

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE UN BIOMATERIAL  
COMPUESTO PP-GAK MEDIANTE MODELAMIENTO CAD-CAE.”

---

Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de  
Ingeniero Mecánico.

---

Autor:

César Antonio Paltán Zhingre

Tutor:

Ing. Jorge Isaac Fajardo Seminario

Cuenca, Diciembre 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE UN BIOMATERIAL  
COMPUESTO PP-GAK MEDIANTE MODELAMIENTO CAD-CAE.”

---

Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de  
Ingeniero Mecánico.

---

Autor:

César Antonio Paltán Zhingre

cpaltan@est.ups.edu.ec

Tutor:

Ing. Jorge Isaac Fajardo Seminario

jfajardo@ups.edu.ec

Cuenca, Diciembre 2016

# Cesión de Derechos de Autor

Yo *César Antonio Paltán Zhingre*, con documento de identificación N° 0104641378, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado: “*Validación del sistema de inyección de un biomaterial compuesto PP-GAK mediante modelamiento CAD-CAE.*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

César Antonio Paltán Zhingre  
C.I. 0104641378

# Certificación

Yo declaro que bajo mi “tutoría”, fue desarrollado el trabajo de titulación: *"Validación del sistema de inyección de un biomaterial compuesto PP-GAK mediante modelamiento CAD-CAE."*, realizado por: *César Antonio Paltán Zhingre*, obteniendo el “Proyecto Técnico”, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Jorge Isaac Fajardo Seminario', written over a horizontal line.

---

Ing. Jorge Isaac Fajardo Seminario  
C.I. 0102495777

# Declaratoria de Responsabilidad

Yo, *César Antonio Paltán Zhingre*, con número de cédula 0104641378, autor del proyecto técnico "*Validación del sistema de inyección de un biomaterial compuesto PP-GAK mediante modelamiento CAD-CAE.*", certifico que el total contenido del "Proyecto Técnico", es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'César Antonio Paltán Zhingre', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

César Antonio Paltán Zhingre  
C.I. 0104641378

# DEDICATORIA

*Este proyecto se la dedico*

*A mi Dios quién me guía por el buen camino, me da fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentan,*

*A mi padre que me ha enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento, quien me han permitido a través de su ejemplo me convierta en una persona íntegra.*

*A mi madre que me ha enseñado que en la vida no existe imposibles, por su apoyo incondicional, quiene a lo largo de toda mi vida me ha colmado de su amor y comprensión*

*A mis hermanos quienes son la luz de mi vida, que siguen mis pasos, son mi motivación, inspiración y felicidad.*

César

# Agradecimientos

*Agradezco a Dios por las oportunidades recibidas en mi vida, es a quien admiro, por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hizo realidad este sueño anhelado.*

*He aprendido que en la vida no se puede obtener las cosas solo por quererlas, hay que ser agradecido y la gratitud es reciproca,*

*Agradezco a mi familia, que son mi fuerza y apoyo, A mi padre que me ha enseñado el valor de las cosas y la fuerza para luchar por ellas, el liderazgo y a ponerme metas altas en la vida porque las puedo alcanzar. A mi madre que me enseñó el respeto hacia mí mismo y el valor de la ayuda, gracias a eso aprendí a respetar a los demás. Agradezco a mis hermanos, son las tres personas que más quiero enorgullecer*

*A mi director de tesis Jorge Fajardo , por su esfuerzo y dedicación, por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado que pueda terminar mi proyecto con éxito.*

*Al grupo de investigación GiMaT, a todos sus miembros, por la colaboración, por haberme facilitado los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de este proyecto.*

*A mis amigos Franco, Tito, Christian, Maka y muchos más que han sacado una sonrisa en momentos de dificultad, me han brindado una mano en momentos de necesidad, a todos estoy muy agradecido.*

*A todas las personas que hoy me ven terminar un proyecto, pero me impulsan a alcanzar más en la vida, que no termina aquí, no está ni cerca, porque cada vez tendré metas, proyectos y necesitare todo su apoyo para hacerlas realidad.*

César

Este documento fue realizado enteramente en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

# Resumen

En el presente proyecto técnico se realiza un análisis mediante caracterización de las propiedades reológicas de un nuevo material compuesto polimérico natural (polipropileno reforzado con fibras de guadua PP+GAK), mediante caracterización reológica, simulaciones de inyección y validación analítica de los resultados. Se genera una base de datos de las propiedades reológicas de un nuevo material que fue desarrollado por el grupo GiMaT. Se analizarán diferentes composiciones (20, 30 y 40 %w/w de fibra), además se incluye 4 y 8 %w/w de agente de acople (MAPP). Se ha propuesto una metodología para la determinación del índice de fluidez e índice de consistencia; esto con la finalidad de brindar un aporte en el estudio del comportamiento del material en un proceso de inyección. De la misma forma, se determinan tanto por simulación y mediante cálculos analíticos los parámetros principales del proceso de inyección: i) presión de inyección, ii) fuerza de cierre y iii) tiempo de enfriamiento. En la determinación de todos los parámetros se encuentra gran similitud entre los resultados experimentales y analíticos tanto en magnitud como en tendencia. Se analiza por último el tensor de orientación en diferentes posiciones de la pieza, conociendo su comportamiento a diferentes composiciones del material. Se analiza y concluye el comportamiento del material a diferentes % de fibra, el efecto del MAPP en la reología del material compuesto, el efecto en la presión de inyección y fuerza de cierre, y el estado de orientación de la fibra al aumentar el % de fibra y MAPP.

**Palabras clave:** Materiales compuestos, fibras naturales, *Guadua Angustifolia Kunth* (GAK), reología, simulación, orientación de fibras.

# Abstract

The present technical project an analysis by characterization of the rheological properties of a new natural polymer composite material (polypropylene reinforced with guadua fibers PP + GAK) is performed, by means of rheological characterization, injection simulations and analytical validation of the results. (20, 30 and 40 wt% of fiber content), in addition 4 and 8 wt% of couple agent (MAPP) are included. A methodology has been proposed for the determination of the melt flow index and consistency index; with the purpose of providing a contribution in the study of the behavior of the material in an injection process. The same way, they determine both the simulation and the analytical calculations the main parameters of the injection process: i) injection pressure, ii) clamping force, and iii) cooling time. In the determination of all the parameters we find great similarity between the experimental and analytical results in both magnitude and trend. Finally the orientation tensor is analyzed at different positions of the piece, knowing its behavior to different compositions of the material. The analysis and conclusion of the behavior of the material at various fiber %, the effect of MAPP on the composite rheology, the effect on the injection pressure and the closing force, and the orientation state of the Fiber to increase the % fiber and MAPP.

**Keywords:** Composite materials, natural fibers, *Guadua Angustifolia Kunth* (GAK), rheology, simulation, fiber orientation.

# Índice

	<u>Pág.</u>
<b>Índice</b> . . . . .	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> . . . . .	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas</b> . . . . .	<b>XIV</b>
<b>1 Validación del sistema de inyección de un biomaterial compuesto PP-GAK mediante modelamiento CAD-CAE.</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Introducción . . . . .	1
1.2 Problema . . . . .	2
1.2.1 Antecedentes . . . . .	2
1.2.2 Importancia y alcances . . . . .	3
1.2.3 Delimitación . . . . .	4
1.3 Objetivos . . . . .	4
1.3.1 Objetivo General . . . . .	4
1.3.2 Objetivo Específicos . . . . .	4
1.4 Marco Teórico Referencial. . . . .	4
1.4.1 Materiales Compuestos. . . . .	4
1.4.2 Fibras Naturales. . . . .	5
1.4.3 El bambú . . . . .	6
1.4.4 Plásticos reforzados con fibras de Bambú . . . . .	7
1.4.5 Reometría de Polímeros . . . . .	7
1.4.6 Proceso de Fabricación con Polímeros . . . . .	10
1.4.7 Fluidos No Newtonianos . . . . .	12
1.4.8 Modelos reológicos de Polímeros . . . . .	13
1.4.9 Inyección de Polímeros . . . . .	16
1.4.10 Orientación de Fibras Cortas . . . . .	24
1.4.11 Sistemas de Simulación de Inyección Polímeros . . . . .	25
1.4.12 Conclusión . . . . .	26
1.5 Marco Metodológico . . . . .	27
1.5.1 Diseño de la Investigación . . . . .	28
1.6 Resultados . . . . .	30
1.6.1 Resultados Reometría MFI . . . . .	30
1.6.2 Resultados Reometría Capilar . . . . .	31
1.6.3 Determinación de los coeficientes para los modelos reológicos . . . . .	35
1.6.4 Resultados de la Simulación del Proceso de Inyección . . . . .	39
1.6.5 Resultados Analíticos . . . . .	46
1.6.6 Resultados Tensor de Orientación . . . . .	52

1.7	Conclusiones . . . . .	58
1.8	Recomendaciones . . . . .	60
1.9	Trabajos futuros . . . . .	60
	<b>Referencias bibliográficas . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>ANEXO A Programación en Matlab . . . . .</b>	<b>69</b>
A.1	Ley de Potencia . . . . .	69
A.2	Cross -WLF . . . . .	70
A.3	Ajuste de Ley de Potencia . . . . .	72
A.4	Ajuste de Curvas de Cross-WLF . . . . .	75

## Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros [66]. . . . .	8
Figura 1.2 – Viscosidad aparente en función de la velocidad de deformación por corte de algunos polímeros [66] . . . . .	8
Figura 1.3 – Viscosidad Cortante de los Compuestos de PP+Bambú [23]. . . . .	10
Figura 1.4 – Comportamiento newtoniano y no newtoniano [66]. . . . .	13
Figura 1.5 – Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de corte [66]. . . . .	13
Figura 1.6 – Fluidos que siguen la ley de Potencia [66]. . . . .	14
Figura 1.7 – Comportamiento del modelo de Cross-WLF . . . . .	16
Figura 1.8 – Fuerza de sujeción sin dimensiones frente a grupos adimensionales. [80]. . . . .	19
Figura 1.9 – Presión de Inyección sin dimensiones frente a grupos adimensionales. [80]. . . . .	20
Figura 1.10–Corrección de la fuerza de apriete para el área proyectada. [80]. . . . .	20
Figura 1.11–Diagrama para el cálculo aproximado de PRESIÓN ESPECÍFICA EN LA CAVIDAD DEL MOLDE en función del espesor de la pieza, de la longitud de la trayectoria del flujo y de la viscosidad del material en estado fundido [83]. . . . .	21
Figura 1.12–Diagrama para el cálculo de la superficie de moldeo proyectada (o área frontal) en función de la fuerza de cierre de la máquina y la presión de inyección (actuando en el molde) [83]. . . . .	22
Figura 1.13–Gradiente de temperatura comparado con el número de Fourier [66]. . . . .	24
Figura 1.14–Ejemplos de diferentes estados del tensor de orientación. a) Aleatorio 3D b) Aleatorio 2D c) Alineado [9]. . . . .	25
Figura 1.15–Metodología Reometría MFI . . . . .	28
Figura 1.16–Metodología Reometría Capilar . . . . .	28
Figura 1.17–Metodología Simulación por Software Especializado . . . . .	29
Figura 1.18–Metodología de Análisis analítico . . . . .	29
Figura 1.19–Resultados Reometría MFI . . . . .	31
Figura 1.20–Resultados Reometría Capilar de 20%, 30% y 40% de fibra a 190°C . . . . .	33
Figura 1.21–Resultados Reometría Capilar de 20% fibra a 190°C . . . . .	34
Figura 1.22–Resultados Reometría Capilar de 30% fibra a 190°C . . . . .	34
Figura 1.23–Resultados Reometría Capilar de 40% fibra a 190°C . . . . .	35
Figura 1.24–Curva de Fluidez del Polipropileno con su ajuste de datos al modelo de la ley de potencia a 190°C . . . . .	36
Figura 1.25–Comportamiento del índice de consistencia a 190 °C . . . . .	37
Figura 1.26–Exponente de la ley de potencia a 190 °C . . . . .	38
Figura 1.27–Curva de Fluidez del Polipropileno con su ajuste de datos al modelo de la Cross-WLF a 190 °C . . . . .	39

Figura 1.28–Resultados del mallado de la probeta y punto de Inyección. Fuente: El Autor. . .	40
Figura 1.29–Presión de inyección y tiempo de inyección del PP+GAK . . . . .	42
Figura 1.30–Presión de inyección y tiempo de inyección del PP+20GAK . . . . .	43
Figura 1.31–Presión de inyección y tiempo de inyección del PP+30GAK . . . . .	43
Figura 1.32–Presión de inyección y tiempo de inyección del PP+40GAK . . . . .	44
Figura 1.33–Fuerza de cierre del PP+GAK . . . . .	44
Figura 1.34–Fuerza de cierre del PP+20GAK . . . . .	45
Figura 1.35–Fuerza de cierre del PP+30GAK . . . . .	45
Figura 1.36–Fuerza de cierre del PP+40GAK . . . . .	46
Figura 1.37–Presión de Inyección, Análítico vs Simulación de PP+GAK . . . . .	47
Figura 1.38–Presión de Inyección, Análítico vs Simulación de PP+20GAK . . . . .	48
Figura 1.39–Presión de Inyección, Análítico vs Simulación de PP+30GAK . . . . .	48
Figura 1.40–Presión de Inyección, Análítico vs Simulación de PP+40GAK . . . . .	49
Figura 1.41–Fuerza de Cierre, Análítico vs Simulación de PP+GAK . . . . .	49
Figura 1.42–Fuerza de Cierre, Análítico vs Simulación de PP+20GAK . . . . .	50
Figura 1.43–Fuerza de Cierre, Análítico vs Simulación de PP+30GAK . . . . .	50
Figura 1.44–Fuerza de Cierre, Análítico vs Simulación de PP+40GAK . . . . .	51
Figura 1.45–Zonas de análisis en la probeta . . . . .	52
Figura 1.46–Tensor de Orientación $a_{11}$ de PP+GAK con variación de fibra . . . . .	53
Figura 1.47–Tensor de Orientación $a_{11}$ de PP+GAK con variación de MAPP . . . . .	54
Figura 1.48–Perfil de orientación de PP+GAK, zona 2 . . . . .	55
Figura 1.49–Perfil de orientación de PP+20GAK, zona 2 . . . . .	55
Figura 1.50–Perfil de orientación de PP+30GAK, zona 2 . . . . .	56
Figura 1.51–Perfil de orientación de PP+40GAK, zona 2 . . . . .	56
Figura 1.52–Perfil de orientación de PP+GAK, Skin . . . . .	57
Figura 1.53–Perfil de orientación de PP+GAK, Shell . . . . .	57
Figura 1.54–Perfil de orientación de PP+GAK, Core . . . . .	58
Figura A.1 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP . . . . .	72
Figura A.2 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+20GAK . . . . .	72
Figura A.3 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+20GAK+4MAPP . . . . .	72
Figura A.4 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+20GAK+8MAPP . . . . .	73
Figura A.5 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+30GAK . . . . .	73
Figura A.6 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+30GAK+4MAPP . . . . .	73
Figura A.7 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+30GAK+8MAPP . . . . .	74
Figura A.8 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+40GAK . . . . .	74
Figura A.9 –Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+40GAK+4MAPP . . . . .	74
Figura A.10–Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+40GAK+8MAPP . . . . .	75
Figura A.11–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP . . . . .	75
Figura A.12–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+20GAK . . . . .	75
Figura A.13–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+20GAK+4MAPP . . . . .	76

Figura A.14–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+20GAK+8MAPP . . .	76
Figura A.15–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+30GAK . . . . .	76
Figura A.16–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+30GAK+4MAPP . . .	77
Figura A.17–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+30GAK+8MAPP . . .	77
Figura A.18–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+40GAK . . . . .	77
Figura A.19–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+40GAK+4MAPP . . .	78
Figura A.20–Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+40GAK+8MAPP . . .	78

## Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1.1 – Propiedades de algunos compuestos de origen natural comparados con PP + fibra de vidrio [15,46,47]. . . . .	5
Tabla 1.2 – Propiedades mecánicas de fibras de naturales [51, 52]. . . . .	6
Tabla 1.3 – Viscosidades de algunos polímeros fundidos importantes [66,69]. . . . .	9
Tabla 1.4 – MFI recomendado para los procesos de transformación de polímeros [71] . . . .	10
Tabla 1.5 – Lista de Substancias en viscosidad creciente [66]. . . . .	11
Tabla 1.6 – Velocidad de corte de las técnicas de transformación de polímeros [66]. . . . .	12
Tabla 1.7 – Viscosidad de diversos materiales [66]. . . . .	12
Tabla 1.8 – Índices de ley de potencia e índice de consistencia, dependencia de temperatura para termoplásticos comunes [13,80, 82] . . . . .	18
Tabla 1.9 – Modelos matemáticos del comportamiento viscoso [28,78,87–92]. . . . .	26
Tabla 1.10–Características de los software de simulación de Inyección de Plásticos [78,87–94].	26
Tabla 1.11–Resumen de Resultados Reometría MFI . . . . .	30
Tabla 1.12–Resultados Reometría Capilar de 20% Fibra a 190°C . . . . .	32
Tabla 1.13–Resultados Reometría Capilar de 30% Fibra a 190°C . . . . .	32
Tabla 1.14–Resultados Reometría Capilar de 40% Fibra a 190°C . . . . .	32
Tabla 1.15–Ajuste al Modelo de viscosidad de ley de potencia . . . . .	36
Tabla 1.16–Ajuste al Modelo de viscosidad de Cross-WLF . . . . .	38
Tabla 1.17–Configuración de la Reología del polímero con el modelo de viscosidad Cross-WLF	40
Tabla 1.18–Configuración de la Fibra y sus característica . . . . .	41
Tabla 1.19–Configuración de la máquina de Inyección BOY 35E . . . . .	41
Tabla 1.20–Resumen de resultados de la simulación . . . . .	42
Tabla 1.21–Resultados Analíticos . . . . .	47
Tabla 1.22–Valores utilizados para el cálculo del tiempo de refrigeración . . . . .	51
Tabla 1.23–Resultados analítico del tiempo de refrigeración . . . . .	51
Tabla 1.24–Orientación en diferentes Zonas . . . . .	52

# **Validación del sistema de inyección de un biomaterial compuesto PP-GAK mediante modelamiento CAD-CAE.**

## **1.1 Introducción**

El crecimiento de la población mundial y el aumento del consumo de productos, han generado la necesidad de satisfacer una gran demanda de productos para el desarrollo de la población [1, 2]. El uso de materiales poliméricos ha mostrado una gran influencia en el incremento de productos, es así que en las últimas tres décadas se han producido 21.6 millones de toneladas de polímero, esto ha generado un desplazamiento del consumo de los materiales tradicionales como acero, bronce y aluminio [1, 3, 4]. Los desafíos de modernización de nuestro planeta han hecho que los procesos de manufactura y transformación de materiales sean más eficientes, económicos y novedosos [1, 5, 6]. Pero este gran consumismo trae un impacto negativo en el medio ambiente, la industria de los polímeros no es ajena a esta situación y está desarrollando nuevos materiales para instalar un consumo responsable y un futuro sustentable [3, 4, 7–10]. Los materiales poliméricos que utilizamos en diferentes aplicaciones necesitan de un conjunto de propiedades y características, las cuales debido a su proceso de transformación y manipulación no siempre garantizan las características necesarias para su correcta utilización en el día a día [8, 10–13]. Con el pasar de los años y debido a factores tanto ecológicos como económicos se establece como alternativas la utilización de biopolímeros [14]. El uso de materiales compuestos reforzados con fibras naturales cortas en matrices poliméricas obtenidas mediante moldeo por inyección, ha evidenciado a nivel mundial un incremento notable en las últimas décadas, en el Ecuador contamos con una riqueza de especies vegetales con potencial para extraer fibra, dada su riqueza biológica [15–17]. Muchas de estas especies no han sido explotadas. Por lo cual se tiene disponibilidad con variedad de fibras vegetales que pueden ser utilizadas como refuerzos de materiales compuestos [18]. Las fibras naturales, como refuerzo, presentan propiedades biodegradables, aumento del módulo de elasticidad (rigidez) y absorción acústica; además presentan ventajas medio ambientales en la producción de biocombustible.

Estos materiales compuestos y biomateriales son desarrollados a nivel mundial mediante tecnología de punta para extrusión, utilizando lubricantes y acoplantes, así como compatibilizantes, obteniéndose perfiles y partículas de material [19]. Los perfiles han dado origen a elementos o componentes de elementos constructivos como ventanas, puertas y pisos, entre otros [20, 21]. Las partículas han sido utilizadas para obtener láminas, paneles, tapas, envases, o un sinfín de elementos, mediante procesos de extrusión, soplado o prensado; a sí mismo el proceso de inyección de materiales poliméricos, o compuestos de matriz polimérica reforzadas con fibras cortas naturales, ha representado una alternativa óptima para la producción de una amplia variedad tales como artículos deportivos, decorativos, pasando por materiales para medicina y piezas más específicas para el campo automotriz. Esta técnica de manufactura tiene la característica de la producción en serie con alta precisión dimensional [19, 22–25].

Por otra parte, el moldeo por inyección dispone de una gran variedad de software de ingeniería asistida CAE (*Computer Assisted Engineering*) que permiten conocer las principales variables del proceso para poder contar con una estimación preliminar altamente precisa tanto de la magnitud de las variables a controlar en el proceso como de las propiedades dimensionales del producto a obtener [20, 26], con prestaciones que permiten al usuario poder ingresar las características del material reforzante [20, 27, 28]. El interés tecnológico es poder utilizar estas herramientas de simulación para predecir los parámetros de procesamiento de estos nuevos materiales. La competitividad de los productores de transformación de polímeros ha generado la necesidad de contar con este tipo de herramienta de simulación, de esta forma se pretende disminuir costos en la producción, así como el tiempo el desarrollo del producto [20, 29–31].

Del proceso de inyección dependerán de una serie de características de la pieza final, en la fase de llenado se originan defectos como líneas de soldadura, burbujas de aire y llenado incompleto; es por estos defectos que se hace necesario el estudio del comportamiento reológico del material al procesar, sus parámetros tales como temperatura, esfuerzo de corte, viscosidad, presión, fuerza de cierre entre otros deben ser considerados en esta técnica de manufactura, así como las características del molde y las propiedades físicas de la máquina inyectora. La correcta operación y ajuste de estos parámetros darán como resultado piezas de gran calidad y procesos de fabricación rentables [31–34].

## 1.2 Problema

### 1.2.1 Antecedentes

El presente proyecto se enmarca en la línea de investigación de nuevos materiales del grupo GiMaT, los proyectos previos vinculados son: “Caracterización mecánica de compuestos poliméricos de polipropileno reforzados con fibras naturales cortas de *Guadua Angustifolia Kunt* (GAK)” y “Caracterización micromecánica de un compuesto polimérico reforzado con fibras naturales PP-GAK” [35–41]. Los trabajos son pioneros en el uso de fibras naturales como potenciales refuerzos

en matrices poliméricas en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, estos trabajos se enfocaron en la caracterización del compuesto.

El presente trabajo investigativo consiste en establecer las propiedades reológicas del compuesto PP-GAK y emplear un software especializado en el análisis de procesos de inyección, con el interés de obtener parámetros que permitan comparar resultados computacionales y analíticos; dado que los modelos de cálculo de los parámetros de inyección consideran el comportamiento reológico del material puro sin reforzantes. Las propiedades reológicas se encuentran en bases de datos de software o en datasheets del fabricante. Para el caso de materiales compuestos reforzados con fibras naturales cortas no se cuenta con los parámetros reológicos que marcan el comportamiento del material durante el proceso de inyección.

Ante lo mencionado cabe la pregunta de investigación: ¿Cómo evaluar y validar los parámetros de inyección en materiales compuestos reforzados con fibras naturales cortas? Responder a esta pregunta investigativa plantea una metodología de análisis para estos materiales compuestos, para esto se debe conocer ¿Cómo obtener las propiedades reológicas del material compuesto? y ¿Cómo incluir las propiedades reológicas de estos nuevos materiales en los modelos computacionales y analíticos para ser comparados y validados? Estas preguntas guiarán el proceso de investigación propuesta.

## 1.2.2 Importancia y alcances

La presente investigación aportará en el campo de la ciencia con una base de datos del nuevo material, compuestos reforzados con fibras naturales cortas PP-GAK, que servirá como punto de partida para nuevos trabajos de investigación con este tipo de material, brindado al sector investigativo un parámetro de análisis comparativo con nuevos materiales [31,42].

Desde el punto de vista tecnológico, se aportará con una metodología que permita la simulación de parámetros de inyección en donde se incluyan las propiedades reológicas del nuevo material y las características de la máquina de inyección. Además se realizará un análisis cuantitativo y cualitativo de los efectos que tienen los reforzantes naturales sobre los parámetros de inyección [31,34].

Finalmente, a nivel industrial, se aportará con información de los parámetros de inyección de este tipo de materiales que permita una adecuada producción, el limitado conocimiento del comportamiento del biomaterial compuesto con fibras naturales cortas genera problemas en el diseño de un nuevo producto con este nuevo material, disminuyendo la productividad y aumentando el costo de implementación. Conocemos que al aplicar las técnicas de simulación se reducen los ciclos de diseño y costos de nuevos productos teniendo mayor eficacia en la producción [43].

La Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, cuenta actualmente con un laboratorio de Ensayos Poliméricos que cuenta con los recursos necesarios para la caracterización del biopolímero, permitiendo aportar los datos necesarios para el análisis del comportamiento reológicos del polímero.

### 1.2.3 Delimitación

El proyecto será desarrollado en el laboratorio de Ensayo de polímeros de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, que cuenta con un reómetro capilar necesario para la investigación. Con la utilización de este sistema y la correcta configuración de parámetros en un software especializado en procesos de inyección, se pretende proporcionar información valiosa, confiable y estructurada que sirva en el campo de la investigación. El Grupo de Investigación en materiales y procesos de transformación (GiMaT) presenta este proyecto de investigación con miras a implementar la metodología descrita.

Se debe limitar este proyecto a la utilización del biomaterial compuesto PP-GAK desarrollado por el grupo de investigación como material base de nuestro análisis, este cuenta con los estudios pertinentes y se cuenta con la información necesaria para la validación de los resultados.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

Validar los resultados de simulación del proceso de inyección de un biomaterial PP-GAK a partir de la caracterización reológica del compuesto y mediante modelos analíticos y experimentales.

### 1.3.2 Objetivo Específicos

- Determinar constantes reológicas del material compuesto PP-GAK
- Determinar el efecto de la variación de parámetros en el proceso de inyección.
- Determinar el efecto de variación de los parámetros reológicos de un compuesto PP-GAK en el proceso de inyección.
- Determinar el estado de orientación de fibras cortas.

## 1.4 Marco Teórico Referencial.

### 1.4.1 Materiales Compuestos.

Se entiende por material compuesto a los formados por dos o más materiales distintos sin que se produzcan reacciones químicas entre ellos con la finalidad de conseguir y mejorar las propiedades con respecto a los materiales iniciales [44]. Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones como rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la

corrosión, dureza, conductividad entre otros. En los materiales compuestos se pueden distinguir dos componentes; la matriz que es el componente en fase continua y el refuerzo en fase discontinua [20, 45].

Estos materiales nacen de la necesidad de combinar propiedades de distintos tipos como cerámicos, plásticos o metales [26]. Las propiedades de los materiales compuestos dependen de una serie de factores como propiedades de la matriz y del refuerzo, contenido de refuerzo, orientación del refuerzo, método de producción del material compuesto entre otros. A continuación se presenta un atabla resumen de las propiedades de los biomateriales compuestos [46]. En la tabla 1.1 se presentan varios materiales compuestos poliméricos recogidos de la bibliografía y sus propiedades mecánicas.

**Tabla 1.1** – Propiedades de algunos compuestos de origen natural comparados con PP + fibra de vidrio [15, 46, 47].

	Alargamiento a la rotura (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Almidón+30% yute	2±0,2	26,3±0,55	2,5±0,23
PLA+30% ramina	4,8±0,2	66,8±1,7	-
PLA+30% yute	1,8	81,9±2,9	9,6±0,36
PTP+25% cáñamo	-	62±2	7,2±0,3
PHBV+30% yute	0,8	35,2±1,3	7±0,26
PLLA+30% lino	2,3±0,2	98±12	9,5±0,5
PHB+30% lino	7±1,5	40±2,5	4,7±0,3
PLA+30% lino	1±0,2	53±3,1	8,3±0,6
PP+30% lino	2,7±1,5	29,1±4,2	5±0,4
PP+30% yute	1,4±0,1	47,9±2,7	5,8±0,47
PP+30% fibra de vidrio	3,01±0,22	82,8±4	4,62±0,11

### 1.4.2 Fibras Naturales.

Las fibras naturales son estructuras filamentosas de origen vegetal, animal y mineral con aplicaciones muy diversas, que se pueden hilar para obtener hebras, hilos o cordelería. Como la agricultura, los textiles han sido parte fundamental de la vida humana desde los inicios de la civilización. En el caso de fibras de origen vegetal, muchas de estas se usan para la fabricación de tejidos, cuerdas, papel, refuerzos poliméricos entre otras, fibras como el yute y el bonote se cultivan desde la antigüedad [48]. En Ecuador la mayoría de trabajos realizados con fibras naturales se encamina a objetos artesanales y decorativos realizados por las comunidades y grupos étnicos del país [17].

Existen dos grupos de fibras, las *Fibras vegetales* están las que se extraen de la vellosidad de algunas semillas, como el algodón; de los tallos (o líber), como el lino y el cáñamo; fibras de follajes, como el sisal; y fibras de cáscaras, como las de coco y las *Fibras animales* que son de lana, pelo y secreciones, como la seda [49]. Algunos materiales reforzados con fibras naturales son obtenidos a un bajo costo usando técnicas adecuadas para su obtención. Estas fibras son llamadas fibras

naturales no procesadas. Otras fibras naturales pueden ser procesadas químicamente para mejorar sus propiedades. Estas fibras son generalmente derivadas de la madera [50]. La tabla 1.2 resumen de las propiedades mecánicas de los materias naturales que se utilizan como fibra reforzante.

**Tabla 1.2** – Propiedaes mecánicas de fibras de naturales [51,52].

Fibra	Densidad ( $kg/m^3$ )	Diámetro ( $\mu m$ )	Longitud ( $mm$ )	Alargamiento a la rotura (%)	Resistencia a la tracción ( $MPa$ )	Módulo de young ( $GPa$ )	Módulo específico
Lino	1380-1500	40-600	10-65	1,2-3	343-1500	60-80	26-46
Cáñamo	1350-1480	10-51	5-55	1,6-4,5	580-1110	70	47
Kenaf Núcleo	310	18-37	0,4-1,1	-	-	-	-
Kenaf exterior	1200	12-36	1,4-11	2,7-6,9	295-930	-	-
Yute	1460	5-25	0,8-6	1,5-3,1	187-773	10-30	7-21
Ramio	1440-1550	18-80	40-250	2-4	400-938	61,4-128	27-47
Piña	1500-1560	8-41	3-8	1-3	170-1627	6,21-82	4-53
Banana	1300-1350	50-280	-	3-8	529-914	7-32	5-24
Sisal	1300-1500	7-200	0,8-8	1,9-3	507-855	9,4-28	7-19
Abacá	1300-1500	17-21	-	2,7	400-1289	45-72	35-50
Henequén	1400	8-33	-	3-4,7	430-580	10-16	7-11
Palmera Datilera	463	-	-	-	125-200	-	-
Coco	1150-1460	0,3-3	0,3-3	1,5-25	131-220	4-6	2,58-4,10
Algodón	1210-1600	12-35	15-56	2-10	287-800	5,5-12,6	4,54-7,87
Capoc	-	10-30	8-30	-	-	-	-
Bagazo	550-1250	32-43	0,8-2,8	0,9	20-290	2,7-17	5-14
Bambú	600-800	7-27	1,5-4,4	2,88-3,52	187-1152	8-150	-
Madera	380-550	15-20	-	-	160	23	41-60

### 1.4.3 El bambú

El bambú consiste en muchos haces vasculares con xilema. Un haz vascular consiste en vainas de fibras, dos vasos y otros tubos de tamiz, en los cuales el xilema rodea cada haz vascular. La vaina consiste en muchas fibras. Los componentes químicos primarios de fibra de bambú y xilema son celulosa y lignina, respectivamente [53]. El proceso de explosión de vapor para la fabricación de fibras de bambú es una manera de separar la lignina y la celulosa de los materiales leñosos [54]. El Bambú se corta en rodajas a un tamaño apropiado, después de lo cual se secan adecuadamente. Los haces de fibras se envían entonces a una explosión de vapor donde se someten a explosiones de vapor para abrir la estructura de bambú. Las fibras de bambú, después de la explosión de vapor, se cortan y se tamizan a un tamaño de la fibra. Las fibras naturales a menudo se calientan en la fabricación de compuestos de fibra. Para la fabricación de pellets o para el moldeo por inyección, las fibras naturales se calientan a unos 200 °C durante varios minutos [23].

La resistencia de las fibras de bambú tratadas con explosión de vapor es de alrededor del 80% fibras sin calentar. Muchas fibras naturales muestran menos adhesión con los polímeros convencionales [55]. Con el bambú es difícil eliminar la lignina que rodea las fibras. La lignina muestra pobre adhesión con las resinas; por lo tanto, deben ser tratados para potenciar su uso en aplicacion industrial [56].

### 1.4.4 Plásticos reforzados con fibras de Bambú

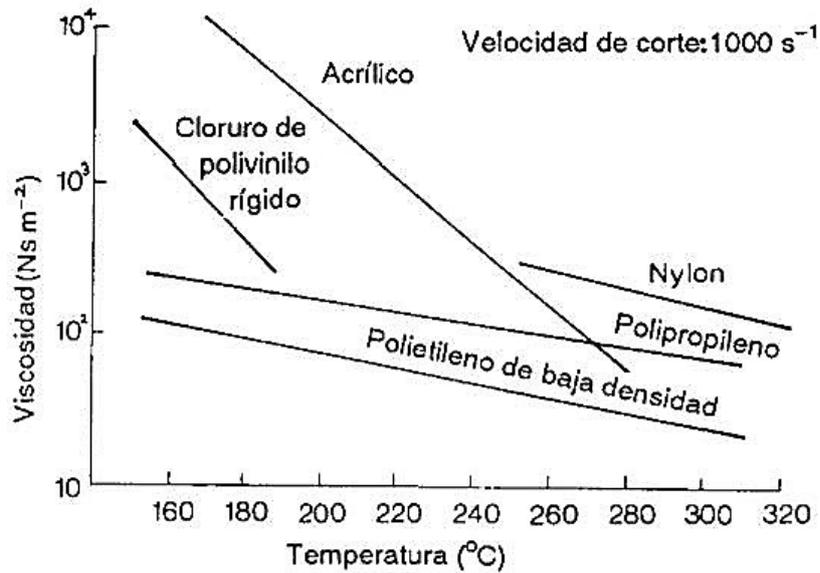
Actualmente, hay muchos tipos de compuestos reforzados disponibles para la producción industrial, con la selección dependiendo del uso y el coste específico [57]. El bambú, se considera generalmente como un recurso natural abundante en países asiáticos y sudamericanos, normalmente existe como un bosque o selva de bambú. La reproducibilidad del bambú es muy buena en comparación con otros árboles. Las fibras de bambú, después del tratamiento, contienen alta resistencia específica comparada con otras fibras, y puede ser comparable a las fibras de vidrio cuando se utilizan en compuestos reforzados [23, 53].

