin de empezar la adquisición de datos en cualquier momento.

3.2.2. Experimentos para la medición de las distribuciones de tiempo de residencia (RTD)

Se prepararon unas muestras de tinta de referencia (MTR) para poder medir la distribución del tiempo de residencia. En una caja de Petri se diluyó Poliestireno en xileno y se añadió el mismo colorante encapsulado en los sensores que se utilizarán posteriormente para la medición de las distribuciones de esfuerzos (Automate Blue 8A). La

solución se dejó solidificar durante un período de 24 horas, para asegurar la evaporación del Xileno. El batch obtenido se muestra a la derecha en la figura 3.4.

Posteriormente se cortó en pedazos y se pesaron las muestras obtenidas.

Para cada uno de los puntos de la red experimental presentada al inicio del capítulo, se generaron **dos** RTD como se muestra a continuación:

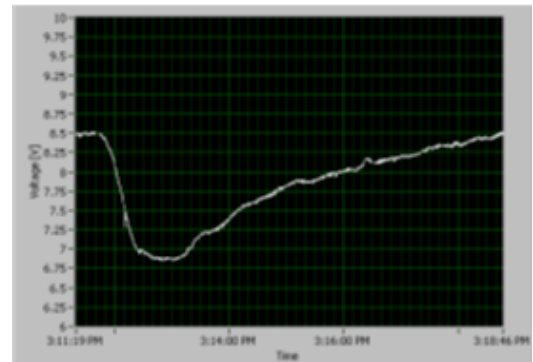
Figura 3.4. Batch solidificado



Una vez alcanzado el estado estable mencionado en la sección 3.2.1 se oprimió el botón “Reset” para empezar una nueva recolección de datos y cuidadosamente se añadió una cantidad de MTR por el puerto de mezclado a los husillos. Las muestras se derriten y tiñen de azul el polipropileno. El experimento finalizó cuando desaparece el color azul presente en el polipropileno a la salida del dado.

Abajo, la figura 3.5 muestra de inicio a fin los datos recolectados a 25 lb/h y 200 rpm. El eje Y representa el voltaje y el eje X representa el tiempo. La señal de voltaje registrada cae abruptamente cuando la sonda refleja el polímero teñido, debido a que el color azul solo absorbe un porcentaje de la luz de la sonda (a diferencia del color blanco). Mientras el polímero continúa pasando debajo de la luz de la sonda, la concentración de la tinta disminuye y el voltaje comienza a crecer de nuevo hasta alcanzar la línea base inicial (polímero de color blanco). El resultado del experimento fue la generación de curvas de distribución del tiempo de residencia que representan una total liberación del colorante. Se concluyó que *la señal de voltaje obtenida es una medida indirecta de la concentración de la tinta dentro de la extrusora.*

Figura 3.5. Ejemplo de curva de distribución del tiempo de residencia

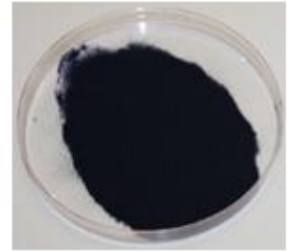


3.2.3. Experimentos para la medición de las distribuciones de esfuerzos (RSD)

La medición de la distribución de esfuerzos o RSD (según su nombre en inglés Residence-stress distribution) dentro de una extrusora se realizó mediante sensores calibrados micro-encapsulados o CAMES (según su nombre en inglés CalibratedMicroencapsulated sensor) fabricados por la compañía Mach I, Inc. Los sensores CAMES son sensibles al esfuerzo y fueron diseñados para romperse a un nivel crítico específico de esfuerzo que está en función del diámetro y del espesor de la pared. Cuando los sensores experimentan niveles de esfuerzo más

allá del esfuerzo cortante crítico, la micro-capsula se rompe y libera el colorante encapsulado, tiñendo el polímero fundido [32]. Para este experimento se utilizaron sensores con un nivel de esfuerzo crítico de 92 kPa y un diámetro mayor que 75 μm que tiñe de color azul el material. En la figura 3.6 se muestran los sensores empleados.

Figura 3.6. Sensores CAMES



Conocida la concentración del colorante en las muestras de tinta de referencia empleadas y sabiendo que debe usarse la misma cantidad de colorante introducida en los experimentos de medición de las curvas RTD y RSD, se calculó la cantidad de sensores CAMES a adicionar en el experimento.

A diferencia de lo anterior, la medición de una RSD se realizó usando el mismo procedimiento descrito en la sección 3.2.2. El resultado de este experimento fue la generación de curvas de distribución de esfuerzos para cada uno de los puntos estudiados en la red experimental, el procedimiento se realizó 4 veces para asegurar la validez de los datos.

Es importante aclarar que la curva RTD representa una ruptura del 100% de los sensores CAMES, debido a que las muestras de Poliestireno se derriten fácilmente dentro del polipropileno sin ofrecer significativa resistencia. Una curva RSD es similar a una curva RTD, la diferencia radica en que la amplitud de la curva (concentración) está en función del esfuerzo ejercido sobre el polímero fundido. Es así como, a mayor esfuerzo, mayor amplitud de la curva RSD, porque a un incremento en el rompimiento de los sensores CAMES da como resultado un incremento de la concentración de la tinta liberada en el polímero.

