



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PRE EVALUACIÓN DE MOLDES
PARA PIEZAS PLÁSTICAS AUTOMOTRICES QUE CONFORMAN
EL INTERIOR DE UN VEHÍCULO.**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. FRANCISCO GERARDO SAUCEDO CRUZ
ASESOR: M.C. KARLA ALEJANDRA RODRÍGUEZ GARCÍA**

AGUASCALIENTES, AGUASCALIENTES, MAYO 2018

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PRE
EVALUACIÓN DE MOLDES PARA PIEZAS
PLÁSTICAS AUTOMOTRICES QUE CONFORMAN EL
INTERIOR DE UN VEHÍCULO.**

CARTA LIBERACIÓN DEL ASESOR



19 de Febrero del 2018

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Ing. Francisco Gerardo Saucedo Cruz, una vez revisada la Tesis titulada: "Desarrollo de un sistema de pre evaluación de moldes para piezas plásticas automotrices que conforman el interior de un vehículo", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestro en Manufactura Avanzada durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 19 días del mes de Febrero del año 2018.

M.C. Karla Alejandra Rodríguez García
CURP: ROGK900927MASDRR06
Asesor Académico

Ing. Hector de Jesús Arias Segovia
CURP: AISH830610HASRGC08
Asesor en Planta

CARTA LIBERACIÓN DEL REVISOR



Santiago de Querétaro, Qro.
02 de mayo del 2018

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora
Posgrado CIATEQ
PRESENTE.

Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis del **ING. FRANCISCO GERARDO SAUCEDO CRUZ**, del trabajo titulado:

**"DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PRE EVALUACIÓN DE MOLDES PARA
PIEZAS PLÁSTICAS AUTOMOTRICES QUE CONFORMAN EL INTERIOR DE
UN VEHÍCULO"**

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el estudiante antes mencionado, el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de ésta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente.

ATENTAMENTE


M.M.A. Gerardo Brianza Gordillo
CURP: BIGG660808HHGRRR01

RESUMEN

En este estudio se reporta el análisis de inyección de plástico en una pieza que forma parte del interior de un vehículo. El análisis se llevó a cabo mediante el software Moldex3D ® que emplea el método de elemento finito. La pieza estudiada es manufacturada por una empresa automotriz de la región que se encarga de la fabricación de los interiores de los vehículos, como son los tableros, consolas, aires acondicionados y otros productos plásticos, sin embargo no cuenta con el análisis de inyección de plásticos que le permitan mejorar los procesos de fabricación o incluso validar los nuevos desarrollos. La simulación de inyección de plástico brinda la posibilidad de analizar y validar las condiciones del proceso para observar el comportamiento de los parámetros de inyección como la presión y velocidad que ejerce la máquina, temperaturas de la resina y el molde durante las diferentes etapas de extrusión del producto.

En este trabajo de investigación se implementó un diseño de experimentos por medio del método de Taguchi, en base a una matriz ortogonal de L9 (3⁴) donde se propusieron los parámetros de inyección que afectan el proceso, en este caso los factores fueron: el diseño original de la parte plástica y 2 rediseños, temperatura de inyección, tiempo de enfriamiento y presión de inyección.

Los mejores parámetros de inyección se obtuvieron en la simulación 8 que corresponde a los parámetros donde la parte plástica contiene 10 refuerzos, una temperatura de 200°C, 20 segundos de tiempo de enfriamiento y 80% de presión respecto a la capacidad de la máquina, se confirmó que los resultados obtenidos en la simulación y por medio del análisis estadístico de Taguchi coinciden como la mejor condición para la inyección de la parte plástica.

Además se realizó un segundo análisis de inyección de plástico a una pieza que se encuentra en diseño y desarrollo, el requerimiento es controlar la línea de unión de la resina durante el proceso en una sección de la parte plástica donde se eviten problemas de calidad de mala apariencia, fueron necesarias dos simulaciones con diferentes propuestas de ubicación del punto de inyección para encontrar la condición óptima que controla la unión de los flujos de inyección, de esta manera se confirma que la implementación de la simulación de inyección de plásticos puede mejorar los procesos de producción y la calidad de los productos.

ABSTRACT

This investigation is about plastic injection analysis for an interior plastic parts of the vehicle. The analysis was made in Moldex3D software using the finite element method. The studied part is produced in an automotive company of the region in charges to produce interior components for the vehicles, as cockpit modules, consoles, air conditioners (HVACs) and other plastic products, nevertheless this company doesn't have plastic injection analysis that allows the improvement of their processes or even the validation for new developments. The plastic injection simulation analysis gives the possibility to analyze and validate the process conditions to check the behavior of the injection parameters (pressures, injection speeds, temperatures) during different stages of the extrusion process.

In this investigation was implemented a design of experiments using Taguchi method in base to an orthogonal matrix L9 which were proposed injection parameters that affect the process, in this case the factors was: original design of the part and two redesigns of the part, injection temperature, cooling time and injection pressures.

The best injection parameters was found at the simulation 8, and the parameters was with the plastic part with 10 reinforcements, resin temperature of 200°C, 20 seconds as cooling time and 80% of pressure respect to machine capacity, the results obtained in the simulation was the same as statistics Taguchi analysis, it confirms the best injection parameters for the plastic part.

In addition was made a second plastic injection analysis for a part that was in design and development, the requirement was to control the weld line of the resin during the injection process, the weld lines should be located in a section where there isn't quality issues due to bad appearance, is was necessary to made two simulations with different injection point location in order to found the best condition to control the weld line created by the injection flows, these analysis made helps to confirm that the implementation of plastic injection simulation improve the production process and product quality of the products.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	V
Abstract	VI
Glosario.....	XII
Capítulo 1. Introducción	- 1 -
Antecedentes	- 5 -
Definición del problema	- 8 -
Justificación	- 9 -
Objetivos	- 12 -
Objetivo general:	- 12 -
Objetivos específicos:.....	- 12 -
Hipótesis	- 13 -
Capítulo 2. Marco teórico	- 14 -
Redes neuronales	- 19 -
Lógica difusa.....	- 20 -
Algoritmos genéticos.....	- 21 -
Metodología de respuesta de superficie.....	- 22 -
Método de elemento finito.....	- 23 -
Método de taguchi.....	- 25 -
Precisión de hipótesis	- 28 -
Capítulo 3. Procedimiento.....	- 29 -
Capítulo 4. Resultados.....	- 41 -
Simulación de inyección de plástico para una pieza con defectos de calidad.	- 41 -
Simulación 1	- 43 -
Simulación 2	- 49 -
Simulación 3	- 53 -
Simulación 4	- 57 -

Simulación 5	- 60 -
Simulación 6	- 62 -
Simulación 7	- 65 -
Simulación 8	- 68 -
Simulación 9	- 71 -
Interpretación de resultados.....	- 74 -
Resultados del análisis de inyección de plástico	- 74 -
Resultados del análisis estadístico por método de taguchi	- 77 -
Simulación de inyección de plástico para una pieza en etapa de desarrollo	- 79 -
Simulación 1	- 88 -
Simulación 2	- 90 -
Interpretación de resultados para la simulación de la parte plástica en desarrollo....	- 92 -
Conclusiones.....	- 93 -
Aportación de la tesis.....	- 95 -
Recomendaciones	- 96 -
Referencias bibliográficas	- 97 -
Anexos	- 1 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Ishikawa de defectos en el proceso de inyección (21).....	- 18 -
Figura 2. Ubicación de la parte plástica a analizar.....	- 29 -
Figura 3. Modelo tridimensional y su malla de la pieza plástica.....	- 31 -
Figura 4. Canal de inyección.....	- 32 -
Figura 5. Líneas de enfriamiento.....	- 33 -
Figura 6. Molde de inyección y su representación dimensional.	- 33 -
Figura 7. Representación de una línea de enfriamiento tipo Baffle.	- 34 -
Figura 8. Vector de apertura del molde (Eje Z).....	- 35 -
Figura 9. Modelo completo para simulación.....	- 35 -
Figura 10. Malla de modelo completo.....	- 36 -
Figura 11. Volumen de la parte plástica.	- 37 -
Figura 12. Diagrama de flujo para el análisis de inyección en base la matriz de Taguchi.-	40 -
Figura 13. Área de interés done se presenta la mayor deformación.....	- 41 -
Figura 14. Gráfico del proceso de inyección simulación 1.	- 43 -
Figura 15. Desplazamiento en milímetros de la deformación de la pieza plástica.....	- 44 -
Figura 16. Comparación entre pieza física y el CAD.	- 45 -
Figura 17. Deformación de la pieza respecto al CAD.	- 46 -
Figura 18. Puntos de fijación de la parte plástica.....	- 47 -
Figura 19. Gráfico del proceso de inyección simulación 2.	- 50 -
Figura 20. Resultado de deformación para la simulación 2.....	- 51 -
Figura 21. Gráfico del proceso de inyección simulación 3.	- 54 -
Figura 22. Resultados de desplazamiento para la tercera simulación.....	- 55 -
Figura 23. Rediseño en la parte plástica.	- 57 -
Figura 24. Resultado de deformación para la cuarta simulación.....	- 58 -
Figura 25. Resultados de deformación para la quinta simulación.....	- 61 -
Figura 26. Resultado de desplazamiento para la sexta simulación.	- 63 -
Figura 27. Detalle del rediseño a la parte plástica.	- 65 -
Figura 28. Resultados de deformación para la simulación 7.	- 66 -
Figura 29. Resultado de deformación para la simulación 8.....	- 69 -
Figura 30. Resultados de deformación para la simulación 9.	- 72 -
Figura 31. Puntos coordenados con mayor deformación.....	- 75 -