La creación de un ciclo ecológico mediante el uso de fibras naturales reduce la densidad mundial de dióxido de carbono y aumenta la oferta de oxígeno a la atmósfera de la tierra. Reemplazar las fibras de vidrio por fibras naturales, como las fibras de bambú, pueden reducir el uso de energía fósil, la producción de fibras de vidrio y, en consecuencia, reducir la liberación de carbono, dióxido de carbono a la atmósfera; además los árboles de bambú asimilan dióxido de carbono durante la producción [23, 58].

### 1.4.5 Reometría de Polímeros

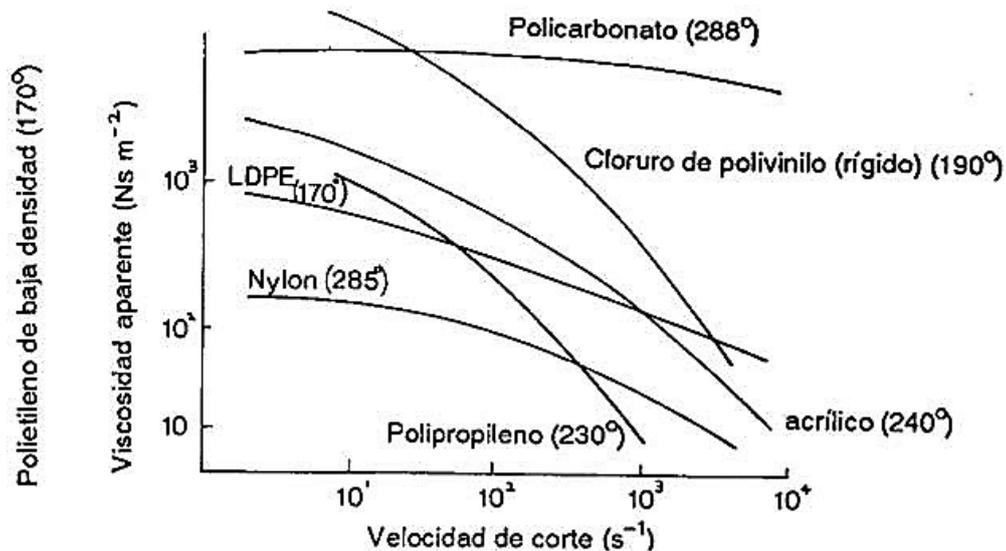
El polímero en estado líquido o semisólido tiene propiedades reológicas de deformación y flujo del material [59]. El conocimiento de las causas y el control de este comportamiento de flujo hacen que la reometría ocupe un papel fundamental [60, 61]. La reometría es el conjunto de técnicas desarrolladas para llevar a cabo mediciones de parámetros reológicos. Las propiedades de los polímeros en estado líquido y semisólido son de gran interés en los sectores industriales e investigativos [42, 62].

El principal factor es el MFI, es un indicador de flujo para materiales fundidos, el cual se usa para comparar diferentes grados dentro de un tipo de polímero, se tiene una relación inversa con la viscosidad del polímero en estado fundido [63, 64]. El índice de fluidez del material fundido puede variar mucho entre las clases de un tipo de polímero, un índice de fluidez bajo significa un peso molecular alto y viceversa [23, 25]. Este indicador es usado por diferentes proveedores para comparar grados de polímero, sin embargo un reómetro puede obtener propiedades de dichos polímeros, como la viscosidad y por lo tanto curvas de flujo en donde se representa la viscosidad en función de la velocidad de cizalla, índices de tixotropía, esfuerzos de fluencia, módulos elástico y viscoso de un material visco elástico, rangos de visco elasticidad lineal, tiempos de relajación, creación de curvas maestras mediante TTS (“Principio de Superposición Tiempo/Temperatura”) para polímeros [23, 65, 66]. En la figura 1.1 se muestra el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros.



**Figura 1.1** – Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros [66].

Dependiendo del tipo de polímero, la información que se obtiene es alta. No se puede hablar de la viscosidad como de una propiedad de los materiales termoplásticos [67]. La viscosidad aparente útil presenta una variación en función de la velocidad de deformación mediante un reograma isoterma, tal y como el representado en la figura 1.2. En la tabla 1.3 se dan algunos valores representativos de las viscosidades de varios termoplásticos a una velocidad de corte típica en extrusión de  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . En la tabla 1.3 se señala la sensibilidad que tiene la viscosidad a la temperatura en los polímeros fundidos [66,68].



**Figura 1.2** – Viscosidad aparente en función de la velocidad de deformación por corte de algunos polímeros [66]

**Tabla 1.3** – Viscosidades de algunos polímeros fundidos importantes [66, 69].

Material	Viscosidad Aparente (Pa.s) a $\dot{\gamma} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ y a la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )											
	150	170	190	210	230	250	270	290	310	360	380	400
PELD	115	85	65	50	40	30	25	20				
PVC	165	100	60									
PPC		360	310	270								
Eva		220	175	145	115	95						
CPP			115	105	85	75	65	60				
PP+25% de fibras de Vidrio			145	125	110	95						
POM			290	200	140							
HIPS				140	115	95						
SAN				210	175	130	90					
ABS				260	195	140						
PMMA				610	300	150	60					
Noryl						240	200	160				
PC						790	570	260	190			
Nylon 6,6							115	80	55			
PEK										480	400	350

#### 1.4.5.1 Comportamiento Reológico de los Compuestos de Bambú

Los compuestos de PP + bambú tienen valores de viscosidad que varían de acuerdo a la velocidad de cizallamiento que son representado en la figura 1.3. Las características de cizallamiento según resultados [23] del material sin reforzar se superponen para proporcionar una comparación. Como se observa en la figura 1.3, cuando la velocidad de cizallamiento es menor que  $\dot{\gamma} = 6[1/s]$ , se define una región de velocidad de cizallamiento inferior donde las viscosidades para 10%, 20% y 30% son mayores que para el material de la matriz. Este resultado es causado por la fricción hidrodinámica [5, 6] entre las fibras ya que el aumento de las concentraciones de fibra produce un orden creciente de viscosidad. La característica de reducción de la viscosidad cortante es la naturaleza de la propia masa fundida de la matriz. Sin embargo, cuando la velocidad de cizallamiento aumenta más allá de  $\dot{\gamma} = 6[1/s]$ , la tendencia (la característica de cizalladura) se ve que la viscosidad disminuye, es decir, la caída de viscosidad de cizallamiento se produce para concentración de tales como 30% y a velocidades más altas, la viscosidad se igualara en un punto.

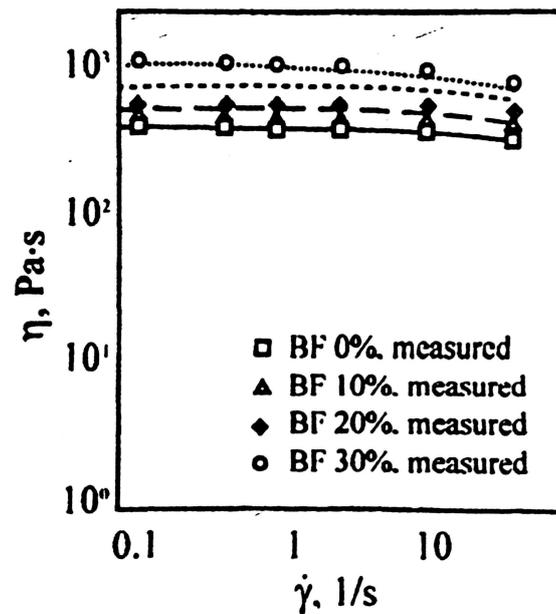


Figura 1.3 – Viscosidad Cortante de los Compuestos de PP+Bambú [23].

### 1.4.6 Proceso de Fabricación con Polímeros

Cuando se comparan las propiedades del polímero en los procesos de transformación que existen hoy en día, para los sistemas de más baja viscosidad se necesita plantas de baja consumo de energía, pero en técnicas como extrusión e inyección de plásticos, se requiere maquinaria más potente. Para conocer las razones de este fenómeno hay que examinar las propiedades reológicas de los estados líquidos de los polímeros [46, 70]. En la tabla 1.4 se encuentran los rangos de esfuerzo de cizalladura para cada proceso.

Tabla 1.4 – MFI recomendado para los procesos de transformación de polímeros [71]

Proceso	Melt Flow recomendado
Moldeo por Compresión, Calandrado y Extrusión	0,1-8
Inyección	5-100
Tubería	0,1-0,5
Película TWQ, Cast	7-11
BOPP	2-7
Extrusión de cintas	2-4
Blown Film	0,3-1,5
Calandrado	1,5-3
Multifilamento	8-35
Spunbond	25-35
Calculo de Extrusión	20-25

### 1.4.6.1 Viscosidad Básica

En la tabla 1.5 se presenta claramente que las sustancias se hacen más espesas conforme se desciende en la tabla, pero es necesario contar con más información para saber cómo se acomodan los diversos modelos poliméricos.

**Tabla 1.5** – Lista de Sustancias en viscosidad creciente [66].

Substancia	"Fluidez o Consistencia"
Aire	Gaseoso
Agua	Fluido
Aceite de Oliva	Líquido
Glicerina	Líquido Espeso
Jarabe Dorado	Jarabe
Brea	Sólido Fluidificante
Vidrio	Sólido Rígido

### 1.4.6.2 Esfuerzo de Corte y Velocidad de Corte

Al movimiento del fluido se opone la reacción viscosa del fluido, el movimiento es de corte por lo que la reacción es la viscosidad cortante. Sabemos que el esfuerzo cortante es

$$\tau = \frac{F}{A} (Nm^{-2}) \quad (1.1)$$

La velocidad de corte se encuentra a partir de la velocidad relativa del fluido a una distancia  $L$ , por lo tanto es:

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{L} (s^{-1}) \quad (1.2)$$

La viscosidad se considera como una propiedad constante teóricamente del material que provoca un esfuerzo cortante en el fluido.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

El valor del esfuerzo cortante depende de la velocidad de corte y la viscosidad del fluido. Si el fluido es de baja viscosidad, el esfuerzo cortante para deformarlo será pequeño, es decir valores bajos de  $\tau$  generan valores altos de  $\dot{\gamma}$ , si  $\eta$  es bajo [66].

### 1.4.6.3 Velocidad de Corte de Diferentes procedimientos

Una alta velocidad no siempre es significativa gran velocidad de manufactura, es decir altos volúmenes de producción. La velocidad de corte  $\dot{\gamma}$ , está relacionada con velocidad de deformación de los

elementos del fluido [65, 66]. La tabla 1.6 resume las velocidades de corte para algunas técnicas de transformación de polímeros.

**Tabla 1.6** – Velocidad de corte de las técnicas de transformación de polímeros [66].

Técnica	velocidad de Corte ( $s^{-1}$ )
Moldeo por compresion	1-10
Calandrado	10-100
Estrusion	100-1000
Moldeo por inyeccion	1000-10 <sup>5</sup>
Recubrimiento con rodillo Invertido	3x10 <sup>3</sup>

#### 1.4.6.4 Viscosidad de los sistemas poliméricos

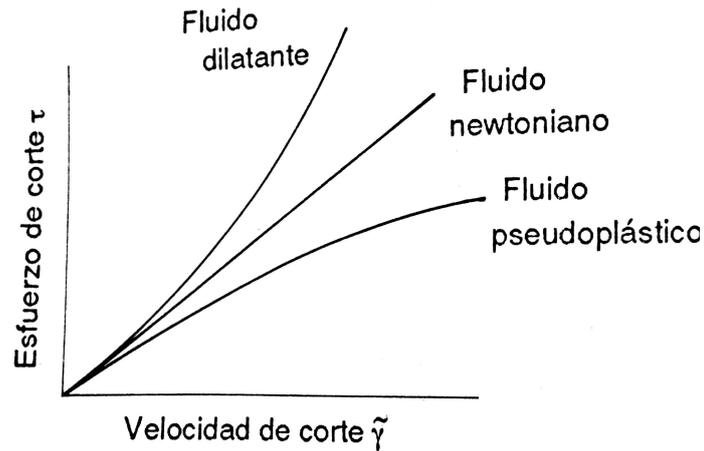
En la tabla 1.7 un resumen de diversos materiales con sus respectivas Viscosidades

**Tabla 1.7** – Viscosidad de diversos materiales [66].

Sustancia o Sistema	Viscosidad ( <i>MPa</i> )	Consistencia
Aire	10 <sup>-5</sup>	Gaseosos
Agua	10 <sup>-3</sup>	Fluido
Sistemas de Látex Poliméricos	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-2</sup>	Líquidos
Aceite de Oliva	10 <sup>-1</sup>	Líquidos
Pintura	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>-1</sup>	Cremoso
Plastisoles de Cloruro de polivinilo	1-3x10 <sup>-1</sup>	Con consistencia de Pintura
glicerina	10	Líquidos Espeso
Resinas para combinaciones resina/Vidrio	50	Jarabe
Jarabe dorado	10 <sup>2</sup>	Jarabe
Poliuretanos Líquidos	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	Jarabe
Polímeros Fundidos	10 <sup>2</sup> -10 <sup>6</sup>	Amelcochado
Cauchos sin Curar	10 <sup>2</sup> -10 <sup>6</sup>	Plasticina Rígida
Compuestos para moldeo por laminas	10 <sup>2</sup>	Pasta
Brea	10 <sup>9</sup>	Solido Fluidificante
Vidrio	10 <sup>21</sup>	Solido Rígido

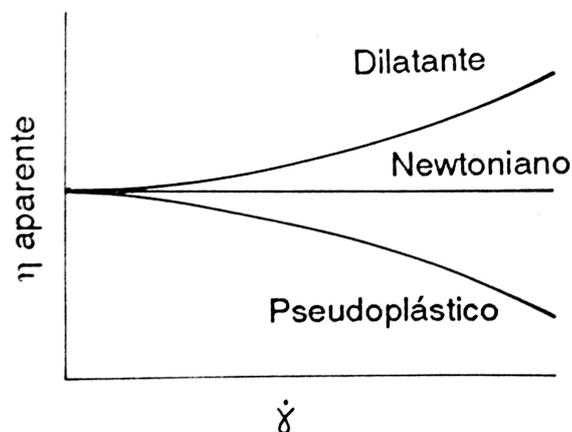
#### 1.4.7 Fluidos No Newtonianos

Para materiales complejos como los polímeros fundidos la viscosidad no es constante, la relación que existe entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte no es lineal. Este comportamiento no lineal se lo llama no newtoniano [72]. Un fluido no newtoniano es aquél cuya viscosidad varía con el gradiente de tensión que se le aplica, es decir, se deforma en la dirección de la fuerza aplicada. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido newtoniano [73]. En la figura 1.4 se presenta el comportamiento newtoniano y no newtoniano.



**Figura 1.4** – Comportamiento newtoniano y no newtoniano [66].

Este comportamiento depende si el material se adelgaza (adelgazamiento pseudoplástico) o espesa (espesamiento dilatante). La mayoría de polímeros fundidos y compuestos se comportan de una manera pseudoplástica. A medida que aumenta el esfuerzo cortante, las moléculas tienden a pasar a la forma lineal y a estar totalmente orientadas, lo que explica el hecho de que la curva de flujo pueda ser rectilínea a altos valores de  $\dot{\gamma}$ . Inicialmente cuando el  $\dot{\gamma}$  aplicado es muy pequeño, no se produce la orientación preferencial de las moléculas, lo que da lugar a comportamiento newtoniano en la zona inicial de la curva de flujo como se ve en la figura 1.5 [66, 73].



**Figura 1.5** – Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de corte [66].

### 1.4.8 Modelos reológicos de Polímeros

Se han propuesto una serie de expresiones complejas para describir de manera exacta el comportamiento de los flujos pseudoplástico y dilatante [72].

### 1.4.8.1 Ley de Potencia

En la práctica, se encuentra que la mayoría de los polímeros se pueden modelar adecuadamente dentro de un intervalo útil de velocidades de corte mediante una expresión de tipo ley de potencial o de Ostwald (modelo de dos parámetros) [74,75]. Este es un modelo utilizado para representar las curvas de flujo de los polímeros, esta puede explicar el comportamiento newtoniano, dilatante y pseudoplástico [76].

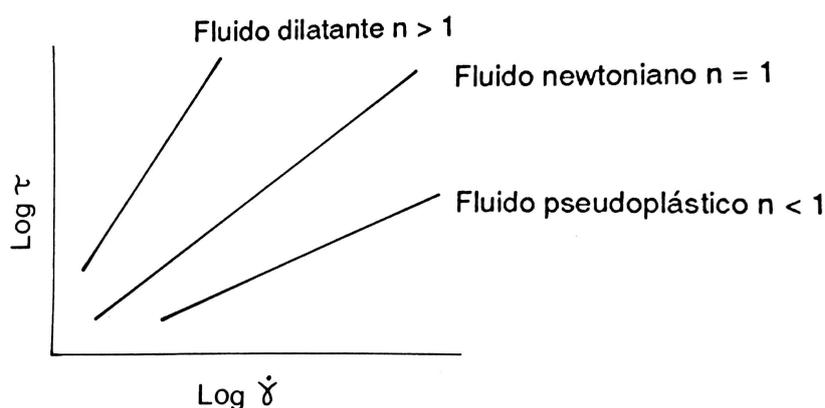
$$\tau = \kappa |\dot{\gamma}|^n \quad (1.4)$$

Donde:

$n$  es el exponente de la ley potencial, que nos da una idea del grado de desviación del fluido con respecto al newtoniano. Es una constante empírica denominada índice del comportamiento del flujo y  $\kappa$  es el índice de consistencia.

El índice de consistencia  $k$  es una medida de la viscosidad newtoniana a bajas velocidades de deformación por corte. El exponente  $n$ , se lo conoce como el *índice de comportamiento de flujo*, se utiliza normalmente como indicador de la dilatación o pseudoplasticidad de una sustancia. De acuerdo con la ley de Newton, la viscosidad es el valor cociente entre el esfuerzo y la velocidad de deformación, de modo que el valor de la pendiente de las curvas de flujo es  $n-1$  como se ve en la figura 1.6.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \kappa |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (1.5)$$



**Figura 1.6** – Fluidos que siguen la ley de Potencia [66].

Si el valor del índice de comportamiento al flujo,  $n$ , es 1, la ley de potencias representa la zona newtoniana, mientras que si  $n < 1$  representa la zona de comportamiento pseudoplástico, que será tanto más alejado de la idealidad cuanto menor sea el valor de  $n$  [77]. El modelo de ley de potencia es el modelo más simple que predice con precisión la región de adelgazamiento por cizallamiento en

la curva de viscosidad. El modelo también incluye la dependencia de la temperatura de la viscosidad. El modelo de ley de potencia se puede expresar como:

$$\eta = m_0 \exp^{-a(T-T_{ref})} |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (1.6)$$

donde

$m_0$  es índice de consistencia y  $a$  es el factor experimental  $1/^\circ C$

#### 1.4.8.2 Modelo de viscosidad Cross-WLF

Describe la temperatura, velocidad de cizalla y la dependencia de presión de la viscosidad. El modelo de viscosidad viene dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (1.7)$$

donde:  $\eta$  es la viscosidad de masa fundida (Pa s),  $\eta_0$  es la deformación viscosa o el "límite Newtoniano" en el que la viscosidad aproxima a una constante a velocidades de cizalla muy bajas,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de cizalla (1/s),  $\tau^*$  es la tensión crítica de nivel en la transición al adelgazamiento de cizalla, determina mediante el ajuste de curva, y  $n$  es el índice potencial en el régimen de velocidad de cizalla alta, determinado mediante el ajuste de curva.

La deformación viscosa viene dada por la ecuación:

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[ -\frac{A_1 (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad (1.8)$$

donde  $T$  es la temperatura (K),  $T^*$  es la temperatura de transición de vitria, determinada por curva de accesorio de tubería,  $p$  es la presión (Pa) y donde  $D_1$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  y  $D_3$  son coeficientes de ajuste de datos.

La temperatura de transición vitria viene dada por la ecuación:

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (1.9)$$

donde  $D_2$  es un coeficiente de ajuste de datos [31, 78].

El modelo de Cross-WLF muestra que ha velocidades cortantes altas ( $\dot{\gamma}$ ) la viscosidad ( $\eta$ ) alcanza la estabilización, sufre grandes caídas de viscosidad entre velocidades cortantes de 0 a 1500, luego de este rango la viscosidad se estabiliza casi linealmente como se puede ver en la figura 1.7

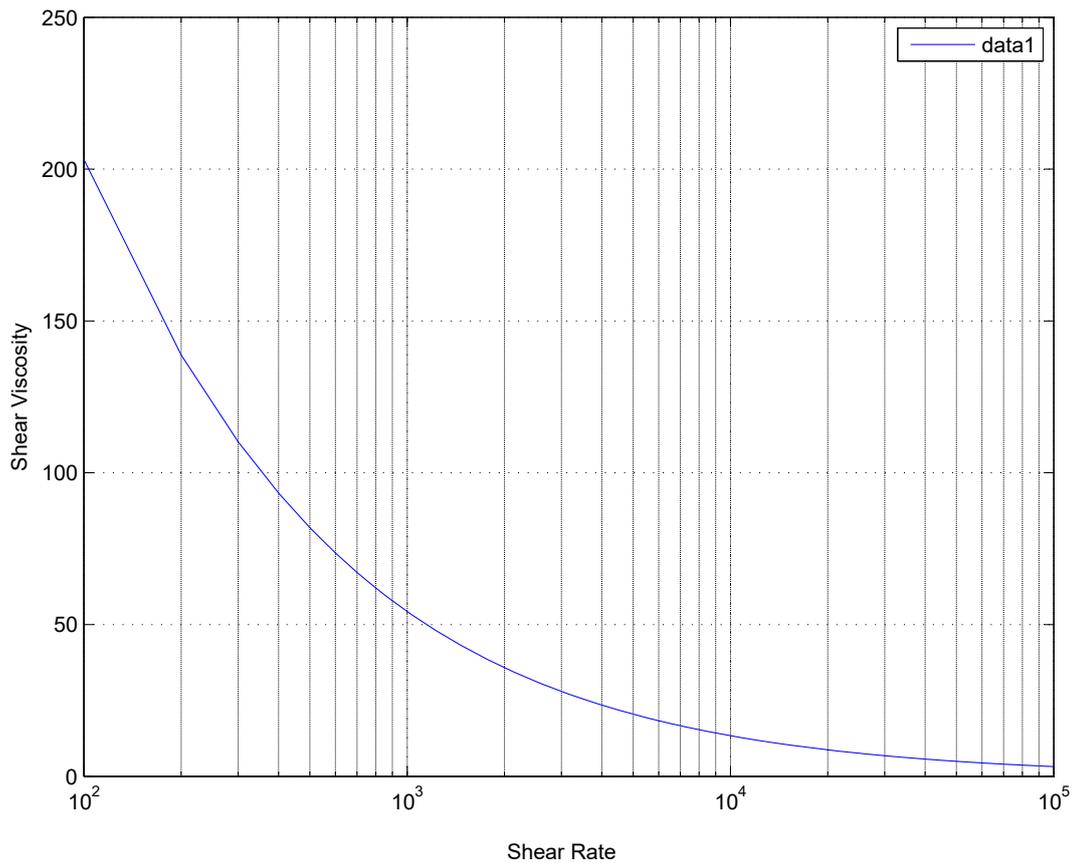


Figura 1.7 – Comportamiento del modelo de Cross-WLF

## 1.4.9 Inyección de Polímeros

El proceso de inyección de polímeros consiste en calentar los pellets de un material termoplástico para transformarlos en un tipo masa a través de un cilindro de plastificación, dándole la forma final al molde. En el proceso de inyección de plástico es necesario optimizar la relación producción - calidad a través del ajuste adecuado de los parámetros [30].

Los parámetros más importantes para un proceso de inyección son los siguientes: ciclo de moldeo en la inyección de plástico, relaciones de presión, volumen y temperatura en la inyección de plástico. Para obtener un proceso de inyección eficiente, las relaciones entre presión, volumen y temperatura juegan un papel importante, cristalización y deformación de la pieza al enfriarse en el proceso de inyección de plástico, temperatura de la colada en la inyección de plástico, coloración de la pieza en la inyección de plástico [32].

### 1.4.9.1 Cálculo de parámetros de Inyección

Para calcular los parámetros principales de una máquina de inyección se necesita conocer el volumen del artículo, la velocidad y la presión específica de inyección y la fuerza de cierre del molde, el proceso principal es la presión de la masa fundida en el período de llenado de molde. El ciclo de

moldeo por inyección se divide en tres fases: llenado de molde, presión de sostenimiento y caída de presión en el interior del molde [19, 79]. La presión en el molde durante su llenado es siempre menor que las presiones que surgen en la segunda parte del ciclo.

#### 1.4.9.2 Modelo de V. K. Savgorodny

La estructura y potencia del mecanismo de inyección se calculan partiendo de las condiciones de llenado de molde, se conoce que la distribución de la presión en el molde durante la presión de sostenimiento determina el esfuerzo necesario para cerrar el molde. La distribución de la presión relativa, a lo largo del molde se determina por las siguientes formulas [79, p.139]:

Para molde cilíndrico:

$$\xi_{med} = \frac{P_r}{P_0} = 0.585 \cdot \exp \left\{ -1.72 \cdot 10^{-9} \frac{rR^2}{m^k H^k} f_1 \right\} + 0.415 \cdot \exp \left\{ -2.48 \cdot 10^{-8} \frac{rR^2}{m^k H^k} f_1 \right\} \quad (1.10)$$

Para molde rectangular:

$$\xi_{med} = \frac{P_x}{P_0} = 0.585 \cdot \exp \left\{ -1.342 \cdot 10^{-9} \frac{xX^2}{m^k H^k} f \right\} + 0.42 \cdot \exp \left\{ -2.76 \cdot 10^{-8} \frac{xX^2}{m^k H^k} f \right\} \quad (1.11)$$

siendo:

$P_r$  y  $P_x$ , las presiones a las distancias  $r$  y  $x$  de la entrada del molde,  $[N/m^2]$ ;  $P_0$ , la presión en la entrada del molde,  $[N/m^2]$ ;  $R$  y  $X$ , las dimensiones máximas del molde,  $[m]$ ;  $r$  y  $x$ , las dimensiones variables del molde,  $[m]$ ;  $H$ , el espesor del artículo a moldear,  $[m]$ ;  $m$  y  $k$ , las constantes de la curva del flujo;

$$f = \left( \frac{10^{5-2k} m^k}{N \cdot \text{seg}^k} \right) \text{ y } f_1 = \left( \frac{10^{7-2k} m^{k-1}}{N \cdot \text{seg}^k} \right) \quad (1.12)$$

son los coeficientes adimensionales que dependen del comportamiento reológico del compuesto.

La presión media de cálculo en el molde será:

$$\xi_{med} = \frac{l}{L} \int_0^L \xi(l) dl \quad (L = X, R; l = x, r); \quad (1.13)$$

Para molde redondo:

$$\xi_{med} = \frac{34 \cdot 10^7 m^k H^k}{R^3} \left[ 1 - \exp \left\{ -1.72 \cdot 10^{-9} \frac{R^3 f_1}{m^k H^k} \right\} \right] + \frac{1.67 \cdot 10^5 m^k H^k}{R^3} \left[ 1 - \exp \left\{ -2.48 \cdot 10^{-8} \frac{R^3 f_1}{m^k H^k} \right\} \right] \quad (1.14)$$

Para molde rectangular:

$$\xi_{med} = \frac{43 \cdot 10^7 m^k H^k}{X^2} \left[ 1 - \exp \left\{ -1.342 \cdot 10^{-9} \frac{X^2 f}{m^k H^k} \right\} \right] + \frac{1.52 \cdot 10^5 m^k H^k}{X^2} \left[ 1 - \exp \left\{ -2.76 \cdot 10^{-8} \frac{X^2 f}{m^k H^k} \right\} \right] \quad (1.15)$$

La fuerza de cierre del molde viene dada por:

$$P = \xi_{med} S, \quad (1.16)$$

Donde:

$\xi_{med}$ , es la presión media de cálculo del molde y  $S$ , la superficie del artículo.

### 1.4.9.3 Modelo de Stevenson

Otro modelo de cálculo para ayudar al ingeniero de procesamiento de polímeros en la búsqueda de las presiones de inyección requerida y la correspondiente fuerza de sujeción del molde es el siguiente, Stevenson [80, p.18] genera un conjunto de grupos adimensionales y gráficos correspondientes para el llenado del molde no isotérmico con polímero no newtoniano. Se definen cuatro grupos adimensionales. La tabla 1.8 muestra las constantes de dependencia de la temperatura de los termoplásticos comunes [81].

**Tabla 1.8** – Índices de ley de potencia e índice de consistencia, dependencia de temperatura para termoplásticos comunes [13, 80, 82]

Polymer	$m_o (Pa \cdot s^n)$	$n$	$a (1/^\circ C)$	$T_{ref} (^\circ C)$
HDPE	$2,0 \times 10^4$	0,41	0,002	180
LDPE	$6,0 \times 10^3$	0,39	0,013	160
Nylon 66	$6,0 \times 10^2$	0,66	-	290
PC	$6,0 \times 10^2$	0,98	-	300
PP	$7,5 \times 10^3$	0,38	0,004	200
PS	$2,8 \times 10^4$	0,28	0,025	170
PVC	$1,7 \times 10^4$	0,26	0,019	180

El coeficiente adimensional de temperatura  $\beta$  determina la intensidad del acoplamiento entre la ecuación de energía y el equilibrio. Se define por

$$\beta = \alpha (T_i - T_m) \quad (1.17)$$

Donde  $T_i$  y  $T_m$  son las temperaturas de inyección y molde, respectivamente.

El coeficiente adimensional de tiempo  $\tau$  es la relación entre el tiempo de llenado,  $t_{fill}$  y el tiempo para el momento térmico por conducción, definido por

$$\tau = \frac{t_{fill}k}{h^2\rho c_p} \quad (1.18)$$

El número de Brinkman  $Br$  es la relación de la energía generada por la disipación viscosa y la energía transportada por conducción. Para un modelo no-isotérmico, no-newtoniano es

$$Br = \frac{m_0 e^{-aT_i} h^2}{k(T_i - T_m)} \left( \frac{R}{t_{fill}h} \right)^{n+1} \quad (1.19)$$

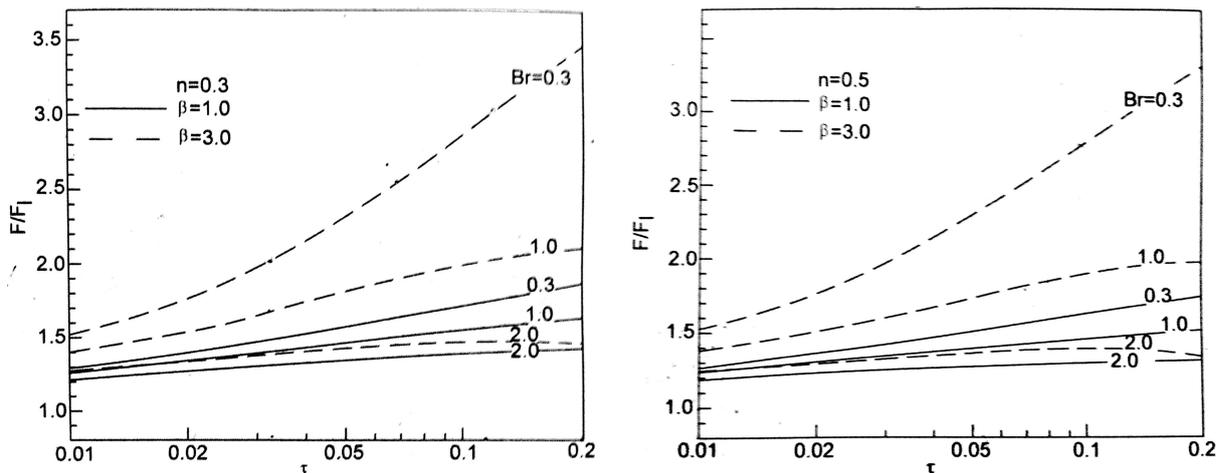
El índice de ley de potencia  $n$  del modelo de ley de potencia refleja el comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento de la masa fundida de polímero.