3.3. PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

Una vez completados todos los experimentos, el análisis de los datos recolectados fue el siguiente paso lógico. El programa mencionado en la sección 3.2.1 consiste de 3 partes fundamentales. La primera parte lee los archivos de datos generados por la sonda óptica, el primero correspondiente a la distribución de tiempo de residencia (muestra de tinta de referencia) y el segundo a la distribución de

esfuerzos (sensores CAMES). La segunda parte normalizaba las curvas obtenidas, realizaba el cálculo del área bajo cada curva y mediante la ecuación 1 se determinaba el *porcentaje de ruptura de los sensores CAMES*:

$$\% Ruptura = \frac{A_{CAMES}}{A_{MTR}} * 100\% \quad (1)$$

Donde A_{CAMES} es el área bajo la curva de distribución de esfuerzos (RSD) y A_{MTR} es la curva bajo la distribución del tiempo de residencia. La tercera parte consistía en mejorar la visualización de las curvas, donde fueron trazadas en una misma gráfica. La extracción de los datos se realizó mediante la transferencia de los datos a un archivo de Excel. Éste procedimiento se siguió para cada combinación de muestra de referencia y sensor CAMES, con el fin de hallar un porcentaje de ruptura promedio para cada punto de la red experimental.

3.4. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DEL FLUJO DE ARRASTRE

El porcentaje del flujo de arrastre del canal es un parámetro importante en el diseño de los husillos de una extrusora. El *porcentaje del flujo de arrastre o de llenado del canal* se refiere a qué tan lleno está un elemento del husillo de material fundido (100% equivale a estar completamente lleno) a una velocidad de rotación de husillo y geometría específica. Las consideraciones hechas para demostrar las ecuaciones 2 y 3 se presentan en el anexo B.

$$\% Flujo de arrastre = \frac{Q_{total}}{Q_{arrastre\ 100\%}} * 100\% \quad (2)$$

Donde Q_{total} es el flujo total de alimentación, $Q_{arrastre\ 100\%}$ es el flujo de arrastre al 100%, y puede calcularse mediante la ecuación (3).

$$Q_{arrastre\ 100\%} = 0,9 * \pi DNWHF_d \cos(\phi) \quad (3)$$

Donde D es el diámetro de los husillos, N la velocidad de rotación de los husillos, W el ancho del canal, H la profundidad del canal, F_d el factor de corrección de forma para la extrusora NITSE, n el número de lóbulos y ϕ el ángulo de hélice.

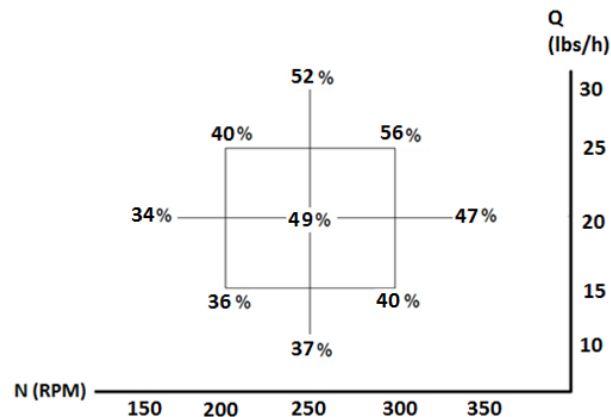
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los experimentos son discutidos en este capítulo y fueron separados en tres partes: Porcentaje de ruptura de sensores CAMES, flujo de arrastre y porcentaje de flujo de arrastre, distribuciones del tiempo de residencia y distribuciones de esfuerzos.

4.1. PORCENTAJE DE RUPTURA DE SENSORES CAMES

El promedio del porcentaje de ruptura de los sensores CAMES fue determinado mediante la ecuación 1 (sección 3.3) para las nueve condiciones estudiadas en el experimento y presentado en la red experimental. Este enfoque proporciona una clara visión de la historia de ruptura y de cómo el material experimenta esfuerzos a diferentes condiciones de operación.

Figura 4.1. Porcentaje de ruptura



El porcentaje de la historia de ruptura de los sensores del experimento se presenta en la figura 4.1. La red indica que hay tendencias en los datos.

A excepción del punto central (20 lb/h a 250 rpm con un porcentaje de ruptura de 49%), se encuentra que un aumento de la velocidad de rotación del husillo para un flujo de alimentación constante genera un aumento del porcentaje de ruptura de los sensores CAMES. Esta es una tendencia esperada debido a que la velocidad de rotación de los husillos es directamente proporcional a la velocidad de corte, y

a mayor velocidad de corte, mayor será el esfuerzo que el material experimenta, ocasionando un mayor número de sensores CAMES rotos.

Otra tendencia observable indica que el porcentaje de ruptura de los sensores CAMES también es función de la velocidad o flujo de alimentación. El aumento del flujo para una velocidad de rotación de husillo constante, tiene como consecuencia un aumento del porcentaje de ruptura de los sensores. Esta tendencia se cumple para todos los datos presentados en la figura 4.1. Si hay mayor cantidad de material fluyendo dentro de la extrusora, la presión del material fundido aumenta, induciendo mayores niveles de esfuerzo sobre las paredes de los sensores CAMES hasta que estos sobrepasan el nivel crítico de esfuerzo y se rompen.

El máximo porcentaje de ruptura alcanzado durante el experimento corresponde a la pareja de condiciones 25 lb/h y 300 rpm, alcanzando un valor de 56%. El promedio del porcentaje de ruptura fue del 43,4%, un porcentaje relativamente pequeño de ruptura. Teniendo en cuenta que la distribución del tiempo de residencia representa el 100% de ruptura de sensores CAMES, el promedio obtenido indicó que más del 50% de los sensores introducidos entraron a la extrusora y salieron por el dado sin alcanzar el nivel crítico de esfuerzo.

