UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico

PROYECTO TÉCNICO:

ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DE REMPLAZAR POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (PAI) POR UN COMPUESTO BIO-BASADO REFORZADO CON FIBRA NATURAL (PP-GAK) EN LA INYECCIÓN DE BRIDAS CORDÓN DE SEGURIDAD INCORPORADAS EN REFRIGERADORAS DOMÉSTICAS

Autor:

Adrián Israel Delgado Pinos

Tutor:

Ing. Jorge Isaac Fajardo Seminario, Ph. D.

Cuenca – Ecuador

2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Adrián Israel Delgado Pinos con documento de identificación N°0104631361, 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 titulación: ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DE REMPLAZAR POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (PAI) POR UN COMPUESTO BIO-BASADO REFORZADO CON FIBRA NATURAL (PP-GAK) EN LA INYECCIÓN DE BRIDAS CORDÓN DE SEGURIDAD INCORPORADAS EN REFRIGERADORAS DOMÉSTICAS, 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.

Cuenca, octubre del 2018

Adrián Israel Delgado Pinos
C.I.: 0104631361

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DE REMPLAZAR POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (PAI) POR UN COMPUESTO BIO-BASADO REFORZADO CON FIBRA NATURAL (PP-GAK) EN LA INYECCIÓN DE BRIDAS CORDÓN DE SEGURIDAD INCORPORADAS EN REFRIGERADORAS DOMÉSTICAS, realizado por Adrián Israel Delgado Pinos, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre del 2018

Ing. Jorge Isaac Fajardo Seminario, Ph. D.

C.I.: 0102495777

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Adrián Israel Delgado Pinos, con C.I.: 0104631361 autor del trabajo de titulación: ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DE REMPLAZAR POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (PAI) POR UN COMPUESTO BIO-BASADO REFORZADO CON FIBRA NATURAL (PP-GAK) EN LA INYECCIÓN DE BRIDAS CORDÓN DE SEGURIDAD INCORPORADAS EN REFRIGERADORAS DOMÉSTICAS, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, octubre del 2018

Adrián Israel Delgado Pinos

C.I.: 0104631361

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mis padres, pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora he conseguido. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanos y familia en general.

A mi esposa Valeria compañera inseparable de cada jornada. Ella representó gran esfuerzo y tensión en momentos de decline y cansancio.

A mis hijos Antonio y Alejandra quienes son mi mayor motivación, gracias por cada sacrificado para ser invertido en el desarrollo de este proyecto, gracias por entender que el éxito demanda algunos sacrificios y que el compartir tiempo con ellos, hacia parte de estos sacrificios.

AGRADECIMIENTOS

Me faltan páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial mi Madre y mi Padre que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

A mi esposa por ser el apoyo incondicional en mi vida que, con su amor y respaldo, me ayuda alcanzar mis objetivos.

A mis hijos por entender que, mediante el proceso de elaboración de este proyecto, fue necesario realizar sacrificios como momentos a su lado, y otras situaciones que demandaban tiempo.

A mi director de tesis Dr. Jorge Fajardo, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me guió en la culminación de este proyecto.

A mis amigos David Chingal y Gabriel Encalada. Por haberme brindado su amistad, colaboración y sabiduría en toda mi vida estudiantil sin el cual no hubiera podido salir adelante.

RESUMEN

En el presente proyecto técnico con título "Estudio de la factibilidad técnica de remplazar poliestireno de alto impacto (PAI) por un compuesto bio-basado reforzado con fibra natural (PP-GAK)", se analizaron las propiedades reológicas del PP, PAI y PP-GAK mediante reometría capilar, además se obtuvieron las constantes reológicas con base en los modelos: ley de potencias y Cross WLF, para luego ser alimentados en un software especializado en simulación de inyección y obtener los parámetros de inyección óptimos para la manufactura de bridas cordón de seguridad.

Se configuró la máquina inyectora con los parámetros obtenidos por simulación y se inyectó un lote de 30 unidades con material PP, PAI y PP-GAK respectivamente. Para comprobar la factibilidad de remplazar el material de la brida, se realizaron ensayos de control de estabilidad dimensional por parte de la empresa Indurama S.A, obteniendo como resultado que el material es apto para ser utilizado en la empresa Indurama S.A para la inyección de las bridas cordón de seguridad con el material compuesto PP-GAK.

ABSTRACT

In the present technical project entitled "Study of the technical feasibility of replacing high impact polystyrene (PAI) with a bio-based compound reinforced with natural fiber (PP-GAK)", the rheological properties of PP, PAI and PP were analyzed -GAK by capillary rheometry, in addition the rheological constants were obtained based on the models: power law and Cross WLF, to be fed in a software specialized in injection simulation and obtain the optimal injection parameters for the manufacture of flanges cord of security. The injection machine was configured with the parameters obtained by simulation and a batch of 30 units was injected using PP, PAI and PP-GAK material respectively. To verify the feasibility of replacing the flange material, dimensional stability control tests were carried out by the company Indurama SA. The results showed that the material is suitable for use in the company Indurama SA for the injection of flanges security cord with PP-GAK composite material.

ÍNDICE

Cesión de derechos de autor II

Certificación III

Declaratoria de responsabilidad IV

Dedicatoria V

Agradecimientos VI

Resumen VII

Abstract VIII

Índice IX

Índice de figuras XI

Índice de tablas XIII

1 Introducción 1

1.1 Problema 2

1.1.1 Antecedentes 2

1.1.2 Importancia y alcances 2

1.1.3 Delimitación 3

1.2 Objetivos 3

1.2.1 Objetivo general 3

1.2.2 Objetivos específicos 3

2 Marco teórico referencial 4

2.1 Compuestos bio-basados 4

2.1.1 Compuestos bio-basados de Bagazo 4

2.1.2 Compuestos de polipropileno reforzado con fibras de bambú 4

2.2 Moldeo por inyección de los compuestos bio-basados 6

2.2.1 Polipropileno Reforzado con fibra de Leucaena collinsii 7

2.2.2 HDPE reforzados con fibras de agave Sisalana 8

2.2.3 Compuestos reforzados con fibras de bambú 8
2.2.4 LDPE, HDPE y PP reforzado con fibra de caña Guadua 9
2.2.5 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales de madera 10
2.2.6 Biomaterial compuesto PP-GAK 11
2.2.7 Fibras recicladas de periódicos con matriz de PP 11
2.2.8 Fibras de bambú con polipropileno 12
2.3 Propiedades reológicas del PAI y PP-GAK 12
2.3.1 HIPS o PAI 12
2.3.2 PP-GAK 13
3 Marco metodológico 16
3.1 Simulación de inyección de las bridas cordón seguridad 17
3.1.1 Modelado 3D 17
3.1.2 Mallado de la geometría 19
3.1.3 Condiciones geométricas 19
3.1.4 Parámetros de inyección 21
3.1.4.1 Material 21
3.1.4.2 Refrigerante 22
3.1.4.3 Molde de inyección 22
3.1.4.4 Selección del punto de inyección 22
3.1.4.5 Tiempo de llenado 24
3.1.4.6 Presión de inyección 25
3.1.4.7 Atrapamientos de aire 27
3.1.4.8 Fuerza de cierre 27
3.1.4.9 Alabeo 28
3.1.4.10 Contracción 29
4 Resultados 30

4.1 Modificaciones en el molde 31
4.2 Montaje del molde 34
4.3 Parámetros de máquina 34
4.4 Parámetros de inyección 34
4.5 Piezas inyectadas 38
4.6 Comparación de las bridas inyectadas con PP-GAK 39
4.7 Análisis de estabilidad dimensional 41
4.7.1 Brida cordón seguridad 41
4.8 Análisis estadístico del efecto del material sobre la contracción en la brida cordón de seguridad 42
4.8.1 Análisis ANOVA para el parámetro C 43
4.8.2 Pruebas de Múltiple Rangos para Parámetro C por Material 44
4.8.3 Análisis ANOVA para el parámetro E 45
4.8.4 Pruebas de Múltiple Rangos para Parámetro E por Material 46
4.9 Aplicación 48
5 Conclusiones 49
6 Recomendaciones 50
7 Trabajos Futuros 50
8 Referencias bibliográficas 51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes principales de una máquina para moldeo por inyección [14]. 6
Figura 2. Código de identificación del HIPS [24] 13
Figura 3. Proceso de simulación del material. 16
Figura 4. Fotografía del compresor de la refrigeradora RI480 con su brida cordón seguridad. 17
Figura 5. Dimensiones de la brida cordón seguridad 18
Figura 6. Mallado de canales de alimentación, bebedero y bridas cordones de seguridad. 19
Figura 7. Mallado de la brida cordón seguridad 19
Figura 8. Canales de alimentación del molde de inyección. 20

Figura 9. Canales de refrigeración. 21
Figura 10. Molde de inyección: a) parte fija y b) parte móvil. 22
Figura 11. Punto de inyección sugerido por el software. 23
Figura 12. Idoneidad del fluido en el material. 23
Figura 13. Punto de inyección propuesto por el software a) brida y b) mazarrota. 24
Figura 14. Tiempo de llenado simulado. 24
Figura 15. Presión de inyección. 25
Figura 16. Diagrama de presión de inyección vs tiempo de inyección. 26
Figura 17. Atrapamientos de aire. 27
Figura 18. Diagrama de fuerza de cierre vs tiempo de inyección. 27
Figura 19. Alabeo de la pieza simulada. 28
Figura 20. Porcentaje de contracción de la pieza simulada. 29
Figura 21. Proceso de inyección de bridas cordón seguridad. 30
Figura 22. Anillo centrador: a) original, b) modificado y c) esquema. 31
Figura 23. Radio de curvatura del bebedero: a) original y b) esquema. 31
Figura 24. Modificaciones de los canales de alimentación del molde. 32
Figura 25. Salidas del aire. 33
Figura 26. Esquema de las salidas de aire. 33
Figura 27. Sistema de atemperado. 34
Figura 28. Molde montado en la inyectora. 34
Figura 29. Curva PVT del material PP. 35
Figura 30. Bridas cordón seguridad. 38
Figura 31. Mazarrota y brida cordón seguridad de material PP. 38
Figura 32. Mazarrota y brida cordón seguridad de material PAI. 38
Figura 33. Mazarrota y brida cordón seguridad de material PP-GAK. 39
Figura 34. Dimensionamiento de la brida. 41
Figura 35. Medias y 95% de Fister LSD. 45
Figura 36. Gráfico caja y bigotes. 45
Figura 38. Medias y 95.0% de Fisher LSD 47
Figura 39. Gráfico caja y bigotes. 47
Figura 40. Brida de material PAI acoplada al refrigerador RI480. 48
Figura 41. Brida de material PP-GAK acoplada al refrigerador RI480. 48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del copolímero de propileno heterofásico [12]. 5
Tabla 2. Propiedades del copolímeros de propileno heterofásicos [12]. 5
Tabla 3. Resultados de la mezcla de fibra de bambú con PPC y MAPP [12]. 6
Tabla 4. Condiciones de inyección con fluidez de 20 y 30%. 7
Tabla 5. Parámetros de procesado del compuesto HDPE con 40% de fibra de sisal [12]. 8
Tabla 6. Resultados de las propiedades de tensión del compuesto reforzado con fibra de bambú [12]. 8
Tabla 7. Parámetros inyectora con HDPE [4]. 9
Tabla 8. Parámetros de inyectora con PP [4]. 10
Tabla 9. Parámetro optimizados en la inyectora [21]. 11
Tabla 10. Proceso de simulación y optimización del biocompuesto PP-GAK [7]. 11
Tabla 11. Propiedades del PAI. 13
Tabla 12. Reometría MFI del PP-GAK. 14
Tabla 13. Parámetros de inyección utilizados para inyectar compuestos bio-basados. 15
Tabla 14. Modelo de viscosidad de ley de potencia. 16
Tabla 15. Configuración de las constantes reológicas del PP-GAK [8]. 21
Tabla 16. Resultados de la optimización del tiempo de inyección. 26
Tabla 17. Características de la máquina inyectora. 28
Tabla 18. Parámetros del ciclo de inyección con PAI. 35
Tabla 19. Parámetros del proceso de inyección de los tres materiales. 37
Tabla 20. Comparación de los aspectos más relevantes del proceso e inyección con los materiales. 40
Tabla 21. Análisis dimensional de contracciones en la brida. 41
Tabla 22. Contracción volumétrica máxima y error porcentual entre PAI y PP-GAK. 42
Tabla 23. Parámetros de las piezas inyectadas. 42
Tabla 24. Resumen estadístico para parámetro C. 43
Tabla 25. Indicadores de condición. 43
Tabla 26. Tabla ANOVA para Parámetro C por Material. 44
Tabla 27. Método: 95.0 porcentaje LSD. 44
Tabla 28. Resumen Estadístico para Parámetro E. 45

Tabla 29. Tabla ANOVA para Parámetro E por Material. 46
Tabla 30. Método: 95.0 porcentaje LSD 46
Tabla 31. Análisis de tolerancias de los parámetros C y E. 48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del copolímero de propileno heterofásico [12]. 5
Tabla 2. Propiedades del copolímeros de propileno heterofásicos [12]. 5
Tabla 3. Resultados de la mezcla de fibra de bambú con PPC y MAPP [12]. 6
Tabla 4. Condiciones de inyección con fluidez de 20 y 30%. 7
Tabla 5. Parámetros de procesado del compuesto HDPE con 40% de fibra de sisal [12]. 8
Tabla 6. Resultados de las propiedades de tensión del compuesto reforzado con fibra de bambú [12]. 8
Tabla 7. Parámetros inyectora con HDPE [4]. 9
Tabla 8. Parámetros de inyectora con PP [4]. 10
Tabla 9. Parámetro optimizados en la inyectora [21]. 11
Tabla 10. Proceso de simulación y optimización del biocompuesto PP-GAK [7]. 11
Tabla 11. Propiedades del PAI. 13
Tabla 12. Reometría MFI del PP-GAK. 14
Tabla 13. Parámetros de inyección utilizados para inyectar compuestos bio-basados. 15
Tabla 14. Modelo de viscosidad de ley de potencia. 16
Tabla 15. Configuración de las constantes reológicas del PP-GAK [8]. 21
Tabla 16. Resultados de la optimización del tiempo de inyección. 26
Tabla 17. Características de la máquina inyectora. 28
Tabla 18. Parámetros del ciclo de inyección con PAI. 35
Tabla 19. Parámetros del proceso de inyección de los tres materiales. 37
Tabla 20. Comparación de los aspectos más relevantes del proceso e inyección con los materiales. 40
Tabla 21. Análisis dimensional de contracciones en la brida. 41
Tabla 22. Contracción volumétrica máxima y error porcentual entre PAI y PP-GAK. 42
Tabla 23. Parámetros de las piezas inyectadas. 42
Tabla 24. Resumen estadístico para parámetro C. 43
Tabla 25. Indicadores de condición. 43
Tabla 26. Tabla ANOVA para Parámetro C por Material. 44
Tabla 27. Método: 95.0 porcentaje LSD. 44
Tabla 28. Resumen Estadístico para Parámetro E. 45

Tabla 29. Tabla ANOVA para Parámetro E por Material. 46
Tabla 30. Método: 95.0 porcentaje LSD 46
Tabla 31. Análisis de tolerancias de los parámetros C y E. 48

INTRODUCCIÓN

Los compuestos bio-basados han recibido mucha atención en las últimas dos décadas para reemplazar las fibras de vidrio como refuerzo en los compuestos de matrices poliméricas. Además de su aspecto ecológico, las principales razones para el uso de compuestos bio-basados son su bajo costo y disminución de peso, manteniendo así las propiedades mecánicas similares a los compuestos de fibra de vidrio. La baja densidad de los compuestos bio-basados atrae especialmente al sector del transporte (automóvil, ferrocarril, aeronáutica). Otras áreas de aplicación de los compuestos bio-basados son la industria de implementos deportivos y de recreación (esquí, snowboard, ciclismo) gracias a sus buenas propiedades de amortiguación [1].

De igual manera lo reconocen Holbery y Houston [2] que "en la última década los fabricantes de automóviles europeos y proveedores de panales de puertas, respaldos de asientos, forros de techo y entre otros elementos aceptaron el uso de compuestos bio-basados con matrices termoplásticas y termoestables". Las fibras naturales como el kenaf, el cáñamo, el lino, el yute y el sisal ofrecen beneficios tales como la reducción de peso, menor costo y menor emisión de CO2, una menor dependencia de fuentes de petróleo extranjeras y el reciclado [2].