Figura 32. Deformación en la parte plástica.	- 76 -
Figura 33. Gráficas de los cuatro factores en sus tres niveles.	- 78 -
Figura 34. Parte plástica del panel de control de aire acondicionado.....	- 79 -
Figura 35. Propuestas de canal de inyección.	- 80 -
Figura 36. Posición del punto de inyección en ambas propuestas.	- 80 -
Figura 37. Volumen de la parte plástica.	- 82 -
Figura 38. Representación del modelo de inyección.	- 83 -
Figura 39. Grafica del comportamiento del flujo de inyección en la etapa de llenado... - 84 -	
Figura 40. Gráfica para comportamiento en etapa de compactación.....	- 85 -
Figura 41. Gráfica del proceso completo de inyección.....	- 86 -
Figura 42. Línea de unión con el punto de inyección al centro de la pieza.....	- 88 -
Figura 43. Ángulos de unión.	- 89 -
Figura 44. Posición de la línea de unión para la propuesta 2.	- 90 -
Figura 45. Ángulos de unión para la línea de unión de la propuesta 2.....	- 91 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz ortogonal L9 del método de Taguchi.	- 26 -
Tabla 2. Requerimientos para el análisis.....	- 30 -
Tabla 3. Propiedades del material ADX1258.....	- 36 -
Tabla 4. Especificaciones de máquina de inyección usada.....	- 37 -
Tabla 5. Matriz de Taguchi para simulación de inyección.....	- 38 -
Tabla 6. Parámetros reales de la inyección (Primera iteración).	- 41 -
Tabla 7. Comparación de resultados de deformación para la simulación 1.	- 48 -
Tabla 8. Parámetros reales de la inyección (Segunda iteración).	- 49 -
Tabla 9. Comparación de resultados de deformación para la simulación 2.	- 52 -
Tabla 10. Parámetros reales de la inyección (Tercera iteración).	- 53 -
Tabla 11. Comparación de resultados de deformación para la simulación 3.	- 56 -
Tabla 12. Parámetros reales de la inyección (Cuarta iteración).	- 58 -
Tabla 13. Comparación de resultados de deformación para la simulación 4.	- 59 -
Tabla 14. Parámetros reales de la inyección (Quinta iteración).	- 60 -
Tabla 15. Comparación de resultados de deformación para la simulación 5.	- 61 -
Tabla 16. Parámetros reales de la inyección (Sexta iteración).....	- 62 -
Tabla 17. Comparación de resultados de deformación para la simulación 6.	- 64 -
Tabla 18. Parámetros reales de la inyección (Séptima iteración).	- 66 -
Tabla 19. Comparación de resultados de deformación para la simulación 7.	- 67 -
Tabla 20. Parámetros reales de la inyección (Octava iteración).....	- 68 -
Tabla 21. Comparación de resultados de deformación para la simulación 8.	- 70 -
Tabla 22. Parámetros reales de la inyección (Novena iteración).	- 71 -
Tabla 23. Comparación de resultados de deformación para la simulación 9.	- 73 -
Tabla 24. Comparación de resultados por cada coordenada.	- 74 -
Tabla 25. Deformación máxima.	- 76 -
Tabla 26. Transformación de la deformación de la pieza.....	- 77 -
Tabla 27. Parámetros estadísticos y análisis de varianza.	- 77 -
Tabla 28. Propiedades del material MC8002.....	- 81 -
Tabla 29. Especificaciones de máquina de inyección.	- 81 -
Tabla 30. Tiempos de enfriamiento recomendados.....	- 86 -
Tabla 31. Flujo recomendado para las líneas de enfriamiento.	- 87 -
Tabla 32. Parámetros de inyección para la parte plástica.	- 87 -

GLOSARIO

CAD. Diseño asistido por computadora (Computer Aided Design).

CAE. Ingeniería asistida por computadora (Computer Aided Engineering).

FEM. Método de Elemento finito (Finite Element Method).

Moldex3D. Software para la industria de moldeo por inyección de plástico.

Hyperworks. Es un programa de análisis y simulación CAE para ingeniería desarrollado por Altair Engineering.

Hypermesh. Es un programa de análisis y simulación CAE para ingeniería desarrollado por Altair Engineering.

Modelo 3D. Los modelos 3D representan un objeto tridimensional usando una colección de puntos en el espacio dentro de un espacio 3D, conectados por varias entidades geométricas tales como triángulos, líneas, superficies curvas, etc.

Superficie A. Una pieza plástica se divide en superficie A y B, la superficie A es la sección de la parte plástica que es visible al cliente final, son superficies de tacto en un vehículo.

Superficie B. Una pieza plástica se divide en superficie A y B, la superficie B se puede interpretar como la parte de atrás de una pieza plástica, es decir, esta sección no es visible al cliente cuando la parte plástica se encuentra ensamblada en el vehículo. En la superficie B se encuentran los refuerzos y puntos o geometrías de sujeción, como clips u orificios para alojar tornillos.

Undercuts. Áreas en la pieza plástica que no pueden desmoldar.

SQP. Programación cuadrática secuencial.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los medios de transporte son parte fundamental en la vida de todas las personas, ejemplo de ellos son: aviones, barcos, trenes o automóviles, es posible viajar de un punto a otro en tiempos reducidos haciendo la vida de las personas más sencilla y cómoda.

El medio de transporte más común y más usado en las ciudades es el automóvil. Existen diferentes tipos de vehículos clasificados según la energía que utilizan para realizar el trabajo. Los vehículos que emplean motores de combustión interna son la configuración con mayor penetración en el mercado. Otro tipo de vehículos son los eléctricos y actualmente los vehículos híbridos han tenido gran impacto debido a que se auxilian de dos o más fuentes de energía para moverse.

La industria automotriz cuenta con más de cien años en desarrollo y se han implementado tecnologías en los vehículos para hacerlos más eficientes, seguros y cómodos. La eficiencia en los vehículos de combustión interna está relacionada con la quema de combustibles fósiles, reducción de peso o masa total del vehículo, sistemas auxiliares de propulsión como son turbinas o compresores que mejoran la potencia de los automóviles o permiten utilizar motores más pequeños y realizar el mismo trabajo de motores más grandes y pesados.

La industria automotriz es una de las industrias más grandes del mundo, recientemente se ve influenciada a la reducción de emisiones, incluyendo su producción, el transporte y el uso del mismo(1) . El desarrollo tecnológico que se vive en la industria automotriz, ha dado paso a brindar aportes tecnológicos que mejoran el confort, seguridad, desempeño, rendimiento, entre otros aspectos. Estos avances tienen un impacto positivo en nuestra vida diaria, sin embargo, la eficiencia en los vehículos está tomando un rol muy importante y la tecnología va mejorando progresivamente para reducir las emisiones de gases contaminantes (2).

El objetivo de un automóvil es transportar personas, animales u objetos de un punto a otro, no obstante, dado el crecimiento del tráfico automotriz y gracias a los avances tecnológicos, ahora los automóviles consideran más aspectos para cumplir con su función.

Un aspecto relevante en la actualidad es cuidar el medio ambiente, por esta razón, los automóviles se mejoran en varios aspectos como el motor, el diseño aerodinámico del automóvil para reducir el coeficiente de fricción que genera el viento, el peso del

vehículo, entre otros. Particularmente, para reducir el peso del vehículo se emplean materiales más ligeros y resistentes, tomando en cuenta un diseño estructural fuerte, resistente y flexible para brindar una mejor seguridad en caso de algún impacto. La reducción de peso en los vehículos puede disminuir el uso de combustible y en consecuencia reducir los gases contaminantes. Un vehículo menos pesado requiere menos energía para proveer un trabajo equivalente (3).

Si se comparan los automóviles que se comercializaban en los años '70s u '80s con los automóviles actuales, se puede observar que son muy distintos. Anteriormente los automóviles tenían grandes y pesadas láminas como carrocería, motores de 8 cilindros con gran potencia y la eficiencia de los mismos no jugaba un papel importante como lo es ahora. Actualmente los vehículos tienen láminas delgadas en su carrocería acompañadas de láminas reforzadas que brindan estructura, ahora la eficiencia de los automóviles es muy importante por lo cual existen vehículos con motores pequeños de 4 cilindros, algunos asistidos de turbo compresores, otros con motores eléctricos para convertirse en vehículos híbridos y todo con la finalidad de hacer más eficiente el transporte, es decir, las láminas pesadas fueron sustituidas por otras más delgadas con la finalidad de reducir el peso del vehículo y de esta manera poder usar motores más pequeños que consumen menos combustible. Éstos cambios no implican que sea menos seguro el vehículo, debido a los grandes desarrollos de ingeniería para reforzar los vehículos ya que la carrocería exterior del vehículo viene acompañada de una estructura metálica para garantizar buena seguridad.

Los nuevos desarrollos buscan materiales más ligeros que cuenten con mejores propiedades mecánicas para así reducir el peso total del vehículo, esto aplica para todas las partes automotrices, en la carrocería al usar láminas más delgadas, en los motores al usar aleaciones de aluminio, incluso en el interior del vehículo como en los asientos automotrices al hacer más ligera la estructura, en los tableros al utilizar plásticos y eliminar brackets metálicos, entre otros elementos. La intención de un diseño de peso ligero va dirigido a la reducción del consumo de energía y a la disminución de gases contaminantes, depende directamente de los materiales y el tipo de proceso (4).

El rápido desarrollo de la industria automotriz ha estimulado la producción de materiales como el acero, el plástico, caucho, entre otros (5). Las partes plásticas que conforman el interior del automóvil son un aspecto importante en el vehículo ya que deben cumplir con especificaciones de resistencia, flexibilidad, funcionalidad y a su vez tener una masa

ligera para ayudar en el rendimiento y desempeño del automóvil, sin olvidar el diseño atractivo que deben tener las piezas plásticas para darle carácter y personalidad al vehículo. Los plásticos forman parte de varios segmentos en el automóvil debido a su bajo peso, durabilidad, flexibilidad en el diseño, bajo impacto a las bajas temperaturas y eficiencia en su manufactura (6).