En el estudio mencionado en la sección 2.5 realizado en una extrusora corrotativa de doble husillo engranado (CoTSE), D. Bigio y W. Pappas [28], encontraron porcentajes de ruptura mucho mayores para diferentes geometrías. Para la geometría con bloques amplios de amasado (mayor agresividad del husillo sobre el material) se encontró un porcentaje de ruptura máximo de 74% y un promedio del 63%. Para la geometría con bloques estrechos de amasado (mínima agresividad del husillo sobre el material) se halló un porcentaje de ruptura máximo de 60% y un promedio del 49%. Este resultado indica que una extrusora CoTSE con mínima agresividad es significativamente más agresiva que una extrusora NITSE. Este resultado coincide con la literatura y la creencia común que la

extrusora NITSE es más eficiente para el mezclado distributivo, en lugar del mezclado dispersivo.

Respecto al flujo específico (Q/N) presentado en la sección 3.2 no puede observarse una relación o tendencia entre el flujo específico y el porcentaje de flujo de arrastre.

4.2. PORCENTAJE DEL FLUJO DE ARRASTRE O DE LLENADO

Otro factor de gran importancia para el diseño, funcionamiento y optimización de una extrusora que se halló en el presente experimento, es el porcentaje de llenado del canal del husillo. Teniendo en cuenta lo presentado en el anexo B, el porcentaje de flujo de arrastre es 100% cuando no hay flujos de presión y de fuga que se opongan al material y representa la capacidad máxima de flujo de alimentación que tiene el canal a una velocidad de rotación de husillo dada. Esta capacidad máxima o saturación del canal es una restricción generada por el diseño y la geometría de los husillos, por lo tanto se hace necesario calcular este valor para conocer las limitaciones de la extrusora en estudio y para saber qué clase de cambios pueden ejecutarse en la geometría del husillo con el fin de aumentar su productividad en función del material procesado.

Las dimensiones del canal necesarias para el cálculo del flujo de arrastre al 100% están presentadas en la tabla 4.1 y fueron tomadas del elemento anterior al segundo cilindro presente al inicio de la sección de mezclado (ver anexo A):

Tabla 4.1. Dimensiones del canal

D [cm]	3
W [cm]	2,3114
H [cm]	0,2554
ϕ [grados]	30
CoeffLobe [(2n-1)/2]	0,9
Fd	0,92
ρ [g/cc]	0,9

Mediante la ecuación 3 presentada en la sección 3.4, se calculó el flujo de arrastre al 100% para cada una de las velocidades de rotación de husillo estudiada. La totalidad de los resultados se presenta en la tabla 4.2.

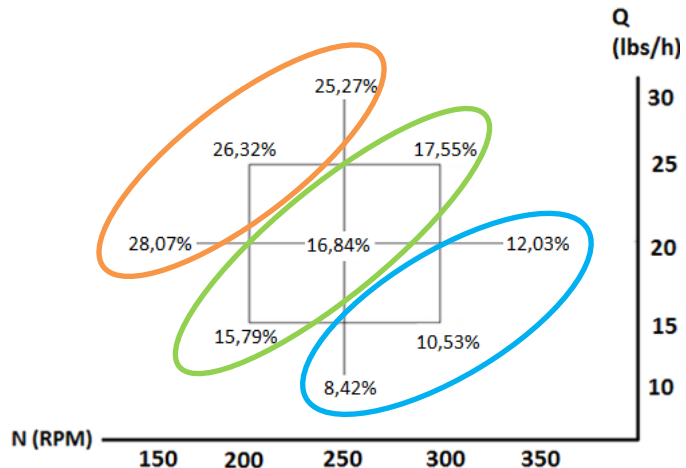
Una vez calculado el porcentaje de flujo de arrastre al 100%, se puede proporcionar una idea cuantificada de qué tan saturado está el canal del husillo de masa de polímero fundido, mediante la relación entre el flujo de alimentación real y el flujo de arrastre al 100%. A esta relación se le conoce como porcentaje de llenado, abajo la tabla 4.2 presenta los porcentajes de llenado para cada uno de los puntos de red experimental.

Tabla 4.2. Flujo de arrastre al 100% calculado y porcentaje de flujo de arrastre

Q [lb/hr]	N [rpm]	Q/N [ml/rev]	Qarrastre 100% [lb*rev/hr]	% Flujo arrastre
10	250	0,336	118,74	8,42
15	200	0,63	94,99	15,79
15	300	0,42	142,49	10,53
20	150	1,12	71,24	28,07
20	250	0,67	118,74	16,84
20	350	0,48	166,24	12,03
25	200	1,05	94,99	26,32
25	300	0,7	142,49	17,55
30	250	1,01	118,74	25,27