Una vez calculados los parámetros adimensionales, se leen las presiones de inyección adimensionales ( $\Delta p / \Delta p_1$ ) y las fuerzas de cierre adimensionales ( $\Delta F / \Delta F_1$ ) de las figuras 1.8 y 1.9

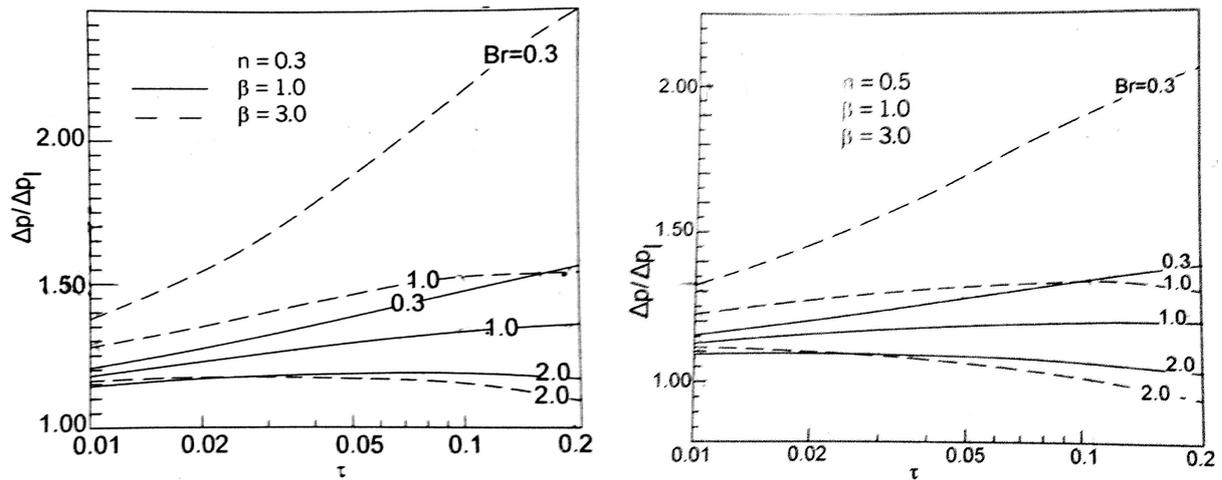
La presión isotérmica y la fuerza se calculan utilizando

$$\Delta p_1 = \frac{m_0 e^{-aT_i}}{1-n} \left( \frac{1+2n}{2n} \frac{R}{t_{fill}h} \right)^n \frac{R}{h} \quad (1.20)$$

$$F_1 = \pi R^2 \left( \frac{1-n}{3-n} \right) \Delta p_1 \quad (1.21)$$

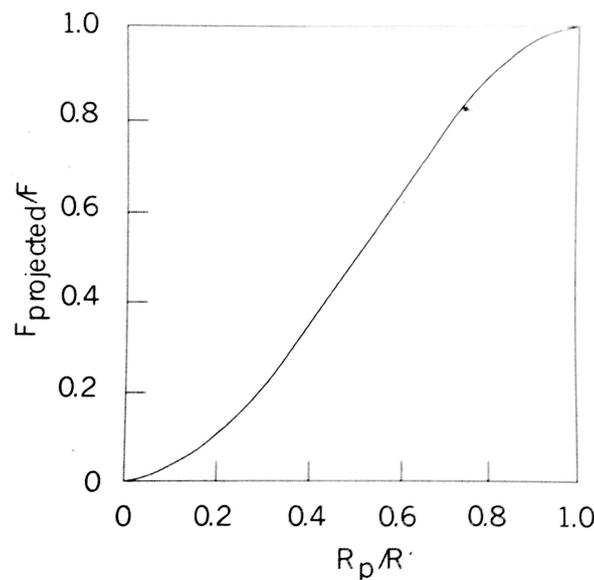


**Figura 1.8** – Fuerza de sujeción sin dimensiones frente a grupos adimensionales. [80].



**Figura 1.9** – Presión de Inyección sin dimensiones frente a grupos adimensionales. [80].

Dado que el área de la pieza a menudo excede el área proyectada, la figura 1.10 puede usarse para corregir la fuerza de sujeción calculada



**Figura 1.10** – Corrección de la fuerza de apriete para el área proyectada. [80].

#### 1.4.9.4 Cálculo por nomogramas

Cuando no se dispone de computadoras ni de programas de cálculo, se recurren a reglas empíricas mediante el uso de diagramas. Se han seleccionado dos nomogramas como se ve en la figura 1.11 y 1.12. Donde la presión específica en la cavidad esta en función de tres variables diferentes (ver figura 1.11) y otra donde la superficie moldeada proyectada (área frontal) esta en función de la fuerza de cierre y la presión específica en la cavidad [83, p.339].

Un ejemplo de cálculo para el uso de la figura 1.11: para moldear una pieza de policarbonato, se usa la escala C que cuenta con un espesor de 1.5 mm y una longitud de recorrido de flujo de 200

mm, presenta una presión específica en la cavidad del molde puede alcanzar los 500 bar ( $5kN/cm^2$ ). Para moldear piezas de la misma dimensión, con material menos viscoso, obviamente se requerirá una presión específica más baja con escalas A y B.

Un ejemplo de cálculo para el uso de la figura 1.12: una máquina con fuerza de cierre de 300 toneladas (3000 kN) puede moldear partes con una superficie proyectada de  $600\text{ cm}^2$  con una presión en la cavidad de 500 bar. Con una presión de 1000 bar, la superficie de moldeo se reduce a  $300\text{ cm}^2$

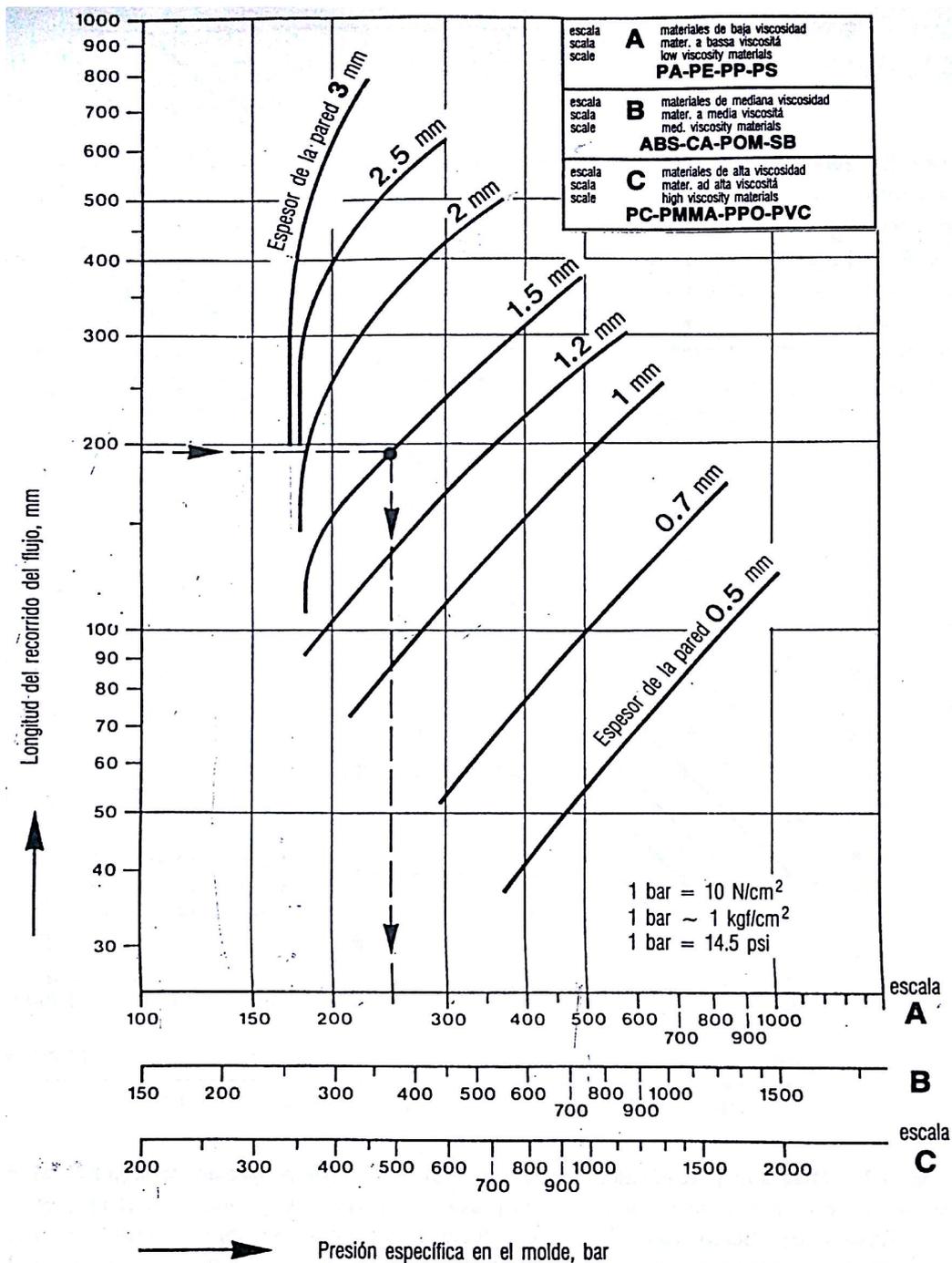
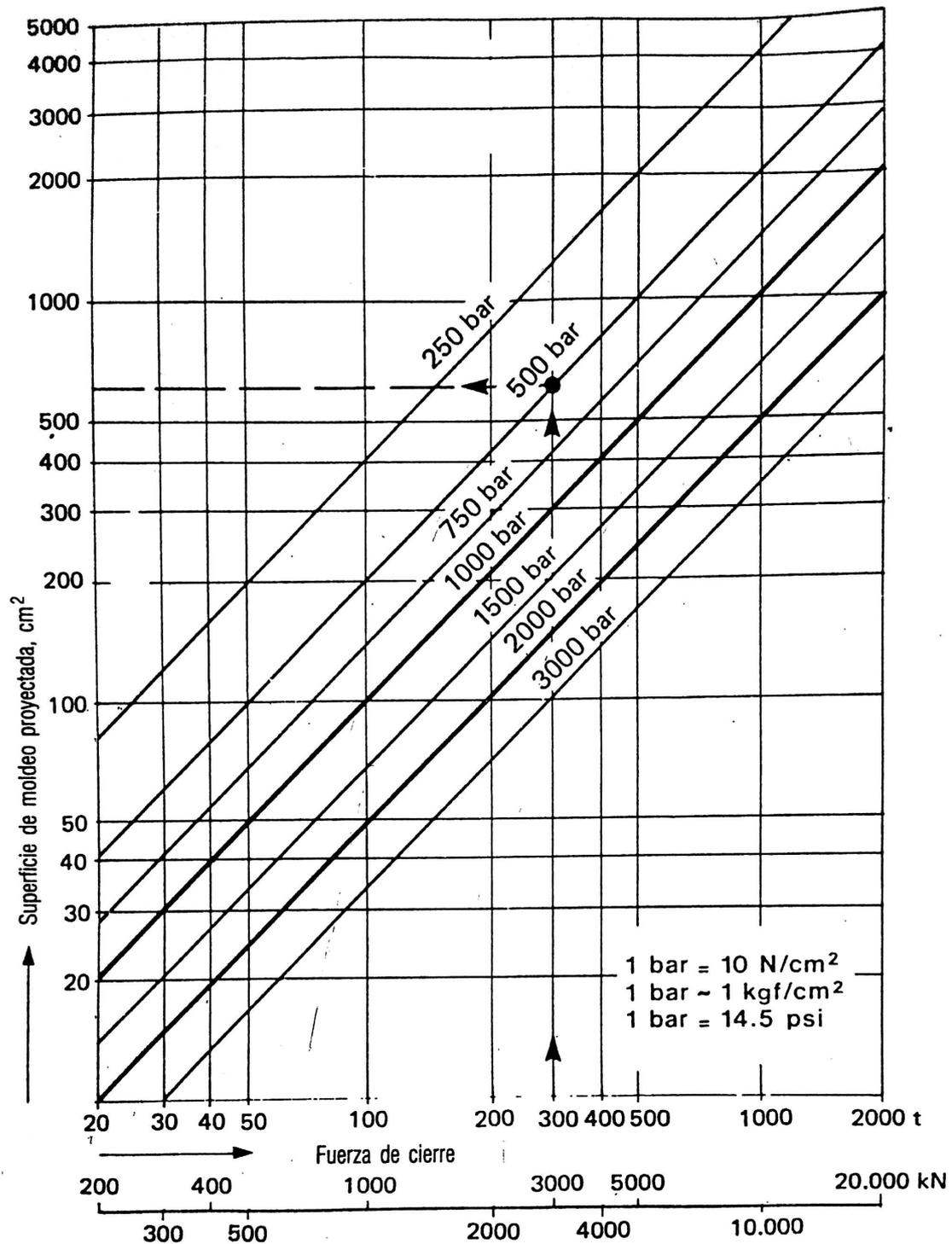


Figura 1.11 – Diagrama para el cálculo aproximado de PRESIÓN ESPECÍFICA EN LA CAVIDAD DEL MOLDE en función del espesor de la pieza, de la longitud de la trayectoria del flujo y de la viscosidad del material en estado fundido [83].



**Figura 1.12** – Diagrama para el cálculo de la superficie de moldeo proyectada (o área frontal) en función de la fuerza de cierre de la máquina y la presión de inyección (actuando en el molde) [83].

#### 1.4.9.5 Modelo de cálculo del tiempo de refrigeración de V. K. Savgorodny

La velocidad de refrigeración disminuye al ceder la presión del material. Para calcular el tiempo de refrigeración la ecuación 1.22 [79, p.71].

$$\frac{t - t_m}{t_0 - t_m} = \frac{L}{\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \exp \left\{ - [2n-1]^2 \frac{\pi^2 \lambda \tau}{c \gamma \delta^2} \right\}; \quad (1.22)$$

donde:

$\tau$ , es el tiempo de refrigeración, [h];  $\delta$ , es el espesor del artículo, [m];  $\lambda$ , la conductibilidad térmica del material, [Joules/(m · grad · h)];  $c$ , el calor específico del material termoplástico, [Joules/(kg · grad)];  $\gamma$ , la densidad del material, [kg/m<sup>3</sup>];  $t$ , la temperatura de refrigeración del artículo, [°C];  $t_m$ , la temperatura del molde, [°C];  $t_0$ , la temperatura del material inyectado, °C;  $n$  y el número de orden del exponente de descomposición de la serie de Fourier.

El tiempo necesario para enfriar el centro de una pieza plana hasta la temperatura  $\tau$  viene dado por:

$$\tau = 30.4 \cdot 10^5 \frac{\delta^2}{\alpha} \log \left( 0.785 \frac{t - t_m}{t_0 - t_m} \right) \text{ seg.} \quad (1.23)$$

El tiempo necesario para enfriar el centro del bebedero hasta la temperatura  $\tau$  se obtiene por:

$$\tau = 57.1 \cdot 10^5 \frac{R^2}{\alpha} \log \left( 0.62 \frac{t - t_m}{t_0 - t_m} \right) \text{ seg.} \quad (1.24)$$

aquí

$R$  es el radio del bebedero,  $m$  y  $\alpha$  el coeficiente de conducción de la temperatura,  $m^2/\text{seg}$ .

#### 1.4.9.6 Modelo de cálculo del tiempo de refrigeración de Morton-Jones

Otra forma de calcular la velocidad del enfriamiento es usando la *difusividad térmica*,  $\alpha$  [66, p.66-68]

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (1.25)$$

En donde  $k$  es el coeficiente de conductividad térmica,  $\rho$  densidad y  $C_p$  es el calor específico.

Con la difusividad térmica se encuentra el número de Fourier. La ecuación de Fourier para el flujo de calor no estacionario en una dirección, que es el fenómeno en estudio, relaciona la dimensión y el tiempo con el enfriamiento.

$$\frac{d^2}{dx^2} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad (1.26)$$

en donde  $x$  es la dimensión del molde,  $T$  es la temperatura y  $t$  es el tiempo.

Las soluciones de esta ecuación son series infinitas y se usa un método gráfico. Se determinan los grupos adimensionales  $F_0$  y  $\Delta T$

$$F_0 = \frac{\alpha t}{x^2} \quad (1.27)$$

En donde  $\alpha$  es la difusividad térmica,  $t$  es el tiempo de enfriamiento y  $x$  es la dimensión del moldeado.

$$\Delta T = \frac{T_3 - T_2}{T_1 - T_2} \quad (1.28)$$

donde  $T_1$  es la temperatura inicial del material fundido,  $T_2$  es la temperatura del medio de enfriamiento (temperatura de la superficie del molde),  $T_3$  la temperatura de la pieza moldeada en el tiempo  $t$  y  $x$ .

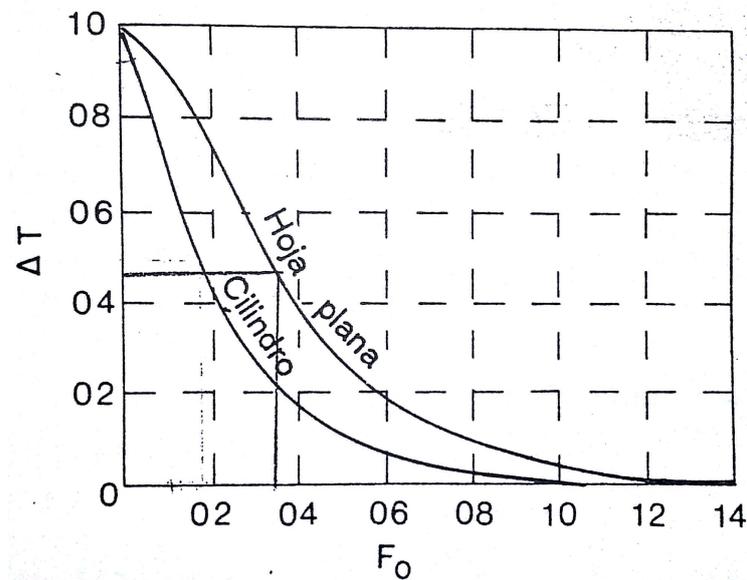
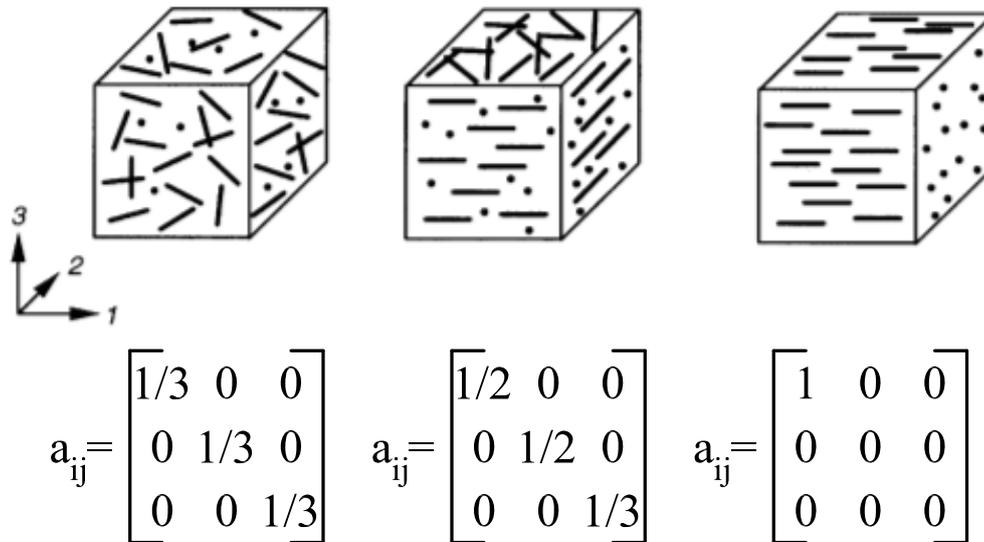


Figura 1.13 – Gradiente de temperatura comparado con el número de Fourier [66].

### 1.4.10 Orientación de Fibras Cortas

Las fibras cortas que se utilizan como refuerzo pueden introducirse en la matriz con orientaciones diversas [84]. Por otro lado, la incorporación de fibras cortas reforzantes permite aumentar la rigidez y resistencia de estos materiales manteniendo la posibilidad de su transformación mediante las técnicas convencionales empleadas para procesar termoplásticos [7, 48, 74].

El tensor de orientación de segundo orden, representa una orientación promedio de un conjunto de fibras cortas a partir de la información de cada fibra. A continuación se presentan las posibles interpretaciones físicas que puede presentar el tensor de orientación [49, 85].



**Figura 1.14** – Ejemplos de diferentes estados del tensor de orientación. a) Aleatorio 3D b) Aleatorio 2D c) Alineado [9].

### 1.4.11 Sistemas de Simulación de Inyección Polímeros

El desarrollo tecnológico exige la aplicación de programas de simulación de llenado de moldes, especialmente en el caso de piezas de plástico de geometría complicada cuya realización práctica con los métodos tradicionales sería casi imposible de seguir. El desarrollo de métodos de cálculo numérico por ordenador y con la aparición de ordenadores cada vez más potentes, está permitiendo la implementación cada vez más extensiva de técnicas CAD/CAE para el cálculo y diseño de piezas de plástico [86]. Comercialmente existen diversos paquetes informáticos para el diseño de moldes y control del proceso de inyección que proporcionan al ingeniero nuevas herramientas para el diseño. La utilización de la simulación numérica reduce la probabilidad de cometer errores y disminuye costes en la fabricación, en el proceso de fabricación, y en la falta de calidad del producto final [27].

Una de las más importantes técnicas de simulación numérica es el método de los elementos finitos/diferencias finitas, cabe recalcar el hecho de la importancia de una correcta modelización de la geometría y discretización del molde, de la caracterización de los materiales (polímero, molde y refrigerante), parámetros de proceso, ecuaciones aproximadas que gobiernan los campos de temperatura, flujo y presiones del sistema, y de los diferentes algoritmos de cálculo [30]. Inevitablemente, el desarrollo tecnológico de nuestra sociedad exige la aplicación de programas de simulación de llenado de moldes, especialmente en el caso de piezas de plástico de geometría complicada cuya realización práctica con los métodos tradicionales sería casi imposible de seguir [20, 27].

El análisis del flujo dentro del molde en la etapa de llenado, es el punto de análisis base de los software de simulación de inyección de plástico, es por ello que los software presentan distintos modelos matemáticos que simulan el comportamiento viscoso para materiales termoplásticos, en la

tabla 1.9 se resume los modelos de varios simuladores comerciales que existen.

**Tabla 1.9** – Modelos matemáticos del comportamiento viscoso [28, 78, 87–92].

	Modelos utilizados			
	Fluido Newtoniano	Modelo de ley de Potencia	Modelo de Cross WLF	Modelo de Segundo Orden
Moldflow Plastics Insigth			x	x
SolidWorks Plastics			x	
Moldex 3D	x	x	x	
Cadmould 3D-F			x	
Tiipflow		x		

Los diferentes software presentan diferentes grados de análisis, existen software que presentan mayor grado de análisis y otros que presentan análisis muy sencillos, en la tabla 1.10 se presenta un resumen de las características de varios simuladores comerciales que existen.

**Tabla 1.10** – Características de los software de simulación de Inyección de Plásticos [78, 87–94].

	Moldflow Plastics Insigth	SolidWorks Plastics	Moldex 3D	Cadmould 3D-F	Tiipflow
Llenado de Molde	x	x	x	x	x
Empaquetamiento	x	x	x	x	x
Orientación de la fibra	x	x	x	x	
Líneas de soldadura	x	x	x	x	
Molding Windows	x				
Velocidad de Flujo	x	x	x	x	
Atrapamiento de Aire	x	x		x	
Ubicación del Punto de Inyección	x	x	x	x	
Análisis en Frio y Caliente	x	x	x	x	
Diseño de experimentos (DOE)	x				
Enfriamiento	x	x	x		x
Enfriamiento del Molde	x	x	x		x
Refrigeración conforme temperatura rápida del ciclo	x		x	x	x
Calentamiento por inducción	x				
Elementos de calentamiento	x				
Deformacion	x				
Insertar el sobremoldeado	x	x			
Etiqueta en el molde	x	x			
Dos secuencias sobremoldeo	x	x			
Inyeccion de Agua			x		

### 1.4.12 Conclusión

Las variables tecnológicas que maneja el material como por parte del proceso de inyección interfieren en las propiedades finales del producto, como también en los costos de manufactura. El conocimiento de los parámetros de inyección permite obtener productos que cumplan con las

características requeridas para su aplicación y sean competitivos en el mercado. La orientación de fibra influye en las características y propiedades de los materiales compuestos con matrices poliméricas y reforzantes naturales. Se puede conocer el estado de orientación de las fibras mediante el uso de alternativas de simulación informática. El conocimiento de la forma de procesar los materiales compuestos por simulación, permite predecir los resultados que se obtendrán, a su vez que generan la facilidad de la implementación de manufacturación a escala industrial.

El énfasis por determinar los parámetros de inyección de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales PP + Bambú mediante simulación y resolución analítica empleando medios informáticos para la resolución de expresiones matemáticas, presenta un punto de análisis comparativo.

La evolución del conocimiento de la técnica de inyección ha generado que se posea información de los parámetros óptimos de inyección. Esto permite reducir costos en la etapa de diseño, reducir la pérdida de recursos al evitar la prueba error, optimizar energéticamente la máquina inyectora, generar un balance adecuado de los canales de alimentación en el molde.

## 1.5 Marco Metodológico

Para poder realizar un análisis de los parámetros antes mencionados, la investigación que se va a realizar es de tipo experimental, mediante caracterización de propiedades reológicas, simulación y desarrollo analítico del proceso de inyección, se ha dividido en cinco etapas:

1. Descriptiva.- en este punto se recolectara información sobre las propiedades que se van a estudiar para realizar una descripción del fenómeno que se investiga.
2. Exploratoria.- es necesario realizar un análisis exploratorio para solventar algunas interrogantes en los niveles iniciales de calibración y uso adecuado del software de simulación y el equipo para la experimentación.
3. Experimental.- donde se obtendrán constantes reológicas, medir el proceso de llenado del molde mediante software especializado, obtener los parámetros óptimos de inyección y el efecto producido por la manipulación de los parámetros en la simulación en el proceso de inyección generan variaciones con respecto al producto final en estudio.
4. Correlacional.- Se pretende establecer la relación entre los parámetros variados en el proceso de simulación, comparándoles frente a desarrollo analítico y experimental. Analizando la relación entre contenido de fibra y los efectos sobre propiedades reológicas.
5. Análisis e interpretación de la información. Con la información recolectada se realizara un análisis estadístico de cada una de las muestras tomadas correspondientes obteniendo así parámetros para el análisis.

### 1.5.1 Diseño de la Investigación

- Reómetría MFI (ASTM D1238 - 13)

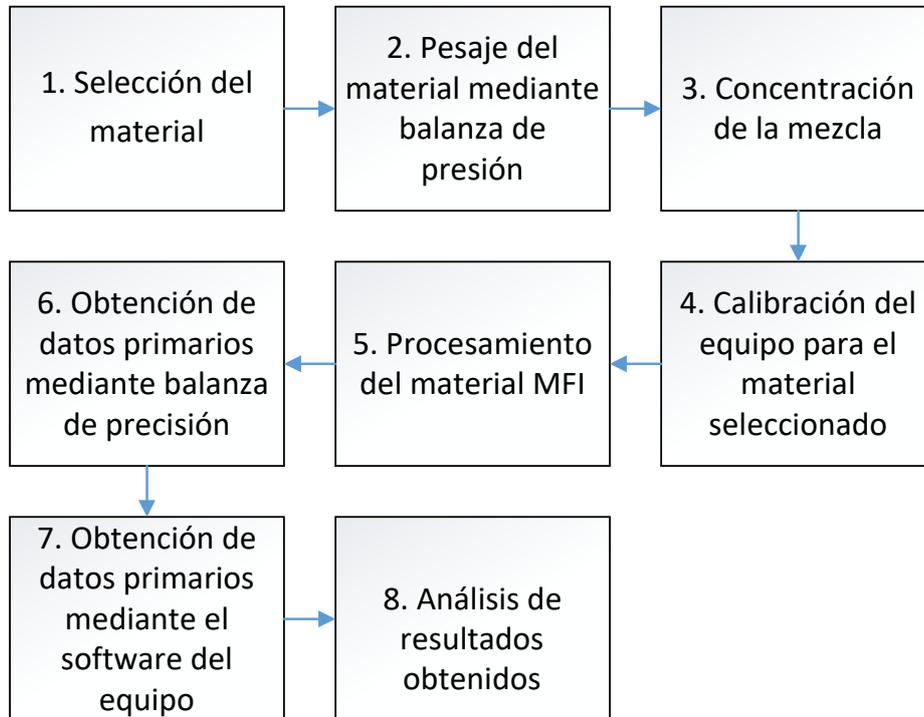


Figura 1.15 – Metodología Reómetría MFI

- Reómetro Capilar (ASTM D3835 - 16 )

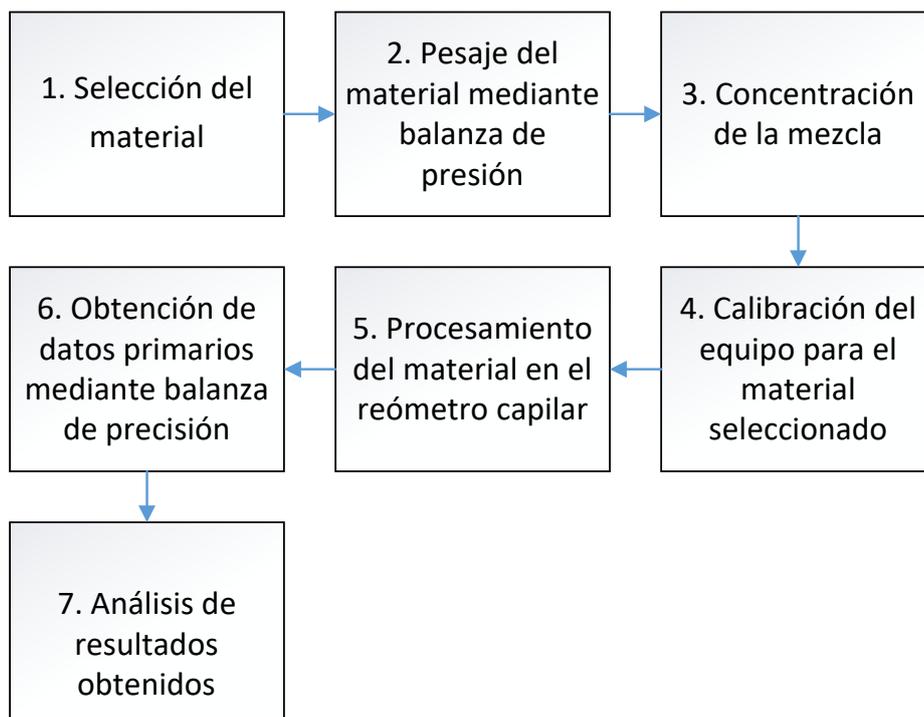
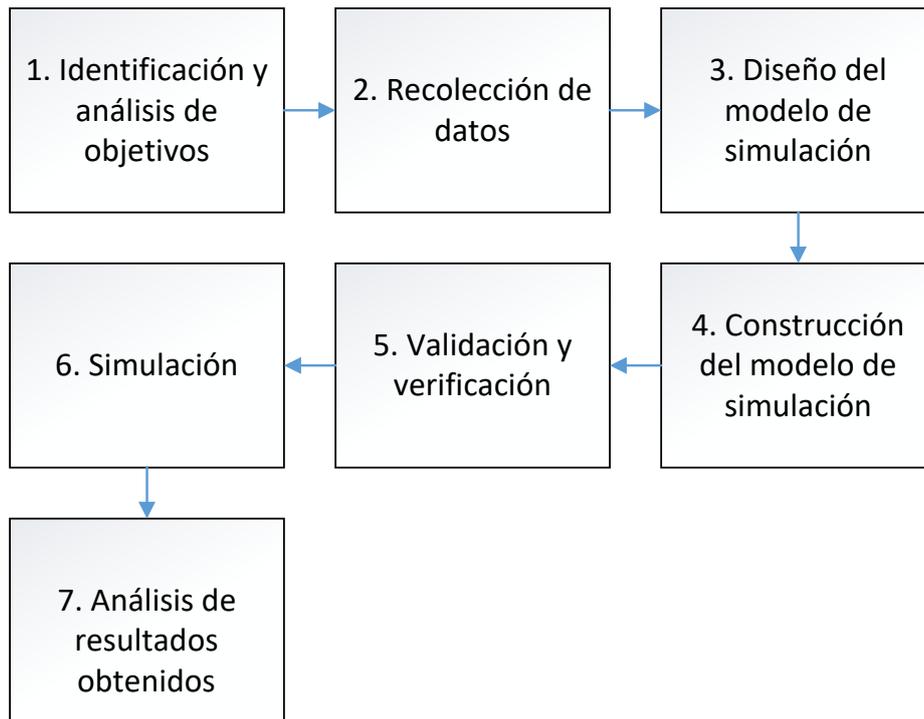


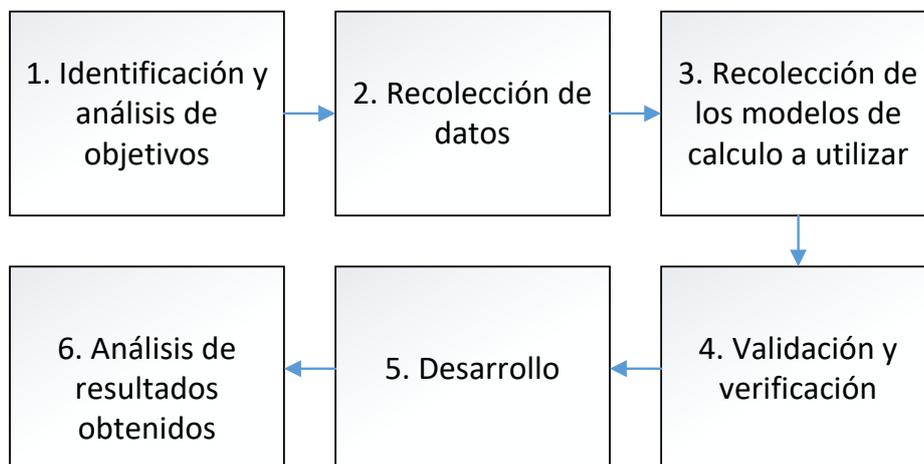
Figura 1.16 – Metodología Reometría Capilar

- Diseño de la fase de Simulación



**Figura 1.17** – Metodología Simulación por Software Especializado

- Validación mediante cálculo analítico



**Figura 1.18** – Metodología de Análisis analítico

Se hace referencia a la importancia que tiene el uso de las normas ASTM D1238 – 13 y D3835-16 en el proceso investigativo para la recolección de datos. Esta metodología presenta las características fundamentales para poder captar la información necesaria para lograr los objetivos propuestos.

El laboratorio de Ensayo de polímeros brinda las facilidades para que esta investigación se pueda realizar con la metodología planteada al contar con los equipos necesarios recurrentes en

la norma citada. Los materiales compuestos base de esta investigación fueron desarrollados por el grupo GiMaT que son PP + GAK en composiciones de 20%, 30% y 40% de fibra con un aditivo de MAPP al 4% y 8%. Es conveniente tener un conocimiento detallado de las variaciones en los resultados para dar una explicación adecuada al estudio realizado.