Los plásticos han encontrado una gran aplicación en muchos productos industriales de la actualidad. Son considerados como sustitutos del metal en algunos casos, aunque los plásticos están asociados con problemas como baja rigidez y fragilidad, pero estas propiedades son mejoradas con la adición de rellenos como puede ser la fibra de vidrio y fibra de carbono (7).

El uso de plásticos en los componentes del interior del vehículo ha tomado gran importancia debido a sus propiedades ya que se pueden moldear o adaptar a complejos diseños desarrollados con la finalidad de llamar la atención de los clientes y dar seguridad. Los plásticos pueden resistir impactos ocasionados por un accidente, por ejemplo las pruebas de seguridad que se realizan en los tableros deben satisfacer los requerimientos de la prueba, el producto no se debe romper ya que esto podría dañar la salud del ocupante.

Por otra parte, la industria automotriz está teniendo gran desarrollo a nivel mundial, existen países donde se manufacturan grandes cantidades de vehículos, un ejemplo de ello es México debido a que las empresas encuentran al país como un excelente lugar para producir y con grandes ventajas como son los acuerdos de tratado de libre comercio que tiene con muchos países, además la mano de obra de alta calidad y bajo costo hace que los inversionistas vean a México como un oportunidad de expandir sus negocios.

Dentro de México existen varios estados con gran inversión en el giro automotriz y Aguascalientes es uno de los estados donde se realiza la manufactura de vehículos con la mayor penetración en el mercado nacional, existen proveedores de diferentes productos que dan soporte a la producción y ensamble del automóvil.

Los procesos de inyección de plástico son comunes en la industria automotriz debido a que gran parte de los componentes de un vehículo son de este material, gran cantidad de producto plásticos se encuentran en el interior como es el tablero de instrumentos, consola, aire acondicionado, en el exterior la fascia delantera y trasera, cubiertas de los espejos, incluso en el motor existen producto plásticos. Dado que los diferentes tipos de

plástico son muy utilizados en los vehículos, es necesario optimizar los procesos para asegurar la calidad y funcionalidad de los mismos.

Por esta razón, esta investigación va dirigida a la optimización de los procesos de inyección de piezas plásticas que conforman el interior de los vehículos. El desarrollo y producción de dichas piezas plásticas se realiza en la misma entidad y debido a esto, se pretende mejorar el proceso y el producto, con la finalidad de asegurar la calidad y reducir las piezas defectuosas.

ANTECEDENTES

Comúnmente el proceso de manufactura en un molde de inyección de piezas plásticas es usado para fabricar una gran variedad de productos, entre ellos las piezas del automóvil (8). Independientemente del diseño cosmético que tiene el interior del automóvil, existe un diseño de ingeniería que brinda seguridad, estructura y funcionalidad para asegurar que en caso de algún impacto las piezas plásticas no se rompan y puedan dañar al usuario. Sin embargo, la manufactura de las piezas plásticas es un proceso complejo, ya que todo se basa en un molde que dará forma y estructura a la pieza, por lo tanto si el diseño del molde o la manufactura del mismo no es el adecuado, las piezas plásticas no tendrán la calidad que se requiere. Esta línea de investigación va encaminada en el aseguramiento de la calidad del producto, así como optimizar o mejorar el proceso para reducir los tiempos de producción y el desperdicio de material.

Las piezas defectuosas pueden depender de varios factores, desde el diseño del producto, el molde (diseño y/o manufactura), factores externos como temperatura y humedad en el proceso de fabricación, hasta la calidad de la resina que se ocupa para producir la pieza plástica, entre otros.

El estudio de investigación que se desarrolla está basado principalmente en los parámetros de inyección en el proceso. Es común encontrar problemas de calidad debido a que los parámetros de inyección no están bien configurados o controlados como la velocidad y presión de inyección, temperaturas del molde y resina, adicional a esto, pueden existir problemas en la calidad del producto debido a los puntos de inyección que tiene el molde que no estén diseñados de manera adecuada o no se pueda controlar el flujo correctamente.

Otro problema común son las líneas de enfriamiento, que no están correctamente diseñadas o en ocasiones simplemente los parámetros de inyección que tiene la máquina no son los adecuados y esto provoca que el producto no cuente con la calidad requerida. Si no existe un sistema de enfriamiento que brinde una temperatura uniforme en el molde, la pieza plástica puede presentar problemas como deformación, contracción inadecuada, marcas visibles en las superficies plásticas (8).

El desarrollo de nuevos productos plásticos es continuo ya que el mercado exige que los productos sean diferentes frecuentemente, es decir, la vida del diseño de un vehículo es en promedio de 6 años, sin embargo, se hacen rediseños de media vida cada 3 años.

Por esta razón, se deben rediseñar los componentes del vehículo con la finalidad de hacerlo lucir diferente y actualizado. Estos nuevos desarrollos suelen ser atractivos para el cliente, con formas complejas y superficies llamativas haciendo que el producto sea difícil de producir por la complejidad de su geometría, como consecuencia el diseño del molde suele representar un reto ya que éste debe ser capaz de crear el producto con la calidad requerida. Cabe mencionar que el diseño de los canales de enfriamiento es todo un desafío para los ingenieros diseñadores, al final las líneas de enfriamiento que tenga el molde dependerá y estará basado en la experiencia del diseñador (9).

En el desarrollo de un nuevo producto se puede estudiar el diseño para determinar si éste es viable de producir, para después realizar un análisis de ingeniería asistida por computadora CAE (Computer Aided Engineering ó Ingeniería Asistida por Computadora), que son estudios y/o validaciones virtuales que se realizan al modelo tridimensional para simular el comportamiento que tendrá el producto, pueden ser análisis de inyección de plástico, análisis lineales, de rigidez, no lineales, entre otros tipos y todos estos se pueden simular y analizar por el método de análisis de elemento finito.

Para esta investigación se realizaron estudios de inyección de plástico con la finalidad de determinar las mejores condiciones del molde y los parámetros de inyección mediante un diseño de experimentos de 9 iteraciones. Para el caso de las piezas de producción masiva que presentan problemas de calidad, se realizaron una serie de simulaciones para optimizar los parámetros de inyección y reducir o solucionar los defectos.

El diseño de la parte plástica proviene de un modelo tridimensional desarrollado con un software de CAD (Computer Aided Design o Diseño Asistido por computadora) donde desde su concepción se definió y evaluó la línea de partición, esta línea define como se va a separar la mitad del molde en cavidad y corazón para que la pieza plástica pueda desmoldar correctamente (9). A su vez también es necesario contar con el CAD del molde, las especificaciones de la máquina y los parámetros de inyección para poder representar las condiciones más reales en el análisis.

Chil-Chyuan KUO et al (10) realizó un diseño de experimentos por medio del método de Taguchi para evaluar los parámetros de inyección que afectan la precisión de los lentes Fresnel durante el proceso de inyección de plástico, encontró que la presión de compactación era el factor que más afectaba el proceso. Mediante la matriz de Taguchi determinó los mejores parámetros de inyección logrando controlar la precisión

del proceso de inyección con una variación de $\pm 3\mu\text{m}$. Para este trabajo de investigación, el estudio de la deformación de la parte plástica se basa en un diseño de experimentos por medio del método de Taguchi de L9, los factores y los niveles son evaluados por medio de simulaciones de inyección de plástico y se evalúa el desplazamiento máximo en milímetros, así como también se hace una comparación entre el desplazamiento resultante contra la posición nominal de los puntos de fijación de la parte plástica, se realizó un análisis estadístico para determinar la mejor condición de inyección que represente el mejor desplazamiento de deformación de la pieza.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente se tienen problemas de calidad en algunos productos manufacturados en una empresa automotriz en la ciudad de Aguascalientes, los defectos que presentan las piezas plásticas están relacionados con el proceso de inyección o incluso con el diseño de la pieza, existen diferentes defectos como falta de material en la etapa de llenado, líneas de unión visibles, deformación en el producto terminado, manchas plateadas, entre otros. Los defectos pueden presentarse en cualquiera de las etapas de proceso, puede ser durante el llenado, la compactación o el enfriamiento, cada etapa se ve afectada por distintas variables, en este trabajo se propone un diseño de experimentos por el método de Taguchi para observar cuales parámetros y en que niveles se obtienen los mejores resultados.

Esta investigación tiene como finalidad la implementación del análisis de inyección de plástico como parte de un sistema de pre evaluación del proceso de extrusión que permitirá evaluar y/o definir los parámetros de inyección de las piezas plásticas que presentan defectos de calidad durante su manufactura, incluso este análisis permitirá validar el diseño de las partes plásticas desde una etapa temprana de diseño, es decir, se realizará el análisis de inyección de plástico a las piezas que se encuentran en desarrollo antes de que entren en producción masiva, todo con la finalidad principal de mejorar el proceso y reducir los defectos de calidad.

JUSTIFICACIÓN

La problemática que se estudia en esta línea de investigación es referente a las piezas plásticas que conforman el interior de los automóviles manufacturados en el estado de Aguascalientes. La calidad de piezas plásticas inyectadas depende de los parámetros del proceso y del diseño del molde (11). El problema surge a partir de la necesidad de optimizar las condiciones de inyección para dichas piezas con el objetivo de asegurar la calidad del producto, reducir los tiempos de producción y obtener un ahorro económico al reducir el defectivo de piezas plásticas.

El problema principal radica en que no hay una justificación para definir las condiciones del molde y el proceso de inyección, éste es empírico, de aquí viene la necesidad de implementar los análisis de inyección de plástico como parte del proceso en el desarrollo de nuevos productos. Esta herramienta permite evaluar las condiciones iniciales que debe tener el molde, además, permite evaluar las condiciones actuales del proceso, si existe un producto con problemas de calidad debido a su proceso de inyección, se pueden replicar las condiciones actuales de manera virtual con la finalidad de encontrar la causa raíz al problema y probar diferentes alternativas que permitan mejorar el proceso y producto. La implementación de este análisis permitirá mejorar los procesos de producción, la calidad de los productos y ahorro económico al poder justificar y validar los cambios antes de ser implementados, ya que existirá un porcentaje de confianza que brindará el análisis virtual para poder hacer pruebas físicas en las líneas de producción.