Dentro del Ecuador se han hecho estudios investigativos en el desarrollo de nuevos materiales poliméricos reforzados con fibras naturales. Se analizan las fibras vegetales con potencial para ser empleadas como reforzantes en compuestos poliméricos y se analizan aspectos como el tipo de matriz, la morfología de las fibras, tratamientos superficiales y propiedades mecánicas [3]

1.1 Problema

1.1.1 Antecedentes

El grupo de investigación GiMaT, en sus estudios para la obtención de nuevos materiales ha generado los principales trabajos a continuación expuestos, con mayores énfasis en polipropileno reforzados con fibras de bambú (GAK.)

Valarezo [4], desarrolló y caracterizó compuestos de polietileno y polipropileno reforzado con fibras GAK, con porcentajes de 5, 10 y 20% de fibra. Además, realizó ensayos de termo gravimetría (TGA) y ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) (pp. 123-124).

Albarracín y Castillo [5], evaluaron la orientación de las fibras cortas en el material compuesto PP-GAK mediante técnicas de procesamiento de imágenes (pp. 105).

Perugachi [6], evaluó el efecto del agente de acople sobre las propiedades reológicas de torque máximo en el compuesto PP-GAK (pp. 50-60).

Santos [7], mediante software de elementos finitos simuló la orientación de fibras y su relación con los parámetros de procesamiento (pp. 66).

Paltán [8], obtuvo el modelo del comportamiento reológico de diferentes composiciones de PP-GAK y su implementación en software de simulación de inyección (pp. 58-60).

Unido a estos esfuerzos por investigar el procesamiento y propiedades de los materiales compuestos bio-basados, en la empresa Indurama S.A, existe la intención de incorporar nuevos materiales poliméricos en la fabricación de componentes de refrigeradoras. Uno de los elementos que serán evaluados serán las bridas cordón de seguridad, que se fabrican tradicionalmente con material poliestireno de alto impacto (HIPS), codificado al interior de la empresa como (PAI) y que se intenta remplazar por un compuesto de (PP) reforzado con fibras vegetales de bambú (GAK).

1.1.2 Importancia y alcances

En la empresa Indurama S.A de la ciudad de Cuenca, Azuay, se utilizan materias primas poliméricas para la producción de componentes de la línea blanca; del cual 45% son importadas y 55% es material nacional, existen diferentes tipos de materias primas poliméricas según la naturaleza de cada área productiva.

Este proyecto pretende generar conocimiento sobre los parámetros del ciclo de inyección ya que al contar con la información reológica del material compuesto bio-basado, se evaluará la factibilidad de remplazar el polímero PAI por un material compuesto bio-basado, constituido por PP-GAK, con la intención de reducir el consumo de material

plástico dentro de los componentes de refrigeradores y de esta manera reducir el impacto al medio ambiente.

Se evaluará la factibilidad del remplazo desde el análisis del ciclo de inyección y las modificaciones necesarias del molde de inyección. Técnicas de simulación asistida por computador serán utilizadas para optimizar el análisis.

La Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, cuenta actualmente con los laboratorios de Ensayos Poliméricos e Inyección que cuenta con los recursos necesarios para determinar las propiedades reológicas y establecer los parámetros del ciclo de inyección de los materiales a ser utilizados en este proyecto, permitiendo aportar los datos necesarios los cuales serán aplicados en la fabricación del material.

1.1.3 Delimitación

El proyecto se desarrollará en los laboratorios de Ensayo de polímeros e Inyección de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, que cuenta con un reómetro capilar y una máquina de inyección los cuales son necesarios para la investigación. Con la utilización de estas máquinas y con la 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 hacia industrias de plásticos que deseen reducir el consumo de material plástico y además reducir el impacto al medio ambiental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estudiar la factibilidad técnica de remplazar el material poliestireno de alto impacto (PAI), por un compuesto bio-basado (PP-GAK) en la inyección de bridas cordón de seguridad incorporada en las refrigeradoras domésticas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades reológicas del PAI y PP-GAK.
- Establecer los parámetros del ciclo de inyección para producir bridas cordón de seguridad con PP-GAK.
- Acondicionar el molde de inyección de la brida cordón de seguridad para garantizar un correcto funcionamiento.

- Inyectar un lote continuo de bridas cordón de seguridad con PP-GAK.

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1 Compuestos bio-basados

Los compuestos bio-basados se refieren a los materiales que están hechos de derivados de las plantas, o de la biomasa. Ejemplos de estos materiales son el maíz, papas, arroz, soya, caña de azúcar, bambú, trigo y aceite vegetal. La combinación del plástico con un compuesto bio-basado se le llama plástico bio-basado [9].

Los plásticos bio-basados pueden formar la base para los materiales sostenibles y ambientales con respecto a los materiales actuales basados exclusivamente en materias primas de petróleo.

Muchos polímeros bio-basados son biodegradables, pero no todos los polímeros biodegradables son productos bio-basados. Algunos polímeros biodegradables o compuestos están hechos de productos derivados del petróleo [9].

2.1.1 Compuestos bio-basados de Bagazo

El compuesto de Bagazo es un polímero a base de caña de azúcar que se puede convertir en productos similares al papel para embalajes, vajillas desechables y recipientes [10]. El bagazo es un producto de pulpa de fibra que forma parte del tallo de caña de azúcar. Las fibras de bagazo pueden ser procesadas de manera similar a la pulpa de papel para producir productos para papelería, empaque de alimentos y artículos de servicio desechables [11]. El compuesto bio-basado de bagazo puede ser un reemplazo para los productos de la espuma de poliestireno y del papel.

2.1.2 Compuestos de polipropileno reforzado con fibras de bambú

Los autores Desille y Schils [4], realizaron una composición de polipropileno reforzado con fibras de bambú que puede incluir al menos el 50 % en peso de un copolímero heterofásico de propileno; del 2 al 40 % en peso de fibras de bambú y del 0.1 al 10 % en peso de un agente de acoplamiento. La composición puede presentar un índice de fluidez de al menos 5 g/10 min a 190° C bajo una carga de 2.16 kg, además tiene una densidad que se sitúa en el rango de 0.900 y 1.010 g/cm3 según ISO 1183; y un módulo de flexión que está en el rango de 1100 MPa y 4000 MPa según ISO 178. El índice de fluidez de la masa fundida

puede ser inferior o igual a 5 g/10 min [12]. El copolímero de propileno heterofásico fue usado para la mezcla con las fibras de bambú, y las propiedades se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del copolímero de propileno heterofásico [12].

	unit	PPC1	PPC2	PPC3	PPC4
MFI (230°C, 2.16 kg)	g/10 min	18	25	50	70
Módulo de tensión	MPa	870	1400	1150	1600
Módulo de flexión	MPa	880	1300	1100	1500
Densidad	g/cm^3	0.905	0.905	0.905	0.905
Fuerza de impacto Izod	kJ/m^2	>50	7	13.5	6.5
Fuerza de impacto Charpy	kJ/m^2	>50	8	0	6
Contenido de caucho	peso %	25	13	19	15.5
Viscosidad intrínseca del caucho	dl/g	0	0	0	3.7

Con la Tabla 1, los autores usaron el PPC1 hasta el PPC4 que son copolímeros de propileno heterofásicos y están formados por una matriz semicristalina de PP y sus propiedades están presentadas en la Tabla 2. Estos copolímeros contienen entre un 5-15% en contenido en etileno, pudiendo llegar a un máximo de 20-25%. Además el copolímero soluciona la baja resistencia al impacto que posee el homopolímero de propileno logrando utilizarlo en la industria mobiliario, automovilística, etc [13]. Los autores usaran estos copolímeros para producir una mezcla con un agente maleable de polipropileno (MAPP) con diferentes porcentajes de compuesto de fibra de bambú que son representados como E2 hasta E6 y los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del copolímeros de propileno heterofásicos [12].

	unit	PPC1	PPC2	PPC3	PPC4
Melt flow index (230°C, 2.16kg)	g/10 min	18	25	50	70
Tensile modulus	MPa	870	1400	1150	1600
Flexural modulus	MPa	880	1300	1100	1500
Density	g/cm^3	0.905	0.905	0.905	0.905
Izod Impact Strength (notched) at 23°C.	kJ/m^2	>50	7	13.5	6.5
Charpy Impact Strength (notched) at 23°C.	kJ/m^2	>50	8	not measured	6
rubber content	wt%	25	13	19	15.5

rubber intrinsic viscosity	dl/g	3.7

Tabla 3. Resultados de la mezcla de fibra de bambú con PPC y MAPP [12].

	unit	E1	E2	E3	E4	E5	E6	C1	C2
bamboo fibers content	wt%	30	20	10	5	5	5	30	-
average length of bamboo fibers	μm	1000	3000	1000	1000	1000	1000	unknown	-
inorganic filler content	wt%	-	-	-	-	-	-	-	20
Melt flow index (190°C, 2.16kg)	g/10 min	17.5	7	5.5	6.3	6.5	8.5	not measured	not measured
Melt flow index (230°C, 2.16kg)	g/10 min	30	not measured	13.2	15.5	16.4	24	6.7	13
density	g/cm^3	1	0.985	0.912	0.906	0.907	0.906	1	1.04
Flexural modulus	MPa	3500	2546	1336	1128	1149	1220	3000	2500
charpy impact notched at 23°C	kJ/m^2	3	4.3	17.5	23.6	23.3	10.1	3.6	4.5

2.2 Moldeo por inyección de los compuestos bio-basados

El Modelo por inyección de material es el proceso más utilizado para fabricar piezas termoplásticas, especialmente en los cuales su forma es más compleja y necesitan alta precisión en el dimensionamiento. En la Figura 1, se presenta un sistema de inyección básico [14].

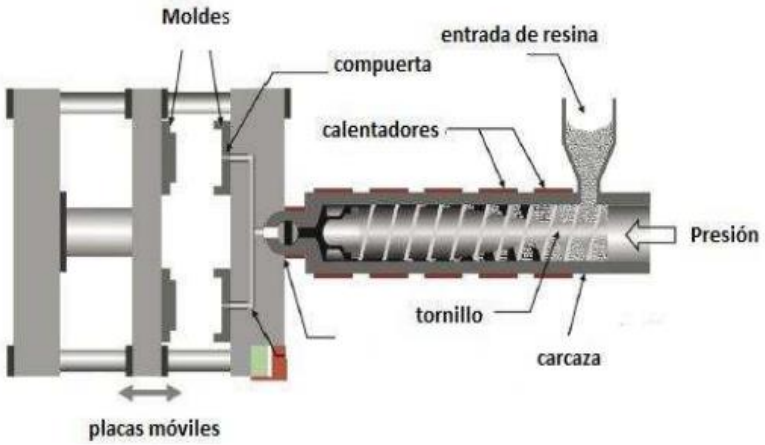

Figura 1. Componentes principales de una máquina para moldeo por inyección [14].

En principio, el moldeo por inyección es un proceso sencillo. Un termoplástico (nuevo o reforzado), en forma de gránulos o polvo, pasa de una tolva de alimentación a la cámara del tornillo, aquí se calienta el material en distintas zonas del tornillo. A continuación, se empuja a través de una boquilla hasta un molde relativamente frío que se cierra firmemente con abrazaderas. Una vez que el plástico ha tenido tiempo suficiente para solidificarse, el molde se abre, de manera que el componente es expulsado; luego se repite el ciclo [15].

El moldeo por inyección es el más usado en la industria porque es una tecnología económica lo que permite producir plásticos complejos [16]. Las características del material y condiciones de procesamiento son los parámetros más importantes en el moldeo por inyección. Los autores Wan *et al.* explican una falta de conocimiento sobre las características de los materiales compuestos de base polimérica, lo que implica que se produzcan rellenos incompletos en determinadas partes del molde mediante inyección [17].

Las herramientas de simulación de los procesos de inyección son alternativas eficaces para optimizar los parámetros de procesamiento, logrando una inyección eficaz sin defectos en el material. Para una buena inyección del material se realiza una simulación con softwares específicos logrando así evitar que la máquina de inyección paré. Pero para lograr esto, es necesario caracterizar los materiales logrando obtener una simulación exacta del proceso de fabricación [18].

2.2.1 Polipropileno Reforzado con fibra de Leucaena collinsii

El autor Granda [19], caracterizó un material compuesto de polipropileno reforzado con fibra de Leucaena collinsii, usando la inyectora (Mateu&Solé) inyectó una pieza con este nuevo material compuesto con 20 y 30% de fluidez usando las siguientes condiciones que son presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de inyección con fluidez de 20 y 30%.

Parámetro	**Valor**
Primera zona	165 °C
Segunda zona	180 °C
Tercera zona	200 °C
Velocidad de inyección	30 %
Velocidad de husillo	220 rpm
Primera presión	12.74 MPa
Segunda presión	1.96 MPa

Al inyectar con porcentajes de fibra de 40 y 50% en peso, el autor incrementó la duración de la primera presión de inyección, y la segunda presión se aumentó progresivamente de 1.96 a 3.92 MPa. Los tiempos de trabajo de la inyectora fueron de:

- Tiempo de inyección: 10 s
- Tiempo de carga: 9.9 s
- Tiempo de refrigeración: 10 s

2.2.2 HDPE reforzados con fibras de agave Sisalana

El autor Bayer [20], reforzó el polietileno de alta densidad (HDPE) con 40 % de fibra de sisal con diferentes porcentajes de agente de acoplamiento. Para la creación del material utilizaron sisal como refuerzo, además mantuvieron el porcentaje de fibra en un 40% en peso, y varió el porcentaje de agente de acoplamiento entre 0, 2, 4 y el 6% en peso [20].
Los parámetros de inyección que utilizaron se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de procesado del compuesto HDPE con 40% de fibra de sisal [12].

Parámetros	**Valor**
Primera presión	12.26 MPa
Segunda presión	2.45 MPa
Descompresión del material	78 s
Carga de material	57 s
Tiempo de inyección	10 s
Tiempo de carga	9.9 s
Tiempo de enfriamiento	15 s
Tiempo molde abierto	1.5 s

2.2.3 Compuestos reforzados con fibras de bambú

Los autores Desille y Schils [12], inyectaron probetas de tracción de compuestos reforzados de PP con fibras de bambú según la norma ISO 527-2. Las longitudes de las muestras eran de 50 mm y los resultados están reportados en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de las propiedades de tensión del compuesto reforzado con fibra de bambú [12].

	unit	**E1**	**E3**	**E4**	**E5**	**E6**
Tensile modulus	MPa	3300	1356	1110	1134	1306
Tensile strength at yield (Rm)	MPa	34	20.71	19.36	19.42	22.27
Elongation at yield	%	not measured	4.53	5.03	4.83	4.03

Tensile stress at break (FR)	MPa	34	19.07	17.16	17.18	20.03

De la Tabla 6, los autores concluyeron que los compuestos que comprenden del 2 al 17 % en peso de fibras de bambú, presentan un módulo de tracción de al menos 1100 MPa y una resistencia a la tracción de al menos 19 MPa. El alargamiento a tracción es de al menos el 4%, mientras que los artículos producidos por moldeo por inyección a partir de compuestos que comprendan desde 18 a 40 % de peso en fibras de bambú, presentan un módulo de tracción de al menos 3.000 MPa y una resistencia a la tracción de al menos 30 MPa. El material creado es extruido con las composiciones de las muestras E1, E3, E4, E5 y E6 presentadas en la Tabla 6, en donde E3 y E6 presentaron mejores propiedades mecánicas. A continuación, estas muestras fueron secadas por 16 horas a una temperatura de 60°C, para después ser inyectadas a 200° C. Estas muestras siempre fueron inyectadas a una temperatura de 200° C con el fin de evitar la degradación térmica de las fibras de bambú.

2.2.4 LDPE, HDPE y PP reforzado con fibra de caña Guadua

El autor Valarezo [4], obtuvo compuestos con matriz polimérica de LDPE, HDPE y PP reforzado con fibras naturales de caña Guadua utilizando las siguientes parámetros de inyección los cuales se presenta en la Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7. Parámetros inyectora con HDPE [4].