## 1.6 Resultados

### 1.6.1 Resultados Reometría MFI

Para el desarrollo de este estudio se emplearon compuestos poliméricos naturales PP+GAK en diferentes mezclas. La matriz de PP homopolímero PPH 7060 provista por TOTAL Petrochemicals. Las fibras fueron de bambú, especie *Guadua angustifolia kunth* provista por Green House – Ecuador. El agente de acople utilizado fue anhídrido maleico injertado en PP, provisto por Sigma-Aldrich. Se analizó el cambio de MFI del biomaterial en diferentes mezclas. La tabla 1.11 resume las composiciones del material y su cambio de MFI. Se utilizó dos temperaturas de ensayo, la primera 230 °C (según la norma ASTM D1238-13), la segunda a 190 °C para evitar degradación de material.

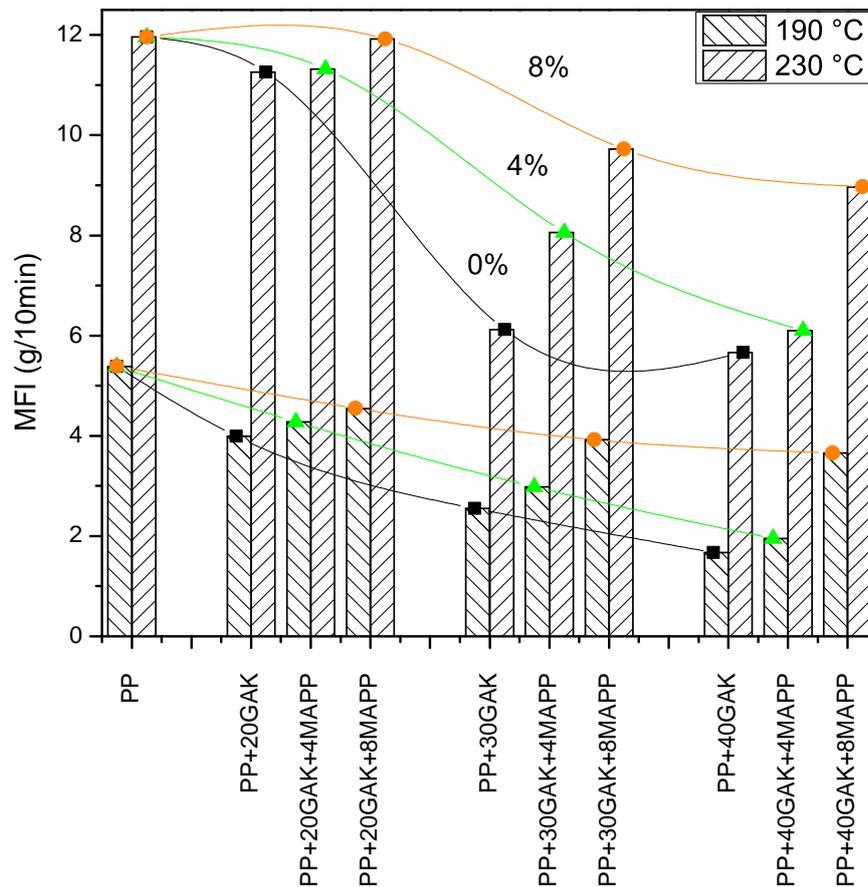
**Tabla 1.11** – Resumen de Resultados Reometría MFI

Composición	50 seg/2,16 kg	
	230 °C	190 °C
PP	11,96	5,39
PP+20GAK	11,26	3,99
PP+20GAK+4MAPP	11,32	4,28
PP+20GAK+8MAPP	11,92	4,55
PP+30GAK	6,12	2,55
PP+30GAK+4MAPP	8,06	2,98
PP+30GAK+8MAPP	9,72	3,92
PP+40GAK	5,66	1,67
PP+40GAK+4MAPP	6,1	1,95
PP+40GAK+8MAPP	8,97	3,66

El contenido de fibra redujo linealmente el índice de fluidez del compuesto con respecto al polímero puro. A mayor contenido de fibra, menor MFI, llegando incluso a reducir la fluidez un 50% aproximadamente (al adicionar 40% fibra). Esto se debe principalmente al efecto espesante de las fibras naturales en la matriz polimérica debido al aumento de la densidad del material compuesto por el incremento de fibra.

El agente de acople mostró un efecto lubricante sobre el compuesto. En todas las composiciones se evidencio un incremento del MFI con el aumento del MAPP desde un 10% hasta un 60%. El efecto lubricante de MAPP en compuestos de fibra natural se explica por la reducción del peso molecular del agente de acople con relación a la matriz de PP esto se evidencia en [95].

La temperatura de ensayo tuvo un efecto directo sobre el MFI. Al ensayar a 190 °C los valores de fluidez se redujeron entre un 37 y 45%. A mayor contenido de fibra menor efecto de temperatura.



**Figura 1.19** – Resultados Reómetría MFI

En base al estudio de Propilco et.al [71], al procesar el compuesto de PP+GAK a 190 °C, obtuvieron índices de fluidez que permiten los siguientes procesos: moldeo por compresión, película, multifilamento. Para el moldeo por inyección se recomienda elevar la temperatura hasta 200 °C.

## 1.6.2 Resultados Reometría Capilar

El estudio reológico se llevó a cabo, con la finalidad de determinar los coeficientes de los distintos modelos reológicos. Para ello se empleó un reómetro capilar Rosand RH2200 de doble barril provisto por Malvern, empleando para todos los casos un capilar de relación largo/diámetro/ángulo igual a 20x1x90°, donde el ángulo corresponde a la inclinación de la entrada del fluido. Se aplicó

corrección de Bagley con un capilar de  $0.25 \times 1 \times 180^\circ$ . En todos los casos se emplearon transductores de presión de 10000 psi y 1500 psi

Inicialmente se analizó el comportamiento a  $190^\circ\text{C}$  y  $230^\circ\text{C}$ , pero la degradación de la fibra a  $230^\circ\text{C}$  no permitió obtener las curvas para el análisis, el rango de velocidad de deformación fue de  $10\text{s}^{-1}$  hasta  $2000\text{s}^{-1}$ . Los resultados se presentan en las tablas 1.12, 1.13 y 1.14.

**Tabla 1.12** – Resultados Reometría Capilar de 20% Fibra a  $190^\circ\text{C}$

SHEAR RATE (1/s)	SHEAR VISCOSITY (Pa.s)			
	PP	PP+20GAK	PP+20GAK+4MAPP	PP+20GAK+8MAPP
10	888,61	1167,39	1069,31	966,62
18,02	684,31	862,3	825,8	769,9
32,46	515,56	635,84	614,06	585,8
57,98	380,48	459,67	437,98	440,67
104,72	267,59	323,48	317,58	308,33
189,61	183,81	219,41	214,85	210,37
342,61	125,12	145,58	145,9	139,42
618,48	84,48	97,27	93,98	92,67
1114,01	56,45	63,3	61,32	60,55
2007,12	36,92	40,89	39,37	40,01

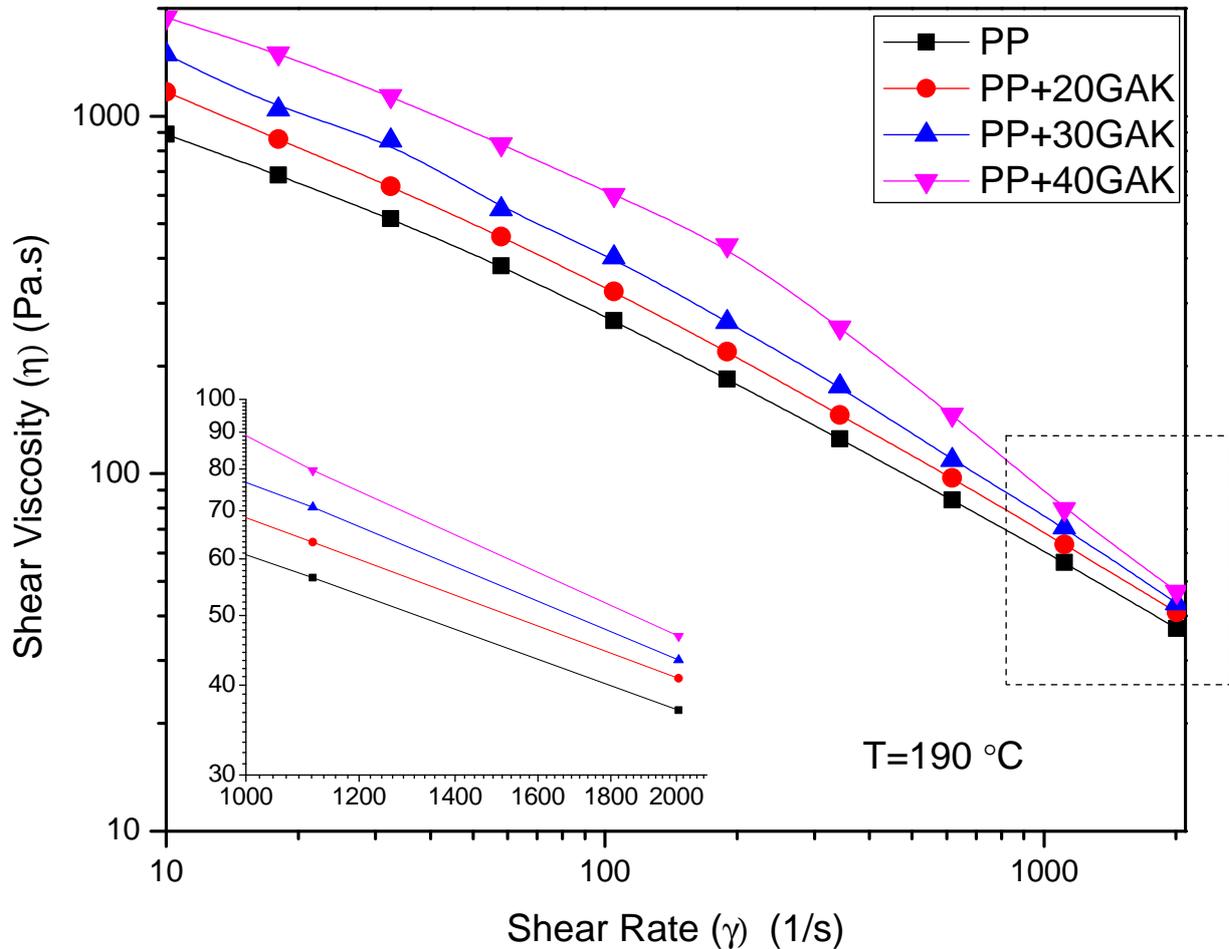
**Tabla 1.13** – Resultados Reometría Capilar de 30% Fibra a  $190^\circ\text{C}$

SHEAR RATE (1/s)	SHEAR VISCOSITY (Pa.s)			
	PP	PP+30GAK	PP+30GAK+4MAPP	PP+30GAK+8MAPP
10	888,61	1487,12	1383,93	1140,58
18,02	684,31	1043,09	1054,01	904,62
32,46	515,56	854,51	769,59	704,86
57,98	380,48	549,35	550,98	501,88
104,72	267,59	402,13	396,64	376,04
189,61	183,81	265,35	273,13	253,31
342,61	125,12	175,23	190,47	169,49
618,48	84,48	109,15	124,15	109,91
1114,01	56,45	70,75	80,81	68,58
2007,12	36,92	43,36	42,81	40,46

**Tabla 1.14** – Resultados Reometría Capilar de 40% Fibra a  $190^\circ\text{C}$

SHEAR RATE (1/s)	SHEAR VISCOSITY (Pa.s)			
	PP	PP+40GAK	PP+40GAK+4MAPP	PP+40GAK+8MAPP
10	888,61	1889,94	1691,21	1185,84
18,02	684,31	1496,29	1276,92	938,89
32,46	515,56	1136,04	938,03	658,77
57,98	380,48	834,09	739,99	506,25
104,72	267,59	602,31	450,33	376,4
189,61	183,81	435,4	305,05	264,52
342,61	125,12	256,3	182,25	178,39
618,48	84,48	146,36	129,12	116,82
1114,01	56,45	79,6	74,04	77,43
2007,12	36,92	46,8	46,68	48,81

Conforme el aumento de fibra en el material compuesto, la viscosidad aumenta a velocidades de corte bajas. El aumento de la velocidad de corte generó que el material compuesto presente una estabilización al llegar a valores  $\dot{\gamma} = 1100 [1/s]$  puesto que la viscosidad obtiene valores similares como se puede ver en las figuras 1.20, 1.21, 1.22 y 1.23. A elevadas velocidades de corte  $\dot{\gamma}$ , el efecto tanto de las fibras como del MAPP, es despreciable. Se evidencia un ligero decrecimiento del material compuesto a velocidades de corte bajas en su viscosidad al utilizar MAPP.



**Figura 1.20** – Resultados Reómetría Capilar de 20%, 30% y 40% de fibra a 190°C

La pérdida de viscosidad que se produce al aumentar la velocidad de corte se justifica por el cambio de la conformación molecular del polímero, estas moléculas modifican su posición relativa, con forme la velocidad aumente, las moléculas ya estarán modificadas para ofrecer la menor resistencia al movimiento. Esto se evidencia que a velocidades mayores a  $\dot{\gamma} = 1100 [1/s]$ , estas moléculas presentan una resistencia mínima, por lo cual se ve una estabilización en el valor de la viscosidad con el aumento de la velocidad de corte. Esto se observó en las figuras 1.20, 1.21, 1.22 y 1.23.

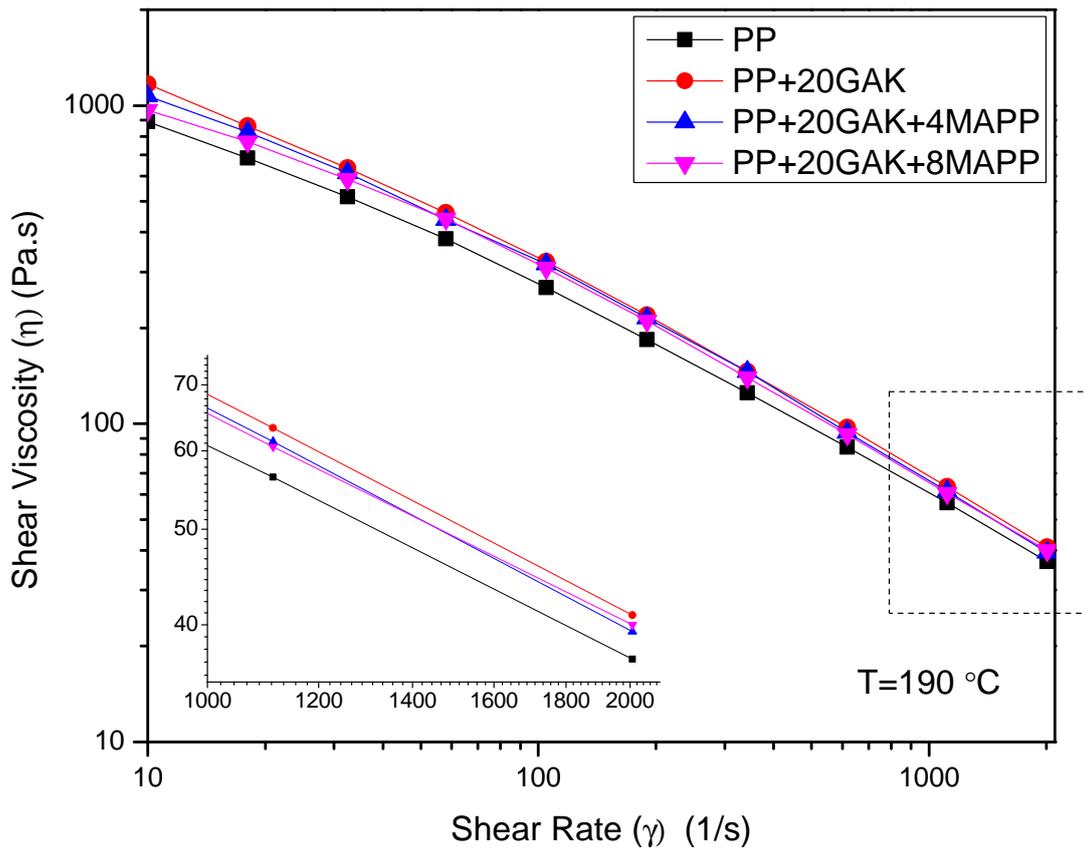


Figura 1.21 – Resultados Reómetria Capilar de 20% fibra a  $190^\circ\text{C}$

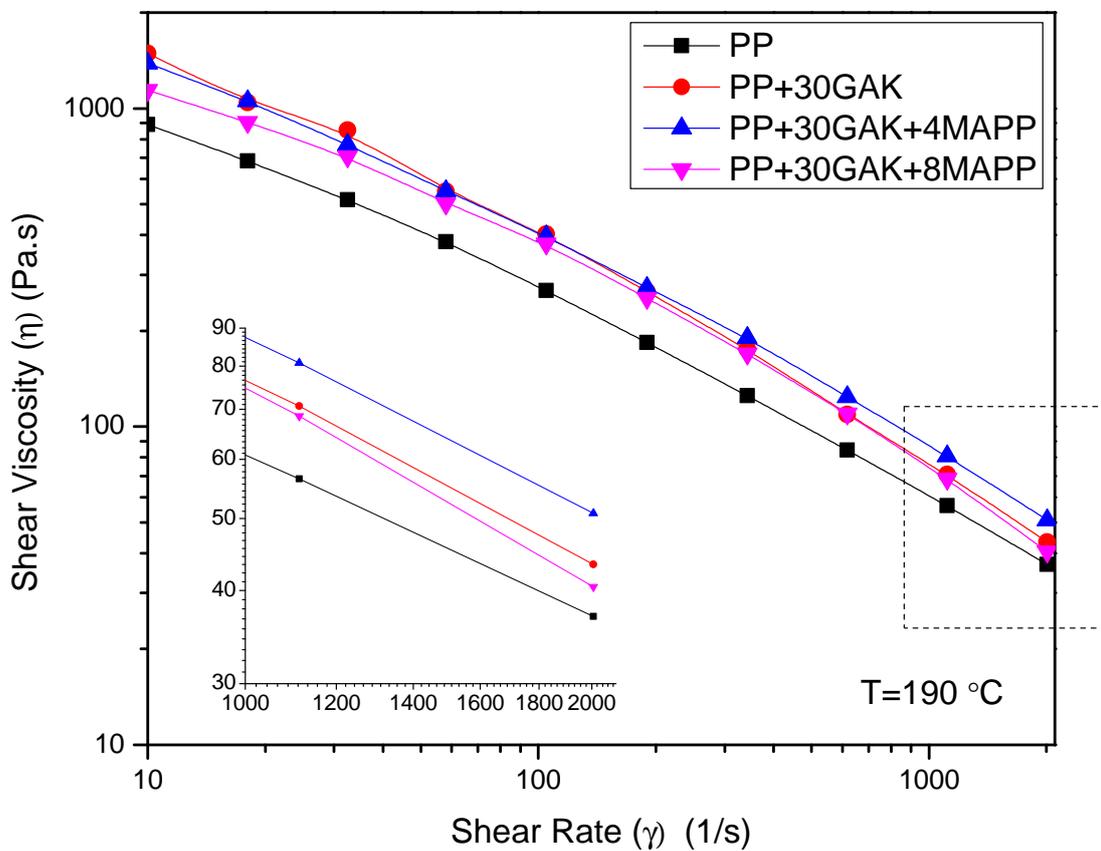


Figura 1.22 – Resultados Reómetria Capilar de 30% fibra a  $190^\circ\text{C}$

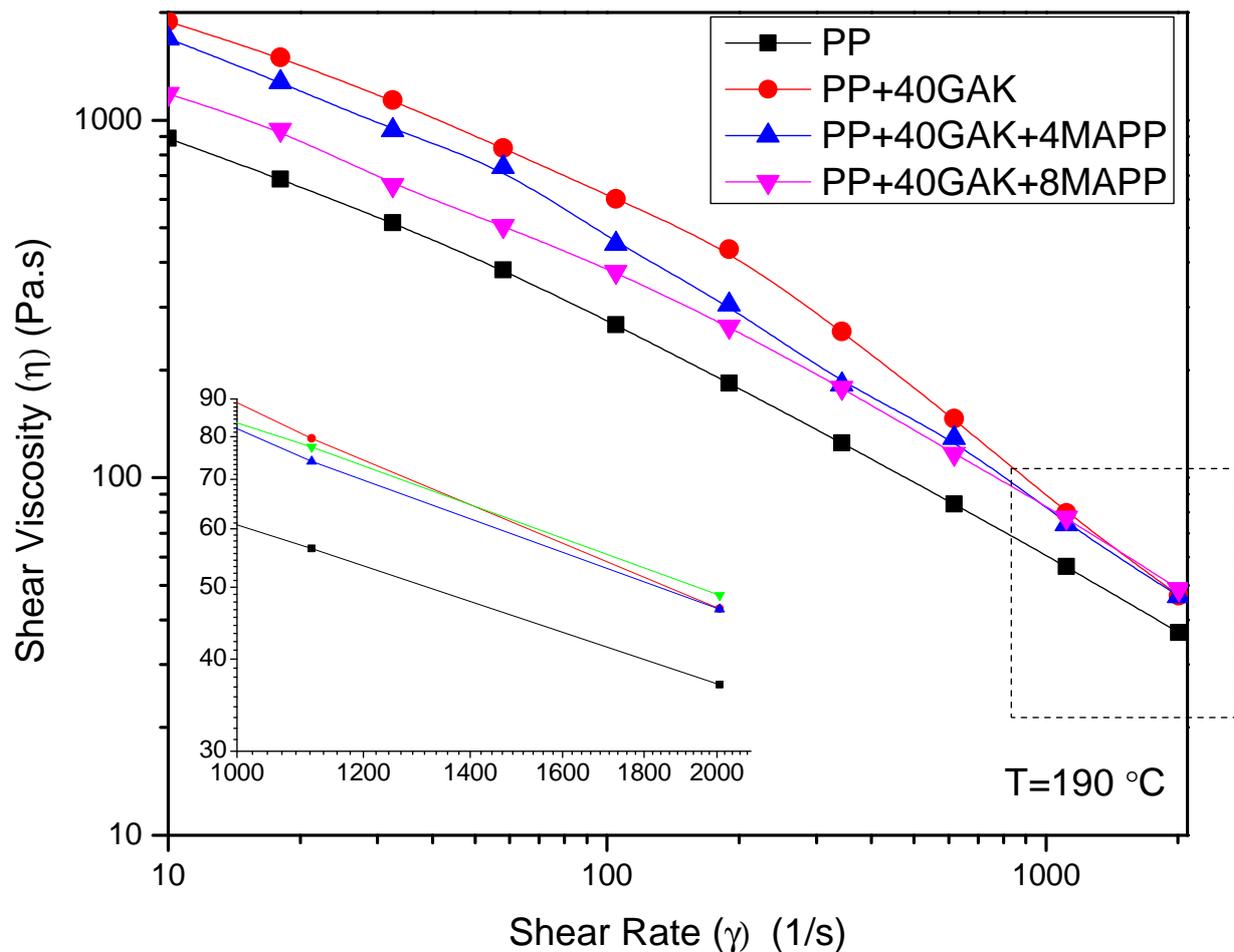


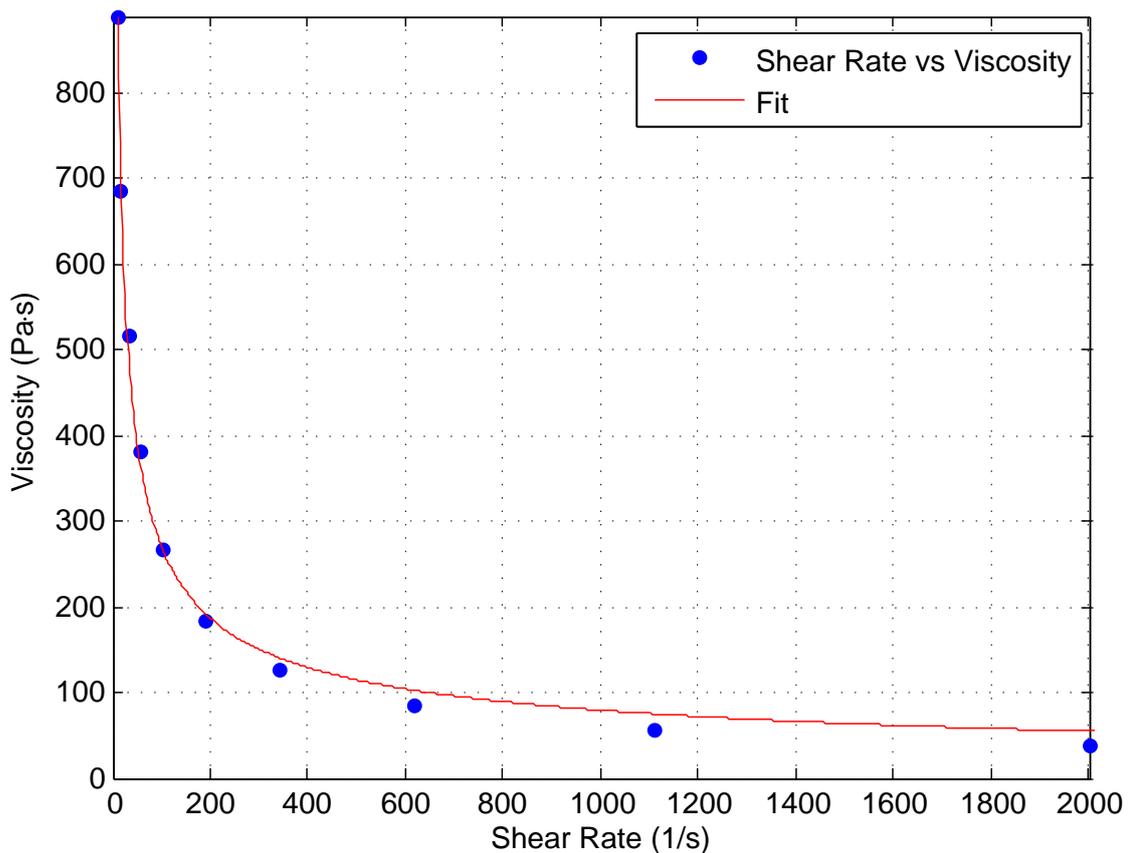
Figura 1.23 – Resultados Reómetría Capilar de 40% fibra a  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 1.6.3 Determinación de los coeficientes para los modelos reológicos

A partir de las curvas que describen el comportamiento reológico de los compuestos PP+GAK, se procedió a identificar las constantes reológicas que ajustan los datos experimentales con los modelos reológicos: ley de potencias y Cross WLF. Para ello se generó un script en Matlab 2013b (Anexo A), para el manejo de la ley de potencias usando la ecuación (1.6) y (1.7) con la finalidad de establecer la variación de la viscosidad respecto a la velocidad cortante y encontrar los parámetros reológicos a diferentes mezclas. Los valores se resumen en las tablas 1.15 y 1.16. Estas constantes servirán para calcular los parámetros de inyección del material compuesto natural de tal forma que se considere el comportamiento real del nuevo material. Como se observa en las tablas 1.15 y en la figura 1.24, los ajustes son muy buenos con el modelo de ley de potencia. En todos los casos el  $r_{\text{square}}$  es superior a 0,99.

**Tabla 1.15** – Ajuste al Modelo de viscosidad de ley de potencia

	$m_o$ ( $Pa \cdot s^n$ )	$a$ ( $1/^\circ C$ )	$n$	rsquare	adjrsquare
PP	2978	0,003065	0,4729	0,9957	0,9945
PP+20GAK	4117	0,004798	0,4387	0,9977	0,9971
PP+20GAK+4MAPP	3655	0,004085	0,4607	0,9955	0,9943
PP+20GAK+8MAPP	3151	0,00331	0,4892	0,9917	0,9893
PP+30GAK	6258	0,006578	0,4274	0,994	0,9923
PP+30GAK+4MAPP	4716	0,005718	0,4524	0,9973	0,9966
PP+30GAK+8MAPP	3673	0,004088	0,4909	0,9912	0,9887
PP+40GAK	8125	0,009954	0,415	0,9817	0,9795
PP+40GAK+4MAPP	5856	0,008046	0,4379	0,9919	0,9896
PP+40GAK+8MAPP	3861	0,004416	0,4799	0,9956	0,9944

**Figura 1.24** – Curva de Fluidez del Polipropileno con su ajuste de datos al modelo de la ley de potencia a 190°C

Las curvas de fluidez con sus ajuste restantes pueden observarse en las figuras A.1 a A.10 del anexo A.

Los valores obtenidos para el índice de consistencia muestran un incremento en función del aumento de fibra como se ve en la figura 1.25, este comportamiento es directamente proporcional al aumento de fibra y se da por el aumento de la densidad ya que contiene más refuerzo y el polímero es más viscoso, siendo más espeso al incrementar el porcentaje de fibra. Al contener MAPP los valores mostraron un decrecimiento. Esto se da por el efecto lubricante que brinda el aditivo, el peso molecular de la matriz PP baja y con ello la densidad, disminuyendo el índice de consistencia. Los valores obtenidos para el exponente de la ley de potencia muestran un decrecimiento en función del aumento de fibra como se ve en la figura 1.26, este comportamiento es inversamente proporcional al incremento de fibra. Al contener MAPP los valores presentan un incremento. Estos valores están corroborados por Osswald en [24, pg.126] y Klyosoven [96, pg.637].

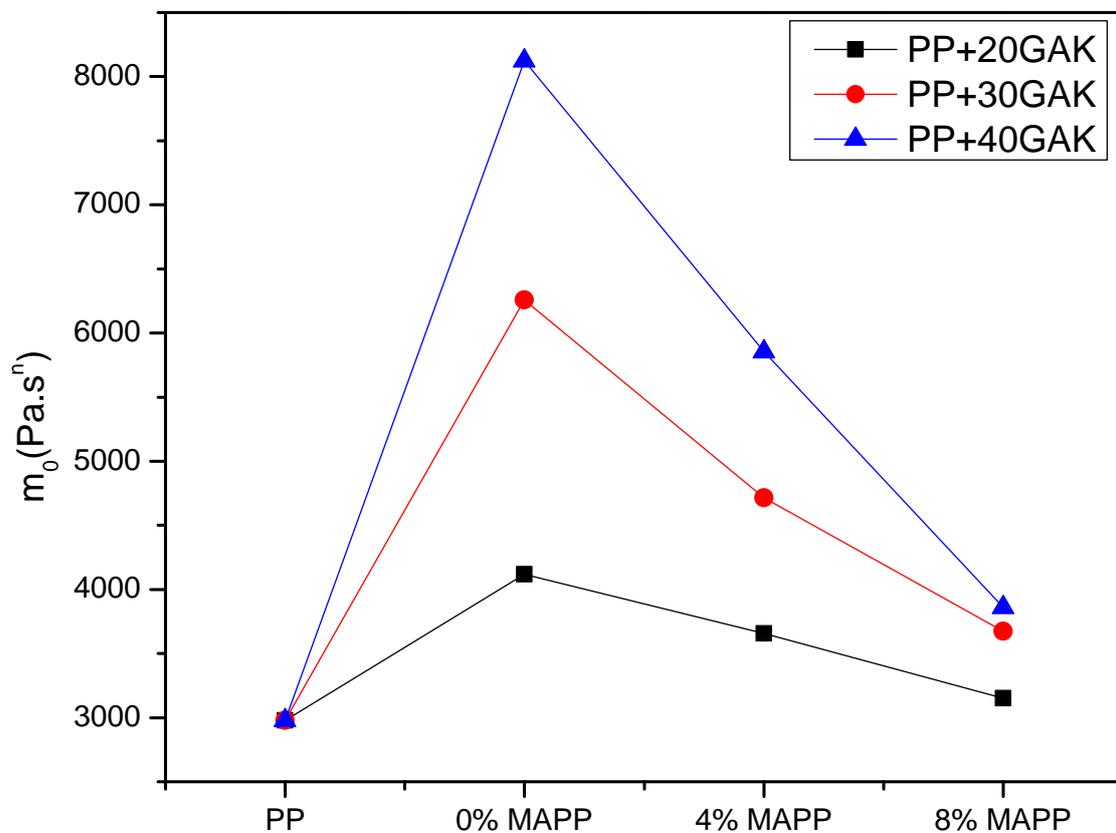
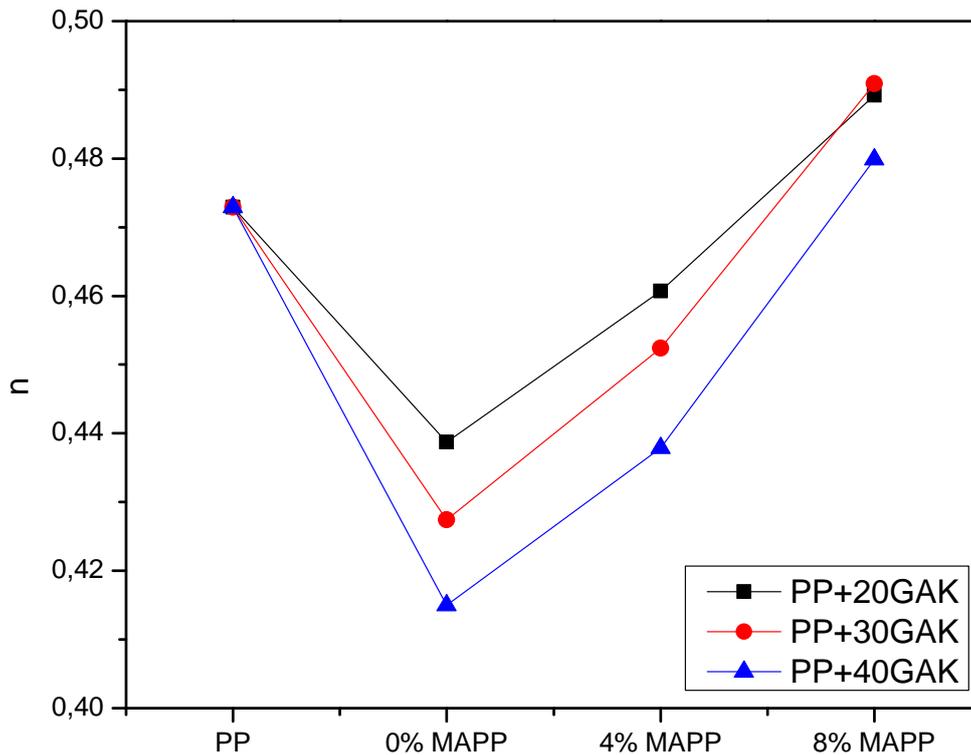


Figura 1.25 – Comportamiento del índice de consistencia a 190 °C

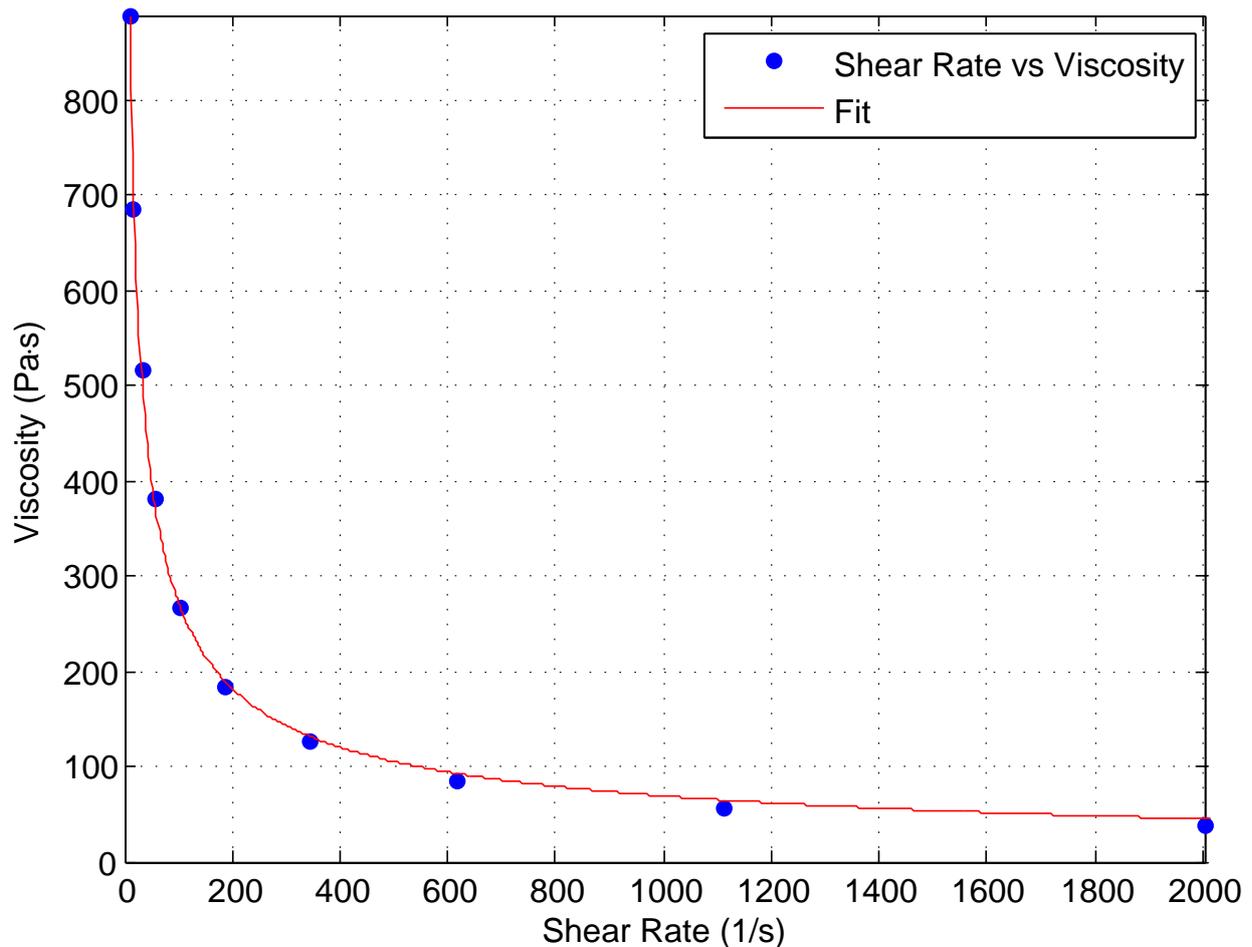


**Figura 1.26** – Exponente de la ley de potencia a 190 °C

A continuación se realizó el ajuste de Cross WLF con la ecuación (1.7). El valor de  $n_0$  es experimental. Estas constantes servirán para configurar el comportamiento del material compuesto natural en el simulador del proceso de inyección de tal forma que se considere el comportamiento real del nuevo material. Como se observa en las tablas 1.16 y en la figura 1.27, los ajustes son muy buenos con el modelo de ley de potencia. En todos los casos el rsquare es superior a 0,99.