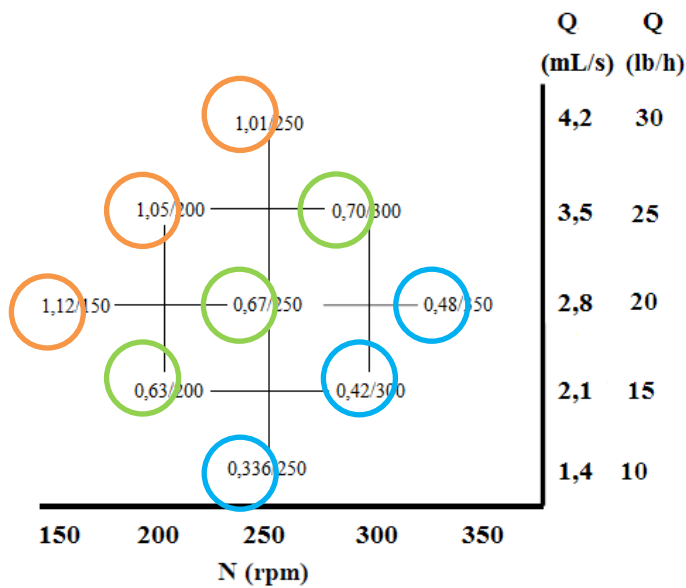
De acuerdo a los resultados presentados arriba, es evidente que el porcentaje de llenado en todas las condiciones es bajo. La extrusora en estudio tiene la capacidad de trabajar a mayores flujos de alimentación para el mismo rango de velocidad de rotación de husillo. Otra causa para el bajo porcentaje de llenado es el alto volumen disponible que presenta el canal, debido al ancho y la profundidad. Para visualizar mejor el comportamiento y las tendencias del porcentaje de llenado, los cálculos de los porcentajes de llenado se presentan en la red de diseño experimental en la figura 4.2.

Figura 4.2. Porcentaje de flujo de arrastre en la red de diseño experimental



De la red de diseño central se puede observar una tendencia particular mediante la agrupación de puntos de la red experimental en diagonales de derecha a izquierda como se muestra en la figura 4.2. Los porcentajes de llenado en las diagonales señaladas son muy similares. Esta tendencia no es la única encontrada en los datos, también se observa en la red experimental respecto al flujo específico encontrada en la figura 3.3. Para observar la tendencia, la figura 4.3 agrupa las diagonales de derecha a izquierda de la figura presentada en la sección 3.2.

Figura 4.3. Agrupación de flujos específicos en diagonales de derecha a izquierda



Mediante las figuras 4.2 y 4.3 se podría inferir que a mayor flujo específico (Q/N), mayor porcentaje de llenado. Esta tendencia es importante, ya que demuestra que para aumentar el porcentaje de llenado puede aumentarse el flujo de alimentación o disminuirse la velocidad de rotación de husillo.

4.3. DISTRIBUCIONES DE TIEMPO DE RESIDENCIA Y DISTRIBUCIONES DE ESFUERZOS

Distribuciones del tiempo de residencia (RTD) y de esfuerzos (RSD) fueron generadas y trazadas en una misma gráfica para las diferentes condiciones de operación en estudio (9 en total).

Las figuras 4.4 y 4.5 (siguiente página) representan las curvas RTD (generadas por las muestras de tinta de referencia) y RSD (generadas por los sensores CAMES) normalizadas para 2 condiciones de operación del experimento: 10/250 y 20/350. Mediante estas figuras se pueden explicar las tendencias encontradas. Para facilidad de visualización de los datos solo se incluyó una curva de RTD (se midieron 2) y dos curvas RSD (se midieron 4). Pero cabe aclarar que las curvas omitidas siguen el patrón presentado.

El eje Y de la gráfica representa la señal de voltaje, que es una medida indirecta de la concentración de tinta que pasa a través de la sonda óptica, y el eje X corresponde al tiempo.

La distribución del tiempo de residencia se representa comúnmente como la historia del tiempo de residencia, pero también puede ser entendido como el camino que siguen las partículas dentro de la extrusora. Siguiendo esta lógica la distribución de esfuerzos representa el porcentaje de esfuerzo promedio que las partículas experimentan dentro de la extrusora respecto a un sensor de referencia con un nivel crítico de esfuerzo.

Figura 4.4. Distribución de tiempo de residencia y de esfuerzos para $Q= 10 \text{ lb/hr}$, $N=250 \text{ rpm}$, $Q/N=0,336$

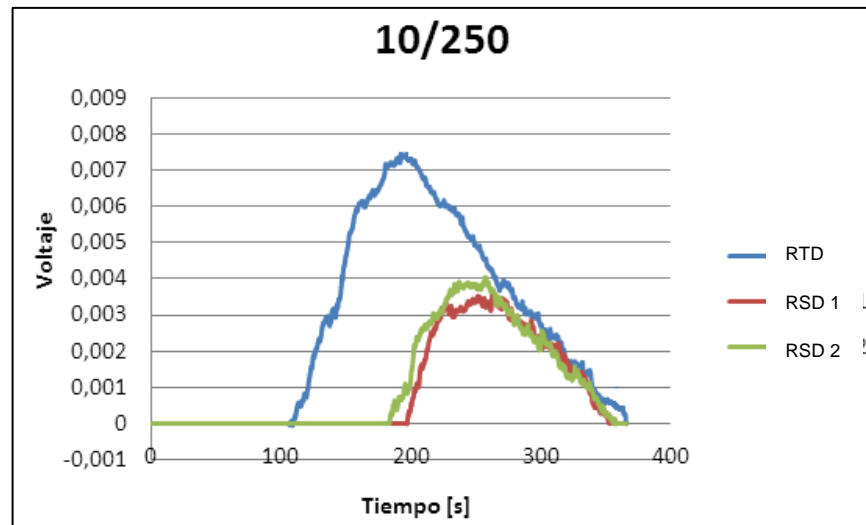
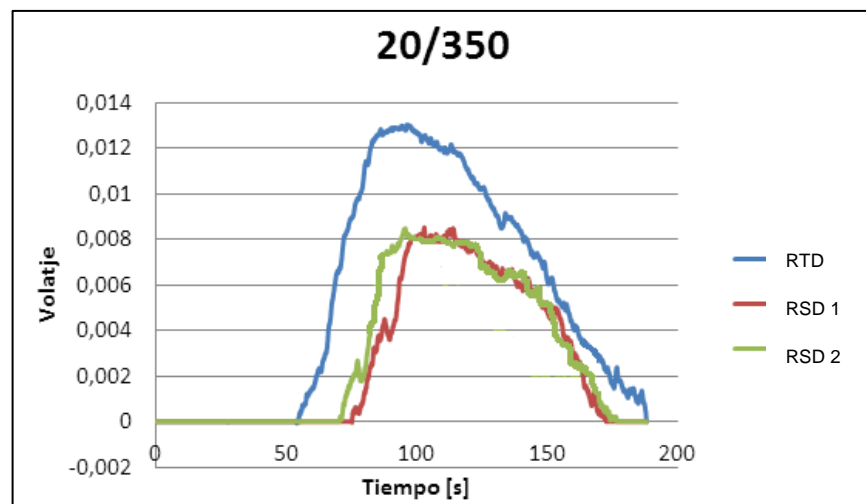