Parámetros	**Valor**
Fuerza de cierre (kN)	350
Fuerza para abrir el molde (kN)	18.42857
Tiempo de aseguramiento de molde (s)	90
Velocidad de cierre de molde (mm/s)	De 450 a 60
Velocidad de desplazamiento boquilla hacia delante / atrás (mm/s)	19
Fuerza de apoyo de boquilla (kN)	36
Valor nominal de tiempo de ciclo (s)	45
Tiempo de plastificación (s)	12
Velocidad promedio de plastificación (mm/s)	200
Perfil de temperaturas (°C)	160,162,163,165,165
Velocidad promedio de inyección (cm/s)	30
Presión de inyección (bar)	510.95
Presión del molde (bar)	600
Contrapresión (bar)	50

Tabla 8. Parámetros de inyectora con PP [4].

Parámetros	Valor
Fuerza de cierre (kN)	350
Fuerza para abrir el molde (kN)	18.42857
Tiempo de aseguramiento de molde (s)	90
Velocidad de cierre de molde (mm/s)	De 450 a 60
Velocidad de apertura de molde (mm/s)	De 281,1 a 43,4
Velocidad de desplazamiento boquilla hacia delante / atrás (mm/s)	19
Fuerza de apoyo de boquilla (kN)	36
Valor nominal de tiempo de ciclo (s)	45
Tiempo de plastificación (s)	12
Velocidad promedio de plastificación (mm/s)	200
Perfil de temperaturas (°C)	185,185,185,190,195
Presión de inyección (bar)	510.95
Presión del molde (bar)	600
Contrapresión (bar)	50

Al realizar con tiempos de ciclo de 45 segundos en la inyección del material, el autor garantiza la homogeneidad del material.

2.2.5 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales de madera

El autor Vicuña [21], obtuvo un material bio-basado reforzado con harina de madera de sawdust, el sawdust contiene fibra naturales y tiene propiedades como la biodegradabilidad. La materia prima utilizada por el autor fue polietileno de alta densidad (PEAD), polivinilo de cloruro (PVC), polietileno de baja densidad (PEBD), y el polipropileno (PP) [21].

La obtención del material compuesto con los polímeros antes mencionado es diferenciada por las condiciones de temperatura y velocidad de giro del tornillo, logrando demostrar que las fibras naturales poseen gran potencial para formular materiales compuestos. Para la inyección de los materiales, el autor adicionó un 5% de ácido esteárico logrando mejorar las propiedades del producto. Como conclusión, el compuesto de PVC con fibra de madera de eucalipto no es la adecuada para el proceso de inyección [21]. Los parámetros optimizados utilizados en la inyectora se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetro optimizados en la inyectora [21].

Propiedades	Valor	Unidades
Fuerza de cierre	350	kN
Tiempo de ciclo	50	s
Perfil de temperaturas	180, 190, 200, 210, 220	°C
Presión de inyección	105	MPa
Presión de llenado	10	MPa
Diámetro del husillo	24	mm

2.2.6 Biomaterial compuesto PP-GAK

El autor Santos [7], optimizó los parámetros de inyección del biomaterial compuesto PP-GAK al 30% w/w en cuatro etapas de optimización usando software de CAD-CAE, con el objetivo de reconocer las variables de influencia en el estado de orientación de las fibras. Los resultados generados fueron que la contracción y el alabeo están vinculados con las variables de temperatura de fusión, presión de sostenimiento, switch de postpresión, temperatura de molde [7]. En la Tabla 10, se presentan los resultados de la optimización del ciclo de inyección usando software CAD-CAE.

Tabla 10. Proceso de simulación y optimización del biocompuesto PP-GAK [7].

Propiedades	Valor	Unidades
Fuerza de cierre	199.8	kN
Tiempo de inyección	1.339	s
Tiempo de refrigeración	10	s
Presión de inyección	18.24	MPa
Porcentaje de avance tornillo	80	%

2.2.7 Fibras recicladas de periódicos con matriz de PP

El autor Serrano [22], utiliza periódicos antiguos como fibras de refuerzo, utilizando diferentes porcentajes de fibras de periódicos que son obtenidos por vía húmeda (ONPF) y

por vía seca (CONPF) con matriz de polipropileno (PP). Además, agrega un agente de acoplamiento al compuesto para mejorar la interfaz entre la matriz y las fibras de refuerzo, obteniendo un biocompuesto que comprende entre el 20% y 50% en peso de fibras PP/ ONP con y sin MAPP. También obtuvo muestras entre el 20 y 40% en peso de PP/GF con agente de acoplamiento.

2.2.8 Fibras de bambú con polipropileno

Los autores Mi *et al.* [23] eligen el polipropileno como material de matriz, debido a su bajo precio y buenas propiedades mecánicas. La novedad de este material compuesto es su baja densidad, buena capacidad de intemperie, buen diseño y flexible; es decir ideal para usar en muebles, construcciones industriales y similares [23].

Para mejorar la vinculación entre las fibras de bambú y la matriz de polipropileno los autores utilizan polipropileno maleado (MAPP). El componente de fibra de bambú comprende entre el 20% y el 60% en peso, pero obtuvieron mejores resultados al 50% y 60% en peso [23].

2.3 Propiedades reológicas del PAI y PP-GAK

2.3.1 HIPS o PAI

El poliestireno de alto impacto (HIPS) es un copolímero de poliestireno (PS) que lleva consigo una mayor resistencia al impacto. El Homopolímero (PS) a menudo puede ser quebradizo, y puede hacerse más resistente al impacto si se combina con otros materiales. Esta forma de PS se produce típicamente agregando alrededor del 5-10% de caucho o copolímero de butadieno. Esto aumenta la resistencia al impacto del polímero y resulta en un producto tenaz, ideal para aplicaciones de embalaje [24].

Debido a la naturaleza versátil de este material, el HIPS está disponible en varios grados y es adecuado para aplicaciones en los mercados de cosméticos, expositores, alimentos y servicios de alimenticios, médicos, hortícolas, industriales y de termoformado personalizado. El código de identificación de este plástico se presenta en la Figura 2, [24]. La empresa Indurama S.A lo denomina como PAI por las siglas en español Poliestireno de Alto Impacto esto ayuda a la contabilidad y control del mismo dentro de la empresa.

Figura 2. Código de identificación del HIPS [24].

El Poliestireno de alto impacto utilizado en la empresa Indurama es el STYRON A-TECH 1115 el cual tiene las siguientes características [25].

- Alto brillo
- Alta Resistencia al Impacto
- Coloración consistente
- Fácil procesamiento
- Aprobada para contacto con alimentos
- Clasificación UL 94 HB

En la Tabla 11, se presenta las propiedades del PAI.

Tabla 11. Propiedades del PAI.

Propiedades	**Sistema Inglés**		**Sistema Internacional**		**Método**
	Valor	**Unidades**	**Valor**	**Unidades**	**ASTM Valor**
Índice de Fluidez (200°C/5Kg)	2.9	g/10 min	2.9	g/10 min	D-1238
Gravedad Específica	1.04		1.04		D-792
Expansión Térmica Lineal (10-5)	5	pulg/pulg/°F	9	cm/cm/°C	D-696
Dureza Hardness – R	102.5		102.5		D-785
Contracción en el molde (10-3)	4 to 8	in./in.	4 to 8	cm/cm	D-955

2.3.2 PP-GAK

El PP-GAK es un material compuesto polimérico natural (polipropileno reforzado con fibras de guadua), que fue desarrollado por el grupo GiMaT, con el objetivo de remplazar los plásticos derivados del petróleo y contribuir a la reducción del impacto ambiental [4].

El PP-GAK es una composición de 20%, 30% y 40% de fibra con aditivo MAPP al 4% y 8%. En la Tabla 12, se presenta los resultados del MFI [8].

Tabla 12. Reometría MFI del PP-GAK

Composición	50 seg/2.16kg	
	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

Como se observa en la Tabla 12, el compuesto PP-GAK a 190°C tiene índice de fluidez ideal para los procesos de moldeo por compresión, multifilamento y película. Para el proceso de inyección se debe usar una temperatura de 200°C [8]. En la Tabla 13, se presenta un resumen de los trabajos realizados sobre compuestos bio-basados con sus respectivos parámetros de inyección en base a la bibliografía consultada.

Tabla 13. Parámetros de inyección utilizados para inyectar compuestos bio-basados.

Autor	Matriz	Refuerzo	Agente Acople	Presión Inyección (MPa)	Presión de sostenimiento (MPa)	Velocidad del husillo (rpm)	Perfil de temperatura (°C)
Serrano [22]	PP	ONP 20 al 50%	MAPP	----------	----------	----------	----------
Mi *et al.* [23]	PP	Bambú al 50% y 60%	MAPP	----------	----------	----------	----------
Bayer [13]	HDPE	Sisal	MAPE	12.26	2.45	300	150, 180, 200
Granda [12]	PP	Leucaena collinsi 30% y 40%	----------	12.74	1.96	220	165, 180, 200
Desille y Schils [12]	PP.	Bambú 17%-60%	MAPE	----------	----------	----------	200
Valarezo [15]	PP, LDPE, HDPE.	Caña guadua	----------	51	5	----------	185, 185, 185, 190, 195
Vicuña [21]	PEAD, PVC, PEBD, PP	Sawdust 40%	MAPP	10.5	10	50	180, 190, 200, 210, 220
Santos [7]	PP	GAK 30%	----------	18.5	----------	80%	200

ONP= Fibras de periódico reciclado

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se detalla la obtención de las propiedades reológicas del PP, PAI y PP-GAK los cuales son utilizados para afinar la simulación en el software especializado, logrando obtener los parámetros de inyección óptimos para producir bridas cordón de seguridad.

Se realizó un análisis de las constantes reológicas mediante el reómetro capilar y un script en el software Matlab logrando ajustar los datos experimentales con los modelos reológicos: ley de potencias y Cross WLF. Estos datos obtenidos logran establecer la variación de la viscosidad respecto a la velocidad cortante y así encontrar los parámetros reológicos de los tres materiales los cuales serán utilizados para calcular los parámetros de inyección de cada material. A continuación, se presenta en la Tabla 14, las constantes reológicas obtenidas de los tres materiales.

Tabla 14. Modelo de viscosidad de ley de potencia.

	$m_o(Pa$	$a(1/°C)$	*n*	*rsquare*	*adjrsquare*
PP	2978	0,003065	0,4729	0,9957	0,9945
PP+GAK	6258	0,006578	0,4274	0,994	0,9923
PAI	2889	0,004573	0,3204	0,9993	0,9992

Como se observó en la Tabla 14, existe un buen ajuste de los datos experimentales con el modelo de ley de potencia para los 3 materiales. Además, se observó que el índice de potencia es $n<1$ para los tres materiales lo que confirma su comportamiento pseudoplástico.

Con los parámetros reológicos obtenidos se procede a establecer los parámetros de inyección óptimos para la simulación de la brida cordón de seguridad. En la Figura 3, se presenta el proceso para establecer los parámetros de inyección con Software especializado.

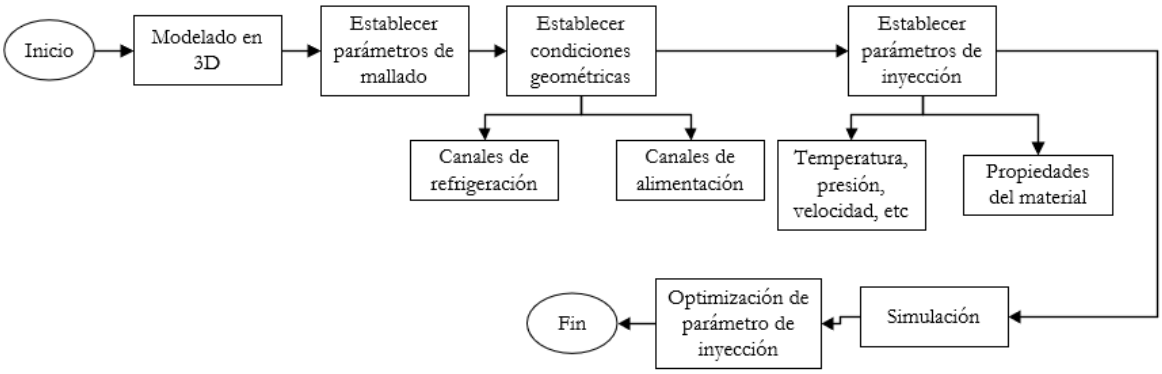

Figura 3. Proceso de simulación del material.

3.1 Simulación de inyección de las bridas cordón seguridad

La brida cordón de seguridad es un elemento de seguridad que forma parte del refrigerador doméstico, la función principal de este elemento es sujetar el cable de alimentación de corriente que alimenta el compresor, los componentes eléctricos y electrónicos, evitando que el cable se desprenda del compresor, su principal requisito de calidad es que sea un elemento rígido para poder cumplir con la función de dar seguridad al cable de alimentación ante cualquier imprevisto. Tal como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Fotografía del compresor de la refrigeradora RI480 con su brida cordón seguridad.

3.1.1 Modelado 3D

Para la simulación de las bridas, se determinan las dimensiones exactas de la pieza a simular. Las dimensiones del elemento fueron proporcionadas por el Departamento de I+D de la empresa Indurama S.A y se presentan en la Figura 5.

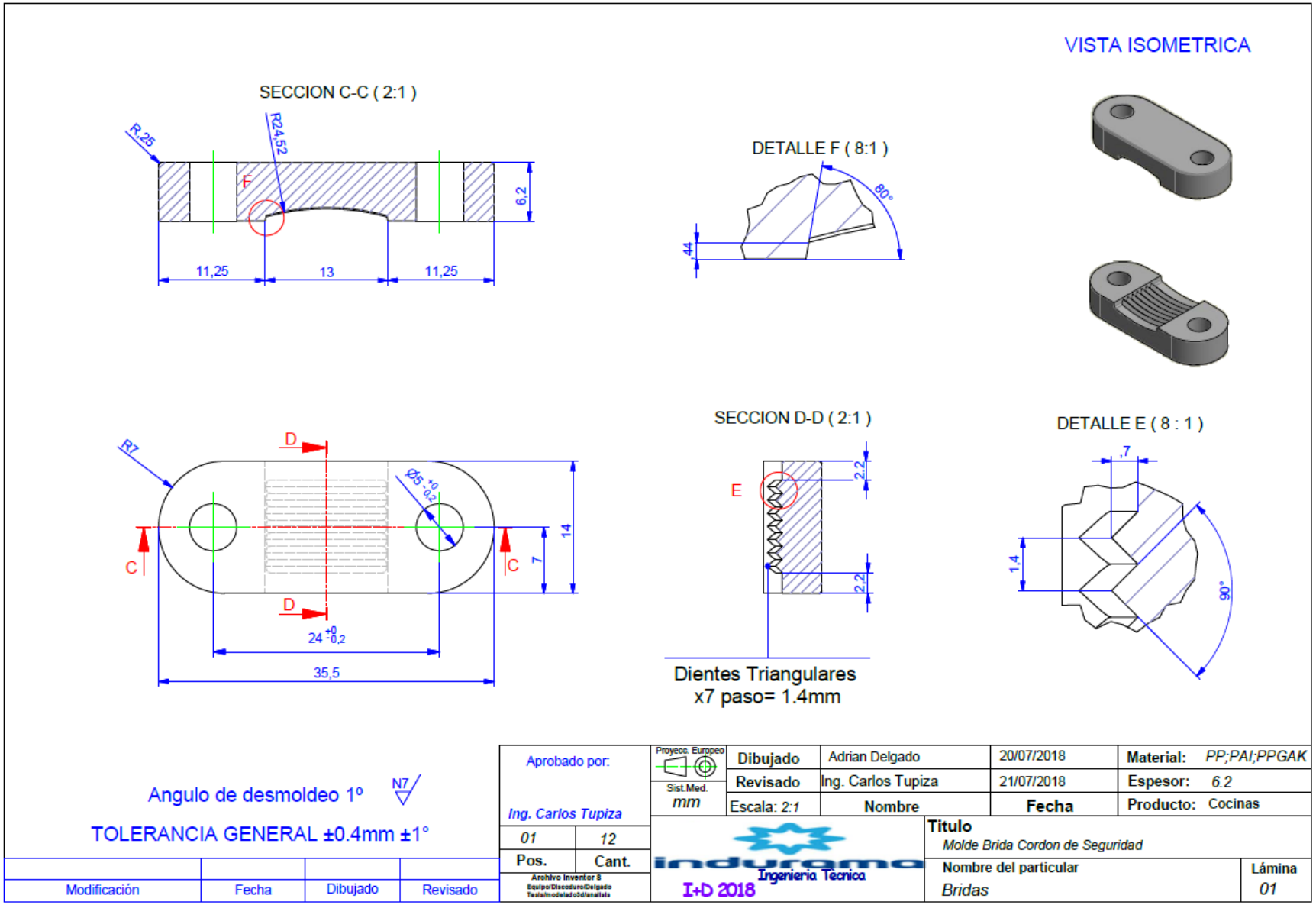

Figura 5. Dimensiones de la brida cordón seguridad.