**Tabla 1.16** – Ajuste al Modelo de viscosidad de Cross-WLF

	$n_0$ (Pa.s)	Tau (Pa)	n	rsquare	adjrsquare	D1 (Pa.s)
PP	3070,6889	7545	0,3714	0,9991	0,999	1,0188E+12
PP+20GAK	4319,3492	10544	0,3428	0,9997	0,9996	1,4331E+12
PP+20GAK+4MAPP	3807,39829	9067	0,3597	0,999	0,9988	1,2633E+12
PP+20GAK+8MAPP	3257,04344	7622	0,3816	0,9968	0,9964	1,0807E+12
PP+30GAK	6683,49227	13390	0,3204	0,998	0,9977	2,2176E+12
PP+30GAK+4MAPP	4993,51955	10520	0,3537	0,9997	0,9996	1,6568E+12
PP+30GAK+8MAPP	3826,2636	9090	0,385	0,9964	0,9959	1,2695E+12
PP+40GAK	8975,38408	19550	0,315	0,9905	0,9915	2,978E+12
PP+40GAK+4MAPP	6346,64785	14420	0,3312	0,9965	0,9961	2,1058E+12
PP+40GAK+8MAPP	4035,32247	10040	0,3795	0,9981	0,9979	1,3389E+12

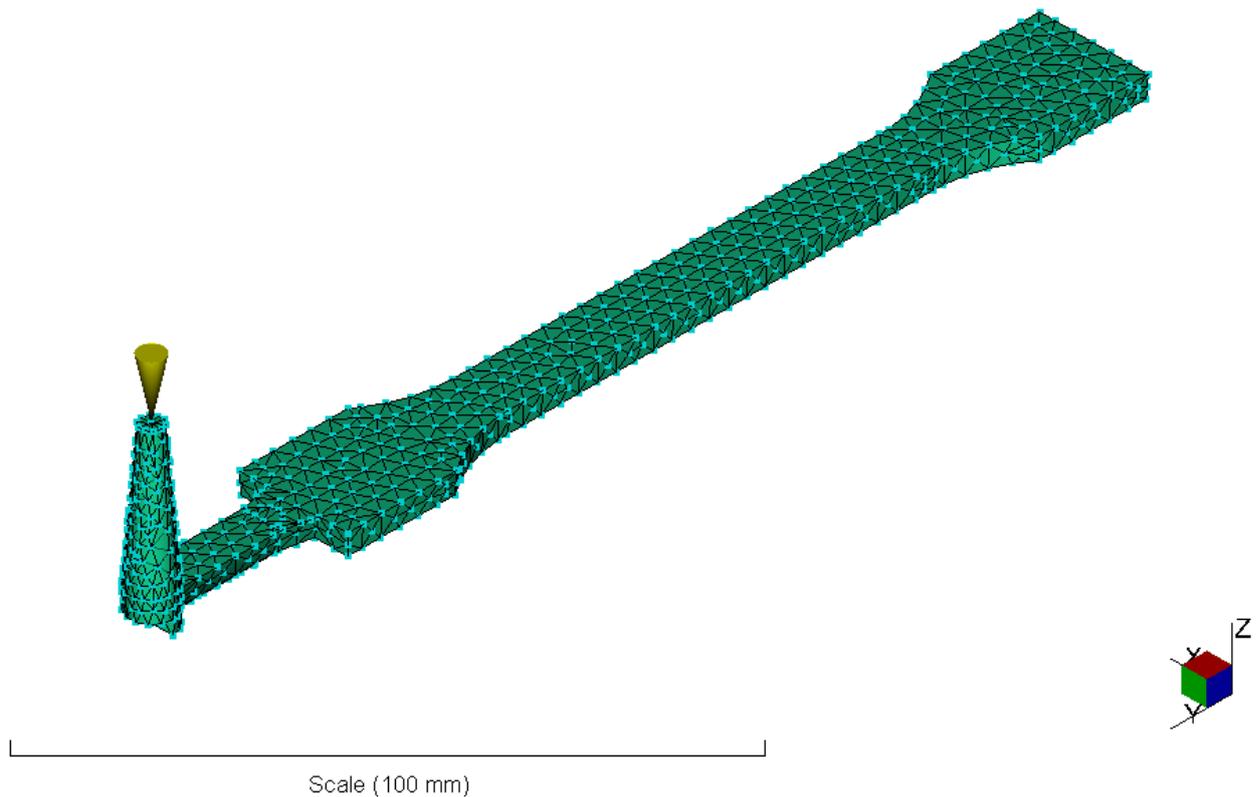


**Figura 1.27** – Curva de Fluidez del Polipropileno con su ajuste de datos al modelo de la Cross-WLF a 190 °C

Las curvas de fluidez con sus ajuste restantes pueden observarse en las figuras A.11 a A.20 del anexo A.

#### 1.6.4 Resultados de la Simulación del Proceso de Inyección

Una vez caracterizada la materia prima y obtenido los coeficientes de ajuste a los modelos reológicos, se procedió con la simulación mediante software especializado. La geometría utilizada fue una probeta para ensayo de tracción bajo norma ASTM D6318-14 y obtenida por inyección según ATSM D3641-12. La geometría fue exportada desde un software de modelado 3D, se utilizó una extensión .stl. Una vez importada la geometría se determinó el tipo de estudio para resolver las interacciones en la simulación. Para este caso de estudio particular se utilizó un Dominio de tipo 2D. Se seleccionó este tipo de dominio porque la geometría no presenta cambios pronunciados en su espesor y economiza costos informáticos. Se realizó el mallado de la geometría configurando un valor de 3.5 mm de distancia entre cada nodo, los elementos del mallado en su totalidad son de tipo triangulares, obteniendo un total de 2054 elementos. Se asignó la ubicación del puno de inyección como se ve en la figura 1.28.



**Figura 1.28** – Resultados del mallado de la probeta y punto de Inyección. Fuente: El Autor.

Una vez concluido el mallado 2D, se procedió a asignar las propiedades del material compuesto dentro del software, luego se seleccionó la simulación para el análisis de acondicionamiento térmico, llenado, compactación y alabeo. La temperatura de inyección fue de 190 °C como temperatura de fusión del material y 45°C como temperatura de la superficie del molde, el clico de inyección se configura a 45 seg. Se configuró un sistema de refrigeración de  $\emptyset$  10 mm de canal, el sistema refrigera con agua y en dirección contraria al flujo del plástico.

Las propiedades reológicas del compuesto fueron cargadas en el software seleccionando el modelo de viscosidad Cross-WLF y sus parámetros como se ve en la tabla 1.17, a su vez se configuraron las propiedades del reforzante como se ve en la tabla 1.18, además se configuró la máquina de inyección BOY 35E, como se ve en la tabla 1.19, el material del molde utilizado fue Tool Steel 420SS. El análisis de la orientación de fibra se configuró como describe Santos en [27].

**Tabla 1.17** – Configuración de la Reología del polímero con el modelo de viscosidad Cross-WLF

Cross-WLF viscosity model		
n	0,3428	(0:1]
Tau*	10544	Pa (0:1e+009)
D1	1,43E+12	Pa.s(0:]
D2	263,15	K(0:1000)
D3	0	K/Pa[0:1e-005)
A1	24,682	(0:40000)
A2	51,6	K(0:20000)

**Tabla 1.18** – Configuración de la Fibra y sus característica

Filler Data		
Density (rho)	1,27	g/cm <sup>3</sup>
Specific heat (Cp)	1680	J/kg-C
Thermal conductivity (k)	0,17	W/m-C
Mechanical properties data		
Elastic modulus. 1st Principal direction (E1)	19000	MPa
Elastic modulus. 2st Principal direction (E2)	1730	MPa
Poissons ratio (v12)	0,38	
Poissons ratio (v23)	0,038	
Shear modulus (G12)	1280	MPa
Coefficient of thermal expansion (CTE) data		
Alpha1	0,029	1/°C
Alpha2	0,029	1/°C
Tensile strength data		
Parallel to major axis of fiber/filler	450	MPa
Perpendicular to major axis of fiber/filler	35,4	MPa
Aspect ratio (L/D)	16,67	
Filler length informacion		
Initial Length	1,2	mm
Measurement method	Optical Reflectometer	
Year measured	2013	

**Tabla 1.19** – Configuración de la máquina de Inyección BOY 35E

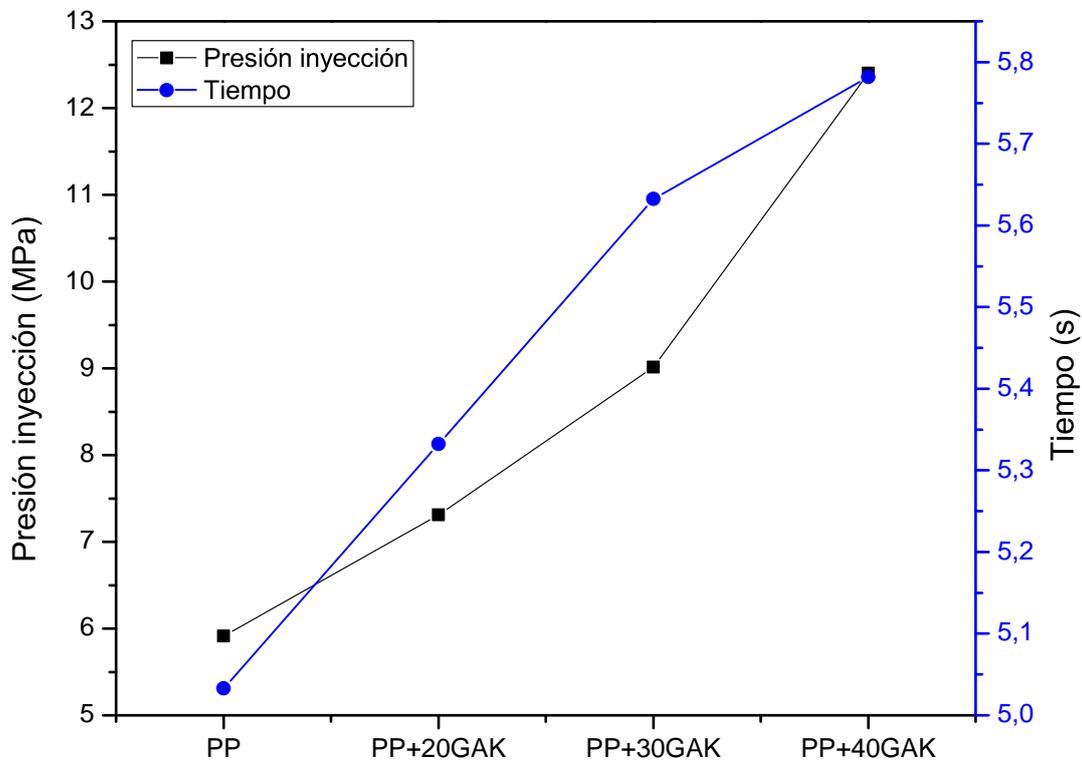
Injection molding machine		
Trade name	BOY 35E	
Manufacturer	BOY Spritzgiessautomaten	
Injection Unit		
Maximum machine injection stroke	95	mm
Maximum machine injection rate	135	cm <sup>3</sup> /s
Machine screw diameter	24	mm
Filling Control	Stroke vs ram speed	
Maximun machine injection pressure	273,9	MPa
Maximun machineclamp force	35	t
Do not exceed maximum clamp force		

Con todos los valores ingresados se realizó la simulación. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 1.20:

**Tabla 1.20** – Resumen de resultados de la simulación

	Tiempo (s)	Presión de inyección (MPa)	Tiempo (s)	Fuerza de cierre (t)	Tiempo de Enfriamiento (s)	Tensor de Orientación $a_{11}$
PP	5,033	5,9123	5,0497	0,5913	82,600	-
PP+20GAK	5,332	7,3079	5,3495	0,7341	82,600	0,8197
PP+20GAK+4MAPP	5,184	6,8219	5,2007	0,6837	82,600	0,831
PP+20GAK+8MAPP	5,182	6,3485	5,1989	0,6352	82,600	0,82
PP+30GAK	5,632	9,0121	5,6503	0,9088	82,600	0,8545
PP+30GAK+4MAPP	5,482	8,071	5,4998	0,811	82,600	0,8581
PP+30GAK+8MAPP	5,477	7,6206	5,4959	0,7636	82,600	0,8539
PP+40GAK	5,782	12,4035	6,4026	1,2581	82,600	0,8841
PP+40GAK+4MAPP	5,479	9,7208	5,7999	0,9803	82,600	0,8865
PP+40GAK+8MAPP	5,384	8,04	5,4980	0,8058	82,600	0,8837

En la figura 1.29 se observó la relación lineal creciente entre la presión y el % de fibra. A mayor contenido de fibra mayor presión. Este comportamiento se explica por el incremento en la viscosidad del polímero al agregar fibras, lo que demanda mayor presión para la inyección. Una tendencia similar fue observada para el tiempo de inyección.

**Figura 1.29** – Presión de inyección y tiempo de inyección del PP+GAK

El material compuesto con el agente de acople MAPP, presenta una disminución en la presión de inyección conforme aumenta el contenido de este como se aprecia en las figuras 1.30, 1.31 y 1.32.

El tiempo disminuye con el aumento de MAPP. Al disminuir la viscosidad del material compuesto con el agente de acople MAPP, el material se vuelve más fluido y alcanza llenar las cavidades del molde con menos presión por la disminución de resistencia a fluir del material. Al necesitar menos presión de inyección el tiempo es menor para alcanzar estos valores.

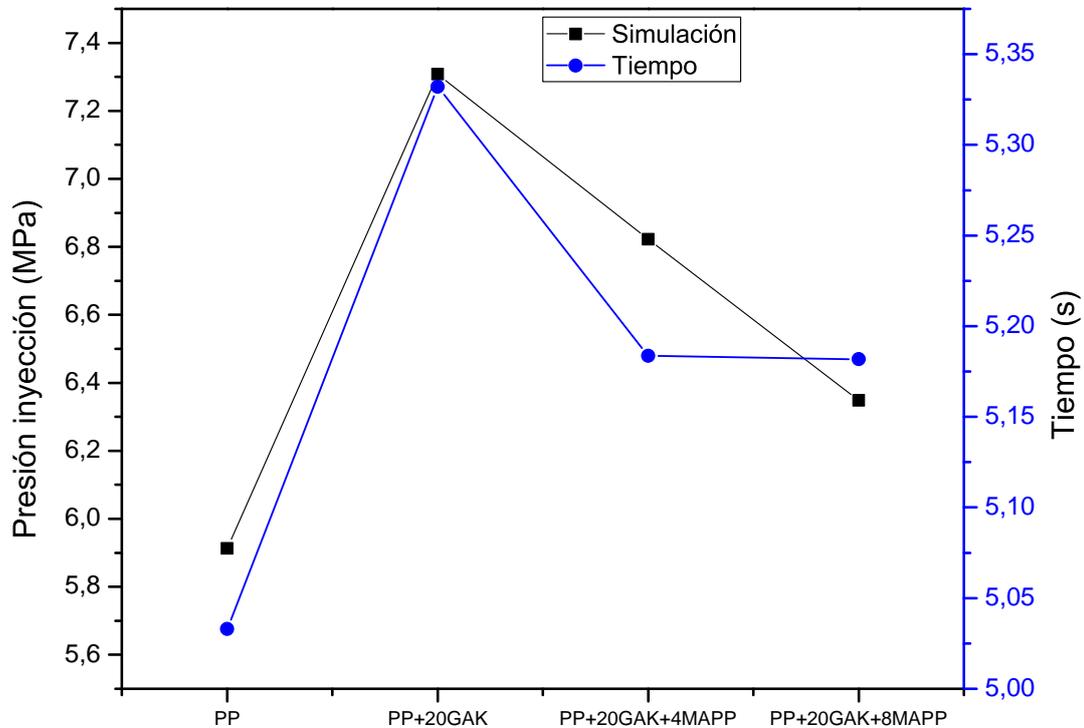


Figura 1.30 – Presión de inyección y tiempo de inyección del PP+20GAK

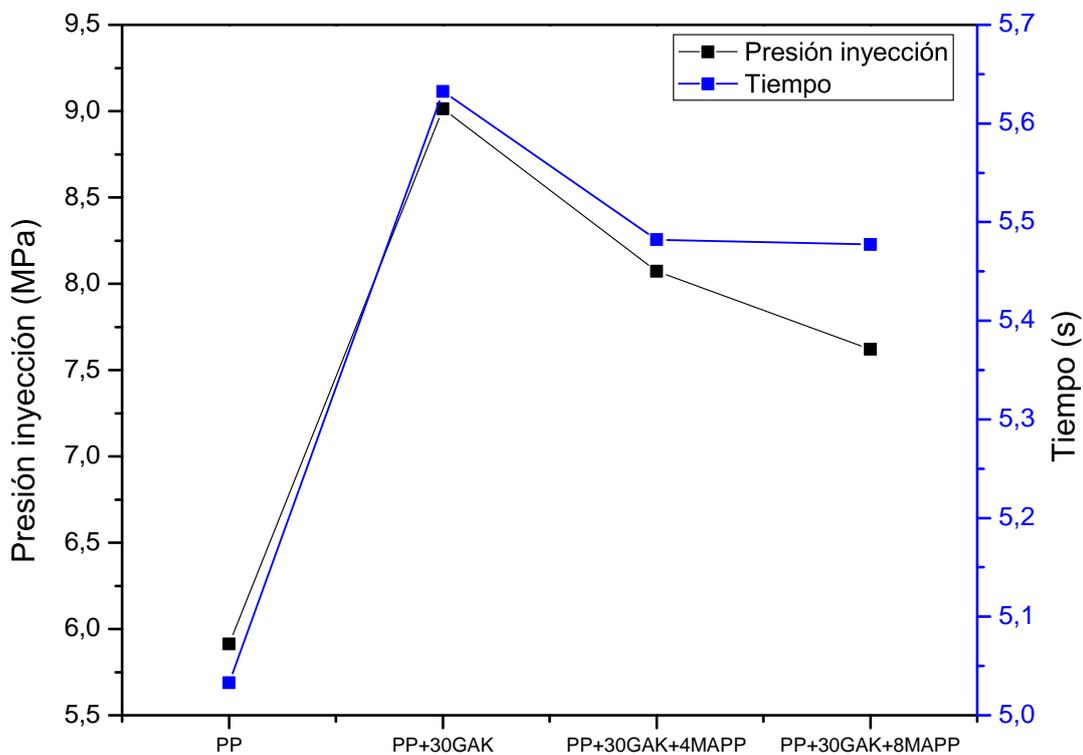
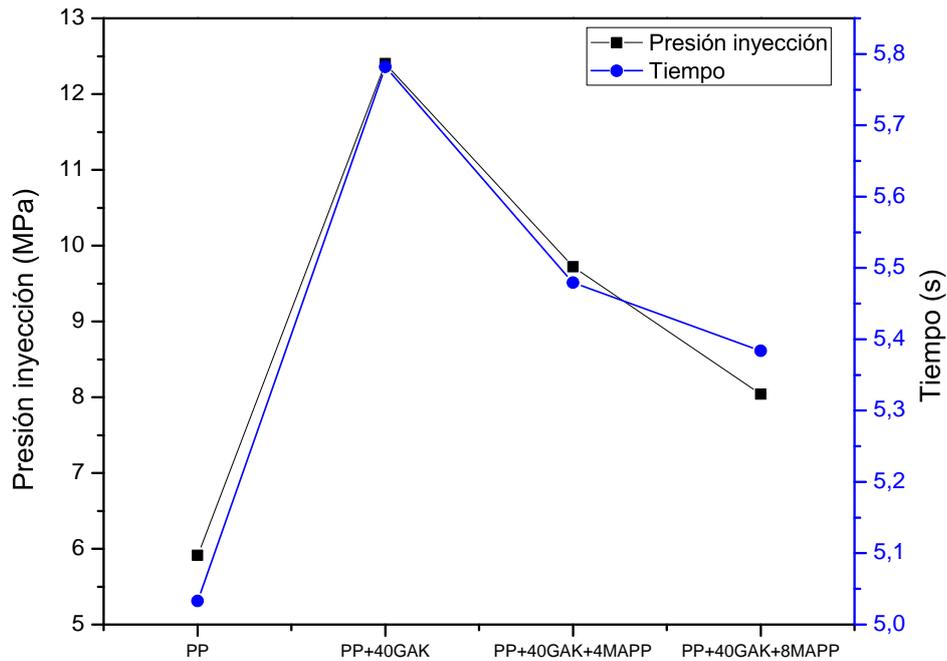
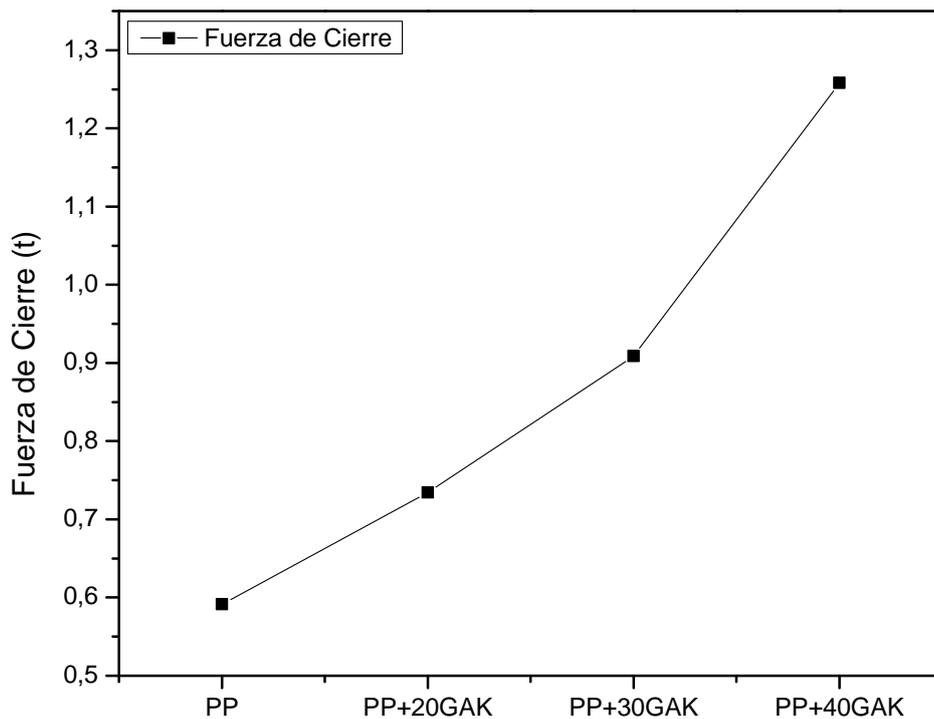


Figura 1.31 – Presión de inyección y tiempo de inyección del PP+30GAK



**Figura 1.32** – Presión de inyección y tiempo de inyección del PP+40GAK

En la figura 1.33 se indica la relación de la fuerza de cierre en toneladas y el tiempo en segundos como tiempo máximo de estudio. Se observó que el contenido de fibra aumenta la fuerza de cierre. El tiempo incrementa con el contenido de fibra para alcanzar el valor de la fuerza de cierre. Se genera esta elevación de la fuerza de cierre por el incremento de la presión de inyección y la viscosidad del material al aumentar la fibra, si la presión de inyección se eleva, la fuerza para resistir la apertura del molde incrementa.



**Figura 1.33** – Fuerza de cierre del PP+GAK

El material compuesto con el agente de acople MAPP, presenta una disminución en la fuerza de cierre conforme aumenta el contenido de este como se aprecia en las figuras 1.34, 1.35 y 1.36. El tiempo disminuye con el aumento de MAPP. Al disminuir la viscosidad del material compuesto con el agente de acople MAPP, el material se vuelve más fluido y alcanza llenar las cavidades del molde con menos presión, esto genera una necesidad menor de la fuerza de cierre.

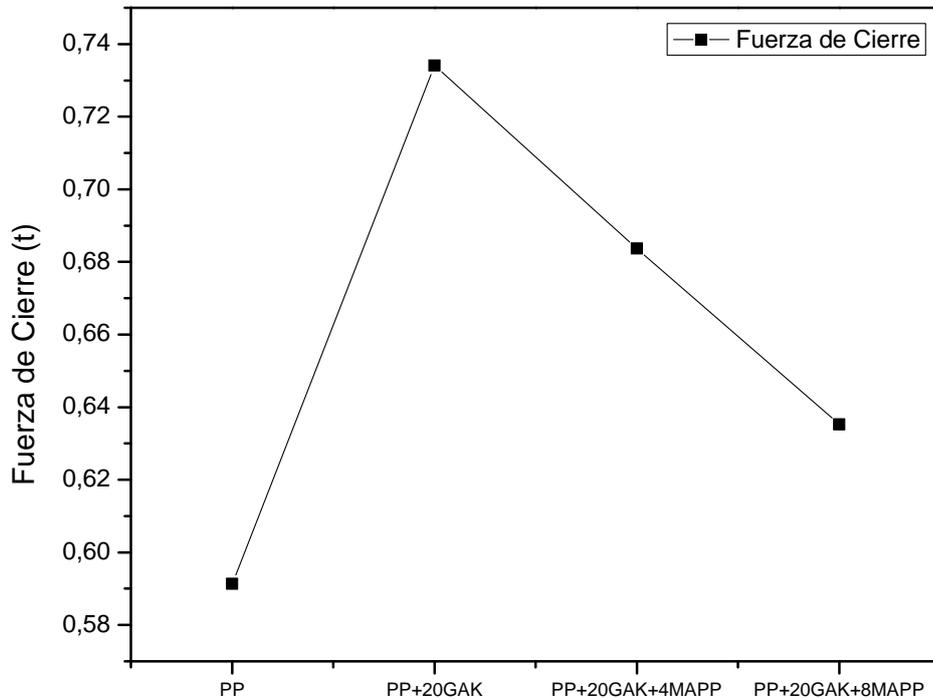


Figura 1.34 – Fuerza de cierre del PP+20GAK

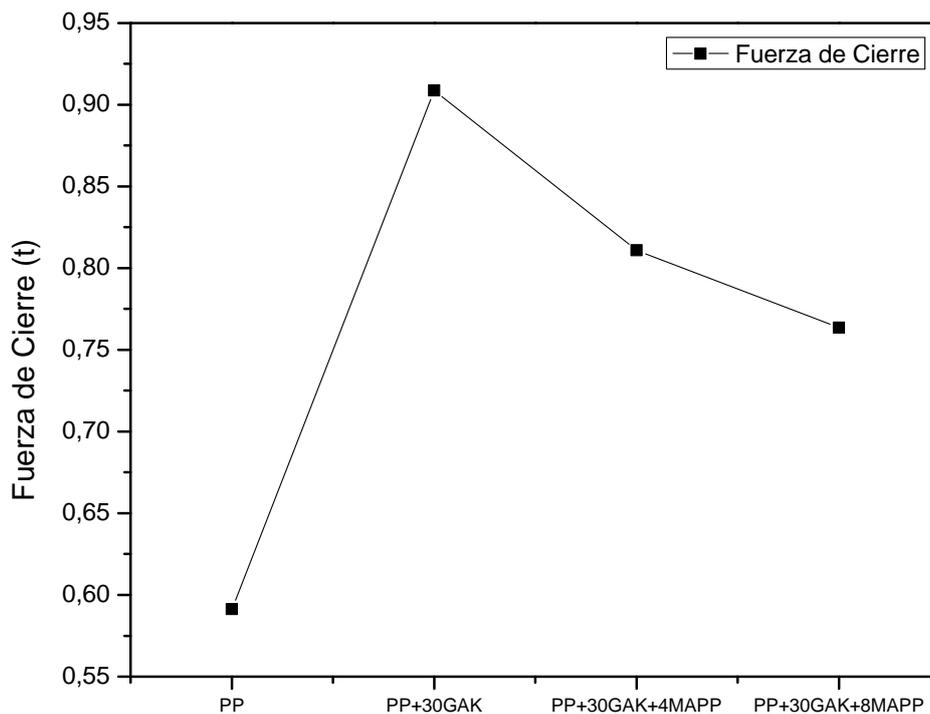
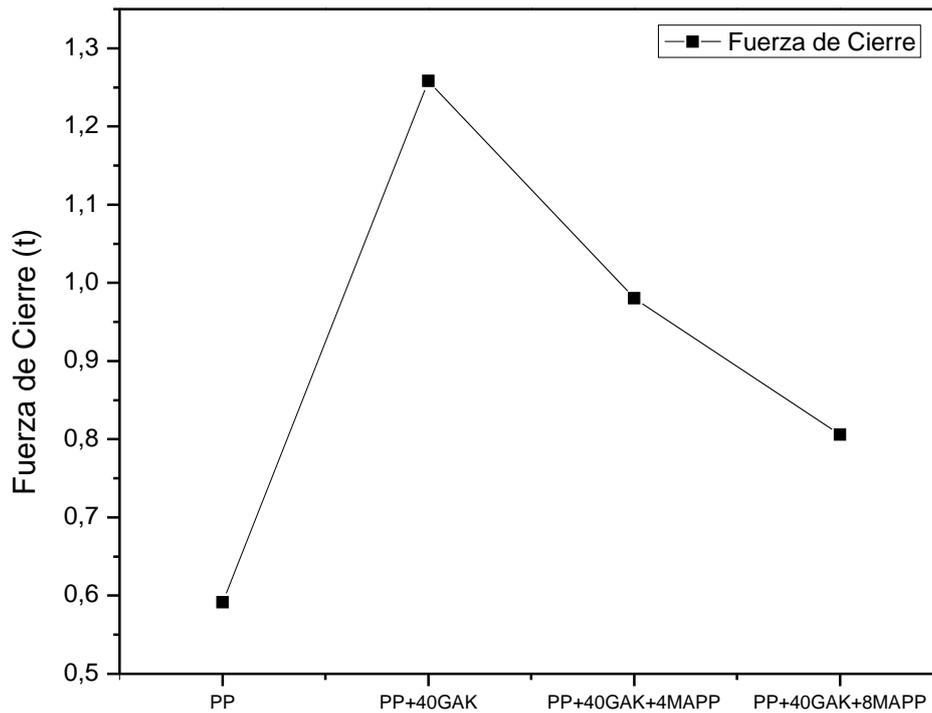