La inyección de piezas plásticas tiene grandes ventajas como la alta calidad en las superficies, buenas propiedades mecánicas, un bajo costo y un peso ligero (12). Los estudios que se realizaron durante esta investigación en los nuevos desarrollos de producto son principalmente en software de modelado 3D (CAD) y análisis de elemento finito por software CAE. El diseñador de la pieza plástica y el molde decide la geometría de la parte, define la línea de partición, cavidad y corazón del molde, insertos, entre otros aspectos (13).

Se requiere asegurar que el diseño en CAD del producto cuente con las especificaciones y tolerancias requeridas para asegurar su manufactura. Estos parámetros o especificaciones se basan principalmente en los ángulos de desmolde de la pieza, en la línea de partición que tendrá el producto, la dirección de desmolde, el espesor de la pieza plástica, la estructura de la pieza que le brinde la rigidez necesaria para evitar

problemas de calidad. La deformación y una compresión inadecuada son los defectos más comunes en las piezas plásticas inyectas por moldeo (12).

Una vez estudiado el producto, es necesario verificar el diseño del molde y determinar dónde estarán ubicados los puntos de inyección, estos permiten la entrada de la resina al molde y definen la ruta de la misma para llenar y formar la pieza plástica, de igual manera se podrán determinar parámetros de inyección que son importantes en el desarrollo de un nuevo producto como la temperatura de la resina y el molde, presión para extrusión y velocidad de inyección, tiempo de compactación y enfriamiento.

Durante el ciclo de inyección de resina, la pieza plástica y el molde deben mantener una temperatura uniforme para solidificar la resina y así obtener el producto final (8), a su vez se deberá evaluar el material del producto para considerar la contracción que tendrá el mismo una vez haya terminado su tiempo de curado. La recolección de la información correcta de una amplia cantidad de datos del proceso será la clave para identificar la problemática en los defectos que presente la pieza plástica (14). La calidad de las piezas plásticas inyectadas por moldeo depende del material, el diseño del producto y del molde, y de los parámetros del proceso (12).

En el caso de los productos que están en producción masiva y presentan defectos de calidad, los estudios que se realizan son similares a los antes descritos, sin embargo, se evalúa el diseño del molde con los ajustes que se le hayan efectuado durante su vida de producción para considerar la condición real, para ello se realizan los ajustes en CAD. Posteriormente se realiza los análisis de flujo de resina para imitar las condiciones reales del proceso, después se propone la contra medida y nuevamente se realizan las simulaciones con las condiciones propuestas para mejorar el proceso de inyección, se realizaron varias simulaciones hasta encontrar los mejores parámetros y esto permitió asegurar que el proceso se ha mejorado.

Los problemas que presentan las piezas son variados, los defectos más comunes son: falta de material, burbujas, marcas de unión o soldadura, manchas de color blanco o gris (mancha plateada), deformación, entre otros defectos. Para resolver algunos de ellos, en los nuevos procesos de inyección por moldeo, se tiene una inyección en caliente seguida de una a menor temperatura y de esta manera lograr un control térmico (15).

El proceso de inyección consiste en introducir la resina dentro del molde por medio del husillo (canal de la máquina por donde viaja la resina) y pasar por los runners (conductos

que forman parte del molde, por donde se inyecta la resina para formar la pieza plástica) (14). Una vez que se completó el llenado de la cavidad del molde con resina, se continúa con la etapa de compactación y ésta consiste en inyectar resina a base de presión con la finalidad de llenar cualquier sección que haya faltado de resina o llenar secciones donde quedaron burbujas. Finalmente la etapa de enfriamiento consiste en disminuir la temperatura de la resina haciendo fluir un líquido refrigerante dentro del molde con la finalidad de solidificar la resina y así obtener la parte plástica terminada. Fuera del proceso de inyección la pieza pasa a la etapa de curado o enfriamiento, durante esta etapa la pieza se puede compactar y deformar, cada material sufre de este fenómeno y el diseño del molde debe considerar esta variación con la finalidad de obtener el producto terminado igual a lo requerido en el diseño CAD del producto.

Los factores anteriormente mencionados así como algunos otros que afectan la inyección de la resina en el molde como: la temperatura ambiental, la humedad, mala calidad de la resina, inadecuada calibración, entre otros, impactan negativamente al producto. Estos factores externos son complejos de controlar, sin embargo hay otros aspectos a considerar que son defectos en el molde, diseño del producto inadecuado, configuración de los parámetros de inyección en la máquina, suciedad en el molde, falta de mantenimiento, entre otros.

Debido a lo anterior, este trabajo pretende evaluar las condiciones de inyección de plástico con dos propósitos distintos, el primero es implementar el análisis de flujo de resina como parte del proceso de desarrollo de un nuevo producto, al validar que las condiciones requeridas para el molde sean factibles y cumplan su función de la mejor manera, así como mejorar los procesos de inyección al evaluar las condiciones actuales de un producto que tenga problemas de calidad con la finalidad de reducir los defectos y garantizar la calidad de los productos.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Desarrollar el análisis de inyección de plástico para una pieza que presenta deformación, mediante un diseño de experimentos L9 de Taguchi para optimizar y determinar los factores con mayor influencia dentro del proceso. Desarrollar un análisis de inyección para controlar la línea de unión del flujo de resina de una pieza plástica.

Objetivos específicos:

- Implementar el análisis de inyección de plástico en un producto que presenta defectos de calidad para mejorar el proceso de manufactura y la calidad final del producto, se busca mejorar la deformación que sufre la parte plástica un 20%.
- Determinar los parámetros de inyección que tienen mayor influencia en el proceso con la finalidad de optimizar la inyección y reducir la deformación de la pieza plástica utilizando la matriz de Taguchi.
- Controlar la línea de unión en una parte plástica que está en la etapa de diseño y desarrollo para evitar mala apariencia como defecto de calidad.
- Determinar la ubicación del punto de inyección en la parte plástica que está en la etapa de desarrollo para controlar la línea de unión del flujo de resina.

HIPÓTESIS

Es favorable desarrollar e implementar simulaciones de inyección de plástico por análisis de elemento finito que permita mejorar o estabilizar el proceso de fabricación de piezas plásticas con la finalidad de asegurar la calidad del producto. Se pretende replicar las condiciones reales del proceso de manera virtual y en base a un diseño de experimentos de L9 por el método de Taguchi evaluar diferentes valores de los parámetros con la intención de mejorar el proceso de inyección.

Es posible determinar la ubicación del punto de inyección para una parte plástica que se encuentra en etapa de diseño con la finalidad principal de controlar la línea de unión entre los flujos de la resina.

Es viable implementar los estudios de análisis de inyección de plástico que permitan reducir los defectos de calidad y estabilizar los procesos para piezas de producción masiva y para nuevos desarrollos de producto, se requiere optimizar los procesos y asegurar la calidad del producto.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

El uso de plásticos se ha vuelto una opción viable en la industria automotriz ya que este permite reemplazar materiales metálicos en ciertas áreas o componentes. En algunos casos, los plásticos están reemplazando materiales metálicos, o están siendo utilizados para el confort de los usuarios, esto se debe principalmente por ser ligeros, durables y fáciles de moldear (16).

Los plásticos tienen propiedades que los caracterizan como su elasticidad, maleabilidad, alta resistencia mecánica, no sufren de corrosión, entre otras propiedades. Estas se pueden mejorar al modificar las proporciones de la materia prima para generar plásticos con diferentes propiedades o hacer mezclas entre diferentes polímeros para mejorar sus propiedades, por ejemplo: rigidez, elasticidad, temperaturas de fusión, de igual manera se pueden combinar con fibras como es el caso de la fibra de vidrio o fibra de carbono para mejorar su resistencia y de esta manera tener materiales más duros que puedan sustituir metales en ciertas aplicaciones. Aproximadamente existen 40 tipos básicos de plásticos que son usados en la producción de los automóviles, son utilizados en el interior, exterior, motor y componentes del chasis. Hay una amplia variedad de plásticos como son: termoplásticos (Polipropileno, polietileno, PVC, acrílicos), termoestables (Poliuretano, baquelita, poliéster) y elastómeros (caucho, neoprenos). Estos plásticos son elegidos en base a los requerimientos de ingeniería con respecto a fatiga, resistencia química y otras propiedades físicas (6).

Para la producción de piezas plásticas por inyección, las propiedades mecánicas de los materiales son importantes ya que deben cumplir con especificaciones de rigidez y elasticidad. Las piezas son sometidas a pruebas de impacto y como resultado no se deben romper ya que esto causaría lesiones serias en los ocupantes, a su vez las partes plásticas del interior del vehículo están sujetas a cambios de temperaturas extremas.

Un vehículo puede ser comercializado en diferentes mercados, y las temperaturas según la región pueden variar. Controlar las variables que afectan el proceso de inyección de plástico es uno de los retos que enfrentan los ingenieros de producción de las piezas plásticas, ya que controlar todas las variables en su manufactura representa grandes desafíos para mejorar la calidad de las partes plásticas, reducir el tiempo ciclo, y mantener un bajo costo de producción (17).

Las características de calidad de los plásticos a evaluar están clasificadas por sus propiedades mecánicas, dimensiones, tolerancias o características medibles y atributos.

Para verificar que las piezas producidas cuentan con la calidad requerida es necesario dimensionarlas y comparar los resultados de acuerdo a la especificación dimensional y tolerancias que indica el dibujo de referencia del producto o ensamble, sin embargo, no es la única característica que debe cumplir, ya que el proceso de inyección por moldeo puede estar variando y en ocasiones las piezas plásticas pueden salir con falta de material, presentar una deformación o simplemente no cumplir con la calidad visual necesaria. Por esta razón, es necesario validar que los parámetros de inyección están controlados para poder reducir la probabilidad de piezas defectuosas.