Figura 4.5. Distribución de tiempo de residencia y de esfuerzos para $Q= 20 \text{ lb/hr}$, $N=350 \text{ rpm}$, $Q/N=0,48$



La primera tendencia observable se encuentra en las formas similares de las curvas de distribución del tiempo de residencia y de esfuerzos generadas, como se muestra en las figuras 4.4 y 4.5.

Las curvas RSD fueron casi idénticas, de ésta manera se prueba la repetitividad del experimento y se valida el uso de los sensores CAMES para la medición de la distribución de esfuerzos. Se demuestra que los sensores no se rompen aleatoriamente, sino que se rompen al nivel de esfuerzo establecido por el

proveedor. Pero como se puede observar en las figuras, el porcentaje de ruptura no es experimentado igualmente en la distribución del tiempo. El porcentaje inicial es bajo, mientras que el porcentaje cerca del final de la distribución es casi del 100%. La explicación de este fenómeno se puede interpretar de la siguiente manera: inicialmente el flujo experimenta poco rompimiento de partículas en la sección de mezclado, donde las partículas son transportadas principalmente dentro de los canales; y a medida que transcurre el tiempo, algunos de los sensores CAMES quedan atrapados repetidamente en los bordes de los canales, ocasionando un rompimiento completo, debido al constante esfuerzo inducido sobre ellos.

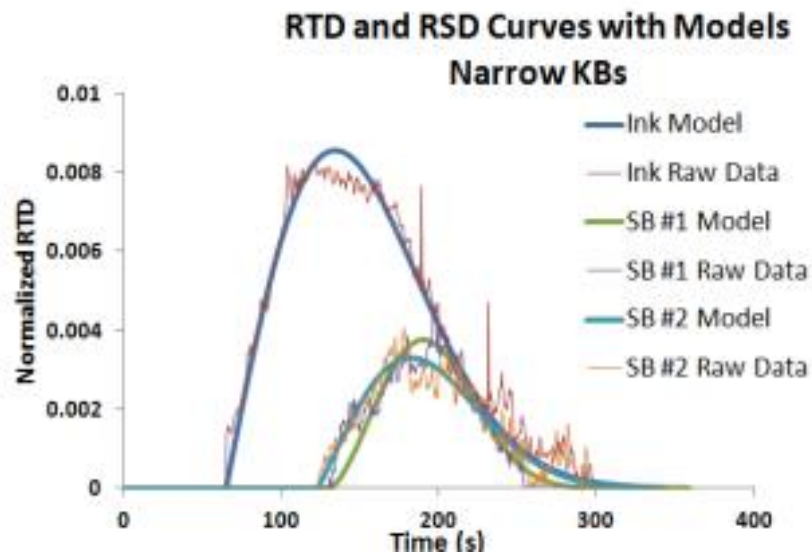
Visualmente las amplitudes de las curvas RTD son mucho más altas, indicando de ésta manera que nunca pudo alcanzarse el 100% de ruptura de los sensores CAMES. La baja resistencia a la ruptura que las muestras de tinta de referencia presentan, confirma la suposición de asumir la curva RTD como la curva RSD correspondiente a un rompimiento del 100% de los sensores CAMES.

También puede observarse que hay un tiempo de retraso entre las curvas RTD y las curvas RSD, el cual podría indicar que hay una cantidad de sensores CAMES que fluyen rápidamente a través de los canales de los husillos donde el esfuerzo inducido sobre las partículas es mínimo. Comparando las dos gráficas se observa que el tiempo de retraso es mayor cuando el flujo específico (Q/N) es menor.

La forma de las curvas RTD depende de las condiciones de operación de la extrusora. La comparación de las curvas RTD en las figuras 4.4 y 4.5, indican que para flujos específicos (Q/N) menores, el tiempo que las partículas pasan dentro de la extrusora es menor, lo que se ve reflejado en el carácter “más puntiagudo” de la curva RTD de la figura 4.4. Este carácter puntiagudo se debe a que la concentración de la tinta de referencia salió y entró rápidamente. Por el contrario, para flujos específicos mayores, la distribución tiene una curva más suave y amplia como se observa en la figura 4.5.