3.1.2 Mallado de la geometría

Para el mallado se exportó el modelo 3D en un formato (.stl) a continuación, se utilizó un dominio de tipo 2D o dual domain, este tipo de mallado se utiliza cuando los elementos a analizar son muy complejos y la información que nos brinda es suficiente para el diseño del molde por lo que su mallado es superficial.

Se realizó el mallado de la geometría con un valor de 0.5 mm entre cada nodo, se emplearon elementos triangulares obteniendo resultados más precisos. La malla se generó con un total de 6346 elementos, y se presentan en las Figura 6 y Figura 7.

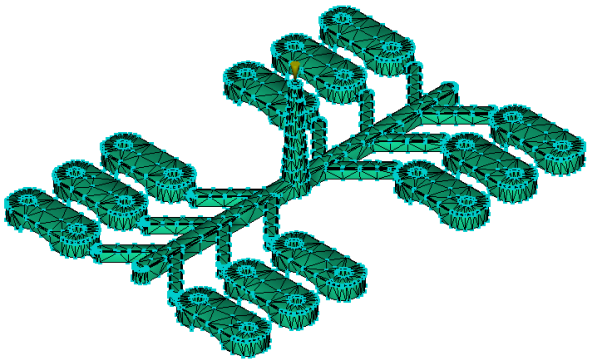

Figura 6. Mallado de canales de alimentación, bebedero y bridas cordones de seguridad.

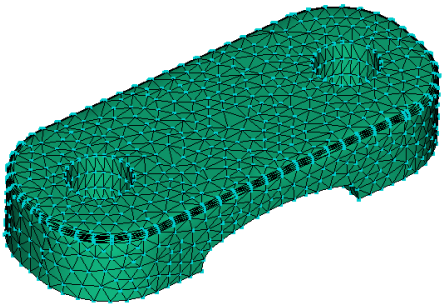

Figura 7. Mallado de la brida cordón seguridad.

3.1.3 Condiciones geométricas

Las condiciones geométricas utilizadas están basadas en el molde utilizado por la empresa Indurama S.A, el canal principal es de forma trapezoidal de 5 x 5 mm con un ángulo de desmoldeo de 2°. Los canales secundarios son de forma trapezoidal de 4x4 mm con un ángulo de desmoldeo de 2°, las entradas son de forma de abanico tal como se presenta en la Figura 8.

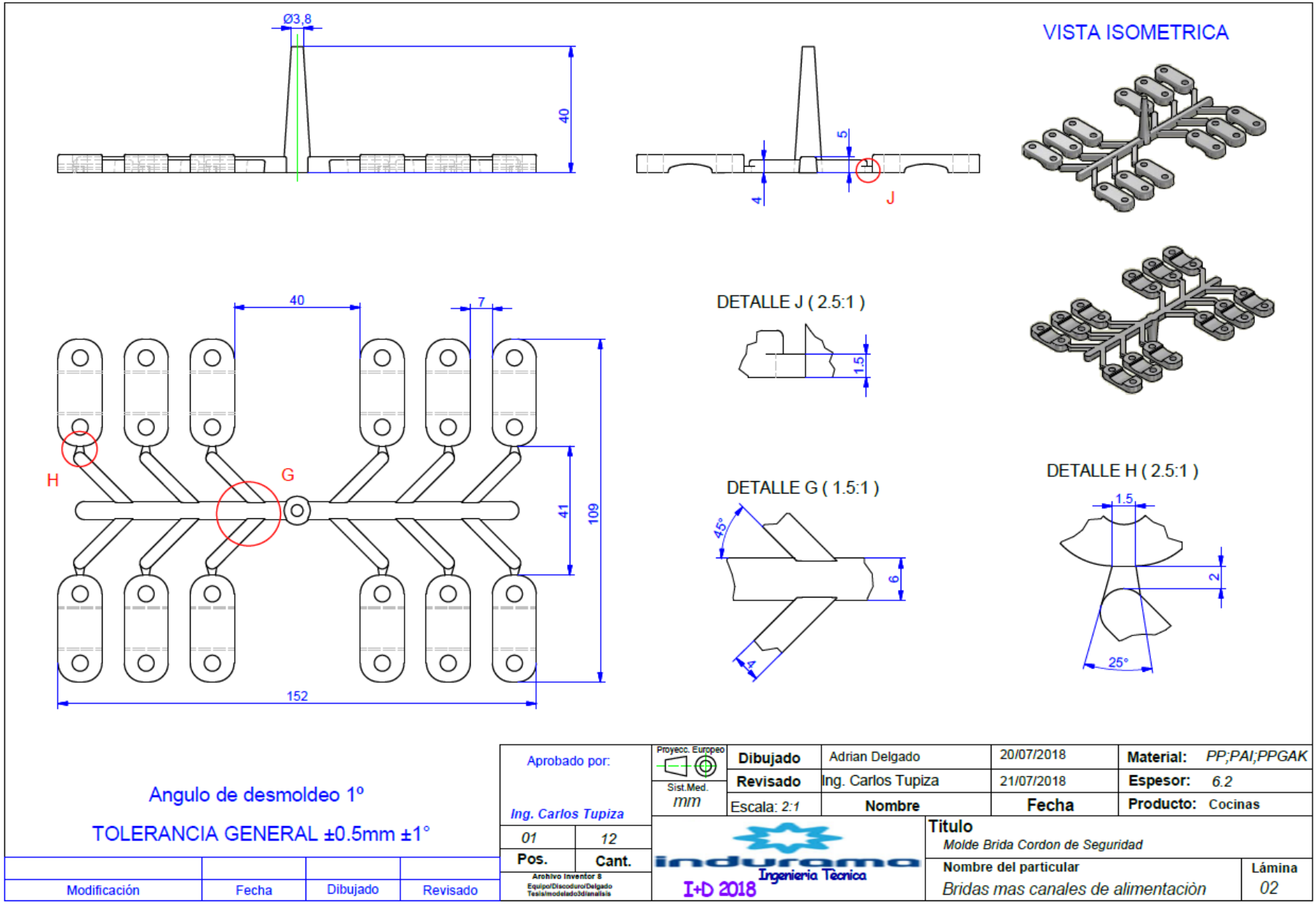

Figura 8. Canales de alimentación del molde de inyección.

El diseño del sistema de atemperado se fundamentó en el diseño actual del molde utilizado por la empresa Indurama S.A. Para efectos de simulación se configuró en el software con un canal circular de 12 mm de diámetro y una longitud de 200 mm que atraviesa el elemento por su parte superior e inferior a una distancia de 15 mm de la cavidad, además se estableció como fluido de refrigeración agua a una temperatura a 45 °C tal como se observa en la Figura 9.

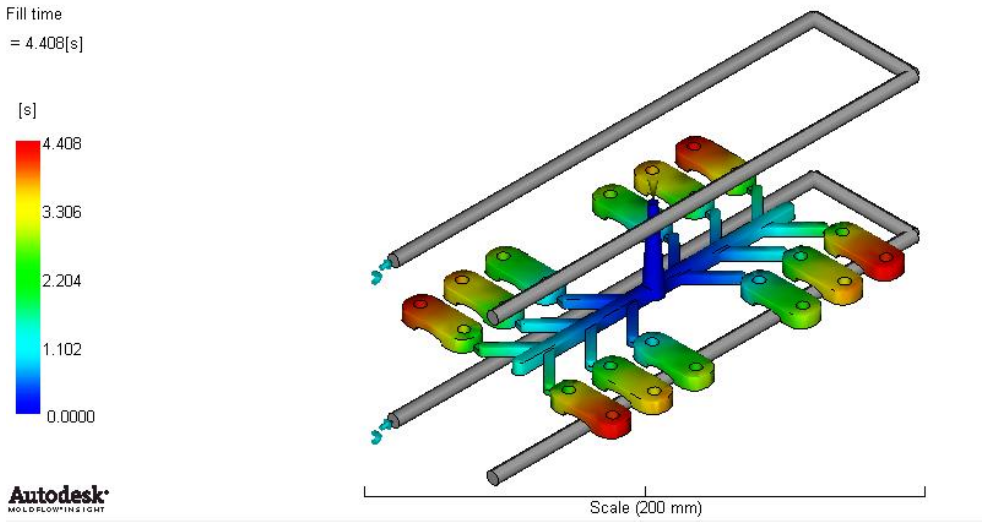

Figura 9. Canales de refrigeración.

3.1.4 Parámetros de inyección

3.1.4.1 Material

Una vez concluido el mallado y las condiciones geométricas se procede asignando las propiedades del material compuesto PP-GAK , la configuración se realizó tal como describe Paltán en [8]. Los parámetros del modelo reológico obtenidos en el presente estudio se resumen en la Tabla 15, logrando así realizar la simulación del proceso de inyección. Los materiales PP y PAI están establecidos de forma predeterminada en el software.

Tabla 15. Configuración de las constantes reológicas del PP-GAK [8].

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)

3.1.4.2 Refrigerante

Para el caso de estudio se seleccionó agua como refrigerante durante el proceso de inyección, logrando conseguir la relación de los procesos de simulación y experimentación.

3.1.4.3 Molde de inyección

El molde a utilizar para inyectar bridas cordón de seguridad se presenta en la Figura 10. El molde fue diseñado y es usado por la empresa Indurama S.A en la inyección de las bridas cordón seguridad. Es un molde de doce cavidades debido a la alta producción del mismo, las cavidades y los canales de alimentación están ubicados en la parte fija del molde mientras que los machos circulares y rectangulares con estrías en la parte móvil del molde. El sistema de guiado del molde es de cuatro bujes y columnas. El sistema de expulsión es mediante placa la cual es activada por un percutor y el retroceso se lo realiza por contacto con la placa porta machos y su sistema de atemperado se encuentra tanto en la parte fija como la móvil del molde.

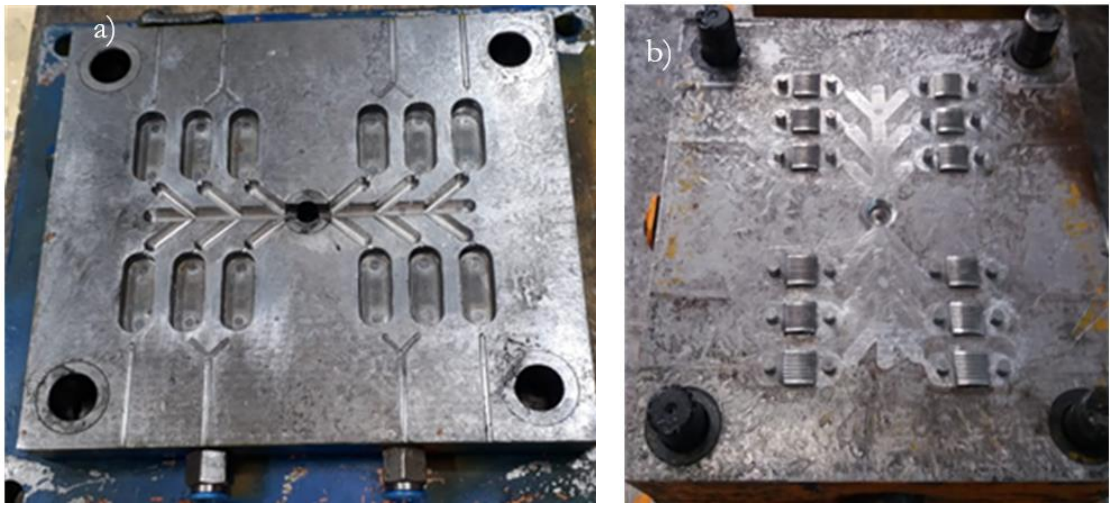

Figura 10. Molde de inyección: a) parte fija y b) parte móvil.

3.1.4.4 Selección del punto de inyección

El software brinda al usuario la facilidad de poder determinar la cantidad de puntos de inyección y puede automáticamente disponer cual es la mejor ubicación para el ingreso del material.

Para el punto de inyección óptimo se realiza un análisis de sugerencia del software, determinando como primera sugerencia el elemento a inyectar sin canales de alimentación tal como se presenta en la Figura 11.

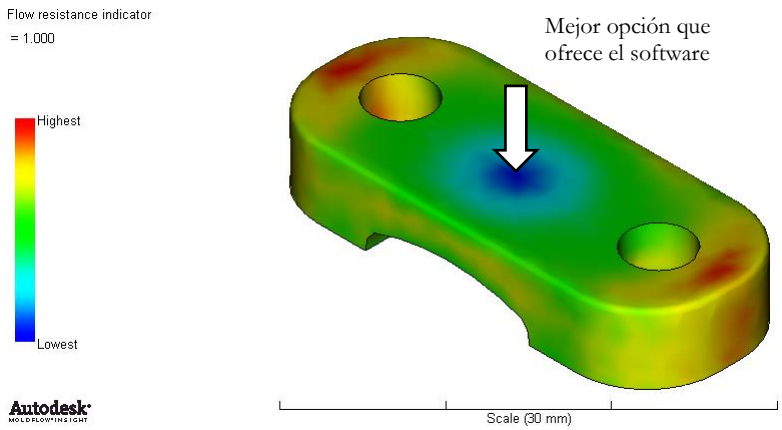

Figura 11. Punto de inyección sugerido por el software.

El punto de inyección óptimo está establecido en la superficie de color azul, ya que es el punto donde el fluido presenta menor resistencia. Además, se simula la idoneidad de la entrada del material teniendo como resultado que la superficie de color azul es la mejor opción tal como se presenta en la Figura 12.

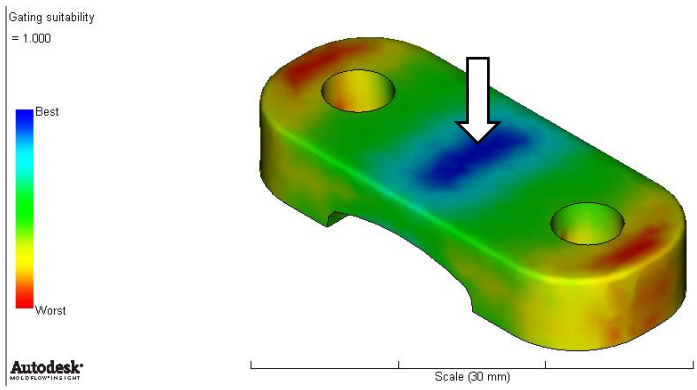

Figura 12. Idoneidad del fluido en el material.

Este análisis debe ser afinado ya que no se consideran aspectos como:

1. Calidad del producto. - Si se considera el punto de inyección en el centro de la pieza se obtendrá marcas en el producto.
2. Complejidad del molde. - La alimentación central necesita de múltiples particiones del molde para su desmoldeo elevando el costo del molde y del producto final.

Por lo que se estableció un nuevo punto de inyección el cual garantiza los puntos antes mencionados y se puede observar en la Figura 13.

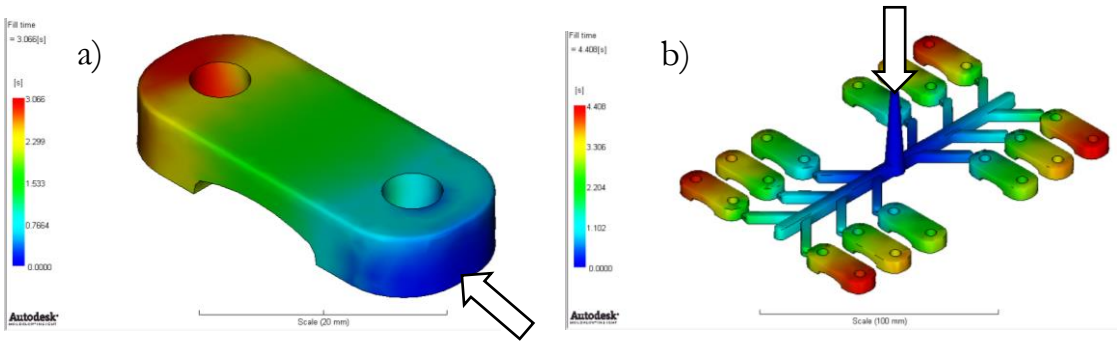

Figura 13. Punto de inyección propuesto por el software a) brida y b) mazarrota.