Las condiciones de moldeo o parámetros del proceso juegan un papel vital para la inyección de plástico, la calidad de las piezas desde su resistencia, deformación, y estrés residual. Estas variables están influenciadas por las condiciones del proceso y afectan directamente a la productividad, el tiempo ciclo y consumo de energía del proceso. Los parámetros con mayor influencia dentro del proceso son: temperatura de la resina, temperatura del molde, tiempo de llenado, tiempo de compactación, y presión de compactación (19). La calidad también tiene una relación muy corta con otros factores como los materiales del producto, diseño de la parte y el molde.

En el proceso de inyección de plástico se presentan diferentes problemas de calidad que pueden estar relacionados a defectos en el material o a los parámetros de inyección. Entre los problemas más comunes se encuentra mancha plateada, rebabas (flash) y falta de material (short shots), éstos están relacionados al llenado de la pieza, los rechupes o huecos en la pieza plástica están relacionados a problemas de compactación en la inyección o por un enfriamiento deficiente en el producto, así como deformaciones, cambios en las dimensiones de la pieza o inclusive diferentes pesos en el producto.

Existen diferentes factores que afectan la calidad de las partes moldeadas y estos pueden clasificarse en cuatro categorías: el diseño de la parte plástica, el diseño del molde, el desempeño de la maquinaria y las condiciones del proceso. La pieza y el molde son considerados como factores o parámetros establecidos y fijos. Durante la producción, las características de calidad pueden desviarse debido al uso y cambios en las condiciones del proceso causadas por el desgaste de la maquinaria, cambios climáticos o fatiga del operador (19).

Dentro de los factores fijos, se puede mencionar el diseño de la pieza y el molde, por lo que las condiciones de la maquinaria y los parámetros del proceso son alternativas para

mejorar el producto si este presenta problemas de calidad. Sin embargo, las condiciones de la maquinaria es un factor constante, ya que reemplazar el equipo de producción representa una inversión fuerte para la empresa. Por esta razón la alternativa más viable es optimizar o mejorar el proceso.

Los aspectos a estudiar en el diseño del producto son: los ángulos de desmolde, ya que esto podría provocar que la pieza quede atrapada o genere marcas superficiales; que la línea de partición sea viable de producir y procurar que tenga una geometría simple, a su vez que no existan undercuts (áreas en la pieza plástica que no pueden desmoldar), ya que esto ocasionaría que después de ser inyectada la parte plástica, justo en el momento donde se abren las dos mitades del molde, este mismo dañe el producto y lo rompa o fracture. La temperatura del molde depende principalmente de la temperatura del refrigerante (14), este aspecto también afecta la calidad del producto.

También es importante considerar el diseño de la pieza, las superficies visuales al usuario del producto es subjetivo, sin embargo, la forma estructural de la pieza plástica mejor conocido como superficie B que es la parte no visible de la pieza debe ser un diseño simple y funcional, de otra forma, la inyección de la pieza es más complicada, ya que la resina debe fluir por toda la estructura de la pieza. La superficie B debe de ser simple, no obstante en algunas ocasiones es complicado debido a las especificaciones que debe cumplir la pieza. El hecho que tenga una estructura saturada de refuerzos, incrementa la probabilidad de generar problemas de calidad durante su proceso de inyección. Por esta razón, es importante considerar espacios mínimos entre un refuerzo y otro refuerzo, así como el grosor y la altura de los mismos. De igual manera determinar el tipo de fijación que tendrá la pieza. Todos estos aspectos se deben considerar y analizar en la pieza plástica para el aseguramiento de la calidad, las piezas que están muy reforzadas comúnmente, son áreas de impacto cuando se tiene un accidente. Un problema común para la extracción de una pieza plástica es la cantidad de refuerzos que tiene el producto y que muchas veces no son necesarios (13).

Para el diseño del molde se debe considerar que éste respete la geometría del producto, los puntos de inyección (cantidad y tipo). De igual manera se debe evaluar la complejidad de la pieza plástica para determinar si debe llevar mecanismos externos al molde que permitirán crear superficies con ángulos de salida de hasta 90° con respecto al vector de desmolde, dichos mecanismos son conocidos como insertos que harán la pieza viable de producir. Los aditamentos antes mencionados permiten crear

geometrías complejas en el producto, sin embargo ocupan de mecanismos adicionales al molde. El proceso del diseño del molde debe contar con elementos como soportes, insertos, barras eyectoras (barras deslizables que liberan la pieza del molde) (13).

Otro aspecto que se considera en el molde es la contracción que tendrá la pieza ya que para formarse, la resina es derretida e inyectada en el molde, luego se enfría uniformemente para solidificar, durante este proceso se contrae la pieza para llegar a su geometría final que es como fue diseñada originalmente. Para ello es necesario definir las líneas de enfriamiento, estas tienden a ser complejas de fabricar debido a que son barrenos pasados en el bloque del molde, por lo tanto, en una geometría compleja es común encontrar problemas de enfriamiento y con ello defectos de calidad o incrementos en el tiempo ciclo de producción. Los canales de enfriamiento son un aspecto importante para un rápido y uniforme control de temperatura en la cavidad del molde, lo cual representa un mejora en el producto y en la producción (15).

El diagrama de Ishikawa brinda un panorama más claro sobre las posibles causas del problema que afectan la calidad del producto, con una lluvia de ideas y clasificando las posibles causas en diferentes áreas, para después evaluar cuales son las posibles soluciones y encontrar las más viables. Este diagrama es un estudio donde se pueden involucrar diferentes departamentos para así considerar todas posibilidades de falla y de esta manera evitar enfocarse en una variable específica. En la Figura 1 se observa un ejemplo del diagrama de Ishikawa para defectos en partes de producción por inyección de plástico.

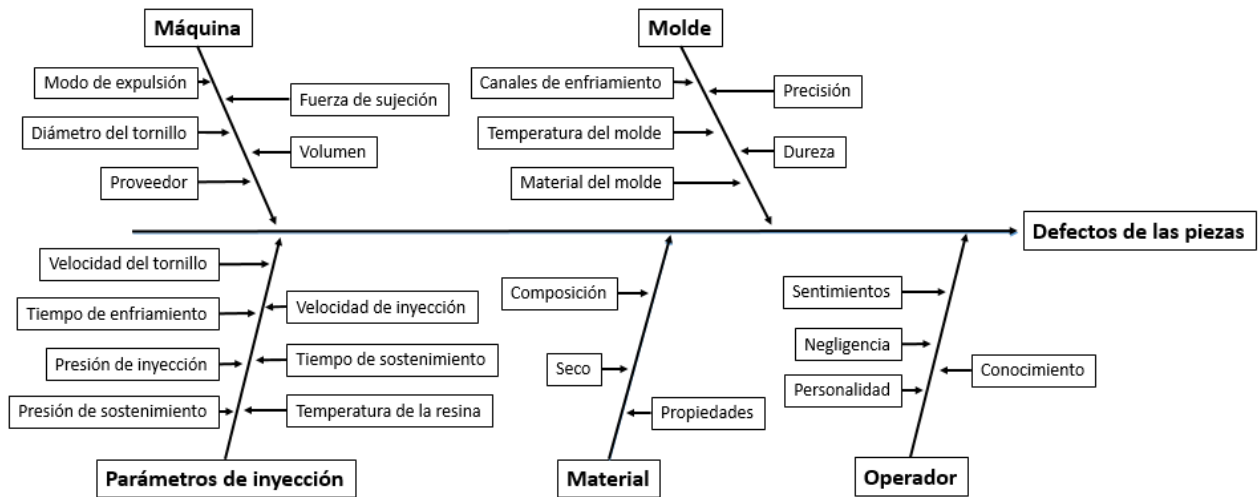


Figura 1. Diagrama de Ishikawa de defectos en el proceso de inyección (21).

La optimización de los parámetros del proceso para los problemas de calidad, es continuamente desarrollada en la industria manufacturera. Particularmente en el ajuste final para los parámetros óptimos de inyección. Anteriormente, los ingenieros usaban la técnica de prueba y error, el cual dependía de la experiencia e intuición para determinar el ajuste de los parámetros iniciales del proceso (21).

En la actualidad existen diversos métodos para determinar los parámetros de inyección óptimos en el proceso, entre ellos está la técnica de Taguchi, redes neuronales artificiales, lógica difusa, algoritmos genéticos, método de elemento finito, modelado no lineal, metodología de respuesta a la superficie, análisis de regresión lineal, entre otras técnicas. Estas metodologías permiten la optimización del proceso de inyección y mejora de la calidad de las piezas plásticas. Las características generales de cada técnica se describen a continuación:

REDES NEURONALES

La optimización de los parámetros de inyección por medio de redes neuronales se basa en que estas están definidas como modelos matemáticos que representan el proceso biológico del cerebro humano. Hay tres componentes principales, las neuronas o elementos de procesamiento, interconexiones y las reglas de aprendizaje (22).

Una neurona es un componente que procesa la información. Esta recibe y procesa las señales de entrada y continuamente pasa su salida al siguiente nivel de neuronas. Una neurona simple puede tener más de una entrada pero solo una salida. La salida de una neurona depende de las señales de entrada, pesos de sus conexiones, valores límite y funciones de activación.

La interconexión es una parte de la red la cual propaga las señales en una dirección simple de una neurona a las otras o inclusive a ella misma. Las reglas de aprendizaje administran el cambio en las matrices de pesos en la red, se puede categorizar en supervisado y no supervisado. El aprendizaje supervisado usa información conocida para el ajuste de los vectores de entrada y vectores de salida, es decir, se conoce la entrada y la salida y de esta manera se alimenta la red con dicha información y después de varias iteraciones se logra reducir el error que presenta la neurona con respecto de la salida conocida y así obtener el resultado esperado. En cambio para entrenar la red por medio del aprendizaje no supervisado, se basa en la información local y control interno dentro de la red, esta se encarga de hacer los ajustes necesarios y los pesos que se asignan dependen específicamente de la neurona (22).