Figura 1.35 – Fuerza de cierre del PP+30GAK



**Figura 1.36** – Fuerza de cierre del PP+40GAK

### 1.6.5 Resultados Analíticos

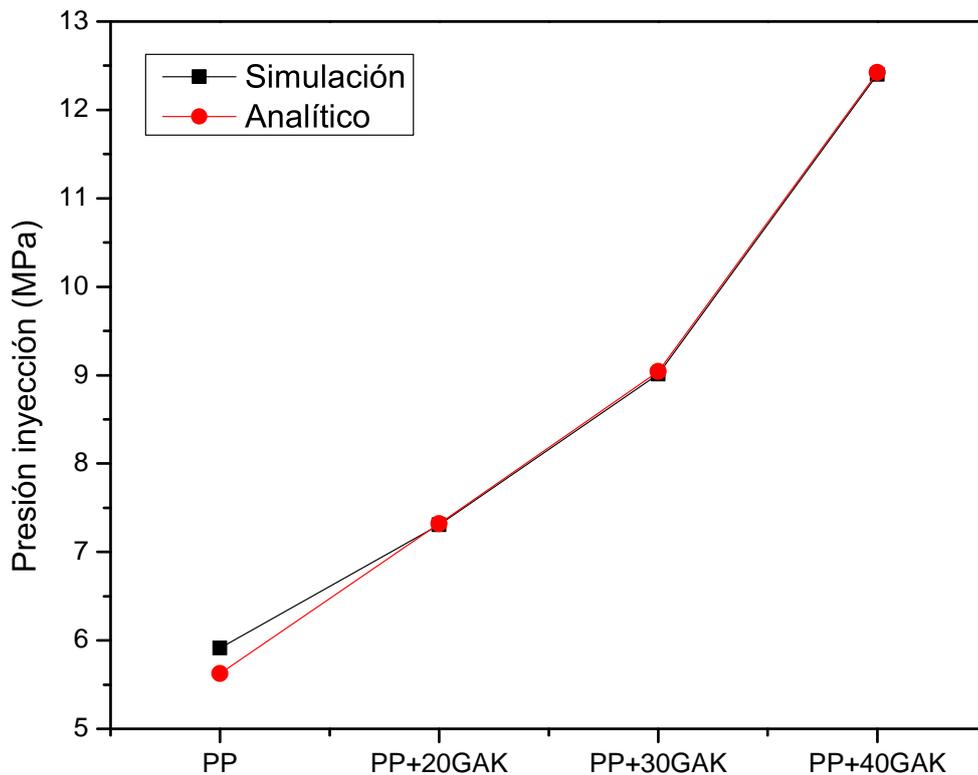
Para el cálculo analítico se utilizó la ecuación (1.15) para la presión y la ecuación (1.16) para la fuerza de cierre, con los valores de la tabla 1.15. El tiempo se ve en la tabla 1.20, el espesor de la pieza es de 0,004008 m con una distancia de recorrido de flujo de 0,2101 m y una superficie del artículo de 0,00645 m<sup>2</sup>. Los valores obtenidos fueron comparados con los obtenidos por la simulación con errores de 0,16 a 4,87% para la inyección y de 4,32 a 11,02% para la fuerza de cierre. La tabla 1.21 presenta los resultados obtenidos. El error relativo se calculó mediante la ecuación (1.29)

$$\%e = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100\% \quad (1.29)$$

Donde  $V_1$  es el valor analítico y  $V_2$  es el valor de la simulación

**Tabla 1.21** – Resultados Análíticos

	Presión de Inyección (MPa)		Error Relativo %	Fuerza de Sujeción (t)		Error Relativo %
	Análítico	Simulación		Análítico	Simulación	
PP	5,62	5,91	4,87	0,62	0,59	4,32
PP+20GAK	7,32	7,31	0,16	0,80	0,73	9,35
PP+20GAK+4MAPP	6,70	6,82	1,72	0,74	0,68	7,55
PP+20GAK+8MAPP	6,43	6,35	1,28	0,71	0,64	11,02
		0,00				
PP+30GAK	9,04	9,01	0,35	0,99	0,91	9,14
PP+30GAK+4MAPP	8,03	8,07	0,55	0,88	0,81	8,55
PP+30GAK+8MAPP	7,56	7,62	0,83	0,83	0,76	8,54
PP+40GAK	12,42	12,40	0,15	1,36	1,26	8,28
PP+40GAK+4MAPP	9,62	9,72	0,99	1,06	0,98	7,67
PP+40GAK+8MAPP	8,02	8,04	0,23	0,88	0,81	9,18

**Figura 1.37** – Presión de Inyección, Análítico vs Simulación de PP+GAK

En las figuras 1.37, 1.38, 1.39 y 1.40 se indica la relación de la presión de inyección en MPa vs el valor obtenido en la simulación. Se observó que el contenido de fibra aumenta la presión de inyección como en la simulación. El comportamiento de las dos curvas es similar, los valores

obtenidos presentaros errores mínimos de aproximación entre la simulación con respecto a los analíticos. La ecuación (1.15) utilizó una variación de presión entre la entradas del molde y la presión a la distancia  $x$ , esta ecuación usa un barrido con las dimensiones máximas de recorrido del fluido. Esto considera la presión de inyección en función de la dimensión de la pieza, brindando una buena aproximación de los resultados a la simulación.

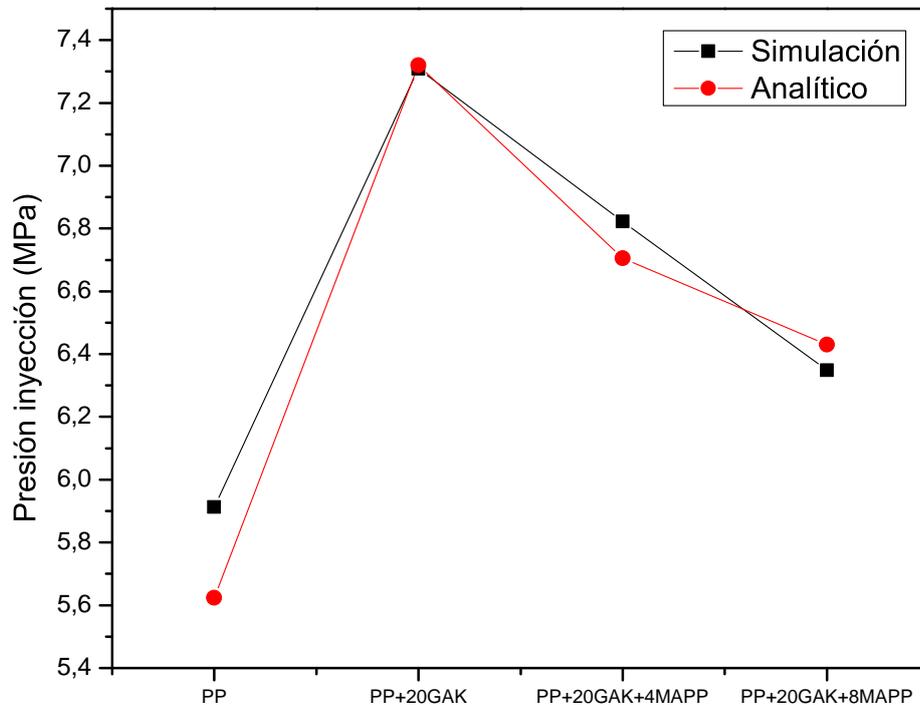


Figura 1.38 – Presión de Inyección, Analítico vs Simulación de PP+20GAK

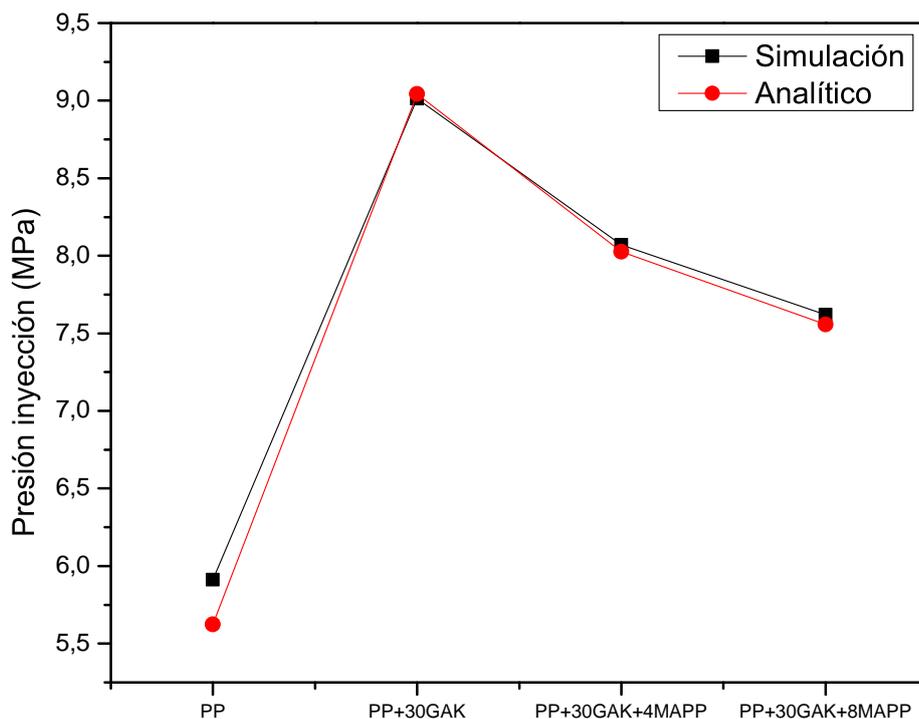
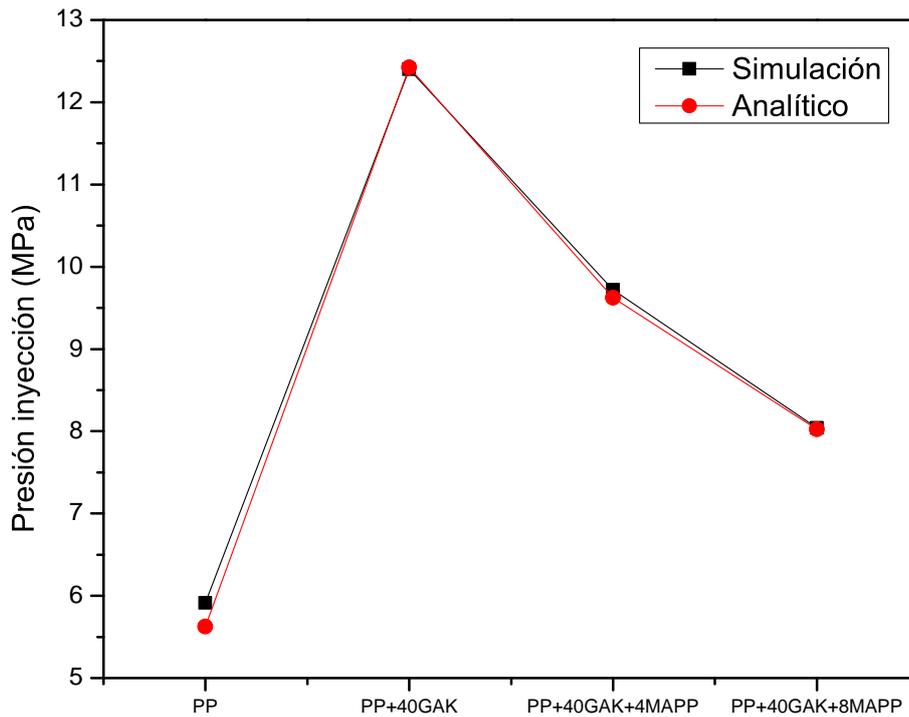
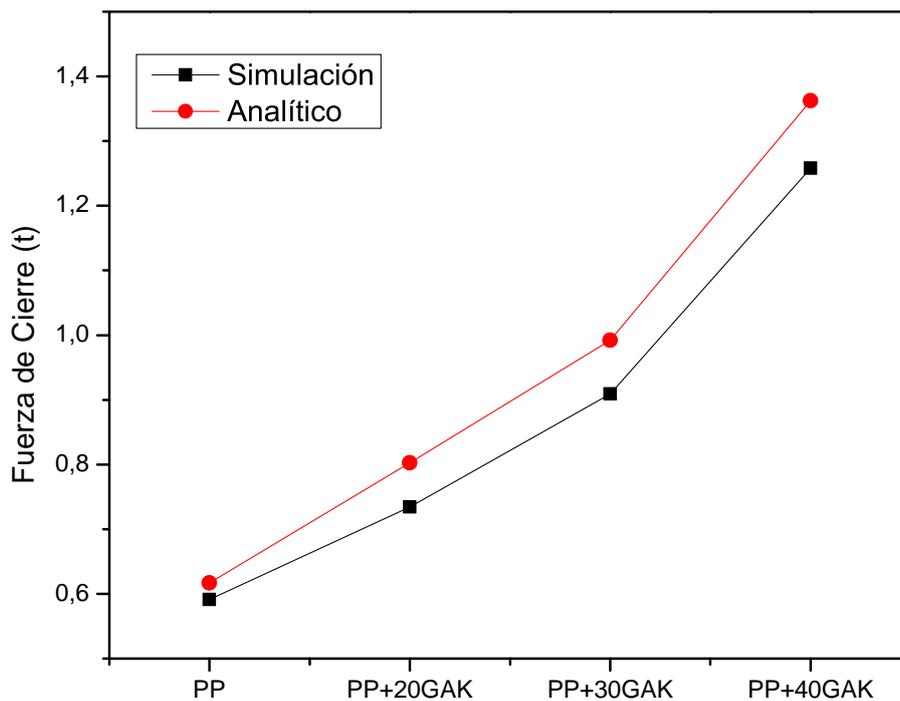


Figura 1.39 – Presión de Inyección, Analítico vs Simulación de PP+30GAK



**Figura 1.40** – Presión de Inyección, Analítico vs Simulación de PP+40GAK

En las figuras 1.41, 1.42, 1.43 y 1.44 se indica la relación de la fuerza de cierre en (ton) vs el valor obtenido en la simulación. Se observó que el contenido de fibra aumenta la fuerza como en la simulación. El comportamiento de las dos curvas es similar en tendencia y en magnitud, los valores obtenidos cuentan con errores de aproximación de simulación entre 4,32 a 11,02% . La ecuación (1.16) utilizada, considera la presión de inyección con la superficie de la pieza.



**Figura 1.41** – Fuerza de Cierre, Analítico vs Simulación de PP+GAK

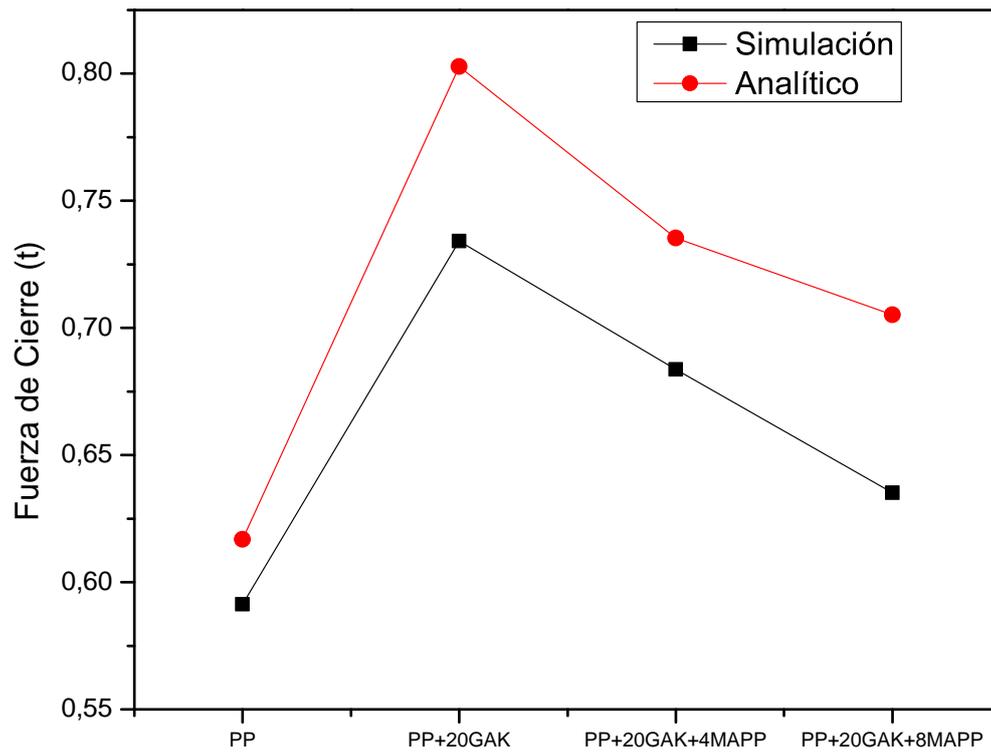


Figura 1.42 – Fuerza de Cierre, Analítico vs Simulación de PP+20GAK

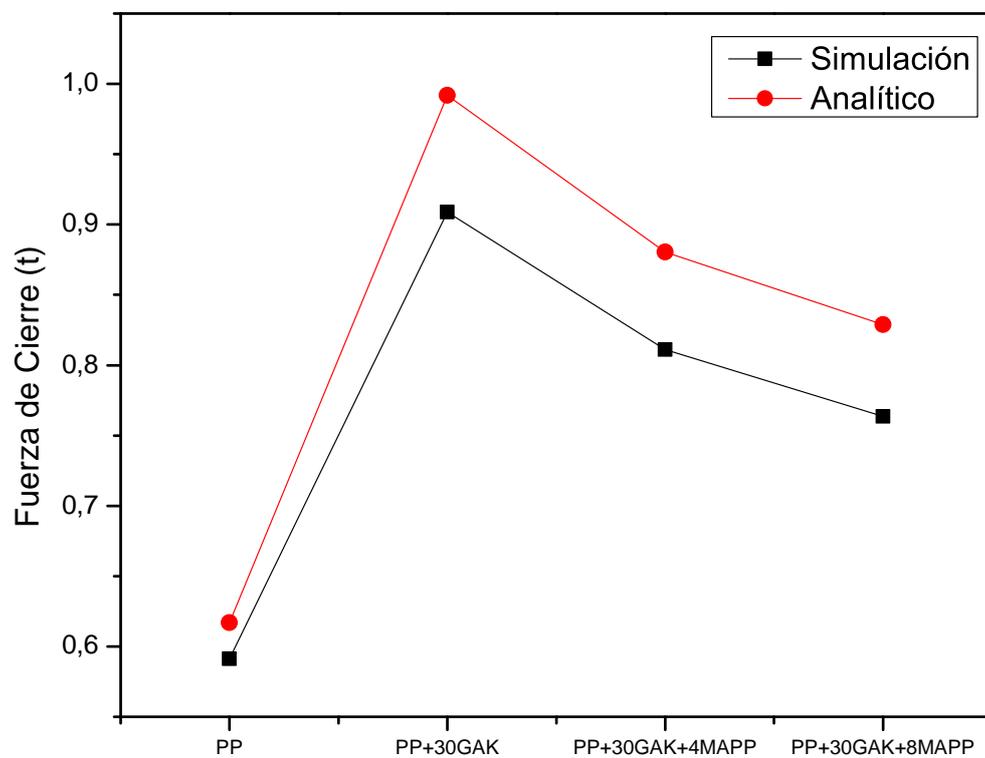
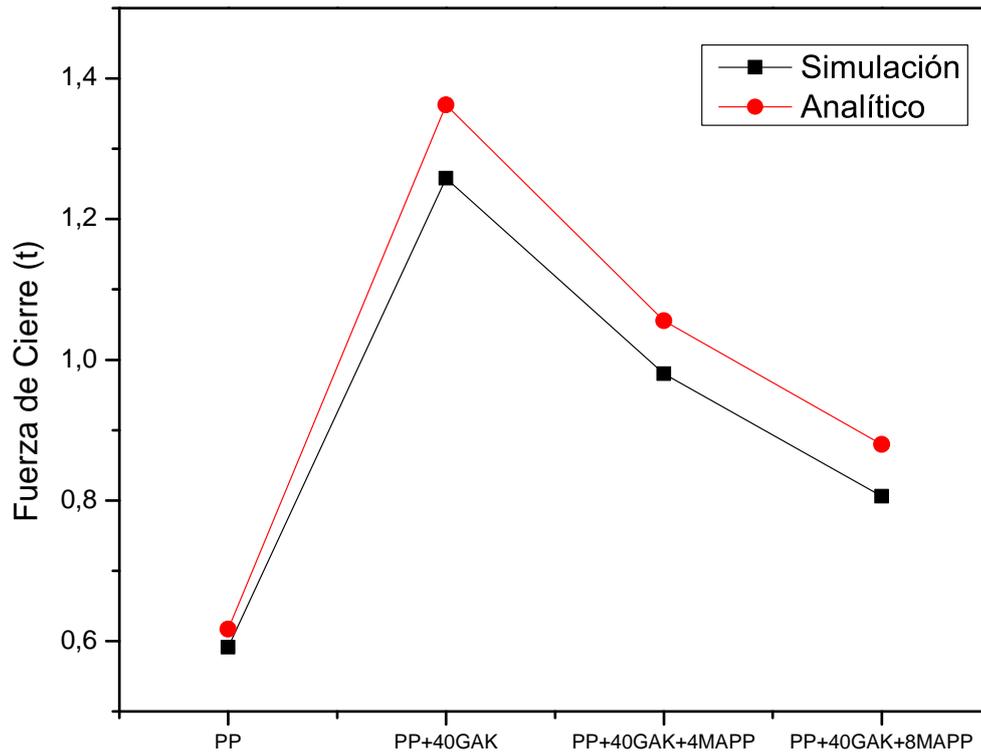


Figura 1.43 – Fuerza de Cierre, Analítico vs Simulación de PP+30GAK



**Figura 1.44** – Fuerza de Cierre, Analítico vs Simulación de PP+40GAK

Para el cálculo analítico del tiempo de refrigeración se emplearon las ecuaciones (1.25), (1.26), (1.27) y (1.28), con la figura 1.13, utilizando los valores de la tabla 1.22. Los valores obtenidos fueron comparados la simulación produciendo un error relativo del 2%. La tabla 1.23 presenta los resultados obtenidos.

**Tabla 1.22** – Valores utilizados para el cálculo del tiempo de refrigeración

	Magnitud	Unidad
Ti	463,15	<i>K</i>
Tm	298,15	<i>K</i>
Tc	373,15	<i>K</i>
cp	2700	<i>J/kg · K</i>
k	0,17	<i>W/m · K</i>
p	905	<i>kg/m<sup>3</sup></i>
x	0,004008	<i>m</i>

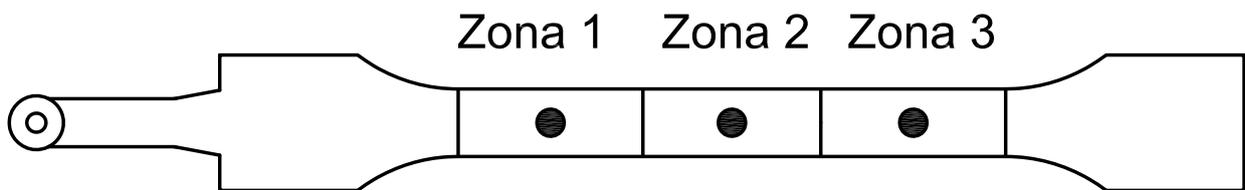
**Tabla 1.23** – Resultados analítico del tiempo de refrigeración

	Tiempo de Enfriamiento (s)		Error Relativo (%)
	Simulación	Analítico	
PP+GAK	82,600	80,814	2,162

El tiempo de refrigeración obtenido es alto tanto en la resolución analítica y la simulación. Esto se da por el alto valor de espesor de la pieza analizada, esto genera que el ciclo de enfriamiento sea alto para poder evacuar todo el calor de la pieza y alcanzar la temperatura de extracción. El modelo de cálculo utilizado genera una buena proximidad con error del 2%.

### 1.6.6 Resultados Tensor de Orientación

Para el estudio del estado de la orientación de las fibras cortas de GAK en la matriz de polipropileno, se analizó el comportamiento del reforzante con su tensor de orientación  $a_{11}$ . Mediante simulación se realizó el análisis de perfil de orientación; con respecto al espesor de la probeta, la simulación generó valores de comportamiento promediado en cada zona de estudio, es decir, el valor entregado abarca todos los valores del espesor. Los datos del tensor de orientación  $a_{11}$  del estudio se presentan en la tabla 1.20 y el perfil de orientación se presenta en la tabla 1.24 tomado en tres zonas de como se observa en la figura 1.45 .

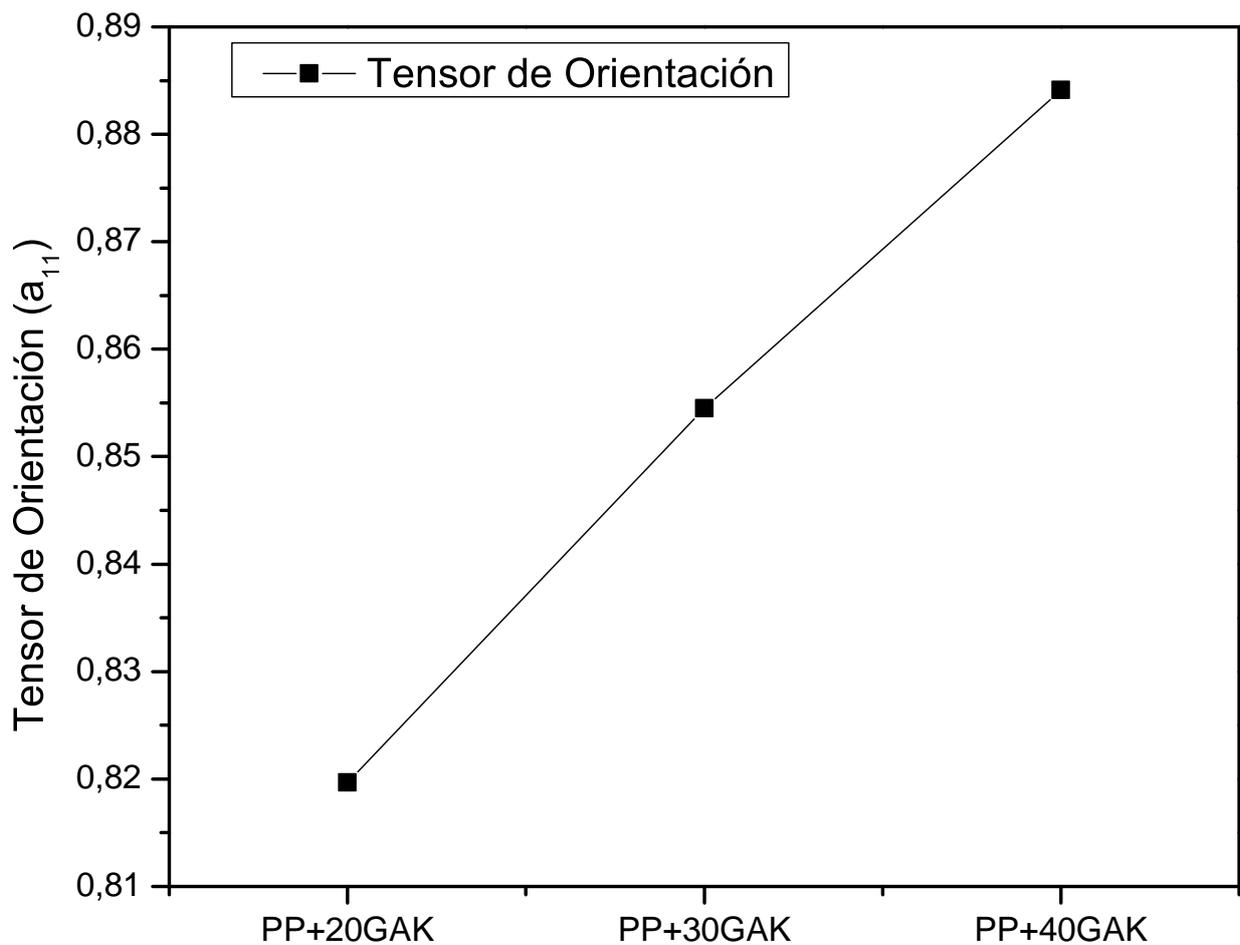


**Figura 1.45** – Zonas de análisis en la probeta

**Tabla 1.24** – Orientación en diferentes Zonas

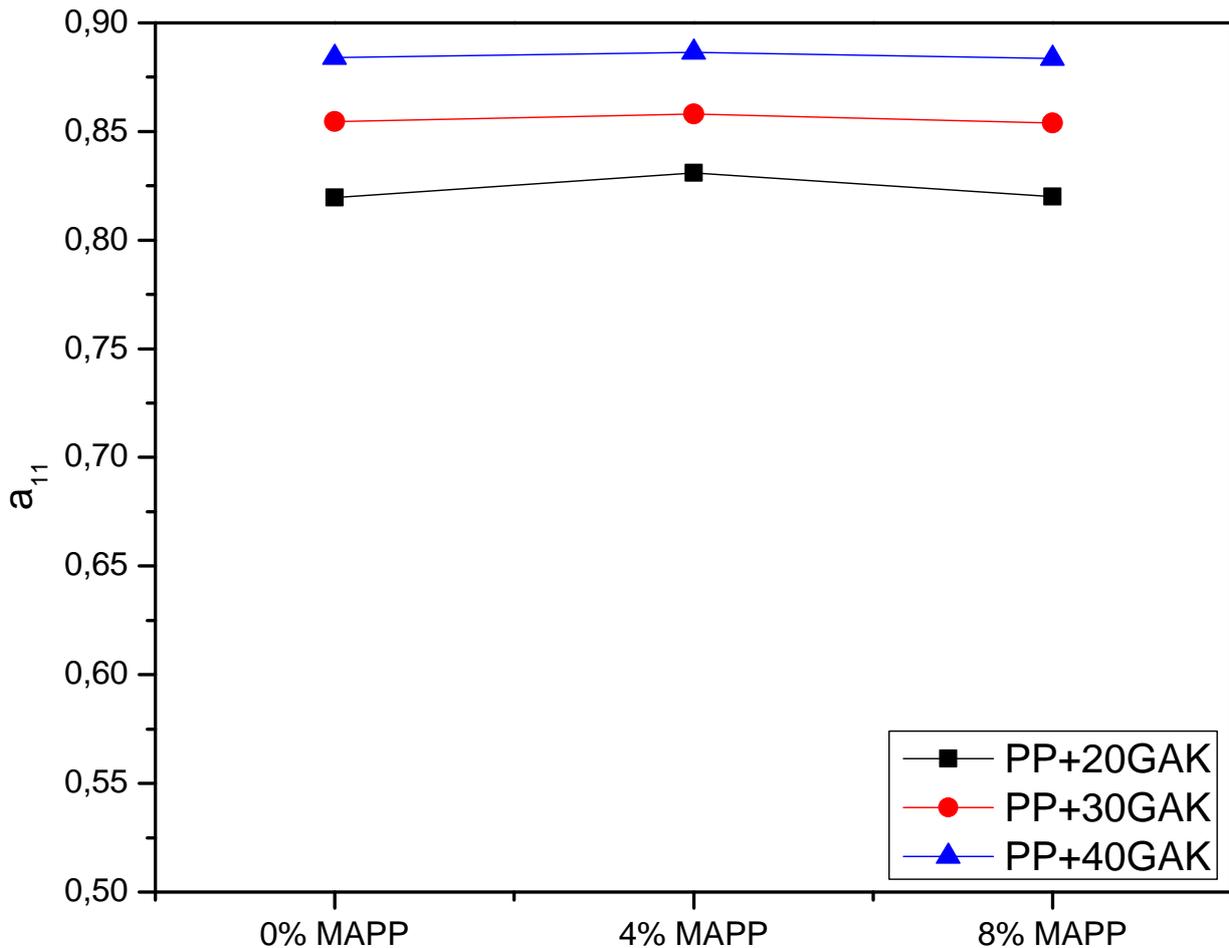
		Zona 1			Zona 2			Zona 3		
		Skin	Shell	Core	Skin	Shell	Core	Skin	Shell	Core
PP+20GAK	a <sub>11</sub>	0,812	0,817	0,725	0,808	0,813	0,705	0,81	0,811	0,700
	a <sub>22</sub>	0,188	0,183	0,275	0,192	0,187	0,295	0,19	0,189	0,300
PP+20GAK+4MAPP	a <sub>11</sub>	0,809	0,817	0,765	0,811	0,813	0,715	0,809	0,812	0,705
	a <sub>22</sub>	0,191	0,183	0,235	0,189	0,187	0,285	0,191	0,188	0,295
PP+20GAK+8MAPP	a <sub>11</sub>	0,808	0,8173	0,750	0,812	0,812	0,695	0,808	0,814	0,690
	a <sub>22</sub>	0,192	0,1827	0,250	0,188	0,188	0,305	0,192	0,186	0,310
PP+30GAK	a <sub>11</sub>	0,847	0,853	0,790	0,845	0,849	0,760	0,846	0,848	0,760
	a <sub>22</sub>	0,153	0,148	0,210	0,155	0,152	0,240	0,154	0,152	0,240
PP+30GAK+4MAPP	a <sub>11</sub>	0,837	0,856	0,800	0,845	0,848	0,795	0,840	0,849	0,770
	a <sub>22</sub>	0,163	0,144	0,200	0,155	0,152	0,205	0,160	0,151	0,230
PP+30GAK+8MAPP	a <sub>11</sub>	0,830	0,858	0,789	0,847	0,847	0,730	0,837	0,849	0,750
	a <sub>22</sub>	0,170	0,142	0,211	0,154	0,153	0,270	0,164	0,151	0,250
PP+40GAK	a <sub>11</sub>	0,878	0,881	0,825	0,875	0,879	0,785	0,877	0,878	0,775
	a <sub>22</sub>	0,122	0,119	0,175	0,125	0,121	0,215	0,123	0,122	0,225
PP+40GAK+4MAPP	a <sub>11</sub>	0,877	0,881	0,835	0,876	0,879	0,840	0,876	0,879	0,825
	a <sub>22</sub>	0,123	0,119	0,165	0,124	0,122	0,160	0,125	0,121	0,175
PP+40GAK+8MAPP	a <sub>11</sub>	0,877	0,882	0,823	0,878	0,878	0,830	0,875	0,879	0,815
	a <sub>22</sub>	0,124	0,118	0,178	0,122	0,122	0,170	0,125	0,121	0,185

Se observó que al incrementar el contenido de fibra en el material compuesto tiene mejor orientación como se ve en la figura 1.46. Esto se da por la fluidez que presenta el material, al tener menos carga de fibra el material cuenta con mayor fluidez como se vio en la figura 1.19 del análisis de MFI. El material al ser más fluido, al ingresar al molde se produce una reducción en el flujo laminar que desorienta a las fibras cortas y eleva el número de Reynolds. Al aumentar el contenido de fibra el fluido se volvió más viscoso como se analizó con MFI y la reometría capilar. Esto generó que el fluido sea más laminar al ingresar al molde y oriente mejor las fibras cortas. Se mostró que a mayor contenido de fibra el número de Reynolds es inversamente proporcional.