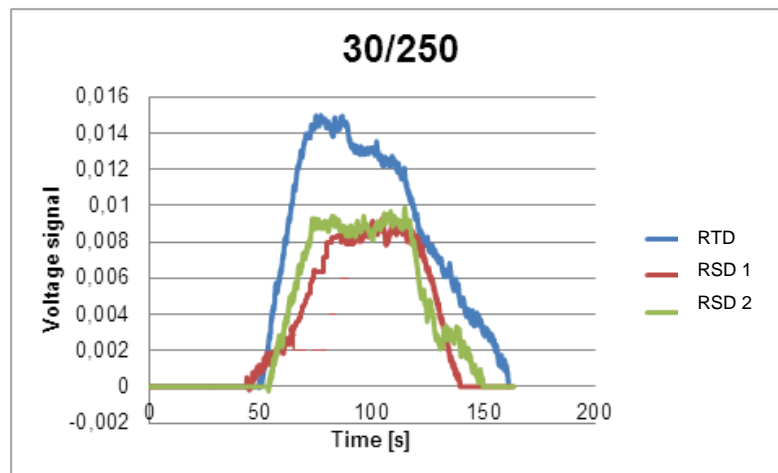
Las curvas generadas en este experimento son similares a curvas RTD y RSD generadas en el estudio realizado para una extrusora corrotatoria de doble husillo engranada [28] y han sido modeladas mediante un modelo de Weibull de 2 parámetros que se ajusta al comportamiento de las distribuciones de tiempos de residencia y esfuerzos [29] como se puede ver a continuación en la Figura 4.6.

Figura 4.6. Curvas RTD y RSD medidas en una extrusora CoTSE[29].



La figura 4.7 muestra dos tendencias encontradas aún más interesantes.

Figura 4.7. Curvas RTD y RSD normalizadas para $Q= 30 \text{ lb/hr}$, $N=250 \text{ rpm}$, $Q/N=1,01$



Las distribuciones generadas en las siguientes condiciones: 30 lb/h a 250 rpm, 25 lb/h a 200 rpm y 20 lb/h a 150 rpm, correspondientes a mayores flujos específicos

(Q/N) y ubicados en la diagonal superior de derecha a izquierda (mencionadas anteriormente en la sección 4.2), no presentan tiempo de retraso entre las curvas RTD y RSD, como se muestra en la figura 4.7. Esta podría ser la primera indicación de la posibilidad de alcanzar un completo rompimiento de los sensores en una extrusora NITSE.

La segunda y más importante tendencia observada en la figura 4.7, fue la aparición de un impulso extendido en las curvas RSD. A pesar del drástico cambio de forma de las curvas RSD, las curvas RTD no cambian significativamente de forma, solo se vuelven un poco más anchas. La figura 4.7 indica que durante un tiempo considerable del experimento, la sonda óptica reportó una señal constante o muy similar de reflectancia (concentración constante de tinta en el polímero fundido). Este fenómeno “estático” y plano de la concentración se puede explicar mediante el elemento cilíndrico ubicado en la sección de mezclado y mediante la aparición de una “piscina” de material dentro de la extrusora, que está siendo distribuida a ritmo constante. Debido al mayor porcentaje de llenado de los canales, las partículas se organizan formando una piscina que induce un nivel de esfuerzo constante sobre los sensores CAMES, generando un rompimiento constante de ellos. La mayoría del mezclado ocurre en el espacio (ápex) entre los husillos y permite un excelente mezclado sin alterar las características físicas del material.

Las formas planas de las curvas RSD son la razón que explica el excelente carácter distributivo de una extrusora NITSE. Con base en las diferencias de las distribuciones generadas para flujos específicos pequeños y grandes, se podría concluir que en una extrusora NITSE puede alcanzarse un muy buen nivel de mezclado distributivo a flujos específicos grandes y bajas velocidades de rotación de los husillos. La condición óptima del experimento para lograr lo anterior, sería a 20 lb/h y 150 rpm, obteniendo un porcentaje de ruptura del 34%, un porcentaje de llenado del canal de 28,07% y un flujo específico de 1,12 ml/rev.

El trabajo futuro está dirigido a plantear un experimento a mayores valores de Q/N y con canales de husillos menos profundos (incrementando el porcentaje de llenado), para entender mejor el mezclado dentro de una extrusora contrarrotatoria de doble husillo no engranada y observar si el carácter plano de las curvas de distribución de esfuerzos observado en 3 condiciones de operación permanece, y dado el caso, modelar las curvas de distribución de esfuerzos y poder conocer indirectamente el esfuerzo que un material recibe a una velocidad de rotación de los husillos, flujo de alimentación y configuración geométrica determinada.

5. CONCLUSIONES

El porcentaje de ruptura de los sensores CAMES aumenta con el aumento del flujo de alimentación y de la velocidad de rotación de husillo.

El porcentaje de llenado aumenta con el aumento del flujo específico (Q/N) y con la disminución del volumen disponible de los canales de los husillos.

El uso de muestras de tinta de referencia y sensores sensibles al esfuerzo para medir las distribuciones del tiempo de residencia (RTD) y de esfuerzos (RSD) es un mecanismo válido y se comprobó su repetitividad.

Valores pequeños de flujo específico (Q/N) generan curvas RTD y RSD similares a las encontradas en un estudio previo en una extrusora CoTSE [28].

Valores grandes de flujo específico (Q/N) generan curvas RSD planas, causadas por la aparición de una piscina de material que induce un nivel de esfuerzo constante sobre las partículas, explicando el excelente carácter distributivo de la extrusora NITSE.