Ren Shie et al (23) analizó la distorsión del contorno del polipropileno (PP) a los materiales compuestos de los componentes del interior de los automóviles. Combinando una red de base radial entrenada y un método de programación cuadrático secuencial (SQP), el ajuste para los parámetros óptimos en el proceso de inyección fue determinado. Las muestras fueron preparadas bajo diferentes condiciones de inyección modificando las temperaturas, velocidades y presiones de inyección de tres corridas progresivas controladas por computadora. Se utilizaron 16 corridas para entrenar la neurona utilizando una matriz ortogonal de Taguchi y el método SQP fue utilizado para la encontrar la solución óptima. Este algoritmo probó que integrando un modelo de predicción RBN (Red de base radial) y un método de SQP se puede resolver un problema de optimización restringida de multi salidas. También encontró una solución efectiva y sistemática para identificar los parámetros óptimos en el proceso de inyección.

LÓGICA DIFUSA.

La metodología de lógica difusa para la optimización de los parámetros de inyección, esta tiene la capacidad de capturar el razonamiento humano, toma de decisiones y otros aspectos de la cognición humana. La imprecisión en los coeficientes y restricciones pueden ser naturalmente modeladas por lógica difusa.

John C. et. al (24) describe el desarrollo de una red neuronal difusa basada en el proceso de material mezclado para desarrollar un sistema de predicción de rebaba (flash) por el proceso de inyección. La meta fue emplear una red neuronal difusa para predecir el sobrante de material (flash o rebaba) en la operación de inyección por moldeo cuando se usa material mezclado de plástico reciclado.

Los parámetros de proceso como velocidad de inyección, temperatura de la resina y presión de sostenimiento fueron variados en base a un pequeño rango. Los datos de las señales de vibración durante el cerrado del molde y las etapas de llenado en la inyección fueron recolectadas en tiempo real usando un acelerómetro. La información fue analizada con una red neuronal y algoritmos de razonamiento con lógica difusa, en conjunto con un modelo de regresión múltiple para obtener las predicciones de rebaba de los valores límite bajo diferentes parámetros de ajuste. Este sistema fue desarrollado para predecir las rebabas con un 96.1% de exactitud durante el proceso de inyección por moldeo.

ALGORITMOS GENÉTICOS.

Otro método usado en la industria manufacturera para lograr optimizar los parámetros en el proceso de inyección son los algoritmos genéticos, estos se basan en los mecanismos de selección natural y la genética, la cual es más robusta y más probable para localizar el óptimo global. Por esta razón, es una característica de los algoritmos genéticos (GA) llegar a la solución a través de un grupo de puntos y no de un solo punto. Las condiciones de moldeo están codificadas como genes en código binario para aplicar GA en la optimización de los parámetros de inyección por moldeo. Un grupo de genes son combinados entre ellos para formar cromosomas, usados para realizar los mecanismos básicos del algoritmo genético, así como la cruce y mutación. La cruce es la operación para intercambiar algunas partes de dos cromosomas y generar una nueva descendencia, lo cual es importante cuando estas explorando todo el espacio rápidamente.

La mutación es aplicada después de una cruce para proveer una pequeña aleatoriedad a los nuevos cromosomas. Para evaluar cada individuo o cromosoma, las condiciones codificadas tienen que ser decodificadas de los cromosomas y usadas para medir el comportamiento de las predicciones de la inyección por moldeo. El ajuste o la función objetivo es una función necesaria en el proceso de optimización y selección de la siguiente generación de algoritmos genéticos. Los resultados óptimos de las condiciones de corte se obtienen de la comparación de los valores de la función objetivo con todos los individuos después de un número de iteraciones.

Forourachi et al (25) presentó una nueva metodología para controlar la calidad empleando bases fundamentales de diversos campos del cálculo, optimización multi objetivo y un diseño robusto. Las dos actividades importantes relacionadas a la calidad del diseño de tolerancias y la optimización de los parámetros fueron dirigidas usando un algoritmo genético que evoluciona las generaciones de las regiones de diseño hiperrectangular mientras simultáneamente se minimiza la sensibilidad de los diseños adaptables de las variaciones no controladas.

Dando un grupo inicial de diseños al azar, se demostró como el algoritmo genético mejoró el promedio de las señales de ruido de una población entera de diseños de una generación a otra conducido por experimentos fraccionales factoriales.

METODOLOGÍA DE RESPUESTA DE SUPERFICIE.

La metodología de respuesta de superficie (RSM) explora la relación entre variables exploratorias y una o más variables de respuesta. RSM usa modelos estadísticos, y por lo tanto los practicantes necesitan estar alerta para que el mejor modelo estadístico sea una aproximación a la realidad.

Mathivanan & N. S. Parthasarathy (26) desarrolló un modelo matemático no lineal, en términos de variables de inyección por moldeo usando RSM. El modelo no lineal evalúa la profundidad de hendidura o rasguño basado en la composición central del diseño de experimentos a través de la simulación del flujo del plástico en la inyección, éste fue desarrollado exitosamente para la predicción de la profundidad del rechupe.

Para validar el modelo, aleatoriamente se generaron 22 casos de prueba donde se llevó acabo esta metodología. Analizando las desviaciones predichas y los resultados actuales se encontró que estaban entre $\pm 1.4\%$ de diferencia.

MÉTODO DE ELEMENTO FINITO.

Otro método empleado en la optimización de los parámetros de inyección es por el método de elemento finito (FEM) ya que permite una visualización detallada de como las estructuras se doblan o tuercen, e indica la distribución de estrés y desplazamientos. El software de FEM provee un amplio rango de opciones de simulación para controlar la complejidad de ambos, el modelado y análisis de un sistema. FEM permite la construcción de diseños completos, refinados, y optimizados antes de que el diseño sea manufacturado.

En general, el método de elemento finito es caracterizado por el seguimiento de procesos: La primera etapa es el desarrollo de la malla del producto, este mallado consiste en triángulos, cuadros o polígonos curvados. Después, se escogen las funciones básicas. Estas pueden ser funciones de base por tramos lineales o funciones de base por tramos polinomiales.

Los beneficios de FEM incluyen el incremento de exactitud, diseño optimizado y mejor visión de los parámetros críticos de diseño, prototipado virtual, menos prototipos físicos, más rápido y menos costoso el ciclo de diseño, incremento de productividad, mejor ganancia.

El método de elemento finito es un método numérico para la solución de ecuaciones diferenciales y por medio de una malla que representan las matrices se resuelven las ecuaciones y se pueden visualizar los resultados en una animación. Los resultados se observan en una escala de colores y magnitudes que representa el comportamiento que tiene la pieza analizada y de igual manera se pueden obtener gráficas de los resultados.

Lee et al, (27) desarrolló por medio de los métodos de elemento finito y una red neuronal abducida el análisis de un molde de inyección de multi cavidad. Para seleccionar los parámetros óptimos del sistema de inyección para minimizar la deformación en el molde de inyección, el método de elemento finito, el método de Taguchi y una red neuronal abducida fueron usados. Estos métodos fueron aplicados en el entrenamiento de la red neuronal abductiva. Una vez que fueron desarrollados el sistema de inyección (canal de inyección) y la forma de final del punto de inyección, esta red fue usada para mejorar la precisión de la predicción de deformación en la multi inyección del molde. Se aplicó un algoritmo de optimización con un índice de desempeño a la red neuronal para

encontrar los parámetros del sistema de inyección. Este método dio un resultado satisfactorio comparado con la verificación correspondiente de elemento finito.

Se realizó una comparación entre el error de la simulación FEM del flujo de inyección y los valores del modelo de predicción para el proceso de optimización. Esta simulación demostró que el modelo no solo encaja con la simulación FEM de flujo de inyección, sino que también con el análisis de elemento finito y las predicciones de la red neuronal. La rapidez y eficiencia para determinar los parámetros óptimos del sistema para el proceso de inyección, puede mejorar exitosamente la precisión del proceso de diseño del molde (27).

Cada uno de los métodos antes descritos tiene sus ventajas y desventajas, algunos son más simples de realizar pero los resultados obtenidos no son tan precisos, pero a su vez permite encontrar una posible solución de una manera sencilla y rápida. Otros métodos en cambio son más complejos y toman más tiempo para realizarse pero sus resultados son muy aproximados a los reales, tal es el caso de los algoritmos genéticos, redes neuronales, lógica difusa o análisis de elemento finito. Sin embargo, este tipo de métodos requieren ser estudiados y comprendidos a profundidad para poder emplearlos correctamente.

Actualmente los parámetros de inyección en los procesos están basados en la técnica de prueba y error, además, la experiencia de los ingenieros juega un papel importante en la selección de los parámetros de inyección en el proceso.

Por medio del desarrollo de esta metodología de FEM en una etapa temprana en el desarrollo de un producto, y en la mejora de la calidad de los productos que actualmente están en producción, se pueden generar grandes beneficios a la empresa en cuestión de ahorros, eficiencia en la producción, reducción de tiempo ciclo de operación, al igual la implementación de nuevas tecnologías que hasta el momento no es una herramienta explotada en el país para el desarrollo de nuevos productos.

Actualmente este tiene problemas de calidad, por tal motivo se llevarán a cabo simulaciones con los parámetros actuales de inyección con la finalidad de imitar virtualmente las condiciones reales del proceso.

MÉTODO DE TAGUCHI

El método de Taguchi se basa en el uso de un diseño especial de matrices ortogonales para estudiar el factor de todo el espacio con solo un pequeño número de experimentos. Este método intenta optimizar el diseño de un proceso o producto. Básicamente el método indica cuántos y cuáles experimentos deben realizarse para un número de factores y niveles determinados.