**Figura 1.46** – Tensor de Orientación  $a_{11}$  de PP+GAK con variación de fibra

El efecto del MAPP en el material compuesto presenta un pequeño cambio en el tensor de orientación, al agregar 4% de MAPP, la fibra empieza a tomar una orientación insignificante, al 8% este efecto se ve disminuido por el efecto lubricante que tiene el aditivo pero esta orientación no presenta mayor cambio. Esto se puede evidenciar en la figura 1.47.



**Figura 1.47** – Tensor de Orientación  $a_{11}$  de PP+GAK con variación de MAPP

Se analizó el perfil de orientación a través del espesor de la pieza evidenciando el efecto del MAPP. Se ha visto en los análisis de MFI y Reometría en las figuras 1.19, 1.20, 1.21, 1.22 y 1.23. El efecto lubricante del MAPP al 8% con un alto grado de lubricación y genera fluidez del material. Al incrementar el MAPP, este efecto es más evidente, generó un alto grado de fluidez y por tanto mayor movilidad de fibras en el centro de la probeta, pues el material al ser más fluido tiene menor flujo laminar y desorienta la fibra como se ve en la figura 1.51. Es evidente que al incrementar el contenido de fibra existe mayor orientación.

El material fundido obtiene una mejor orientación en la superficie de la pieza por el enfriamiento del material en menor tiempo, en el núcleo del material se evidencia que existe menor orientación de fibra por el mayor tiempo de enfriamiento necesario y el flujo menos laminar del fluido en el momento de inyección. Entre la superficie y el núcleo hay el pico máximo de orientación de fibra por el fluido laminar que existe en esta zona. Esto se evidencia en las figuras 1.48, 1.49, 1.50 y 1.51.

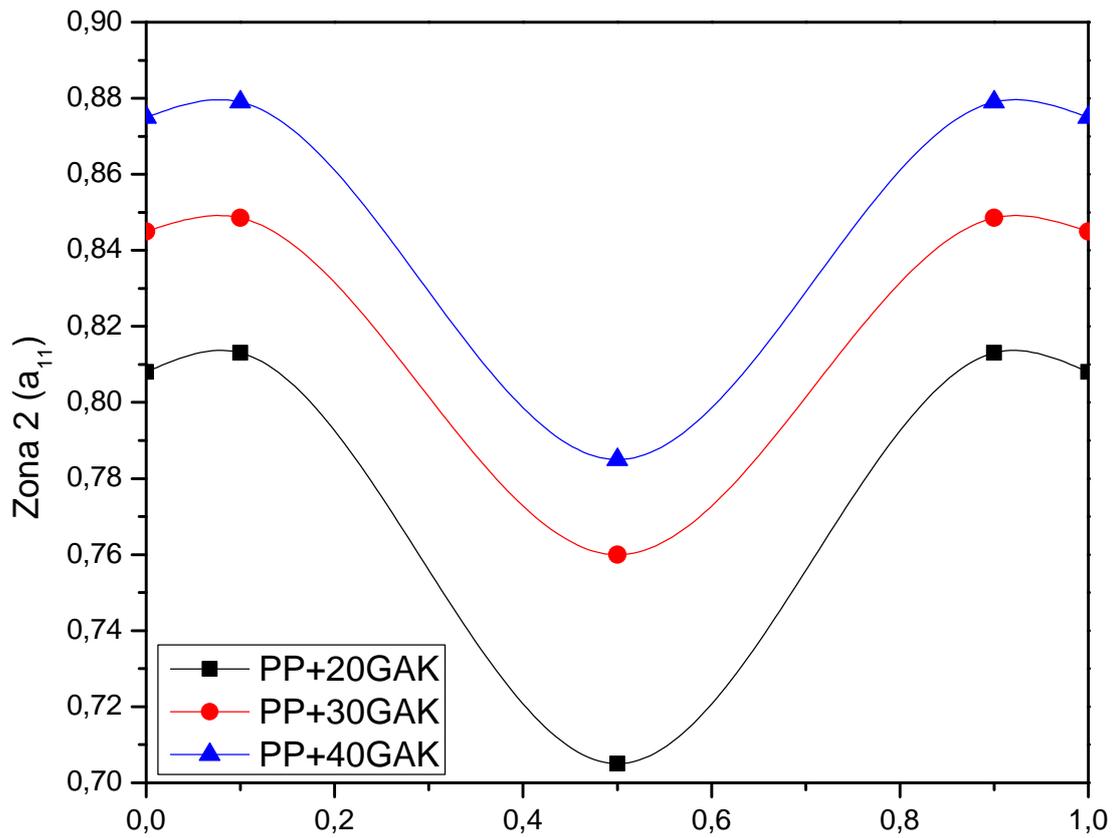


Figura 1.48 – Perfil de orientación de PP+GAK, zona 2

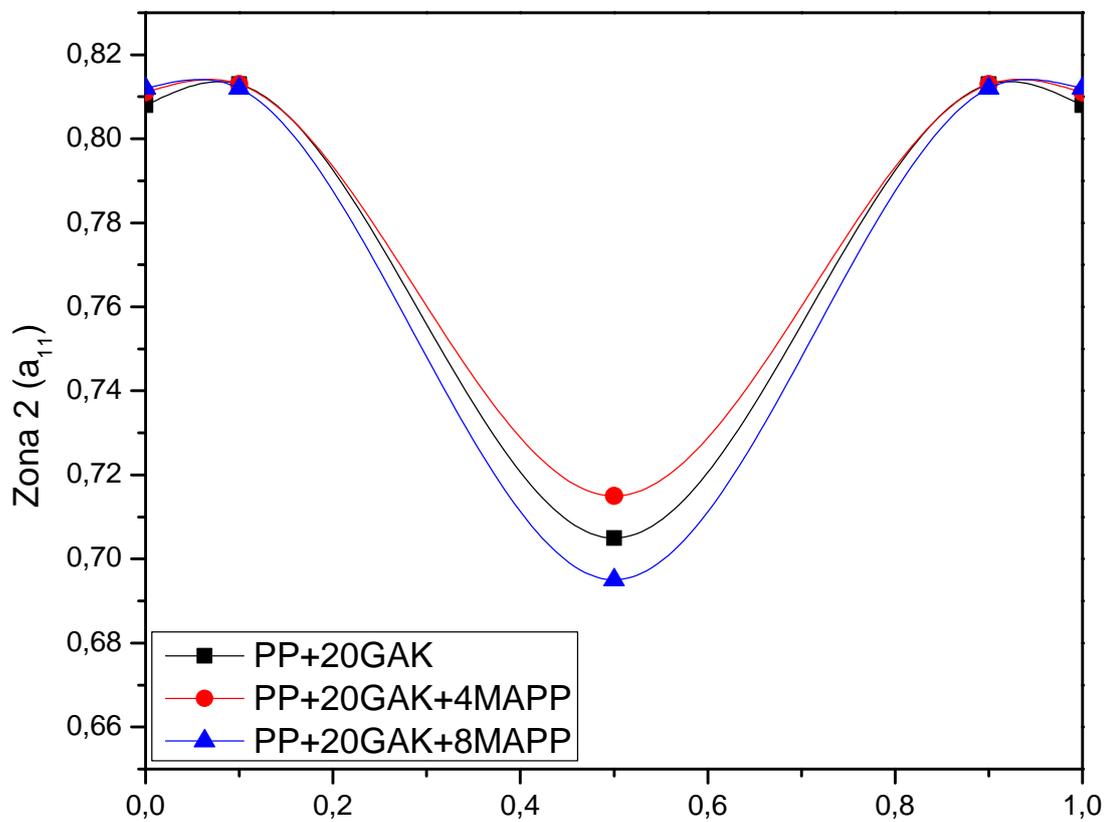


Figura 1.49 – Perfil de orientación de PP+20GAK, zona 2

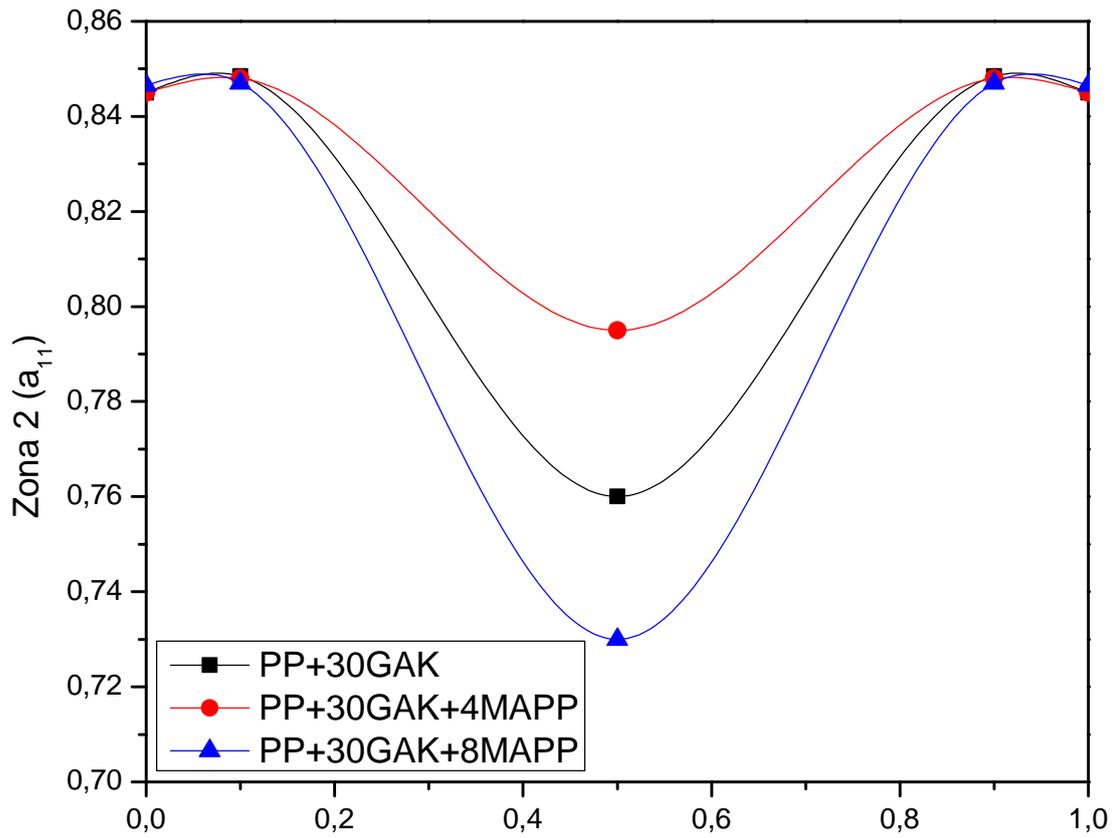


Figura 1.50 – Perfil de orientação de PP+30GAK, zona 2

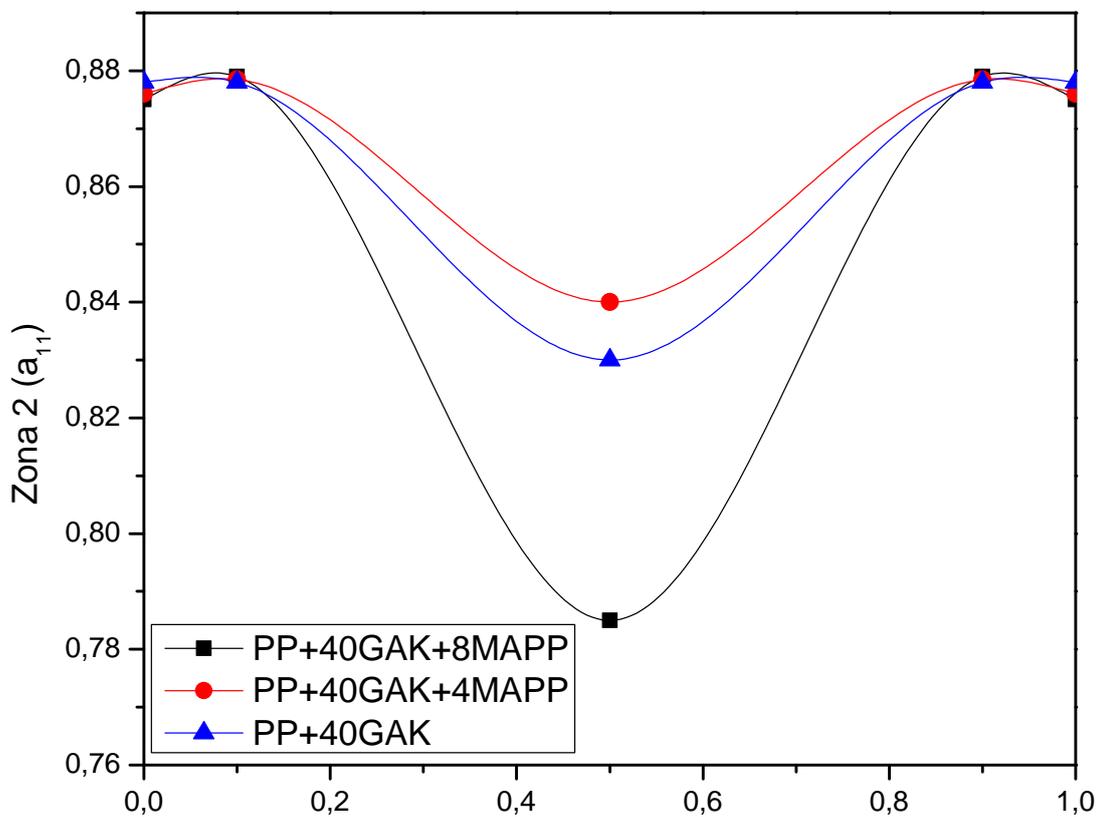


Figura 1.51 – Perfil de orientação de PP+40GAK, zona 2

Se observó que la superficie mantiene una orientación, con una pequeña pendiente como se puede evidenciar en la figura 1.52 y en la figura 1.53, el flujo de material por el enfriamiento más rápido que hay en la superficie y la poca movilidad de las fibras en esta zonas permite que se mantenga la orientación que obtienen por el punto de inyección.

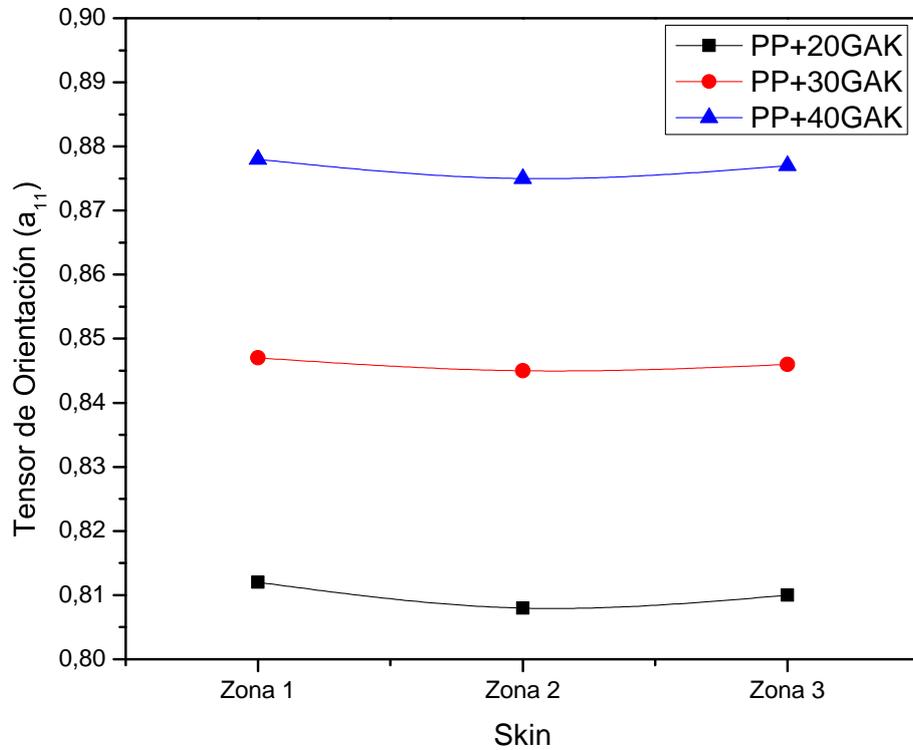


Figura 1.52 – Perfil de orientación de PP+GAK, Skin

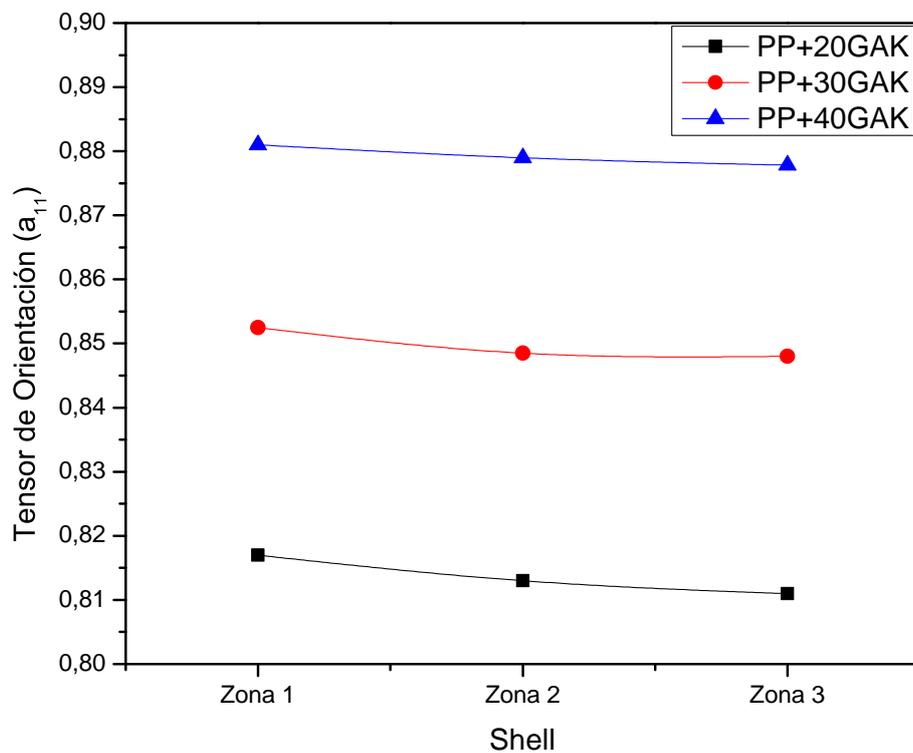


Figura 1.53 – Perfil de orientación de PP+GAK, Shell

Y en la figura 1.54 la pendiente es muy pronunciada conforme el fluido se aleja del punto de inyección. Esta pérdida de orientación es más pronunciada por el recorrido del fluido que permite mayor interacción de las fibras.

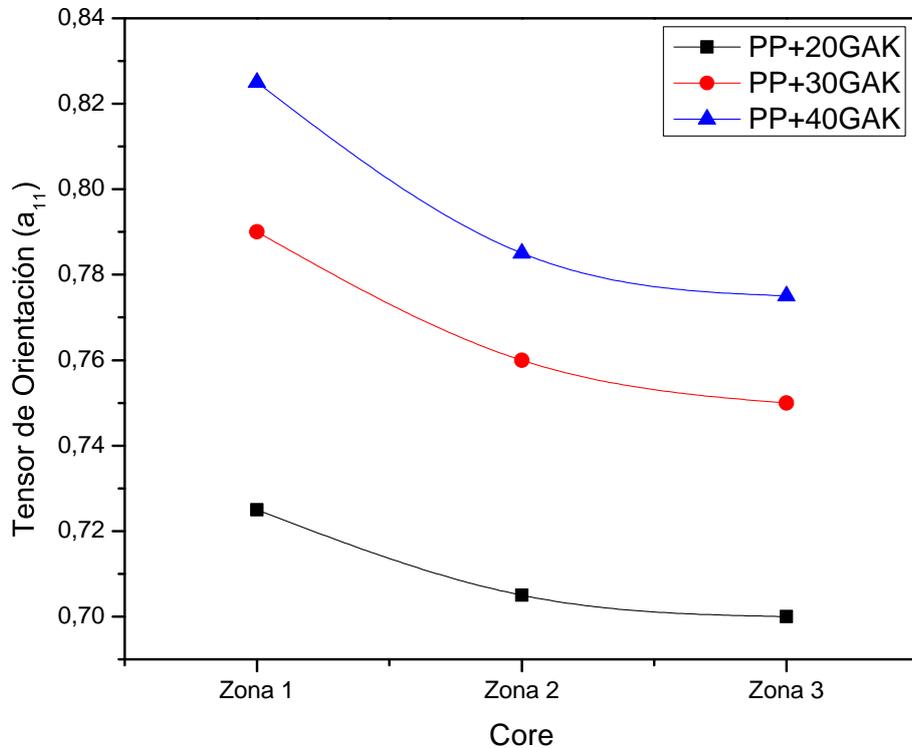


Figura 1.54 – Perfil de orientación de PP+GAK, Core

## 1.7 Conclusiones

- Tras el estudio realizado, se cuenta con una base de datos de las constantes reológicas del material compuesto PP+GAK que han sido adquiridas mediante reometría capilar y el ajuste de curvas con modelos matemáticos reológicos, lo cual representa un valioso aporte al análisis materiales compuesto con fibras naturales. De la misma manera se presenta una metodología de análisis de datos mediante los modelos reológicos.
- Para la recolección de datos se ha determinado que el tiempo y temperatura son dos parámetros que deben ser combinados para evitar degradación del material, puesto que alterara los resultados obtenidos
- El contenido de fibra reduce linealmente el índice de fluidez del compuesto con respecto al polímero puro. El efecto espesante de las fibras naturales en la matriz polimérica aumenta la densidad del material compuesto por el incremento de fibra.
- El agente de acople da un efecto lubricante sobre el compuesto.

- La temperatura de ensayo tiene un efecto directo sobre el MFI. A mayor contenido de fibra menor efecto de temperatura.
- Conforme aumenta el % fibra en el material compuesto, la viscosidad aumenta a velocidades de corte bajas. El aumento de la velocidad de corte genera que el material compuesto presente una estabilización al llegar a valores  $\dot{\gamma} = 1100[1/s]$ .
- A elevadas velocidades de corte  $\dot{\gamma}$ , el efecto tanto de las fibras como del MAPP, es despreciable. A velocidades bajas de corte, la viscosidad decrece mucho y el MAPP tiene un efecto lubricante.
- La pérdida de viscosidad que se produce al aumentar la velocidad de corte se da por el cambio de la conformación molecular del polímero, estas moléculas modifican su posición relativa, conforme la velocidad aumente y alcanzan un estado estable.
- El índice de consistencia incrementa en función del aumento de fibra, este comportamiento es directamente proporcional al aumento de fibra. Al contener MAPP este índice presenta un decrecimiento importante.
- El exponente de la ley de potencia tiene un decrecimiento en función del aumento de fibra, este comportamiento es inversamente proporcional al incremento de fibra. Al contener MAPP los valores presentan un incremento.
- A mayor contenido de fibra mayor presión de inyección. Una tendencia similar se observa en el tiempo de inyección. El material compuesto con el agente de acople MAPP, tiene una disminución en la presión de inyección conforme aumenta el contenido. El tiempo disminuye con el aumento de MAPP.
- El contenido de fibra aumenta la fuerza de cierre. El tiempo incrementa con el contenido de fibra para alcanzar el valor de la fuerza de cierre. El material compuesto con el agente de acople MAPP, tiene una disminución en la fuerza de cierre conforme aumenta el contenido de este. El tiempo disminuye con el aumento de MAPP.
- Los valores simulados presentan errores relativos mínimos de aproximación entre la simulación con respecto a los analíticos. La variación de presión entre la entradas del molde y la presión a la distancia  $x$  considera la presión de inyección en función de la dimensión de la pieza, brindando una buena aproximación de los resultados a la simulación. Los valores obtenidos cuentan con errores de aproximación de simulación entre 0,15 a 11,02%.
- El tiempo de refrigeración obtenido es alto por el espesor de la pieza analizada, esto genera que el ciclo de enfriamiento demore en evacuar todo el calor de la pieza y alcanzar la temperatura de extracción.
- Al incrementar el contenido de fibra en el material compuesto tiene mejor orientación. Al tener menos carga de fibra el material cuenta con mayor fluidez. Al aumentar el contenido de

fibra el fluido se vuelve más viscoso. Esto genera que el fluido sea más laminar al ingresar al molde y oriente mejor las fibras cortas. A mayor contenido de fibra el número de Reynolds es inversamente proporcional.

- El efecto lubricante del MAPP al 8% con un alto grado de lubricación y genera fluidez del material. Al incrementar el MAPP, este efecto es más evidente, genera un alto grado de fluidez y por tanto mayor movilidad de fibras en el centro de la probeta, pues el material al ser más fluido tiene menor flujo laminar y desorienta la fibra. Al incrementar el contenido de fibra existe mayor orientación.
- El material fundido obtiene una mejor orientación en la superficie de la pieza por el enfriamiento del material en menor tiempo, en el núcleo del material existe menor orientación de fibra por el mayor tiempo de enfriamiento necesario y el flujo menos laminar del fluido en el momento de inyección.

## 1.8 Recomendaciones

- Determinar los límites operativos del reómetro capilar al trabajar con alta concentración de fibras y baja temperatura.
- Se recomienda una definición más fina del mallado en el simulador para obtener mayor precisión en los resultados, específicamente en la orientación de fibra.
- Realizar un secado del pellet antes de realizar cualquier tipo de análisis debido a la naturaleza higroscópica de las fibras.
- No superar los 210 °C para evitar degradar térmicamente a las fibras.

## 1.9 Trabajos futuros

- Profundizar el estudio de la Reología del material compuesto con un análisis PVT estableciendo las constantes necesarias que pueden ser ingresadas en el simulador como caracterización del compuesto.
- Realizar un estudio del material compuesto en una pieza que se fabrique en la industria para el uso diario.
- Realizar un estudio de la degradación del material compuesto, al ser reutilizado para procesos de transformación de polímeros.

## Referencias bibliográficas

- [1] T. A. Osswald, W. Aquite, D. Ramírez, L. López, J. Puentes, C. Pérez, and S. G. Rodríguez, “Retos en la Industria de procesamiento de plásticos y compuestos,” *Dyna*, vol. 79, no. 175, pp. 20–28, 2012.
- [2] “El excesivo crecimiento de la población mundial amenaza su sostenibilidad.” Nov. 2011.
- [3] L. Martínez, M. López Manchado, A. Vázquez, and M. Arroyo, “Efecto de distintos tipos de fibra corta en las propiedades mecánicas de las mezclas de polipropileno/polietileno,” *IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga. Jornadas SAM*, pp. 1017–1024, 2000.
- [4] P. Colta and D. José, “Desarrollo experimental de blends de polipropileno con fibras naturales lignocelulósicas,” Dec. 2014.
- [5] M. V. Centeno, *El desarrollo esquivo: intentos y logros parciales de transformación económica y tecnológica en el Perú, 1970-2000*. Fondo Editorial PUCP, 2003.
- [6] E. Velazquez Otero, “Visualización de la distribución de las fibras de vidrio producida durante la extrusión de polímeros reforzados,” Ph.D. dissertation, 2010.
- [7] P. A. Aguilar, K. Quesada-Solís, R. Sibaja-Ballesteros, and J. R. Vega-Baudrit, “Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster,” *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 6, no. 2, p. 4, 2005.
- [8] E. R. Sandoval, A. F. Quintero, and A. A. Aponte, “Reología y textura de masas: Aplicaciones en trigo y maíz,” *Ingeniería e Investigación*, vol. 25, no. 1, pp. 72–78, 2005.
- [9] D. H. Chung, T. H. Kwon, and others, “Fiber orientation in the processing of polymer composites,” *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 175–188, 2002.
- [10] M. Ospina, R. Mejía de Gutiérrez, S. Delvasto, J. Monzó, M. V. Borrachero, and J. Payá, “Modificación de la morfología de la ceniza de cascarilla de arroz por molienda de alta energía y su efecto en las propiedades reológicas de pastas de cemento portland adicionadas,” *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 1, no. 2, pp. 577–584, 2009.
- [11] C. Pons, R. S. Giandini, and G. Pérez, “Desarrollo de software dirigido por modelos,” 2010.

- [12] S. G. Hatzikiriakos and J. M. Dealy, "Wall slip of molten high density polyethylenes. II. Capillary rheometer studies," *Journal of Rheology (1978-present)*, vol. 36, no. 4, pp. 703–741, May 1992.
- [13] K. Hamad, M. Kaseem, and F. Deri, "Melt rheology of poly (lactic acid)/low density polyethylene polymer blends," *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 1, no. 04, p. 208, 2011.
- [14] D. Garraín Cordero, "Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología de análisis de ciclo de vida," 2009.
- [15] A. Miravete, *Materiales compuestos 03*. Reverté, 2003, vol. 1.
- [16] V. Vuure, A. Willem, L. Q. N. Tran, C. Fuentes Rojas, L. R. Osorio Serna, E. E. Trujillo de los Rios, N. Vo Hong, D. Perremans, F. Bensadoun, J. Baets, and others, "Natural fibre composites: recent developments," in *5th Eucass-European Conference for Aerospace Sciences*, 2013.
- [17] "Las fibras naturales - Año Internacional de las Fibras Naturales 2009."
- [18] L. Garzón, L. M. López, J. F. Seminario, R. Zuluaga, S. Betancourt, P. Gañán, and L. J. Cruz, "A new natural fiber: Toquillla straw a potential reinforcement in thermoplastic polymer composites," *ICAMS*, 2014.
- [19] J. O. Ayala, L. E. Ballesteros, D. C. Suárez, and P. L. Forero, "Estandarización de una técnica de inyección de resinas poliéster para el estudio de la vasculatura cerebral," *Revista Salud UIS*, vol. 39, no. 3, 2007.
- [20] J. C. Posada, J. I. Villegas, L. Y. Jaramillo, C. A. Vargas, and L. A. García, "Comportamiento de materiales compuestos a partir de matriz polimérica con nanocargas en el proceso de moldeo por inyección usando software de simulación," *Entre Ciencia e Ingeniería*, no. 15, 2014.
- [21] M. López, C. Camurri, D. Corredor, and J. A. Jiménez, "Desarrollo y caracterización del material compuesto de base cobre reforzado con cerámicas intermetálicas de TiB<sub>2</sub>," 2005.
- [22] M. Hidalgo, M. Muñoz, and K. Quintana, "Análisis mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con fibras cortas de fique en disposición bidimensional." *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, RLMM*, vol. 32, no. 1, 2012.
- [23] F. T. Wallenberger and N. Weston, *Natural fibers, plastics and composites*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [24] T. A. Osswald, E. Baur, S. Brinkmann, K. Oberbach, and E. Schmachtenberg, "International plastics handbook," 2006.

- [25] V. Pashkova, E. Włoch, A. Mikołajczyk, M. Łaniecki, B. Sulikowski, and M. Derewiński, “Composite SBA-15/MFI Type Materials: Preparation, Characterization and Catalytic Performance,” *Catalysis Letters*, vol. 128, no. 1-2, pp. 64–71, Nov. 2008.
- [26] M. Mahdavi, P. L. Clouston, and S. R. Arwade, “A low-technology approach toward fabrication of laminated bamboo lumber,” *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 257–262, 2012.
- [27] S. Benítez and J. Dario, “Simulación del estado de orientación de fibras cortas de guadua en un biomaterial compuesto: PP-GAK moldeado por inyección mediante sistemas CAD-CAE,” Feb. 2015.
- [28] J. Xie and Y.-C. Jin, “Parameter determination for the Cross rheology equation and its application to modeling non-Newtonian flows using the WC-MPS method,” *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 10, no. 1, pp. 111–129, Jan. 2016.
- [29] G. A. M. Rodríguez, “Efecto de las características de la malla sobre resultados de la simulación del proceso de inyección para accesorios de tuberías.”
- [30] J. de Juanes.-Márquez, M. L. Martínez.-Muneta, M. Rodríguez.-Villagrà, and J. M. Pérez.-García, “Simulando la inyección de plásticos,” *Simulating plastic injection. New trends to understand processes.*, vol. 87, no. 6, pp. 671–678, Nov. 2012.
- [31] S. A. Hijjawi Rodríguez, “Efecto de los modelos reológicos en la simulación del proceso de inyección,” p. 102, 2007.
- [32] J. A. Picas, J. Guasch, A. Forn, A. Castaño, and E. Ruperez, “Nuevos materiales base aluminio para moldes de inyección de plásticos,” *Anales de Mecánica de la Fractura XXIII. Encuentro del grupo español de fractura*, pp. 29–23, 2006.
- [33] G. Menges, G. Mohren, L. A. Mestre, and A. A. Massanet, *Moldes para inyección de plásticos*. Gustavo Gili, 1980.
- [34] B. Abbes, R. Ayad, J. C. Prudhomme, and J. P. Onteniente, “Numerical simulation of thermo-plastic wheat starch injection molding process,” *Polymer engineering and science*, vol. 38, no. 12, p. 2029, 1998.
- [35] L. Garzon, L. M. Lopez, and J. Fajardo, “New natural fiber: Toquilla straw a potential reinforcement in thermoplastic polymer composites,” in *Conference: ICMS 2014*.
- [36] J. I. F. Seminario, G. Suarez, L. J. Cruz, L. E. G. Muñoz, and L. M. López, “Characterization of the state planar orientation for short natural fiber in polymeric composites by means of the tensor orientation.”