El diseño de sistema de alimentación dispone de un canal central que alimenta a doce canales secundarios. El diámetro del canal central será mayor al de los secundarios, esta reducción progresiva del diámetro del canal secundario se da para garantizar el llenado uniforme de las piezas. Como se observa en las figuras anteriores el punto de inyección se localiza en un punto de la línea de partición, línea por la que se abrirá el molde para la posterior extracción de la pieza.

3.1.4.5 Tiempo de llenado

Indica el tiempo necesario para llenar la cavidad y se presenta mediante barra de colores el tiempo que cada cavidad tarda en llenar [28]. Como se observa en la Figura 14, la barra de colores indica que el elemento se va a llenar completamente en un tiempo de 4.4 segundos, pero no se está tomando factores de tiempo de enfriamiento, sostenimiento, etc.

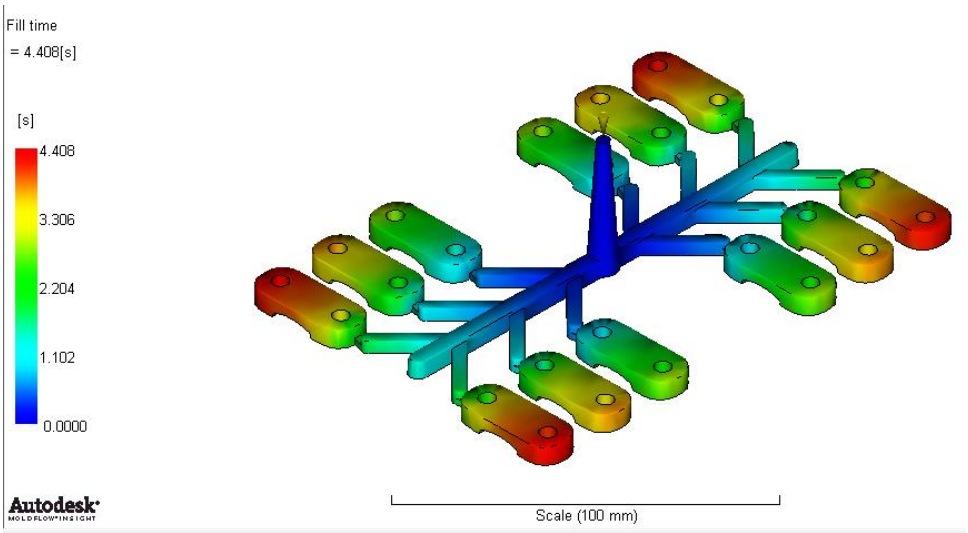

Figura 14. Tiempo de llenado simulado.

3.1.4.6 Presión de inyección

La presión de inyección indica el valor necesario para llenar las cavidades del molde en su totalidad. Este valor que proporciona el software es un valor referencial con el que se parte para el ajuste en la máquina de inyección. Como se observa en la Figura 15, se necesita una presión de 12.7 MPa para llenar completamente el molde. Se debe tener en cuenta que no se debe experimentar una caída de presión mayor al 50% de la presión de inyección tal como se observa en la Figura 15.

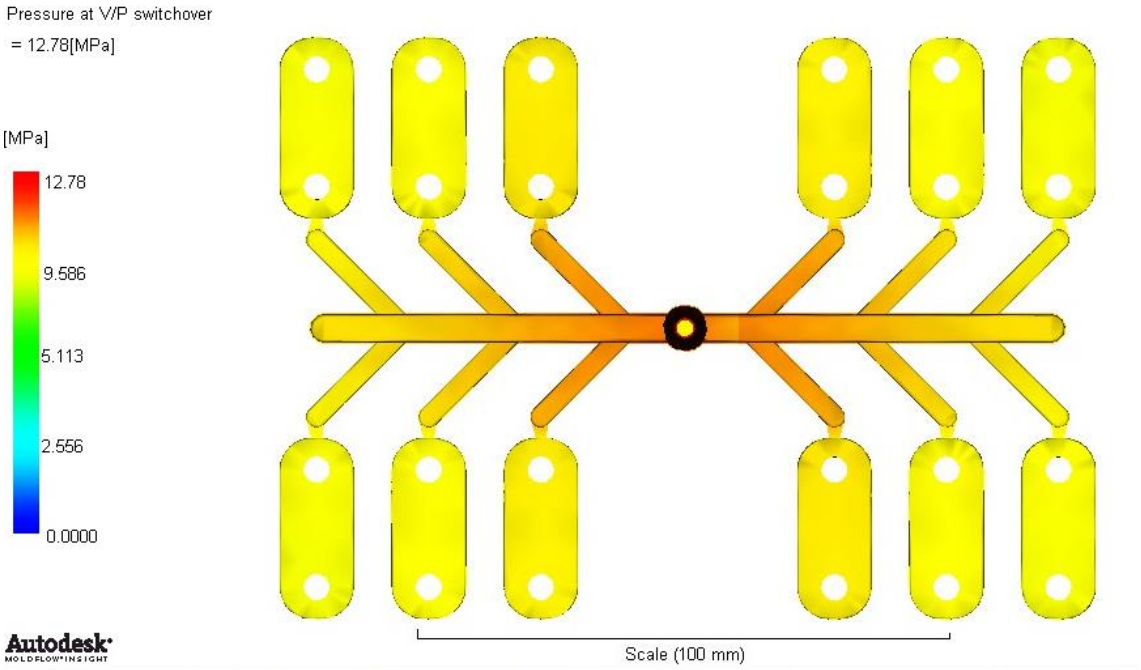

Figura 15. Presión de inyección.

En la Figura 15, se observa las piezas de color amarillo y la mazarota de color naranja, según la barra de colores de presión el color amarillo se encuentra a 9.6 MPa y la de color naranja está 10.8 MPa, por lo que la presión cae un 24% en las piezas y un 14.9% en la mazarota, llegando a la conclusión de que la presión de inyección no cae hasta el 50% y se garantiza el llenado de las piezas.

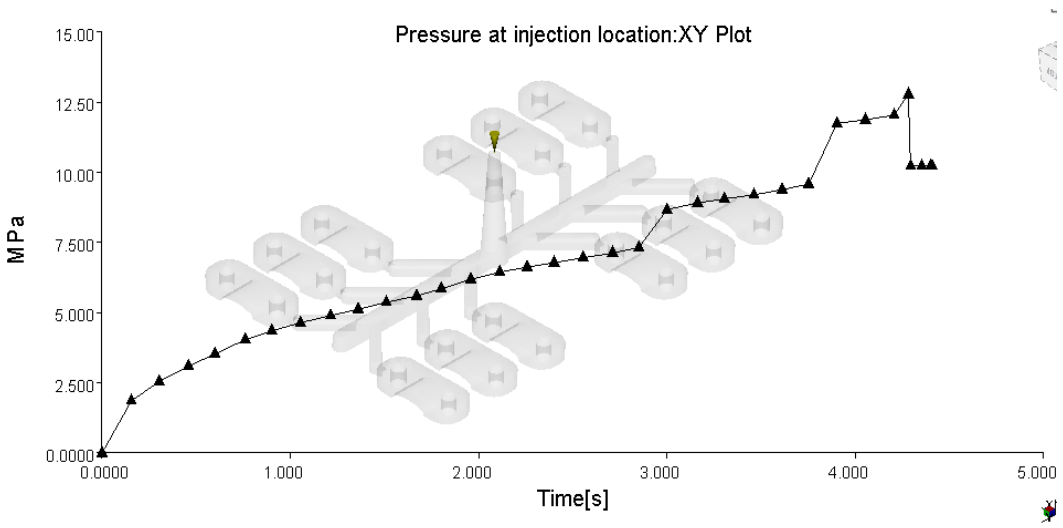

Figura 16. Diagrama de presión de inyección vs tiempo de inyección.

En la Figura 16, se presenta la relación de la presión de inyección con un valor de 12.7 MPa y con un tiempo de 4.4 segundos. Se observa además que de 0 a 3 segundos la presión se comporta con una curva ascendente, de 3 a 4.5 segundos se observa un pico presión debido al llenado de las cavidades de las bridas y por último se tiene una disminución de presión debido a la solidificación de la entrada.

En la Tabla 16, se presentan los resultados obtenidos de las variaciones de temperatura durante el transcurso de tiempo de llenado del molde. La diferencia térmica no supera los 10°C con el fin de generar un llenado homogéneo.

Tabla 16. Resultados de la optimización del tiempo de inyección.

Tiempo de llenado (*Fill Time*)	**Temperatura al frente del flujo (*Temperature at flow front*)**		**ΔT**	**Presión en V/P conmutación (*pressure at V/P switchover*)**	**Asignación de tiempo de llenado**
Segundos	**°C**	**°C**		**MPa**	**Segundos**
0.664	191.3	191.3	2.3	12.41	0.4
0.780	190.8	191.3	2.3	12.22	0.8
0.936	190.5	191.3	2	11.95	1
1.089	190.1	191.3	2.8	11.85	1.2
1.235	189.8	191.3	1.8	11.52	1.6
1.456	189.7	191.3	1.5	11.1	1.7
1.723	190.2	191.3	1.2	10.95	2
2.024	188.9	191.3	0.5	10.85	2.4
2.856	191.3	191.3	3	10.97	2.8
3.059	187.8	191.3	3.5	11.56	3.2
3.985	187.3	191.3	3.8	11.89	3.6
4.156	187.2	191.3	4.1	11.2	4

3.1.4.7 Atrapamientos de aire

Este análisis sirve para eliminar imperfecciones del material que se generan por el aire atrapado en las cavidades del molde. Al inyectar con material PP-GAK, este contiene fibras naturales los cuales se degradan térmicamente a partir de los 200°C por tal motivo el molde debe tener salidas de aire para evitar estos defectos en los productos inyectados. En la Figura 17, se observa los atrapamientos de aire de color magenta opuestos a las entradas del material, por lo que se recomienda acondicionar al molde con salidas de aire en los lados opuestos de entrada del material.

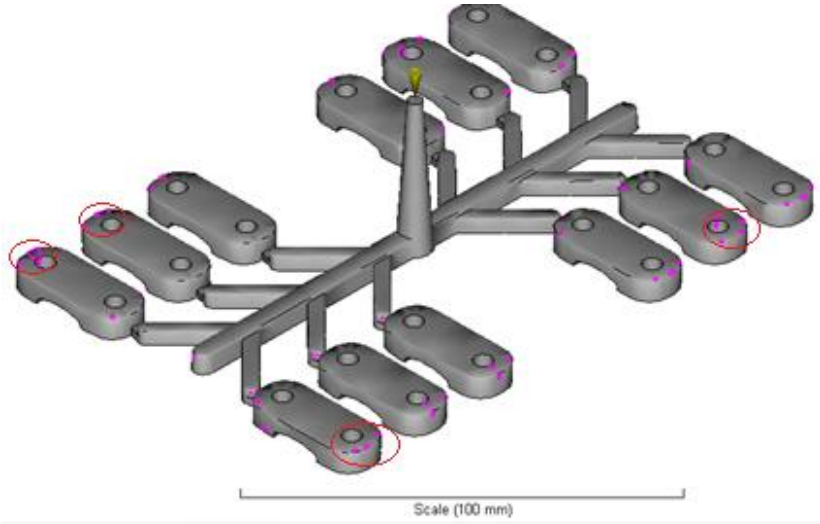

Figura 17. Atrapamientos de aire.

3.1.4.8 Fuerza de cierre

El análisis de la fuerza de cierre necesaria para mantener el molde cerrado durante la fase de inyección se observa en la Figura 18, esta fuerza máxima de cierre es 5 toneladas y es fundamental para la selección de la inyectora. Se recomienda utilizar un 25% extra de fuerza de cierre para compensar restricciones adicionales en la fase de producción.

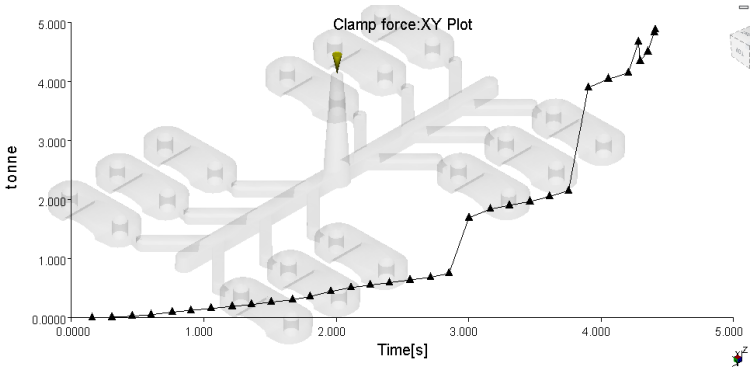

Figura 18. Diagrama de fuerza de cierre vs tiempo de inyección.

La inyectora utilizada para la producción fue una BOY 35E y sus características se presentan en la Tabla 17. La inyectora tiene una capacidad de fuerza de cierre de 35 toneladas la cual es mayor a la requerida; por lo tanto, se conseguirá un cierre seguro del molde durante la fase de inyección del material compuesto PP-GAK en el molde.

Tabla 17. Características de la máquina inyectora.

Máquina de moldeo por inyección		
Nombre comercial	BOY 35E	
Fabricante	BOY	
Unidad de inyección		
Carrera máxima de inyección	95	mm
Caudal máximo de inyección	135	cm^3/s
Diámetro del tornillo	24	mm
Control llenado	Stroke vs ram speed	
Presión de inyección máxima	273.9	MPa
Fuerza máxima de cierre	35	t
No exceder la fuerza máxima de cierre		

3.1.4.9 Alabeo

Para la simulación del alabeo, se determinaron: la dirección de la fuerza de gravedad con respecto a los planos de origen de la geometría y la temperatura ambiente a la que se encontrará el producto una vez concluido el proceso de inyección. Se seleccionó 23°C como un valor referente a la temperatura ambiente y los resultados se presentan en la Figura 19.

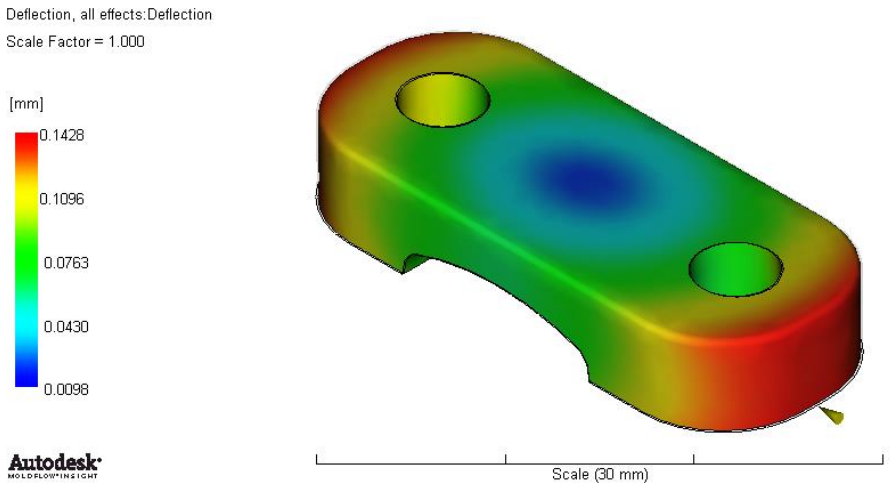

Figura 19. Alabeo de la pieza simulada.

3.1.4.10 Contracción

La contracción es el fenómeno en el que el volumen del plástico fundido lleno dentro de la cavidad de un molde se reduce en el momento en que se enfría y se solidifica.

La mayor parte de la contracción de la pieza se produce en el molde mientras se enfría, pero existe una contracción residual después de la expulsión, debido a que la pieza continúa enfriándose. Además, la pieza puede continuar encogiéndose muy levemente durante varias horas o incluso días hasta que la temperatura y el contenido de humedad se estabilicen. Por lo tanto, la inspección dimensional debe esperar al menos un día, en el caso de materiales higroscópicos se debe esperar hasta 15 días [29]. Las bridas inyectadas fueron evaluadas en términos de su contracción lineal en diferentes parámetros dimensionales y se compararon entre cada uno de los materiales empleados para la fase experimental.