Ziegmann et al (28) diseñó y fabricó un molde especial para observar la duración de las micro líneas de unión durante el proceso de inyección. Considerando el corto tiempo de solidificación de la resina durante el proceso, se implementó un sistema para variar los tiempos de enfriamiento, luego el experimento fue llevado a cabo en una máquina de inyección horizontal y este estudio permitió determinar que para el material PP, existe una relación entre la fuerza de unión de la resina y los parámetros de inyección. Los resultados que determinaron los parámetros óptimos del proceso se obtuvieron por medio un análisis de Taguchi.

En base al método de análisis de elemento finito y una matriz de Taguchi se desarrolló este trabajo de investigación, ya que la empresa cuenta con los recursos y herramientas necesarias para la implementación de esta metodología. Por medio de la matriz de Taguchi se definió un diseño de experimentos de L9 donde se evaluarán las variables que se pueden optimizar para mejorar los parámetros de inyección, en este caso los factores son el diseño de la parte plástica, la temperatura de la resina, el tiempo de enfriamiento y la presión de inyección durante el llenado. Las simulaciones de flujo de resina en el Software Moldex 3D permitieron realizar nueve iteraciones o corridas con los parámetros definidos en la matriz y de esta manera comprobar cual combinación es la que brinda los mejores resultados en la simulación.

Por su parte, el análisis por medio del método de Taguchi consiste en un diseño de experimentos para verificar los resultados estadísticamente, esta metodología se basa en la utilización de matrices ortogonales, las cuales indican cuántos y cuáles experimentos deben realizarse para un número de factores y niveles determinados. Las matrices empleadas en este método permiten evaluar cada uno de los factores a través de realizar pocos experimentos. Un ejemplo de una matriz ortogonal de Taguchi se puede observar en la Tabla 1 (28), en este caso en particular es una matriz de L9 (3⁴) ya que es de 3 niveles y 4 factores.

Tabla 1. Matriz ortogonal L9 del método de Taguchi.

Experimento	Factores			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

El método de Taguchi emplea la transformación de la variable de respuesta a la relación S/N, es una medida de las variaciones presentadas en la variable de respuesta y para maximizar esta transformación se utiliza la ecuación.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde “r” es el número de repeticiones en los experimentos y “y_i” es la variable de respuesta.

Además fue necesario realizar un análisis de varianza con los datos de respuesta, el objetivo es desarrollar un estudio sistemático de cada factor, en este caso de cada parámetro de inyección. El análisis de varianza en el diseño estadístico de Taguchi se basa en las ecuaciones.

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N Y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$SS_j = \left[\sum_{i=1}^{k_j} \left(\frac{j_i^2}{n_{ij}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\sigma_j = \frac{SS_j}{v_j} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

T = Suma de toda las observaciones

N = Total de observaciones para cada factor

j_i = Suma de las observaciones, el factor “j” bajo el nivel “i”

SS_T = Suma de cuadrados totales

SS_j = Suma de cuadrados para e factor “j”

v_j = Grados de libertad del factor “j”

σ_j = Varianza del factor “j”

De igual manera se pretende analizar un producto nuevo que está en una etapa temprana de diseño, del cual aún no se cuenta con el molde y por medio de simulaciones de inyección se pretende desarrollar y analizar los parámetros óptimos, con la finalidad de llegar a la etapa de producción sin problemas de calidad, ya que se tendrá un respaldo virtualmente validado que dará una alta confianza de que el producto cumple con los requerimientos.

PRECISIÓN DE HIPÓTESIS

Las simulaciones de flujo de resina por el método de elemento finito y el método de optimización por medio de la matriz de Taguchi facilitará la selección de los parámetros de inyección dentro del proceso, permitiendo que la fabricación de las piezas plásticas que conforman el interior del vehículo cumpla con la calidad requerida.

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO

La fabricación de piezas plásticas es un proceso complicado de controlar debido a la gran cantidad de variables que influyen en el proceso, como la temperatura del molde y la resina, la presión de inyección, las velocidades de inyección, el tiempo de enfriamiento, entre otras. En esta investigación se analizó una pieza plástica que es usada en el interior de uno de los vehículos manufacturados en la región. La parte plástica que se estudia en primer instancia corresponde a una pieza que presenta problemas de calidad durante su proceso de inyección, después se analizó una parte plástica que se encuentra en desarrollo y se desea determinar la posición del punto de inyección con la finalidad de controlar la línea de unión de la resina, es decir en este estudio se realizan análisis de inyección de plástico a dos partes plásticas diferentes con requerimientos distintos.

La problemática que se tiene en la primera parte plástica en estudio es debido a que presenta deformación después del proceso de inyección. Esta pieza es parte de un ensamble y por lo tanto al tener el problema de deformación y/o compactación, es difícil crear el ensamble ya que al estar fuera de especificación no se puede ensamblar correctamente, en este caso la tolerancia es de ± 1 mm en los puntos de fijación de la pieza. La pieza plástica que se va analizar forma parte de la consola central de instrumentos de un vehículo, esta pieza está ubicada en la parte trasera de la consola y da cavidad a las ventilas del aire acondicionado de los pasajeros de la segunda fila de asientos, en la Figura 2 se muestra la ubicación de la pieza plástica como referencia.



Figura 2. Ubicación de la parte plástica a analizar.

Para determinar la causa a esta problemática se evalúa el proceso de inyección con la finalidad de encontrar los mejores parámetros que den solución al defecto de calidad presente en el producto. El proceso de inyección de plásticos se divide en tres etapas principales: el llenado, la compactación y enfriamiento, de estas etapas es durante el enfriamiento cuando se presenta los defectos más significativos que afectan la productividad y calidad de las piezas inyectadas (30). Si no existe uniformidad en la distribución térmica durante la etapa de enfriamiento, esto puede causar defectos de deformación en las piezas inyectadas (31). Sabiendo que la principal causa en el defecto de deformación del producto se da en la etapa de enfriamiento, en la tabla de los parámetros de inyección, se realizan diferentes simulaciones con diferentes tiempos de enfriamiento y diferentes rediseños en la parte plástica que no representen cambios significativos en el molde. Dado que una modificación mayor en el molde de inyección implica una gran inversión económica y aproximadamente 12 semanas para realizar el cambio en el molde.

La metodología utilizada durante esta investigación es la simulación de flujo de resina por método de elemento finito, para ello se utiliza el software Moldex 3D para correr las simulaciones necesarias. Este software brinda la posibilidad de configurar todas las variables que influyen en el proceso de inyección con la finalidad de imitar las condiciones reales y obtener resultados más aproximados a las condiciones físicas.

Para poder realizar las simulaciones con una mejor aproximación al proceso real es necesario contar con la siguiente información de acuerdo a la Tabla 2 que muestra los requerimientos para el análisis.

Tabla 2. Requerimientos para el análisis.

Requerimiento	Descripción
CAD del producto.	Modelo tridimensional de la parte plástica.
CAD del molde.	Modelo tridimensional del molde de inyección.
Material y propiedades.	Material de la parte plástica y su tabla de propiedades mecánicas.
Especificaciones de la máquina.	Hoja de especificaciones de la máquina y sus capacidades.
Especificación de inyección.	Hoja del proceso de inyección.

El CAD (Computer-Aided Design o Diseño Asistido por computadora) del producto se debe representar en una malla que es trabajada en el software Hypermesh, éste es un módulo de pre procesamiento del software Hyperworks.

El primer paso para realizar la simulación de inyección de plástico consiste en preparar el modelo tridimensional, para ello es necesario utilizar el software Hypermesh porque brinda la posibilidad de importar el CAD de la parte plástica y del molde, estos archivos vienen en formato STEP, se tiene que separar los componentes del molde que son necesarios para hacer la simulación como es el caso del canal de inyección, las líneas de enfriamiento, la base del molde y la parte plástica. El siguiente paso consiste en crear la malla de dichos componentes y se exportan en formato STL que es compatible con el siguiente proceso de la simulación que se realiza en el software Moldex3D Designer. En la Figura 3 se observa el CAD de la pieza plástica y en un costado su representación en malla.

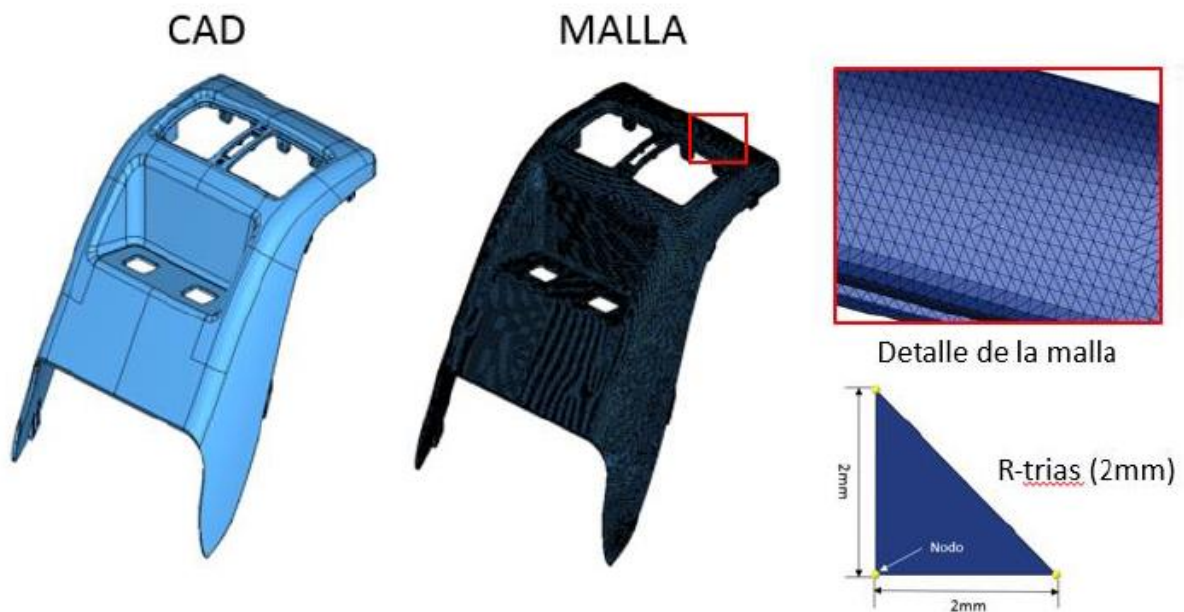


Figura 3. Modelo tridimensional y su malla de la pieza plástica.