- [37] J. Fajardo, D. Lasso, C. Paltán, L. López, D. Perguachi, and L. Cruz., “Improving the processing and rheological properties of natural fibre/ polypropylene composites,” *TORONTO’2015 AES-ATEMA 25th International Conference “Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications”*.
- [38] J. I. Fajardo, J. Santos, L. Garzón, and L. J. Cruz, “Factorial study of process parameters on the orientation state of injected bamboo fibre/polypropylene composite parts,” *OTTAWA’2015 AES-ATEMA 26th International Conference “Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications”*.
- [39] J. D. Santos, J. I. Fajardo, A. R. Cuji, J. A. García, L. E. Garzón, and L. M. López, “Experimental evaluation and simulation of volumetric shrinkage and warpage on polymeric composite reinforced with short natural fibers,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 287–293, 2015.
- [40] J. D. Santos, J. I. Fajardo, A. R. Cuji, A. J. García, L. E. Garzón, and L. M. López., “Evaluación experimental y simulaciones de la contracción volumétrica y alabeo en moldeo por inyección de un compuesto polimérico reforzado con fibras naturales cortas,” *VIII Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM), 2014*.
- [41] J. I. Fajardo, D. R. Lasso, L. E. Valarezo, S. Betancourt, and L. J. Cruz, “Desarrollo de un material biocompuesto de polietileno de alta densidad reforzado con fibras naturales cortas de guadua angustifolia kunth,” *VIII Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM), 2014*,.
- [42] R. E. Bretas, *Reología de polímeros fundidos*. Editora da UFSCar, 2005.
- [43] M. U. Velasco and P. Y. Mehrenberger, *Los polímeros: síntesis, caracterización, degradación y reología*. Instituto Politécnico Nacional, 2010.
- [44] M. Campo, M. D. Escalera, B. Torres, J. Rams, and A. Ureña, “Comportamiento a desgaste de recubrimientos de material compuesto de matriz de aluminio fabricados por proyección térmica,” *Revista de metalurgia*, vol. 43, no. 5, pp. 359–369, 2007.
- [45] S.-p. Luo, J.-z. Cao, and X. Wang, “Properties of PEG/thermally modified wood flour/polypropylene (PP) composites,” *Forestry Studies in China*, vol. 14, no. 4, pp. 307–314, 2012.
- [46] A. Besednjak, *Materiales Compuestos*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2005, google-Books-ID: gMSg5rURr6sC.
- [47] “Materiales compuestos en automóviles - nanotubo.com.ar.”
- [48] H. A. Khalil, I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, and Y. S. Hadi, “Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review,” *Materials and Design*, vol. 42, pp. 353–368, 2012.

- [49] P. B. Albarracín Parra and E. X. Castillo Agurto, “Determinación de la distribución de orientación y longitud de fibras mediante procesamiento digital de imágenes en compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas,” 2014.
- [50] C. A. J. Alvarado, P. R. López, and R. R. Villarreal, “Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto,” *Ingenierías*, vol. 7, no. 22, p. 7, 2004.
- [51] L. E. Valarezo Jaramillo, “Obtención experimental de un material biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de guadúa angustifolia proveniente del Ecuador,” 2013.
- [52] J. I. Fajardo, L. E. Valarezo, L. M. López, and A. P. Sarmiento, “Experiencias in obtaining polymeric composites reinforced with natural fiber from ecuador,” 2013.
- [53] R. Tokoro, D. M. Vu, K. Okubo, T. Tanaka, T. Fujii, and T. Fujiura, “How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers,” *Journal of Materials Science*, vol. 43, no. 2, pp. 775–787, Oct. 2007.
- [54] S. Mohanty and S. K. Nayak, “Short Bamboo Fibre-reinforced HDPE Composites: Influence of Fibre Content and Modification on Strength of the Composite,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Mar. 2010.
- [55] Q. Te-fu, H. Luo-hua, and L. Gai-yun, “Effect of chemical modification on the properties of wood/polypropylene composites,” *Journal of Forestry Research*, vol. 16, no. 3, pp. 241–244, 2005.
- [56] K. Goda, M. Sreekala, A. Gomes, T. Kaji, and J. Ohgi, “Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites—effect of load application during mercerization of ramie fibers,” *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, vol. 37, no. 12, pp. 2213–2220, 2006.
- [57] C. Rosales, R. Perera, M. Matos, T. Poirier, H. Rojas, J. Palacios, and S. Quintana, “Influencia de la morfología sobre las propiedades mecánicas de nanocompuestos y mezclas de polímeros,” *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 26, no. 1, pp. 3–19, 2006.
- [58] A. Ochoa Mendoza, “Reciclado mecánico de materiales compuestos con fibras de celulosa,” Ph.D. dissertation, Industriales, 2005.
- [59] F. T. García, “Reología de polímeros: parte 1. Nociones básicas y modelos reológicos,” *Revista de Química*, vol. 14, no. 1, pp. 35–51, 2013.
- [60] G. Locati and F. Baldi, “Reómetro Bi-capilar para la caracterización de los Polímeros en estado de fusión,” *Revista de plásticos modernos*, vol. 85, no. 562, pp. 346–348, 2003.

- [61] F. R. García Cavazos, M. d. Reyes Melo, V. A. González González, C. A. Guerrero Salazar, and A. F. García Loera, “Aplicación del cálculo fraccional a la reología de materiales poliméricos,” *Ingenierías*, vol. 10, no. 35, pp. 42–47, 2007.
- [62] P. J. Carreau, D. De Kee, and R. P. Chhabra, *Rheology of polymeric systems: principles and applications*. Hanser Publishers Munich, 1997.
- [63] A. M. A. Vásquez and N. R. Demarquette, “Propiedades reológicas del polipropileno en flujos elongacionales y de cizallamiento,” *Scientia Et Technica*, vol. 1, no. 36, 2007.
- [64] A. F. Rigail-Cedeño, “Aplicaciones del Melt Flow Index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos,” *Revista Tecnológica-ESPOL*, vol. 19, no. 1, 2006.
- [65] M. R. Carpio and M. de María Ruiz, *Ingeniería de los materiales plásticos*. Díaz de Santos, 1988.
- [66] D. H. Morton-Jones, *Procesamiento de plásticos: inyección, moldeo, hule, PVC*. Limusa, 1993, google-Books-ID: GG5OPQAACAAJ.
- [67] “Reómetros, reómetro - Apfísicas.”
- [68] Q. c. . e.-I. c. . Marketizer.com, “La reología y reometría | QuimiNet.com.”
- [69] F. N. Cogswell, *Polymer melt rheology: a guide for industrial practice*. Elsevier, 1981.
- [70] L. F. R. d. Valle, *Extrusión de plásticos: principios básicos*. Editorial Limusa, 1993.
- [71] Propilco, “Información sobre polipropileno y generalidades,” Propilco, Tech. Rep., 2015.
- [72] B. Tremblay, “Estimation of the elongational viscosity of polyethylene blends at high deformation rates,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 33, no. 2, pp. 137–164, 1989.
- [73] J. C. García Quesada, “Tema 5. Técnicas reométricas,” *Reología*, 2008.
- [74] G. Lin, X.-J. Zhang, L. Liu, J.-C. Zhang, Q.-M. Chen, and L.-Q. Zhang, “Study on microstructure and mechanical properties relationship of short fibers/rubber foam composites,” *European Polymer Journal*, vol. 40, no. 8, pp. 1733–1742, 2004.
- [75] J. C. Cárdenas, O. J. L. H, and K. T. P. R, “Estudio reológico de los fluidos viscoelásticos surfactantes utilizados en operaciones de fracturamiento hidráulico,” *Revista Fuentes*, vol. 9, no. 1, Jan. 2012.
- [76] O. Méndez Zamora, “Solución A La Ecuación De Navier–Stokes Generalizada Con Ley De Potencia Via Método De Elemento Finito,” Ph.D. dissertation, 2012.

- [77] J. Cárdenas and E. Fonseca, “Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura,” *Revista EIA*, vol. 12, no. 2, pp. 125–137, 2009.
- [78] “Cross WLF viscosity model | Moldflow Flex | Autodesk Knowledge Network.”
- [79] V. K. Savgorodny and L. Uralde, *Transformación de plásticos*. Editorial Gustavo Gili, 1978.
- [80] A. C and J. Sanz, *Injection Molding Processing Data*, ser. Injection molding package. Hanser, 2001.
- [81] A. Arsad, A. R. Rahmat, A. Hassan, M. Mokhtar, and S. N. M. Dali, “Flow Characteristics and Dynamic Behavior of Polyamide 6/Acrylonitrile Butadiene Styrene (PA6/ABS) Blends,” *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, vol. 62, no. 4, pp. 209–214, 2013.
- [82] N. S. Rao and N. R. Schott, *Understanding Plastics Engineering Calculations: Hands-on Examples and Case Studies*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012.
- [83] G. Bodini, F. C. Pessani, and H. Bañuelos, *Moldes y máquinas de inyección para la transformación de plásticos*. McGraw-Hill, 1999.
- [84] Innoget, “Orientación de fibras en materiales compuestos: mejora de las propiedades del material y proceso de fabricación - Universidad de Burgos technology transfer portal.”
- [85] S.-Y. Fu and B. Lauke, “Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers,” *Composites Science and Technology*, vol. 56, no. 10, pp. 1179–1190, 1996.
- [86] “CAD-CAM-CAE,” Nov. 2013.
- [87] “TIIPFLOW - Software Open Source Inyección de plásticos.”
- [88] “CADMOULD 3df - Software CAD de simulación en procesos plásticos.”
- [89] “Diseño de moldeo de plástico por inyección | Simulation Moldflow.”
- [90] “The Power Law Coefficient : Plastics Technology.”
- [91] “Cadmould 3d-F simulacion de inyeccion de plasticos.”
- [92] “SOLIDWORKS Plastics.”
- [93] “Compare Products | Moldflow Software | Autodesk.”
- [94] “Simulación del proceso de inyección en el diseño de piezas de plástico.”

- 
- [95] S. H. P. Bettini, M. P. P. de Miranda Josefovich, P. A. R. Muñoz, C. Lotti, and L. H. C. Mattoso, “Effect of lubricant on mechanical and rheological properties of compatibilized pp/sawdust composites,” *Carbohydrate polymers*, vol. 94, no. 2, pp. 800–806, 2013.
- [96] A. A. Klyosov, *Wood-plastic composites*. John Wiley & Sons, 2007.

# Programación en Matlab

## A.1 Ley de Potencia

```

1 function [fitresult , gof] = createFit2(x, y)
2 %CREATEFIT2(X,Y)
3 % Creamos un ajuste a la ley de potencia.
4 % Datos para el ingreso:
5 % X Entrada: x velocidad de Corte
6 % Y Salida: y viscosidad
7 % Salida:
8 % Una figura que representa el ajuste de Datos.
9
10 %cargamos los valores de X,Y
11 [xData , yData] = prepareCurveData( x, y );
12
13 % Configuramos el tipo de ajuste y las opciones.
14 ft = fittype( 'a*exp(-(b)*(190-200))*x.^(c-1)', 'independent', 'x
    ', 'dependent', 'y' );
15 opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
16 opts.Display = 'Off';
17 opts.Robust = 'Bisquare';
18 opts.StartPoint = [0.832936712285323 0.775910709337946
    0.481004952829605];
19
20 % Ajustar el modelo a los datos.
21 [fitresult , gof] = fit( xData , yData , ft , opts )
22
23 % Crear una figura
24 figure( 'Name', 'Shear Rate vs Viscosity' );

```

```

25
26 % Imprimir los datos obtenidos
27 subplot( 2, 1, 1 );
28 plot(xData,yData,'o','MarkerSize',5,'Color',[0 0 1],
      'MarkerFaceColor',[0 0 1])
29 hold on
30 plot(fitresult)
31 legend('Shear Rate vs Viscosity','Fit','Location','NorthEast')
      ;
32 % Dar nombre de los ejes
33 xlabel('Shear Rate (1/s)');
34 ylabel('Viscosity (Pa\cdots)');
35 axis([0 x(10) 0 y(1)])
36 grid on
37
38 % Imprimir residuals.
39 subplot( 2, 1, 2 );
40 h = plot(fitresult, xData, yData, 'residuals');
41 legend( h, 'Shear Rate vs Viscosity - residuals', 'Zero Line',
      'Location', 'NorthEast' );
42 % Dar nombre de los ejes
43 xlabel('x');
44 ylabel('y');
45 axis([0 x(10) -inf inf])

```

## A.2 Cross -WLF

```

1 function [fitresult, gof] = createFit(x, y)
2 %CREATEFIT(X,Y)
3 % Creamos un ajuste a Cross-WLF.
4 % Datos para el ingreso:
5 % X Entrada: x velocidad de Corte
6 % Y Salida: y viscosidad
7 % Salida:
8 % Una figura que representa el ajuste de Datos.
9
10 %cargamos los valores de X,Y
11 [xData, yData] = prepareCurveData( x, y );
12

```

```
13 % Configuramos el tipo de ajuste y las opciones.
14 ft = fitype( 'no/(1+((no*x)/(a)).^(1-c))', 'independent', 'x', '
    dependent', 'y' );
15 opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
16 opts.Display = 'Off';
17 opts.Robust = 'Bisquare';
18 opts.StartPoint = [0.0971317812358475 0.823457828327293];
19
20 % Ajustar el modelo a los datos.
21 [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts)
22
23 % Crear una figura
24 figure( 'Name', 'Shear Rate vs Viscosity' );
25
26 % Imprimir los datos obtenidos
27 subplot( 2, 1, 1 );
28 plot(xData, yData, 'o', 'MarkerSize', 5, 'Color', [0 0 1], '
    MarkerFaceColor', [0 0 1])
29 hold on
30 plot(fitresult)
31 legend( 'Shear Rate vs Viscosity', 'Fit', 'Location', 'NorthEast' )
    ;
32 % Dar nombre de los ejes
33 xlabel( 'Shear Rate (1/s)' );
34 ylabel( 'Viscosity (Pa\cdots)' );
35 axis([0 x(10) 0 y(1)])
36 grid on
37
38 % Imprimir residuals.
39 subplot( 2, 1, 2 );
40 h = plot(fitresult, xData, yData, 'residuals');
41 legend( h, 'Shear Rate vs Viscosity - residuals', 'Zero Line', '
    Location', 'NorthEast' );
42 % Dar nombre de los ejes
43 xlabel( 'x' );
44 ylabel( 'y' );
45 axis([0 x(10) -inf inf])
```

### A.3 Ajuste de Ley de Potencia

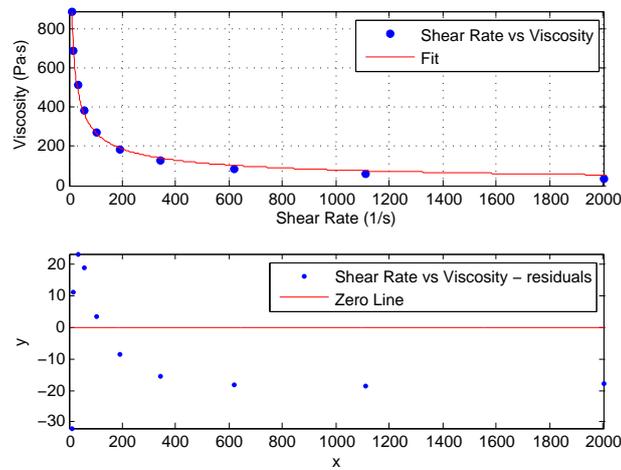


Figura A.1 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP

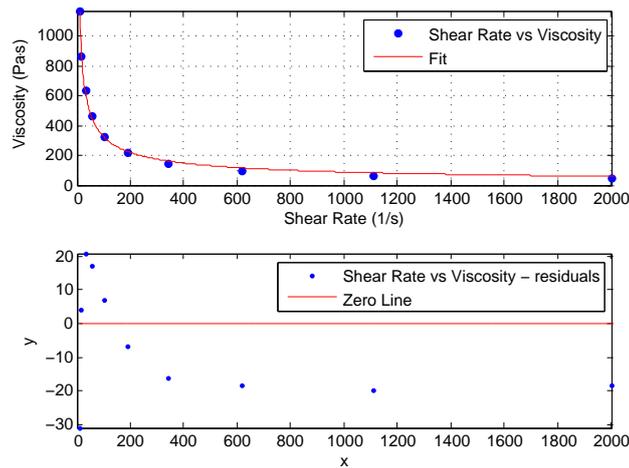


Figura A.2 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+20GAK

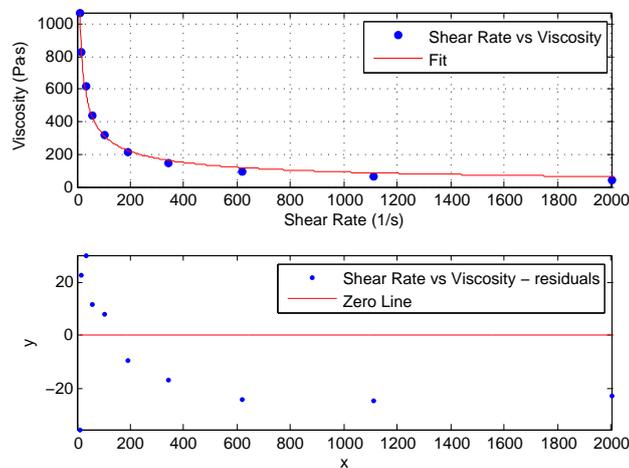


Figura A.3 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+20GAK+4MAPP

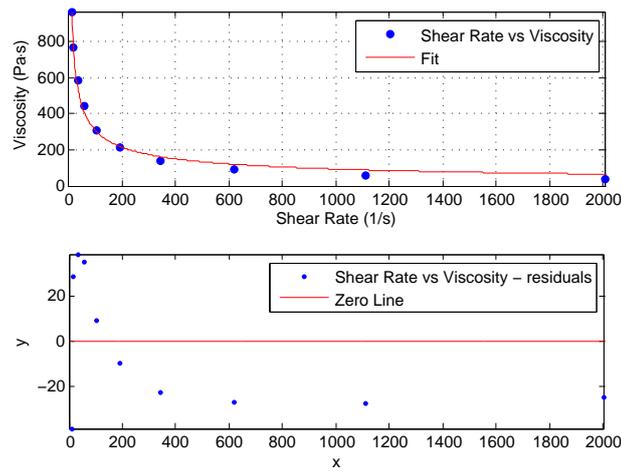


Figura A.4 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+20GAK+8MAPP

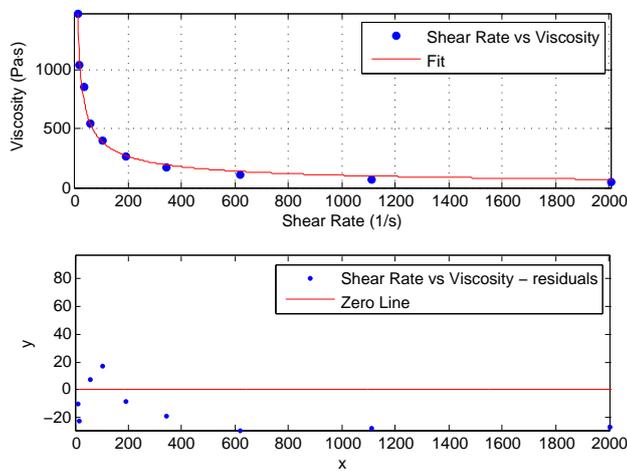


Figura A.5 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+30GAK

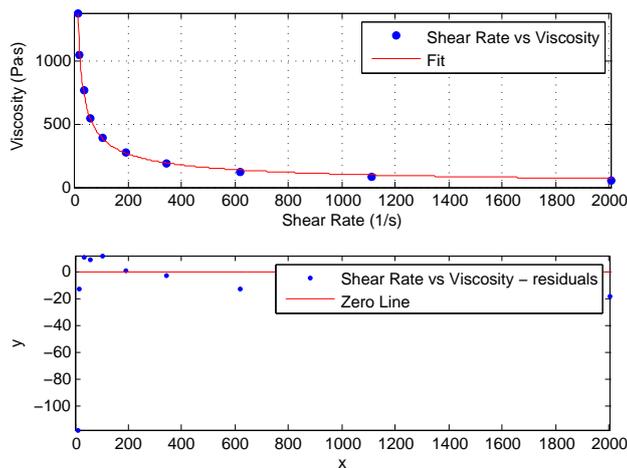


Figura A.6 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+30GAK+4MAPP

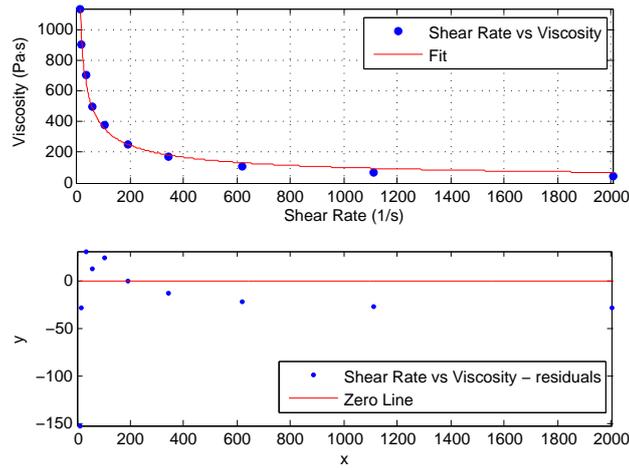


Figura A.7 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+30GAK+8MAPP

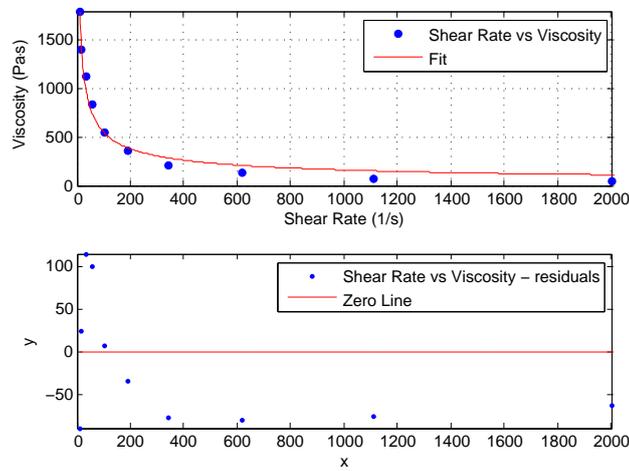


Figura A.8 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+40GAK

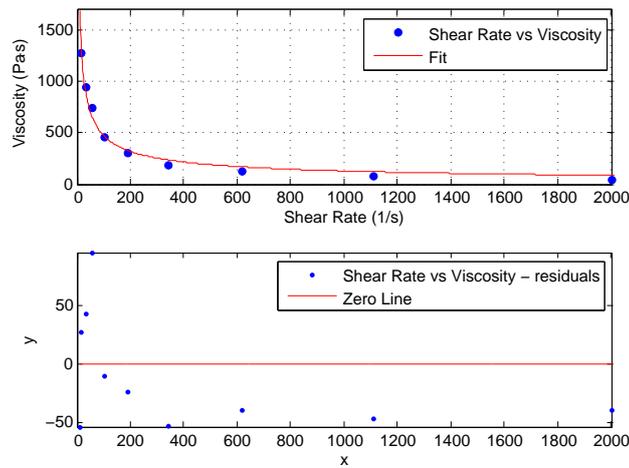


Figura A.9 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+40GAK+4MAPP

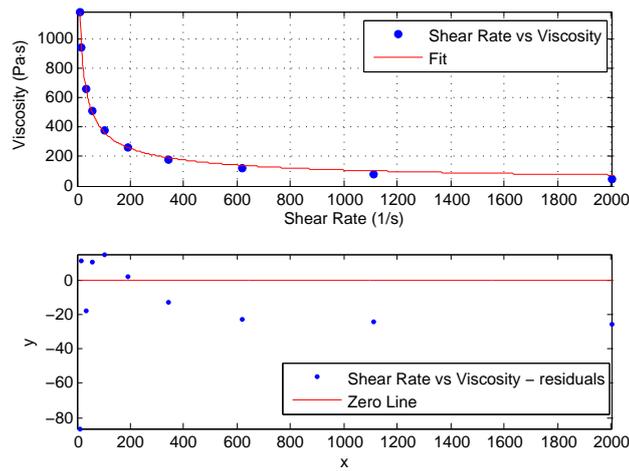


Figura A.10 – Ajuste a ley de potencia del comportamiento reológico PP+40GAK+8MAPP

## A.4 Ajuste de Curvas de Cross-WLF

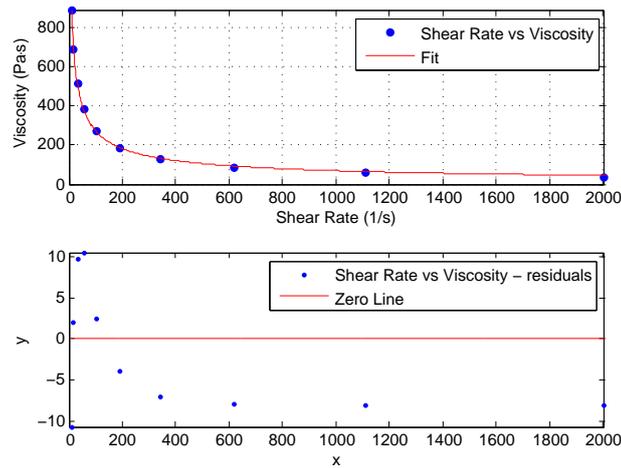


Figura A.11 – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP

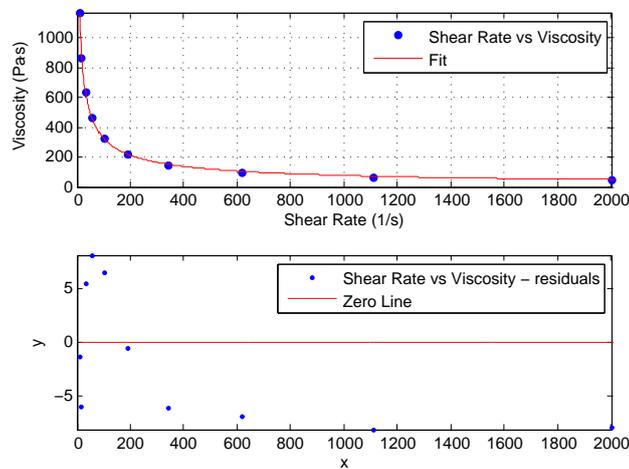


Figura A.12 – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+20GAK

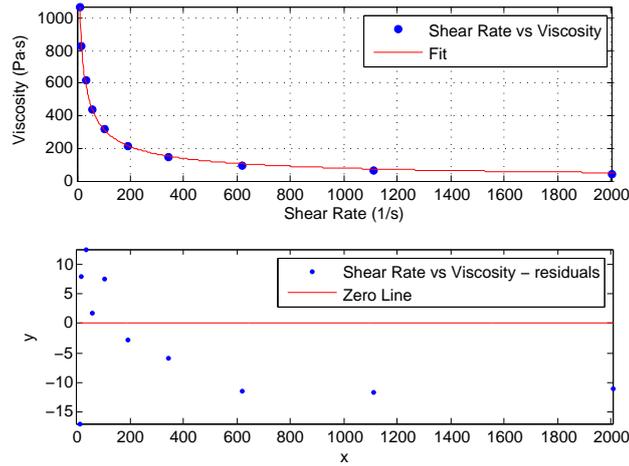


Figura A.13 – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+20GAK+4MAPP

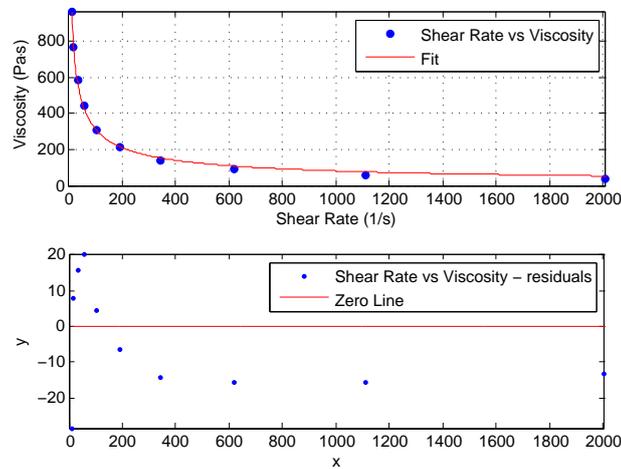


Figura A.14 – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+20GAK+8MAPP

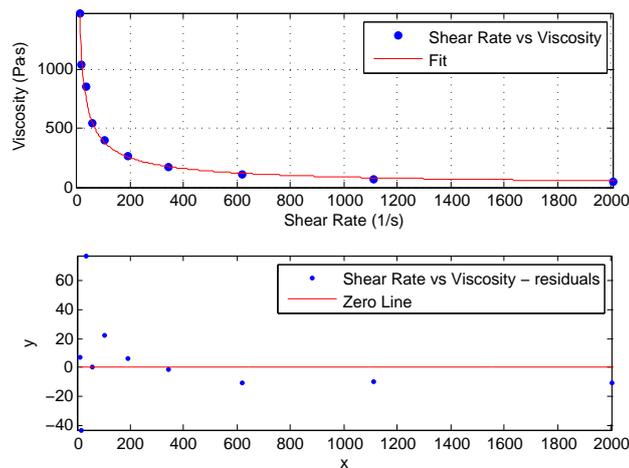


Figura A.15 – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+30GAK

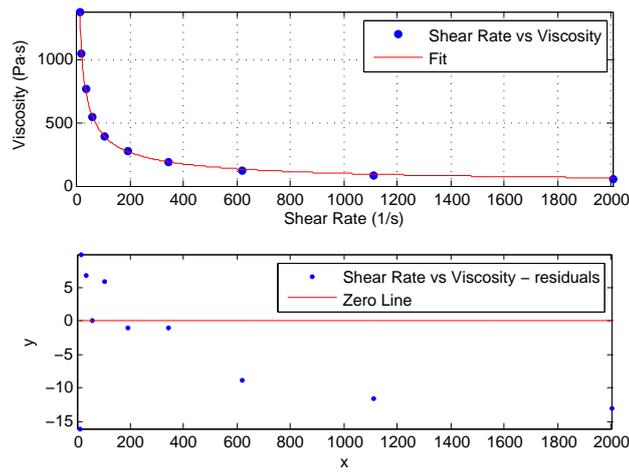


Figura A.16 – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+30GAK+4MAPP

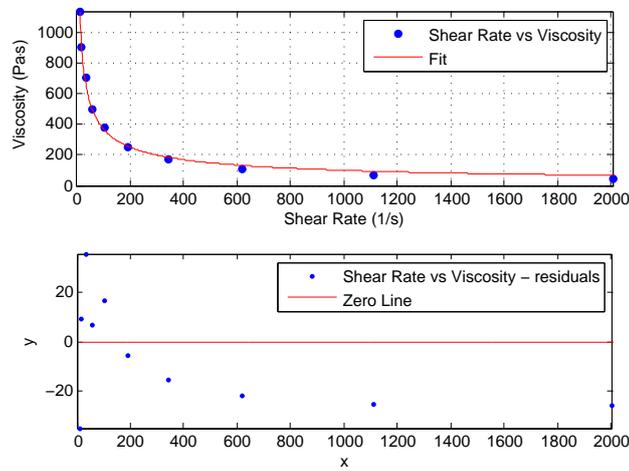


Figura A.17 – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+30GAK+8MAPP

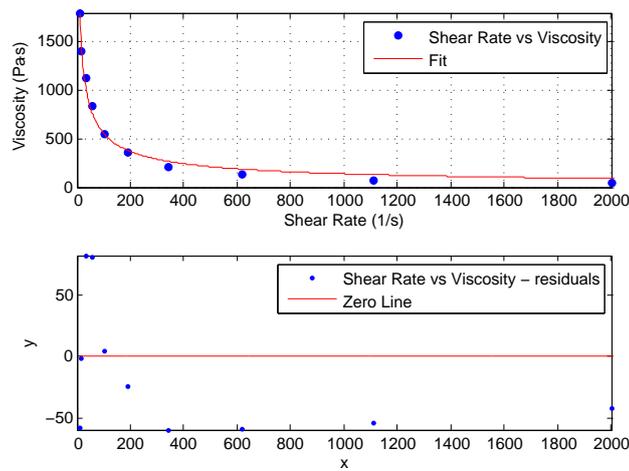
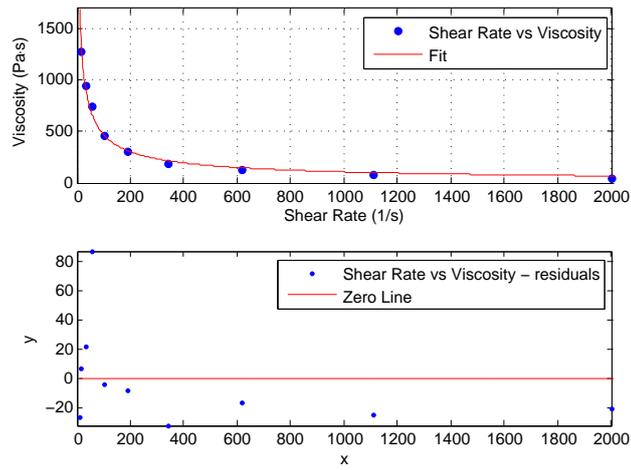
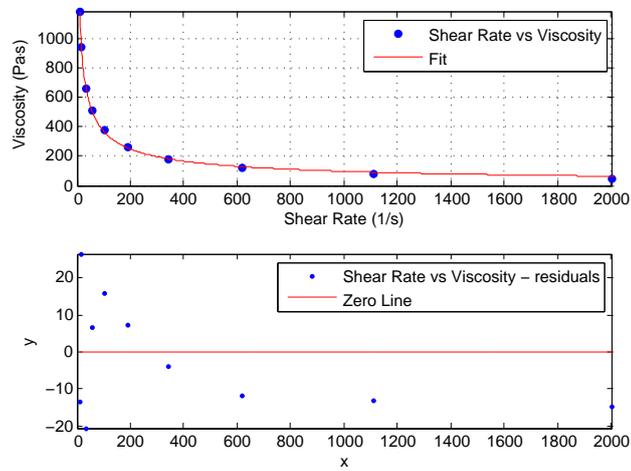


Figura A.18 – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+40GAK



**Figura A.19** – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+40GAK+4MAPP



**Figura A.20** – Ajuste a Cross-WLF del comportamiento reológico PP+40GAK+8MAPP