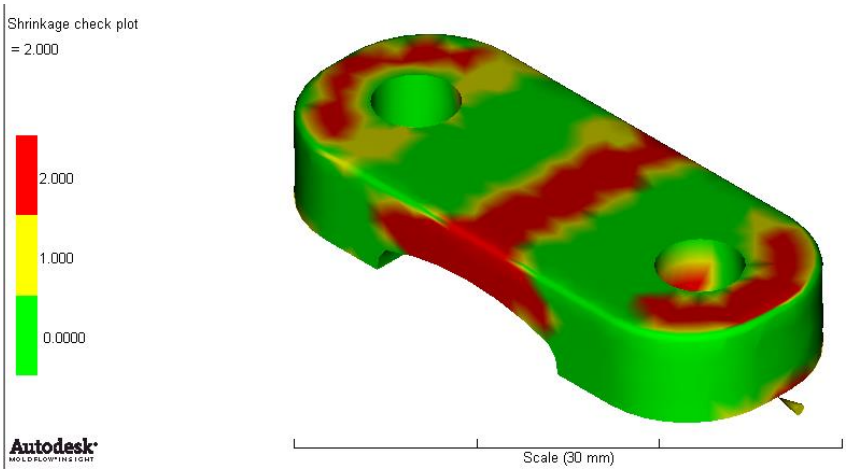

Figura 20. Porcentaje de contracción de la pieza simulada.

La Figura 20, muestra un diagrama de control de contracción en el cual se observa en la barra de colores el porcentaje de contracción. Además, la superficie de color rojo nos indica que se contraen el doble de la superficie de color amarillo, esto es ocasionado a los cambios de espesor.

RESULTADOS

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos de la inyección del material compuesto PP-GAK al 30% w/w. Una vez identificados los parámetros óptimos mediante la simulación se procede a inyectar las bridas con el material PP-GAK, mediante el siguiente proceso presentado en la Figura 21.

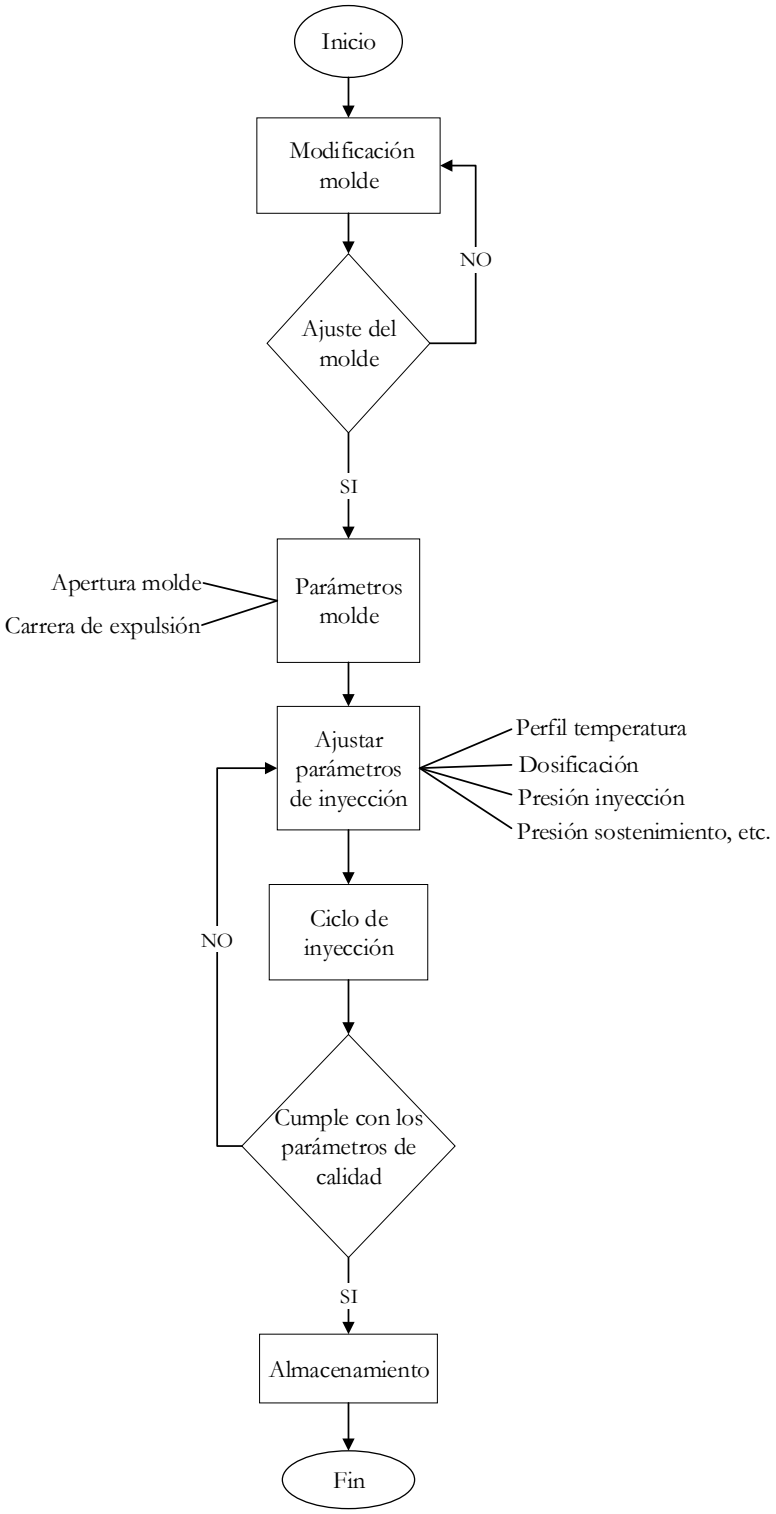

Figura 21. Proceso de inyección de bridas cordón seguridad.

4.1 Modificaciones en el molde

Para la inyección del PP-GAK se realizaron modificaciones en el molde para ajustarlo a la inyectora BOY 35E del laboratorio de polímeros de la Universidad Politécnica Salesiana. A continuación, se detallan las modificaciones realizadas:

1. Modificación del anillo centrador. – Se construyó un nuevo anillo centrador, dado que la inyectora empleada para la presente investigación difiere de la inyectora de la empresa Indurama S.A, estas modificaciones se presentan en la Figura 22.

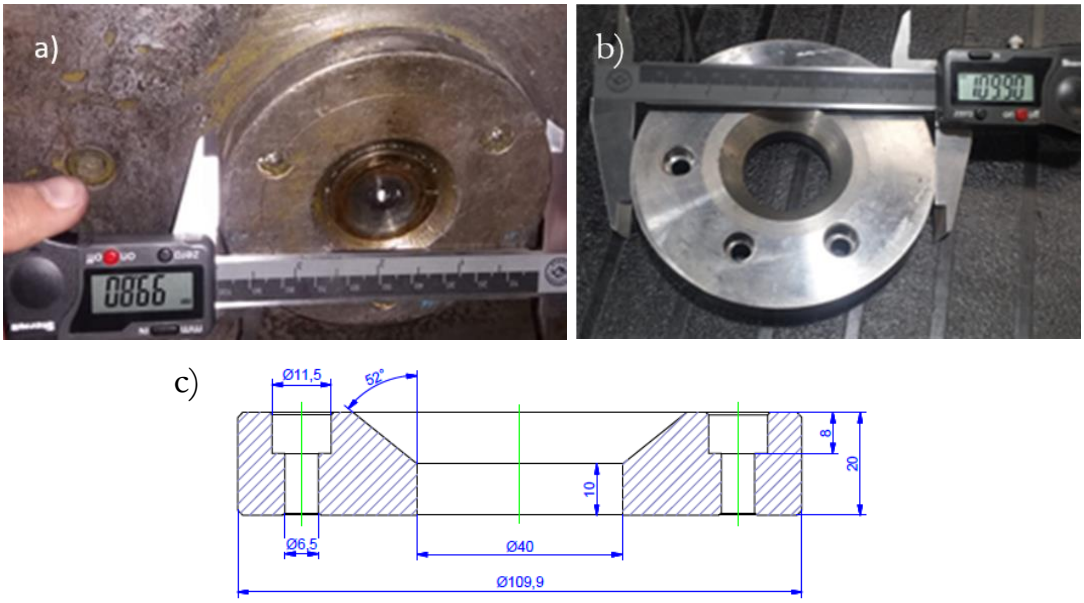

Figura 22. Anillo centrador: a) original, b) modificado y c) esquema.

2. Modificación del bebedero. – Se modificó el radio de curvatura del bebedero para asegurar contacto con la boquilla de la inyectora. Se recomienda que el diámetro de curvatura del bebedero sea 1 mm más grande que el diámetro de la boquilla para evitar fugas de material, estas modificaciones se presentan en la Figura 23.

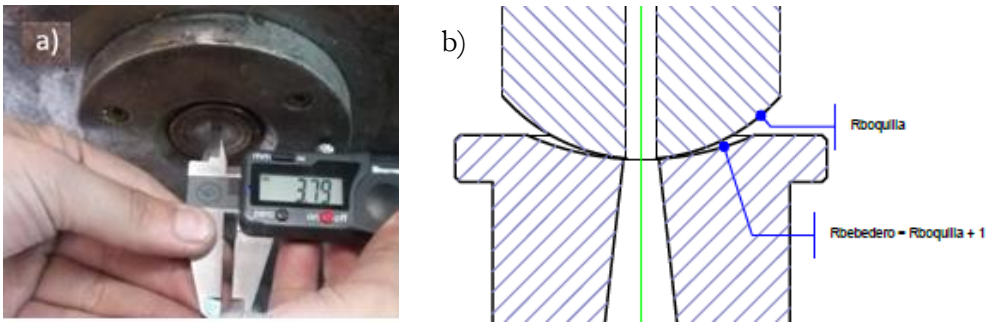

Figura 23. Radio de curvatura del bebedero: a) original y b) esquema.

3. Modificación de las canales de alimentación. – Para garantizar un llenado uniforme de las cavidades y mejorar el flujo al interior de los canales se debe garantizar una reducción gradual de la sección transversal de los mismos. Además, se ensancharon las dimensiones de las entradas del molde en un 20% a la medida original, para mejorar la fluidez del material y asegurar el llenado del molde con el material compuesto PP-GAK en las cavidades del molde. Estas modificaciones se presentan en la Figura 24, el cálculo de la sección de los canales de alimentación está dada por la ecuación 1.

$$D_1 = Diámetro\ bebedero/\sqrt{2} \qquad (1)$$

$$D_1 = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7.07\ [mm]$$

$$D_2 = \frac{D_1}{\sqrt{6}} = 3\ [mm]$$

Como se presentan en los cálculos, D_1 es el canal principal y D_2 es el canal secundario, estos cálculos son utilizados para la inyección de polímeros puros, estos cálculos sugieren estas dimensiones, pero el molde original tenía unas dimensiones de D_1= 6 mm y D_2=5 mm. Teniendo en cuenta que en el molde se inyectó PP+GAK los canales se incrementaron en 20% y los resultados son de D_1= 7.2 mm y D_2=6 mm.

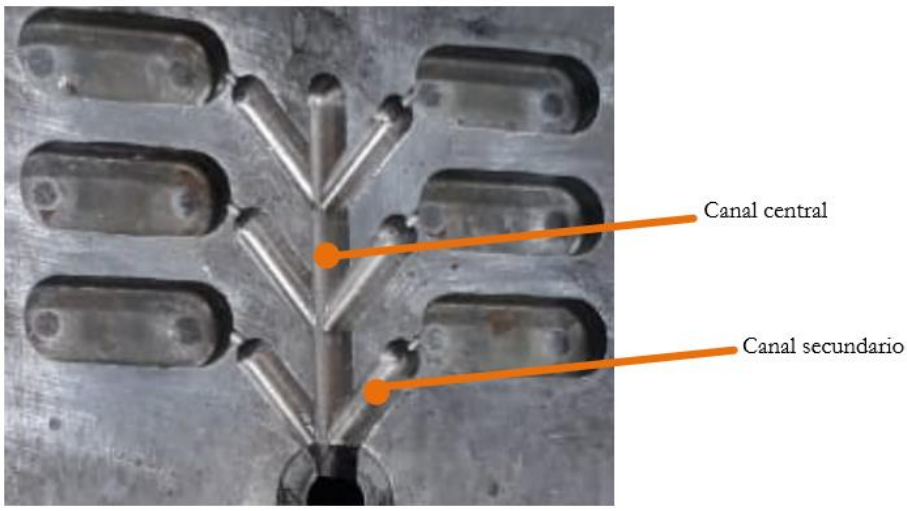

Figura 24. Modificaciones de los canales de alimentación del molde.

4. Elaboración de las salidas de aire. – Se mecanizaron salidas de aire a los lados opuestos de las entradas de material, para evitar la degradación térmica del plástico por el flujo hidrodinámico opuesto al llenado de la cavidad. Se determinaron las dimensiones de las salidas de airea atendiendo las recomendaciones para PP. Estas salidas de aire se presentan en la Figura 25.

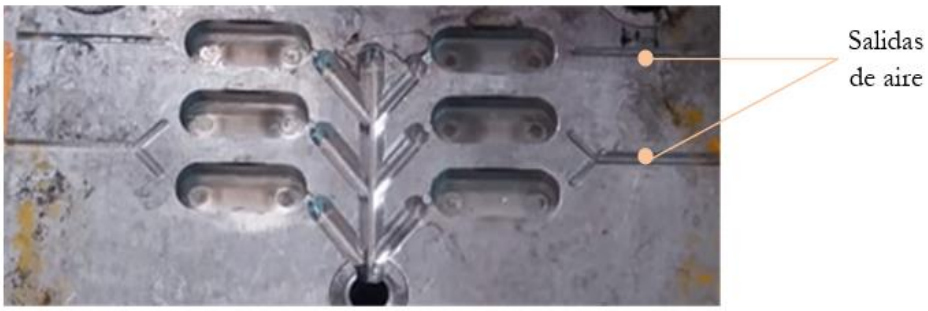

Figura 25. Salidas del aire.

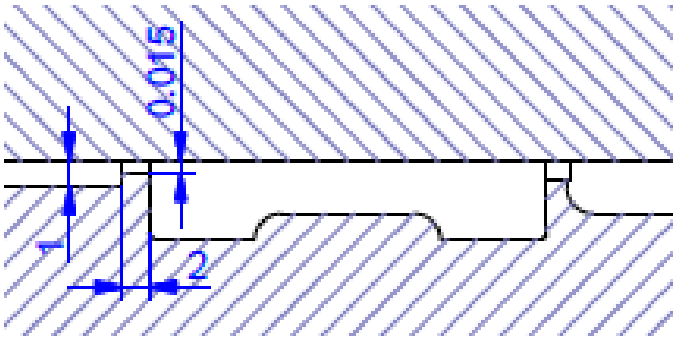

Figura 26. Esquema de las salidas de aire.

5. Modificación del Sistema de atemperado del molde. – Se cambiaron los rácor de conexión rápida del sistema de atemperado de diámetro 10 a 12 mm, para adaptarla a los equipos de refrigeración de la inyectora BOY 35E. Estas modificaciones se presentan en la Figura 27.

Figura 27. Sistema de atemperado.

4.2 Montaje del molde

Se realizó el montaje del molde de inyección bridas cordón seguridad, en la inyectora BOY E35 tal como se presenta en la Figura 28.

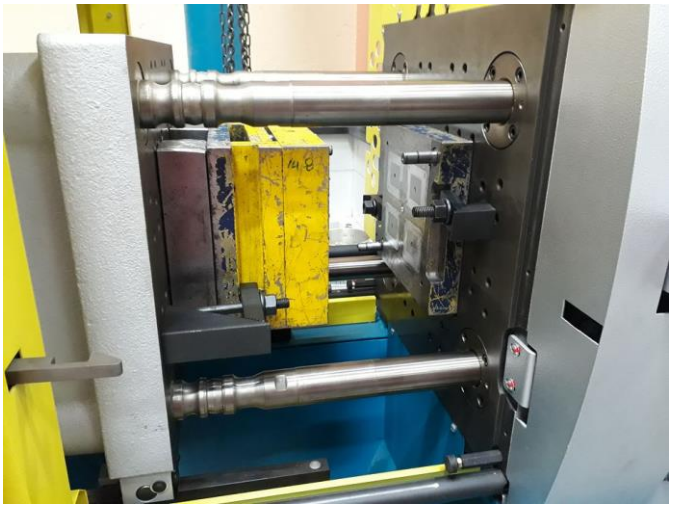

Figura 28. Molde montado en la inyectora.