El punto óptimo de la red experimental para alcanzar excelente mezclado distributivo sin dispersar las partículas corresponde a una velocidad de rotación de husillo de 150 rpm y a un flujo de alimentación de 20 lb/h.

La continua investigación y estudio de la distribución de esfuerzos podría tener un impacto económico significativo en la industria, tanto así que podría ser posible conocer el esfuerzo que el material experimenta dentro de una extrusora conociendo la geometría de la extrusora, el flujo de alimentación y la velocidad de rotación de husillo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] TADMOR, Zehev and GOGOS, Costas G. Principles of Polymer Processing. 2 ed. Hoboken : Wiley, 2006. p. 322-327, 523-587.
- [2] HOLMES-WALKER, William A. Polymer conversion. New York : Wiley, 1975. p. 117.
- [3] MIEBACH, Klaus. Cabeza de extrusión para el moldeo por soplado de cuerpos huecos de material termoplástico. Patente española, 2 209 743. Julio 1, 2004.
- [4] BERNHARDT, Ernest. Processing of thermoplastic materials. New York : Reinhold, 1963. p. 117-118, 138.154-161.
- [5] TADMOR, Zehev and KLEIN, Imrich. Engineering Principles of Plasticating Extrusion. New York : Reinhold, 1970. p. 1, 338, 339.
- [6] VLACHOPOULOS, J and STRUTT, D. Polymer Processing. Materials Science and Technology. Vol. 19, No. 9 (sep. 2003); p. 1161-1169.
- [7] FISHER, Edwin G. Extrusion of plastics. 2 ed. London : Plastics Institute, 1964. 271 p.
- [8] MORTON-JONES, D.H. Procesamiento de plásticos : Inyección, moldeo, hule, pvc. México D.F : Limusa, 1993. p. 96-124.
- [9] GILES, Harold F, Jr.; WAGNER, John R, Jr. and MOUNT, Eldridge M, III. Extrusion : The Definitive Processing Guide and Handbook. New York : William Andrew, 2005. p. 35-163.
- [10] NICHOLS, Russell J. and STELLER, Mark A. Compounding glass-fiber-reinforced nylon. Plastics compounding. Vol. 9, No. 4 (Jul/Aug 1986).

- [11] HAGBERG, Carl G. and DICKENSON, Jerauld L. Recycling nylon carpet via reactive extrusion. *Plastics Engineering*. Vol. 53, No. 4 (apr 1997); p. 41-43.
- [12] MUDALAMANE, Rajath and BIGIO, David I. Behavior of Fully Filled Regions in a Non-Intermeshing Twin-Screw Extruder. *Polymer Engineering and Science*. Vol. 43, No. 8 (aug 2003); p. 1466-1476.
- [13] CHEN, L.; HU, G.H. and LINDT, J.T. Residence time distribution in non-intermeshing counter-rotating twin-screw extruders. *Polymer Engineering and Science*. Vol. 35, No. 7 (apr 1995); p 598-609.
- [14] SHEARER, Gifford and TZOGANAKIS, Costas. Relationship between local residence time and distributive mixing in sections of a twin-screw extruder. *Polymer Engineering & Science*. Vol. 41, No. 12 (dic 2001); p. 2206-2215.
- [15] SHEARER, Gifford and TZOGANAKIS, Costas. The effects of kneading block design and operating conditions on distributive mixing in twin screw extruders. *Polymer Engineering & Science*. Vol. 40, No. 5 (may 2000); p. 1095-1106.
- [16] SHEARER, Gifford and TZOGANAKIS, Costas. Distributive mixing profiles for co-rotating twin-screw extruders. *Advances in Polymer Technology*. Vol. 20, No. 3 (sep 2001); p. 169-190.
- [17] CHENG, Jianya; XIE, Yifan and BIGIO, David I. Characterization of Kneading Block Performance in Co-Rotating Twin Screw Extruders. *SPE-ANTEC Tech. Papers*. Vol. 44 (1998); p. 198-202.
- [18] TODD, David B. Residence time distribution in twin-screw extruders. *Polymer Engineering and Science*. Vol. 15. No. 6 (jun 1975); p. 437-443.
- [19] KAPLAN, Aharon and TADMOR, Zehev. Theoretical model for non-intermeshing twin screw extruders. *Polymer Engineering Science*. Vol. 14, No. 1 (jan 1974); p. 58-66.

- [20] NICHOLS, Russell and Yao, J. Aspects of Melt Flow in Counter-Rotating, Tangential Twin Screw Extruders, an Experimental Study. SPE-ANTEC Tech. Papers. Vol. 28 (1982); p. 416-422.
- [21] KIM, Myung H., et al. A new model of flow in a tangential counter-rotating twin screw extruder. Advances in Polymer Technology. Vol. 9, No. 1 (spring 1989); p. 87-95.
- [22] BIGIO, David I. and ZERAFATI, Saeid. A Numerical Procedure for Evaluation of Mixing in the Nip Region of a Non-Intermeshing, Counter-Rotating Twin Screw Extruder. SPE-ANTEC Tech. Papers. Vol. 34 (1988); p. 85-89.
- [23] NGUYEN, K. and LINDT, J.T. Finite Element Modeling of a Counter-Rotating, Tangential (CRT) Twin Screw Extruder. SPE-ANTEC Tech. Papers. Vol. 34 (1988); p. 93-96.
- [24] NGUYEN, K. and LINDT, J.T. Finite Element Modelling of a Counter-Rotating, Non-Intermeshing Twin Screw Extruder. SPE-ANTEC Tech. Papers. Vol. 35 (1989); p. 154-159.
- [25] J. Curry and A. Kiani, —Experimental Identification of the Distribution of Fluid Stresses in Continuous Melt Compounders - Part 2, II in SPE-ANTEC Tech Papers, 1991, vol. 37, pp. 114-118.
- [26] CURRY, J. and KIANI, A. Measurement of Stress Level in Continuous Melt Compounders. SPE-ANTEC Tech. Papers. Vol. 36 (1990); p. 1599-1602.
- [27] WHITE, James L. and SZYDLOWSKI, Witold. An improved theory of metering in an intermeshing corotating twin-screw extruder. Advances in Polymer Technology. Vol. 7, No. 2 (1987); p. 177, 1987.
- [28] BIGIO, David I., et al. Residence stress distributions in a twin screw extruder. SPE-ANTEC Tech. Papers. Vol. 57 (2011); p. 1382-1386.