4.3 Parámetros de máquina

A continuación, se procede a configurar los parámetros de máquina los cuales son apertura y cierre del molde; ajuste del sistema de expulsión, velocidad de acercamiento y retroceso de la boquilla de la inyectora.

4.4 Parámetros de inyección

Los parámetros de inyección se configuraron para tres tipos de materiales PAI, PP y PP-GAK, debido a que cada material tiene parámetros diferentes como su perfil de

temperatura, presión de inyección, presión de sostenimiento, dosificación, velocidad de inyección, etc.

Para la configuración de estos parámetros del material PAI, se tomó como referencia los parámetros utilizados en la empresa Indurama S.A y se detallan en la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros del ciclo de inyección con PAI.

Descripción	Valor
Presión de inyección (bar)	85
Perfiles de temperatura (°C)	220, 215, 210, 200
Velocidad del husillo (rpm)	300
Tiempo de pos presión	0.4
Carrera de dosificación	65
Fuerza de cierre	120
Tiempo de ciclo	40

Para la configuración del material PP se basó en la curva PVT, tomando la curva de presión de 100 MPa, la cual se exhibe en la Figura 29.

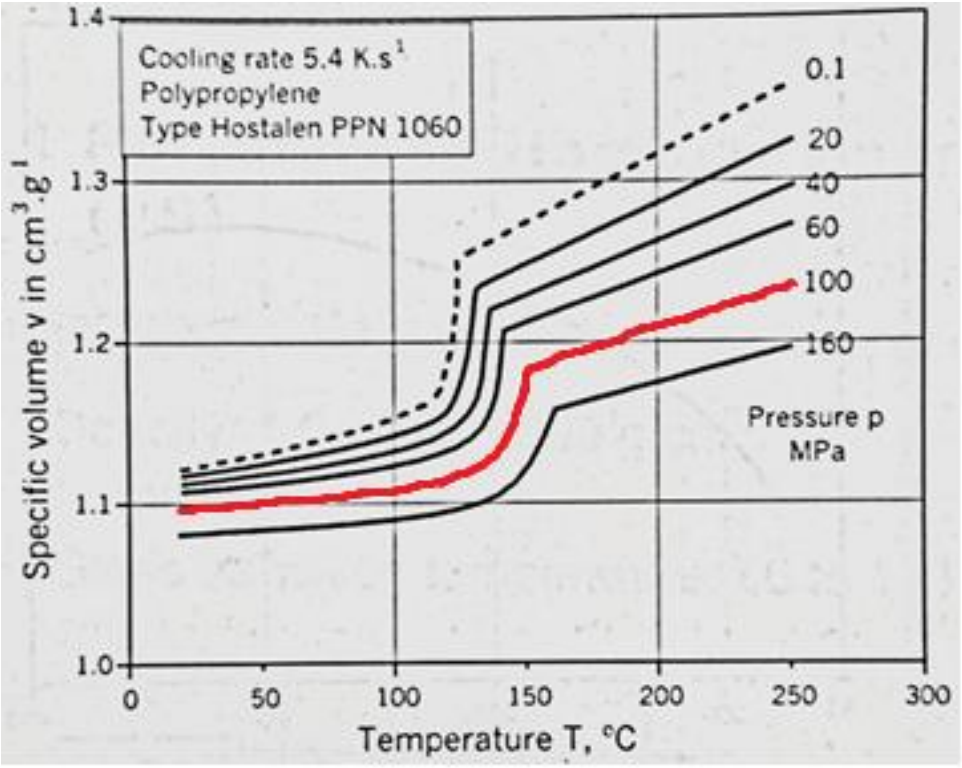

Figura 29. Curva PVT del material PP

Como se presenta en la Figura 29, el material PP se puede inyectar de 20 a 160 MPa en donde el rango de temperatura es de 130 a 240°C y la presión es constante, además el cambio de volumen específico es proporcional. Desde el rango de temperatura de 130 a

10°C se observa una caída de presión debido a la caída del volumen específico por lo que se observa en la pieza inyectada como contracciones. Se eligió la curva de 100 MPa que se señala con color rojo como valores iniciales para la inyección.
Para la configuración del material PP-GAK, los valores implementados fueron adquiridos en el software de simulación, los mismos que se utilizaron como referencia para dar inicio a la configuración de la inyectora. Se estableció una presión de inyección de 120 MPa y una fuerza de cierre del molde de 7 toneladas.

Después de haber configurado los parámetros de inyección de la máquina, se procede a realizar varios ensayos, con el fin de ir afinando y obtener los parámetros óptimos de inyección de brida cordón de seguridad con los tres tipos de material mencionados con anterioridad. En la Tabla 19, se resume los parámetros más relevantes entre lo simulado y lo experimental.

Tabla 19. Parámetros del proceso de inyección de los tres materiales.

Parámetros	**Simulación**			**Experimental**		
	PP	**PAI**	**PP-GAK**	**PP**	**PAI**	**PP-GAK**
Fuerza de cierre (kN)	80	70	90	90	80	120
Velocidad de cierre del molde (s)	--	--	--	450 a 70	450 a 70	450 a 70
Velocidad de apertura del molde (mm/s)	--	--	--	450 a 70	450 a 70	450 a 70
Velocidad de cierre del molde (s)	--	--	--	18	18	18
Velocidad de desplazamiento boquilla hacia adelante/atrás (mm/s)	--	--	--	45	40	45
Fuerza de apoyo de boquilla (kN)	--	--	--	45	35	40
Valor nominal de tiempo de inyección (s)	4.2	4.5	4.3	7	5.5	6.1
Carrera de plastificación (mm)	--	--	--	92	95	94
Velocidad Promedio de plastificación (mm/s)	--	--	--	300	300	250
Perfil de temperaturas (°C)	240	230	190	235,220,210,200,190	220,210,200,190,180	190,190,180,170,160
Presión de inyección en (bar)	110	100	120	90	100	120
Contrapresión (bar)	60	50	80	80	90	100

4.5 Piezas inyectadas

Concluido todo el proceso de inyección se tienen las siguientes piezas las cuales se presentan en la Figura 30, Figura 31, Figura 32 y Figura 33.

Figura 30. Bridas cordón seguridad.

Figura 31. Mazarrota y brida cordón seguridad de material PP.

Figura 32. Mazarrota y brida cordón seguridad de material PAI.

Figura 33. Mazarrota y brida cordón seguridad de material PP-GAK.

4.6 Comparación de las bridas inyectadas con PP-GAK

En la empresa Indurama S.A tienen un procedimiento para evaluar la calidad de las bridas con el material PAI. Se ocupará el mismo criterio para evaluar con el material PP-GAK. Para aprobar la calidad de la pieza inyectada se tienen 3 pasos los cuales son:

1. **Materia prima. –** La materia prima defectuosa provoca problemas de acabado superficial como tonalidad, propiedades mecánicas distintas y en casos extremos, daños en las máquinas inyectoras. Para controlar se exigen ensayos, fichas técnicas a los proveedores.

   El material PP-GAK está en fase de patentado, pero no hay problemas al momento de la inyección, ya que se cuenta con estudios previos realizados por el GiMaT.

2. **Proceso de inyección. –** Cada elemento tiene su procedimiento de inyección, las cuales se describen a continuación.

2.1. **Preparación de material. –** El material PAI tiene un proceso de secado en un horno a 60°C, después se mezcla y homogeniza con aditivos y scrap. Todo esto es controlado con una carta de pre control utilizado por la empresa Indurama S.A.

El grupo GiMaT proporcionó un valor de 15 kg que corresponde a pruebas y puesta a punto del ciclo de inyección de material PP-GAK ya procesado y listo para la inyección. Se procedió a un secado en un horno a 80°C con la finalidad de eliminar la humedad en la fibra natural.

2.2. **Parametrización. –** En Indurama S.A. los operadores configuran los parámetros de inyección tales como: perfiles de temperatura, presiones, post-presiones y tiempos de ciclo, con la ayuda de una base datos que tiene para cada

tipo de elemento a inyectar. Los parámetros usados para inyectar el PP-GAK están presentados en la Tabla 19.

3. **Evaluación. –** Para evaluar la calidad de la pieza, la empresa Indurama S.A hace una validación de la pieza en forma individual y como parte del conjunto de la refrigeradora, a continuación, se describen los criterios de calidad que debe cumplir el elemento las cuales son:

3.1. **Peso. –** Se pesa la brida inyectada para conocer si la configuración de la inyectora es la correcta. Si tiene un peso bajo al valor referencial, se concluye que la brida no está apta para cumplir su función ya que presenta falta de compactación del producto lo que reduce sus propiedades mecánicas. Si tiene un peso alto, se concluye que se está ocupando material en exceso.

3.2. **Estabilidad dimensional. -** En este punto se controla que la pieza cumpla las dimensiones críticas del plano, ya que esta pieza es ensamblada en serie.

Como resultado de la inyección de la brida con el material PP-GAK, se tiene las siguientes diferencias las cuales se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Comparación de los aspectos más relevantes del proceso e inyección con los materiales.

Descripción	**PAI**	**PP-GAK**	**Diferencia %**
Peso (kg)	0.04	0.028	-30
Temperatura de proceso (°C)	230	190	-17.4
Tiempo de ciclo (s)	40	42	5
Costo ($)	3.64[1]	2.50[2]	-31.32
Modulo elástico (GPa)	1.86[1]	3.6[2]	93.5
Modulo elástico Flexión (GPa)	1.89[1]	3.7[2]	95.77
Esfuerzo ultimo tracción (MPa)	31[1]	40.5[2]	30.65
Esfuerzo ultimo flexión (MPa)	50[1]	48[2]	-4
CO_2 (kg/kg)	1.42[1]	1.37[3]	-3.52

Nota: [1] tomado de la data sheet, [2] Información proporcionada por GiMaT, [3] Tomado de base de datos CES Material Selector.

Como se observa en la Tabla 20, el material PP-GAK tiene un porcentaje del 30 % menos peso que el PAI. Por otra parte, las propiedades mecánicas en general del PP-GAK son superiores al PAI, Al utilizar un 30% w/w de fibras de bambú, se reduce un 30 % el consumo de materia prima lo que implica un ahorro de materia prima plástica. Además, para su procesamiento se observa que el PAI requiere mayor temperatura que el PP-GAK; por lo tanto, el ahorro energético es de un 17.4% con respecto al PAI generando un beneficio durante la producción en serie de bridas cordón de seguridad.

Los tiempos de ciclo del PP-GAK no varían significativamente con una diferencia relativa del 5% con respecto al PAI por lo que se concluye que el PP-GAK genera un ahorro energético y económico la cual es atractivo para la empresa Indurama S.A.

4.7 Análisis de estabilidad dimensional

4.7.1 Brida cordón seguridad

Para el análisis de estabilidad se realizó un muestreo de 30 bridas con material PP, PAI y PP-GAK, este dimensionamiento se presenta en la Figura 34. Para el análisis se consideraron las mismas cavidades para todo el muestro.

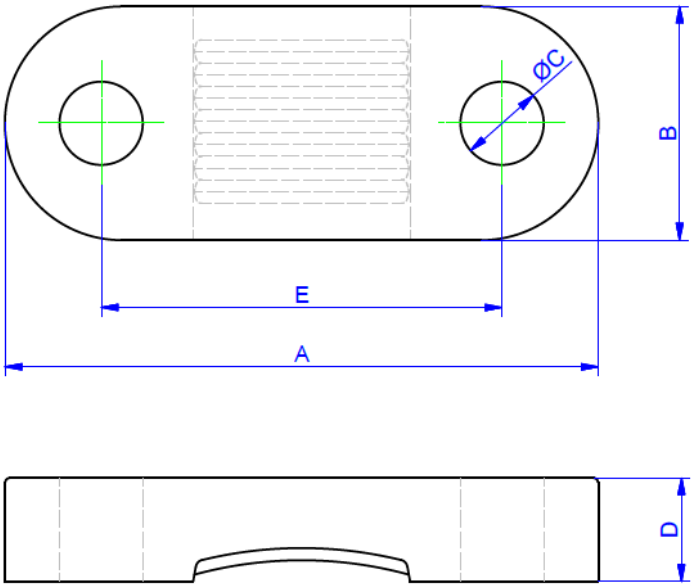

Figura 34. Dimensionamiento de la brida.

En la Tabla 21, se presenta los resultados obtenidos en la inyección del material de prueba.

Tabla 21. Análisis dimensional de contracciones en la brida.

Parámetro	Cavidad/Machos	PP	Error (%)	PAI	Error (%)	PP-GAK	Error (%)
A	35.5	35.27±0.1	0.65	35.47±0.1	0.08	35.47±0.05	0.08
B	14	13.58±0.02	3	13.7±0.09	2.14	13.81±0.03	1.36
C	5	4.85±0.03	3	4.93±0.1	1.40	4.84±0.05	3.20
D	6.2	6.1±0.1	1.61	6.15±0.1	0.81	6.09±0.1	1.77
E	24	23.58±0.03	1.75	23.95±0.03	0.21	23.99±0.04	0.04

Además, se realiza una comparación de la contracción volumétrica total de la pieza entre los valores obtenidos por simulación y los valores experimentales entre el material original y la propuesta de sustitución PP-GAK, se presenta el error porcentual en la Tabla 22.

Tabla 22. Contracción volumétrica máxima y error porcentual entre PAI y PP-GAK.

Contracción volumétrica máxima y error porcentual			
Material	**Simulación**	**Experimentación**	**Error porcentual de la media**
PAI	0.06±0.02 mm	0.09±0.03 mm	28.5
PP-GAK 30%	0.09±0.03 mm	0.10±0.04 mm	11

Como se observa en la Tabla 22, el error porcentual es alrededor del 20 % y se debe a dos razones:

1. Errores sistemáticos durante la medición.
2. La simulación no es capaz de reproducir la orientación real y la longitud real de las fibras.

4.8 Análisis estadístico del efecto del material sobre la contracción en la brida cordón de seguridad

Con las mediciones realizadas en los parámetros C y E, ya que estos valores son funcionales y de interés al momento del montaje en la refrigeradora. La Tabla 23, resume los datos medidos de cada parámetro en las bridas inyectadas con PP y PP-GAK. La muestra de control es el PAI.

Tabla 23. Parámetros de las piezas inyectadas.

# Muestra	PP		PAI (control)		PP-GAK	
	Parámetro C	**Parámetro E**	**Parámetro C**	**Parámetro E**	**Parámetro C**	**Parámetro E**
1	4.85	23.75	4.93	23.95	4.88	23.91
2	4.83	23.74	4.91	23.94	4.9	23.89
3	4.85	23.76	4.94	23.92	4.91	23.92
4	4.84	23.72	4.95	23.93	4.91	23.91
5	4.86	23.75	4.94	23.95	4.92	23.92
6	4.84	23.74	4.92	23.95	4.89	23.88
7	4.84	23.72	4.93	23.95	4.92	23.90
8	4.81	23.75	4.93	23.96	4.92	23.90
9	4.80	23.76	4.95	23.98	4.92	23.91
10	4.81	23.77	4.91	23.97	4.91	23.93
11	4.82	23.75	4.91	23.97	4.89	23.93
12	4.85	23.76	4.95	23.93	4.90	23.92
13	4.86	23.75	4.94	23.94	4.90	23.91
14	4.85	23.76	4.94	23.94	4.90	23.91

# Muestra	PP		PAI (control)		PP-GAK	
	Parámetro C	**Parámetro E**	**Parámetro C**	**Parámetro E**	**Parámetro C**	**Parámetro E**
15	4.81	23.72	4.93	23.95	4.92	23.91
16	4.82	23.72	4.91	23.94	4.92	23.91
17	4.83	23.72	4.95	23.94	4.90	23.92
18	4.87	23.75	4.96	23.95	4.90	23.89
19	4.85	23.75	4.96	23.94	4.90	23.91
20	4.84	23.75	4.95	23.94	4.91	23.90
21	4.81	23.76	4.94	23.94	4.92	23.90
22	4.85	23.77	4.94	23.95	4.91	23.91
23	4.85	23.72	4.95	23.96	4.91	23.91
24	4.82	23.77	4.97	23.96	4.90	23.92
25	4.86	23.76	4.93	23.95	4.90	23.93
26	4.87	23.75	4.91	23.96	4.91	23.92
27	4.86	23.74	4.92	23.95	4.92	23.92
28	4.85	23.76	4.92	23.97	4.91	23.92
29	4.83	23.75	4.95	23.96	4.90	23.91
30	4.87	23.77	4.96	23.94	4.90	23.90

4.8.1 Análisis ANOVA para el parámetro C

Tabla 24. Resumen estadístico para parámetro C.