[29] PAPPAS, William, et al. Variable strength stress bead analysis in a twin screw extruder. SPE-ANTEC Tech. Papers (2012). Artículo aceptado por SPE-ANTEC durante NPE en Orlando, FL.

[30] Ficha del Polipropileno : PPH-20-4. Prime PolymerServices [en línea]. [Consultado Junio 15 de 2011].. Disponible en <http://www.osterman-co.com/pdf/epi/Polypropylene/Osterlene_PP_PPH%20-%2020%20-%20.4.pdf >

[31] Ficha del Dióxido de Titanio :White Masterbatch PE105B. ShantouMeilianChemical [en línea]. [Consultado Julio 28 de 2011]. Disponible en <www.commerce.com.tw/modules.php?modules=products&action=detail&ID=C0024524&no=40646>

[32] MACH I. Dye-filled capsules indicate extruder shear stress. *PlasticsTechnology*. Vol. 41, No. 3 (mar 1995); p. 12.

ANEXO B: CONSIDERACIONES Y DEMOSTRACIÓN DE LA ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE FLUJO DE ARRASTRE EN UNA EXTRUSORA NITSE

Primero debe hacerse un análisis de flujo total. El flujo total (Q_{total}) es la suma del flujo de arrastre, de presión y de fuga. A continuación se presentará una breve descripción de cada uno de ellos.

El flujo de arrastre es la acción de transporte hacia adelante producido por el movimiento relativo entre el husillo y el barril como resultado de las fuerzas de fricción. Depende del diámetro del husillo (D), de la rapidez del husillo (N), de la profundidad del canal (H), del ancho del canal (W) y del ángulo de hélice (ϕ) [8].

El flujo de presión es una oposición al flujo de arrastre debido al gradiente de presión que hay a lo largo de la extrusora. Depende de las dimensiones del husillo, el gradiente de presión y la viscosidad del material fundido (μ) [4].

El flujo de fuga es una oposición al flujo de arrastre debido al espacio finito entre el husillo y el barril, a través del cual puede fugarse material. Depende de la rapidez del husillo, la presión frontal y la viscosidad del material fundido.

La expresión se puede representar de la siguiente manera:

$$Q_{total} = Q_{arrastre} - Q_{presión} - Q_{fuga}$$

En general, debido a que el flujo de fuga es muy pequeño en comparación con los demás, éste puede aproximarse a cero. Partiendo de suponer el modelo de flujo matemático isotérmico para un fluido Newtoniano, se pueden calcular muy buenos valores para estimaciones de primer orden mediante la utilización de factores correctores de forma para entender la presurización y los mecanismos de flujo dentro de una extrusora. Éste modelo se parece en gran medida al modelo de bombeo para una extrusora simple. El completo desarrollo matemático se encuentra en el libro Principles of Polymerprocessing por los autores Tadmor y

Gogos, 2da edición, 2006, Capítulo 6.8 [1]. A continuación se muestra la ecuación obtenida, donde el primer término corresponde al flujo de arrastre y el segundo a al flujo de presión:

$$Q_{total} = \frac{2n - 1}{2} * V_{bz}WHF_d + \frac{2n - 1}{12} * \frac{WH^3}{\mu} \left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right)F_p$$

Donde F_d y F_p son factores de forma para el flujo de arrastre y flujo de presión en función de H/W , respectivamente. V_{bz} es el componente vertical de la velocidad del barril en el canal, $-\partial P/\partial Z$ es el gradiente de presión y n es el número de "lobes". El elemento tiene un lobe pero debido al carácter no engranado de la extrusora, se eligió un valor de 1,4 para compensar por el comportamiento de los dos husillos relativamente separados.

Cuando los canales están parcialmente llenos y hay descarga abierta, el flujo de presión tiende a cero. Es decir, el flujo total es igual al flujo de arrastre y se conoce como Flujo de arrastre al 100% que depende únicamente de las dimensiones geométricas y de la velocidad del husillo. Además V_{bz} está definido como sigue:

$$V_{bz} = \pi DN \cos(\phi)$$

Entonces, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_{arrastre\ 100\%} = \frac{2n - 1}{2} * \pi DNWHF_d \cos(\phi) = 0,9 * \pi DNWHF_d \cos(\phi)$$

Mediante un cálculo sencillo se puede obtener el porcentaje de flujo de arrastre de todas las condiciones de operación trabajadas, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Flujo de arrastre} = \frac{Q_{total}}{Q_{arrastre\ 100\%}} * 100\%$$