Material	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
PAI	30	4.93667	0.0172873	0.350182%	4.91	4.97	0.06
PP	30	4.84	0.0201717	0.41677%	4.8	4.87	0.07
PP-GAK	30	4.90667	0.0106134	0.216305%	4.88	4.92	0.04
Total	90	4.89444	0.0437847	0.89458%	4.8	4.97	0.17

Tabla 25. Indicadores de condición.

Material	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
PAI	-0.291387	-1.01476
PP	-0.785089	-1.02139
PP+GAK	-0.844579	-0.23439
Total	-1.77454	-1.61588

La Tabla 25, muestra diferentes estadísticos de Parámetro C para cada uno de los 3 niveles de Material. La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles, enlistados aquí bajo la columna de promedio.

Tabla 26. Tabla ANOVA para Parámetro C por Material.

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadrado Medio*	*Razón-F*	*Valor-P*
Entre grupos	0.146889	2	0.0734444	269.23	0.0000
Intra grupos	0.0237333	87	0.000272797		
Total (Corr.)	0.170622	89			

La Tabla 26, descompone la varianza de Parámetro C en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 269.228, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Parámetro C entre un nivel de Material y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

4.8.2 Pruebas de Múltiple Rangos para Parámetro C por Material

Tabla 27. Método: 95.0 porcentaje LSD

Material	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
PP	30	4.84	X
PP-GAK	30	4.90667	X
PAI	30	4.93667	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
PAI - PP	*	0.0966667	0.00847629
PAI – PP-GAK	*	0.03	0.00847629
PP – PP-GAK	*	-0.0666667	0.00847629

* indica una diferencia significativa.

La Tabla 27, aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

A partir del análisis estadístico, se puede determinar con el 95% de nivel de confianza que existe una diferencia estadísticamente significativa en la evaluación de la contracción del parámetro C al cambiar de material. También es importante notar que la diferencia en contracción es mínima entre la muestra de control PAI y la alternativa de sustituir por PP-GAK. Por lo tanto, es factible su sustitución.

En la Figura 35 y Figura 36, se observan las gráficas de medias y de caja y bigotes.

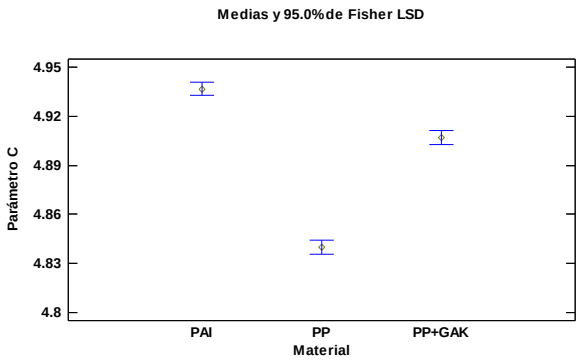

Figura 35. Medias y 95% de Fister LSD.

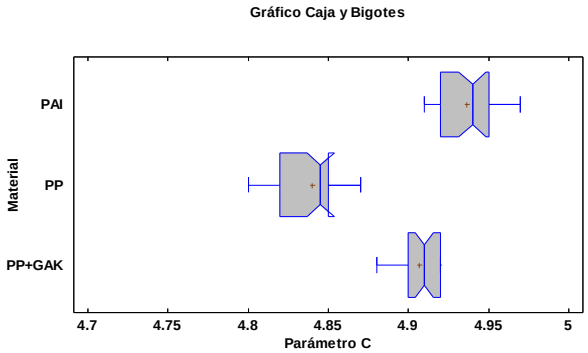

Figura 36. Gráfico caja y bigotes.

4.8.3 Análisis ANOVA para el parámetro E

Tabla 28. Resumen Estadístico para Parámetro E.

Material	*Recuento*	*Promedio*	*Desviación Estándar*	*Coeficiente de Variación*	*Mínimo*	*Máximo*	*Rango*
PAI	30	23.9493	0.0133735	0.0558408%	23.92	23.98	0.06
PP	30	23.748	0.0164841	0.0694124%	23.72	23.77	0.05
PP-GAK	30	23.9107	0.0120153	0.0502509%	23.88	23.93	0.05
Total	90	23.8693	0.0888225	0.37212%	23.72	23.98	0.26

Material	*Sesgo Estandarizado*	*Curtosis Estandarizada*
PAI	0.496753	0.100705
PP	-1.44749	-0.65921

PP-GAK	-1.16123	0.350692
Total	-2.36905	-2.7182

La Tabla 28, muestra diferentes estadísticos de Parámetro E para cada uno de los 3 niveles de Material. La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles, enlistados aquí bajo la columna de Promedio.

Tabla 29. Tabla ANOVA para Parámetro E por Material.

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadrado Medio*	*Razón-F*	*Valor-P*
Entre grupos	0.684907	2	0.342453	1726.82	0.0000
Intra grupos	0.0172533	87	0.000198314		
Total (Corr.)	0.70216	89			

La Tabla 29, descompone la varianza de Parámetro E en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 1726.82, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Parámetro E entre un nivel de Material y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

4.8.4 Pruebas de Múltiple Rangos para Parámetro E por Material

Tabla 30. Método: 95.0 porcentaje LSD

Material	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
PP	30	23.748	X
PP-GAK	30	23.9107	X
PAI	30	23.9493	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
PAI - PP	*	0.201333	0.00722708
PAI – PP-GAK	*	0.0386667	0.00722708
PP – PP-GAK	*	-0.162667	0.00722708

* indica una diferencia significativa.

La Tabla 30, aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3

grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

A partir del análisis estadístico, se puede determinar con el 95% de nivel de confianza que existe una diferencia estadísticamente significativa en la evaluación de la contracción del parámetro C al cambiar de material. También es importante notar que la diferencia en contracción es mínima entre la muestra de control PAI y la alternativa de sustituir por PP-GAK. Por lo tanto, es factible su sustitución.

En la Figura 37 y Figura 38, se observan las gráficas de medias y de caja y bigotes.

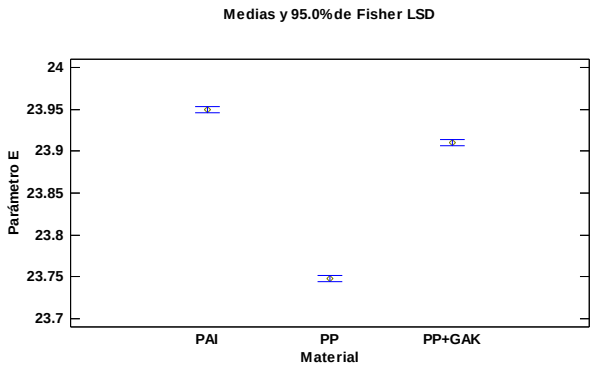

Figura 37. Medias y 95.0% de Fisher LSD

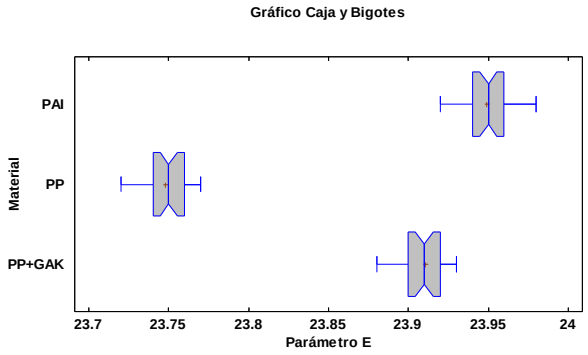

Figura 38. Gráfico caja y bigotes.

Como se observa en la Tabla 31, el análisis de tolerancias dimensionales de los parámetros C y E, los dos están dentro de la tolerancia requerida por el plano.

Por lo que las dimensiones de los parámetros críticos del producto tanto en el PAI como en el PP-GAK están dentro de las tolerancias, por lo que la sustitución sería aplicable desde este punto de vista.

Tabla 31. Análisis de tolerancias de los parámetros C y E.

Descripción	Patrón (mm)	PAI (mm)	Error (%)	PP-GAK (mm)	Error (%)
Tolerancias parámetro C	$5^{+0}_{-0.2}$	4.93±0.06	1.4	4.9±0.04	2
Tolerancias parámetro E	$24^{+0}_{-0.2}$	23.94±0.06	0.25	23.91±0.05	0.37

4.9 Aplicación

Para efectos demostrativos, las bridas cordón de seguridad inyectadas con el material PP-GAK, fueron remplazadas en la línea de refrigeración de la planta Indurama S.A tal como se presenta en la Figura 39 y Figura 40.

Figura 39. Brida de material PAI acoplada al refrigerador RI480.

Figura 40. Brida de material PP-GAK acoplada al refrigerador RI480.

CONCLUSIONES

En este proyecto técnico se inyectó las bridas cordón seguridad con material PP-GAK logrando validar este material para ser aplicado en la industria, lo que ha permitido alcanzar los objetivos planteados y llegar a las conclusiones que se describen a continuación:

- Se determinaron las propiedades reológicas del PAI y PP-GAK mediante reometría capilar, logrando utilizar estos datos en la configuración de la inyectora.
- Se establecieron los parámetros de inyección óptimos para la inyección de las bridas cordón de seguridad con el PP-GAK mediante el software especializado, facilitando la configuración del ciclo de inyección en la máquina.
- El molde de inyección usado para inyectar bridas con PAI por la empresa Indurama S.A, fue modificado de acuerdo a los requerimientos de este tipo de materiales compuestos, logrando diseñar canales para eliminar los atrapamientos de aire y así obtener mejor acabado en la pieza con el material PP-GAK.
- Se inyectaron 30 piezas de bridas cordón de seguridad con los tres materiales PP, PAI y PP-GAK; logrando validar el material, además el material al ser utilizado en el proceso de inyección, logra disminuir el peso, el consumo de material plástico, la temperatura de procesamiento lo que se traduce en ahorros económicos durante la producción en serie de las bridas cordón de seguridad.
- Los cambios que se realizaron en el molde de la empresa Indurama S.A no demandaron costes excesivos ni cambios significativos con base en su condición original; por lo que al inyectar el material PP-GAK no implica el cambio de moldes.

RECOMENDACIONES

Para inyectar el material PP-GAK se debe realizar un secado a 80°C, durante 8 horas para evitar defectos en la fase de inyección por el atrapamiento de aire las piezas.

Las canales de alimentación y las entradas del molde deben ser más anchas para evitar el esfuerzo a la cizalladura y aumento de la presión de inyección.

No exceder la temperatura por arriba de 200°C para evitar degradar térmicamente las fibras de refuerzo.

TRABAJOS FUTUROS

Remplazar progresivamente los demás elementos estructurales de una refrigeradora doméstica.

Probar con otros porcentajes de contenido de fibra en el rango de 20 a 50%.

Realizar ensayos mecánicos a los componentes sustituidos para validar sus propiedades bajo tracción, compresión y flexión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. Abdennadher, «Injection Moulding of Natural Fibre Reinforced Polypropylene: Process, Microstructure and Properties», Tesis Doctoral, MINES ParisTech, París, Francia, 2015.

[2] J. Holbery y D. Houston, «Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications», vol. 58, n.º 11, pp. 80-86, 2006.

[3] V. L. Fajardo J y S. A. López L, «Experiencies in obtaining polymeric composites reinforced with natural fiber from Ecuador», *Ingenius*, vol. 9, pp. 28-35, 2013.

[4] L. E. Valarezo, «Obtención experimental de un material biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de guadúa angustifolia proveniente del Ecuador», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2013.

[5] P. B. Albarracín y E. X. Castillo, «Determinación de la distribución de orientación y longitud de fibras mediante procesamiento digital de imágenes en compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2014.

[6] D. Perugachi, «Desarrollo experimental de blends de polipropileno con fibras naturales lignocelulósicas», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2014.

[7] J. D. Santos, «Simulación del estado de orientación de fibras cortas de guadua en un biomaterial compuesto: PP-GAK moldeado por inyección mediante sistemas CAD-CAE», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2015.

[8] C. A. Paltán, «Validación del sistema de inyección de un biomaterial compuesto PP-GAK mediante modelamiento CAD-CAE», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2016.

[9] J. P. Greene, *Sustainable plastics: environmental assessments of biobased, biodegradable, and recycled plastics*. John Wiley & Sons, 2014.

[10] Z. Liyana *et al.*, «Investigation of sugar cane bagasse as alternative material for pyramidal microwave absorber design», en *Wireless Technology and Applications (ISWTA), 2012 IEEE Symposium on*, 2012, pp. 66–70.

[11] S. Daud, S. S. M. Salleh, M. N. Salleh, F. H. Kasim, y S. A. Saad, «Analysis of Chemical Composition in Sugarcane Bagasse & Rice Straw for their suitability using in Paper Production», 2007.

[12] G. Desille y C. Schils, «Bamboo Fibers Reinforced Polypropylene Compositions», US20160040001A1, 11-feb-2016.

[13] P. García y M. Teresa, «Polimerización secuencial de Copolímeros de Propileno en un solo reactor. Regulación de la morfología y propiedades mecánicas», 2016.

[14] D. Ponce, «Obtención de Materiales Compuestos de Matriz Polimérica Biodegradable Reforzada con Fibra Natural», Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 2011.

[15] E. Müller, R. Schillig, T. Stock, y M. Schmeiler, «Improvement of injection moulding processes by using dual energy signatures», *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 704–709, 2014.

[16] S. H. Tang, Y. J. Tan, S. Sulaiman, N. Ismail, y R. Samin, «The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 182 (1-3), pp. 418-426, 2007.

[17] A. R. Wan, L. T. Sin, y A. R. Rahmat, «Injection moulding simulation analysis of natural fiber composite window frame», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 197 (1-3), pp. 22-30, 2008.

[18] N. Montañés Muñoz, «Fabricación y caracterización de materiales compuestos ecológicos con matriz polimérica de origen natural y residuos vegetales industriales

procedentes de la fabricación de licores de hierbas aromáticas», Tesis Doctoral, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, Valencia, España, 2017.
[19] L. A. Granda García, «Evaluación de las propiedades de materiales compuestos fabricados a partir de fibras semiquimicas de Leucaena Collinsii y Polipropileno», Tesis Doctoral, Universitat de Girona, Barcelona, España, 2016.
[20] J. Bayer Resplandis, «Evaluación de las propiedades de materiales compuestos fabricados a partir de fibras semiquimicas de Leucaena Collinsii y Polipropileno», Tesis Doctoral, Universitat de Girona, Barcelona, España, 2013.
[21] D. D. Vicuña Vicuña, «Obtención de biocompuestos a partir de residuos de madera (Sawdust) y resina termoplástica», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2016.
[22] A. Serrano, F. X. Espinach, J. Tresserras, N. Pellicer, M. Alcala, y P. Mutje, «Study on the technical feasibility of replacing glass fibers by old newspaper recycled fibers as polypropylene reinforcement», *J. Clean. Prod.*, vol. 65, pp. 489-496, feb. 2014.
[23] Y. Mi, X. Chen, Q. Cuo, y C.-M. Chan, «Bamboo fiber reinforced polypropylene composites», mar-1999.
[24] «High Impact Polystyrene», *Impact Plastics*, 2018. .
[25] S. Americas, «PAI STYRON A-TECH 1115». 2011.
[26] «Moldeo por inyección». [En línea]. Disponible en: http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion11.MOLDEO.POR.INYECCION.pdf. [Accedido: 17-abr-2018].
[27] E. Maya Ortega, «Diseño de moldes de inyección de plástico con ingeniería concurrente», Tesis de máster, Instituto Politécnico Nacional, Mexico, DF., 2007.
[28] «Resultados: Tiempo de Llenado | Simulacion de Plasticos | Sobre Plásticos y mas», *Simulacion de Plasticos | Sobre Plásticos y mas*. [En línea]. Disponible en: https://www.sobreplasticosymas.com/single-post/2016/06/20/Resultados-Tiempo-de-Llenado. [Accedido: 19-jul-2018].
[29] «Calculate Plastic Mold Shrinkage | ICOMold». .