La malla es la discretización del modelo tridimensional del producto en nodos y pequeños elementos que pueden ser triángulos, cuadrados, pentágonos o hexágonos que siguen la geometría del CAD, los elementos tienen un nodo en cada vértice y estos nodos pueden pertenecer a uno o varios elementos conectados. Esta discretización o malla representa ecuaciones lineales, la matriz de dichas ecuaciones lineales se llama matriz de rigidez del sistema y el número de ecuaciones del sistema es proporcional al número de nodos. El mallado que se utiliza en este trabajo de investigación es R-trias con

dimensión de 2mm cada elemento con la finalidad de capturar la mayor cantidad de detalles del producto, el mallado R-trias son elementos representados en triángulos rectángulos, es decir que tienen un ángulo recto cuyo valor es de 90°.

Como parte del proceso de simulación de flujo de resina es necesario trabajar el molde de inyección, esto implica separar el canal de inyección desde su entrada al molde hasta los puntos por donde se llenará la pieza plástica. La Figura 4 muestra el canal de inyección previamente separado del resto del molde, por este canal fluye la resina en estado líquido. El proceso consiste en verter los pellets del polímero en la tolva de la máquina, luego estos se calientan y derriten hasta pasar a un estado líquido, por medio del husillo o tornillo de la máquina la resina viaja y entra al molde por medio del canal de inyección.

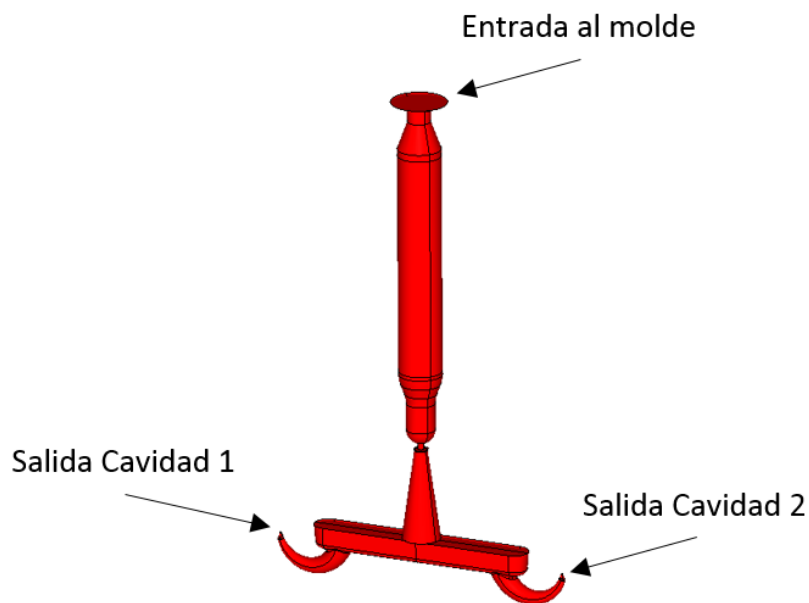


Figura 4. Canal de inyección.

La configuración del molde para la inyección de este producto es multicavidades, es decir, que se inyectan dos piezas por cada ciclo de extrusión, por esta razón el canal de inyección tiene dos salidas, cada una es la entrada a la cavidad del molde que es donde se formará el producto.

Para continuar con la preparación del modelo para la simulación del flujo de inyección también es necesario separar las líneas de enfriamiento del molde, en este caso fluye agua a temperatura de 28°C. Posteriormente el agua fluye por los canales y enfría la resina para que esta se solidifique, en la Figura 5 se muestran todas las líneas de enfriamiento que son usadas en este molde.

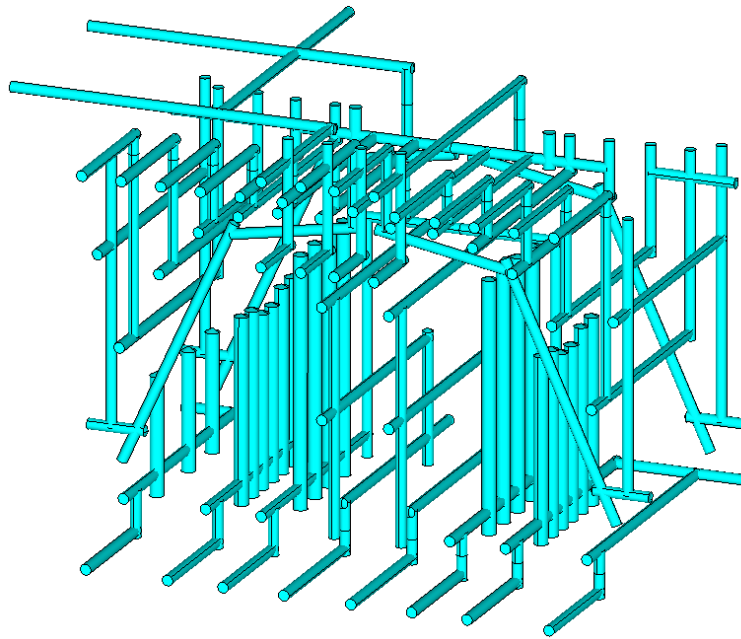


Figura 5. Líneas de enfriamiento.

Posteriormente se crea una figura que represente el tamaño real del molde así como determinar el eje o vector en el que se abren las cavidades del molde para permitir extraer el producto del mismo. La Figura 6 muestra una imagen con el tamaño del molde y su representación en un cubo que posteriormente será utilizado al configurar la simulación de flujo de resina.

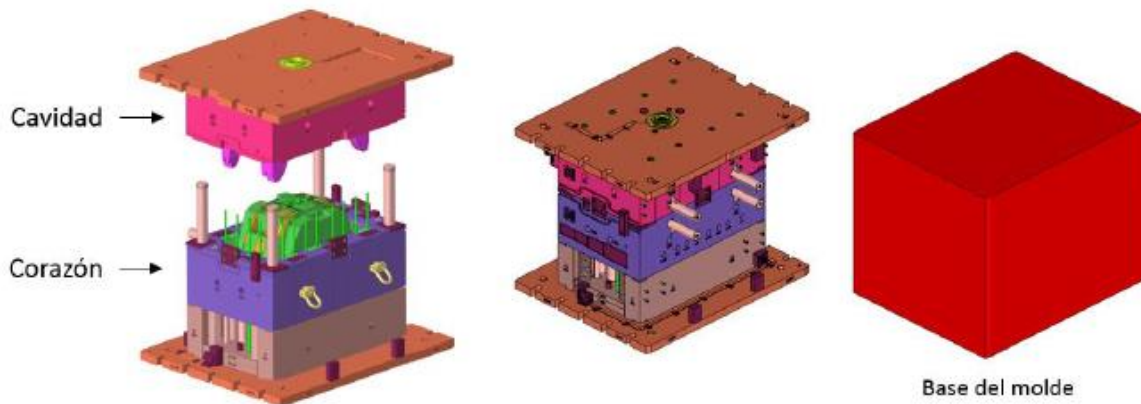


Figura 6. Molde de inyección y su representación dimensional.

Una vez que se tiene la malla del producto, la malla del canal de inyección, las líneas de enfriamiento y el sólido que representa el tamaño real del molde, se exportan en formato STL (Standard Triangle Language) para poder ser importadas en Moldex 3D Designer. Como ya se mencionó todo lo anterior fue trabajado en Hypermesh.

En el software Moldex 3D Designer, se importan todas las geometrías que se trabajaron previamente, en este software se va a configurar el modelo completo para la simulación

de inyección de plástico, es necesario primero trabajar el CAD en hypermesh ya que se debe depurar la información innecesaria y se deben exportar los componentes en un formato compatible con Moldex3D Designer. El siguiente paso ya en la configuración del modelo para análisis es definir la entrada de la resina, luego con las líneas de enfriamiento se definen los diámetros de cada tubo y el tipo de línea, en este caso hay líneas que son barrenos pasados y otro tipo de línea de enfriamiento son los baffles. Éste tipo de línea de enfriamiento es un tubo perpendicular a la línea de enfriamiento pero tiene una separación al centro que divide el tubo en dos secciones y en el extremo del barreno hay un pequeño espacio por donde fluye el líquido refrigerante, es decir, es un tubo perpendicular a la línea de enfriamiento que desvía el líquido en forma de U con la finalidad de enfriar secciones de la pieza plástica debido a la complejidad de la forma. La Figura 7 muestra una línea de enfriamiento tipo baffle.

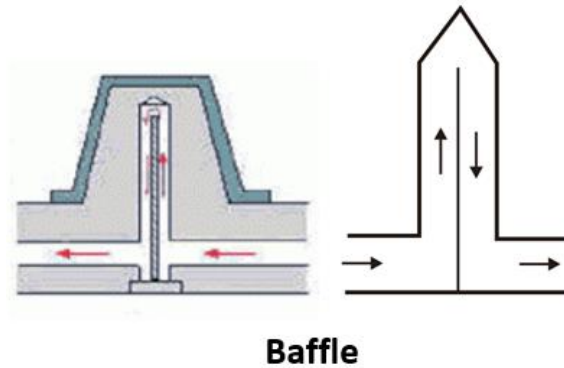


Figura 7. Representación de una línea de enfriamiento tipo Baffle.

Finalmente en Moldex 3D Designer se importa el cubo que representa el tamaño real del molde y se define el vector de apertura, de acuerdo a la Figura 8 se observa que el vector de apertura es en el eje Z. Terminada esta configuración, se crea la malla del modelo completo para análisis y se exporta, ya que ahora el proceso será configurar la máquina y los parámetros de inyección en Moldex 3D.

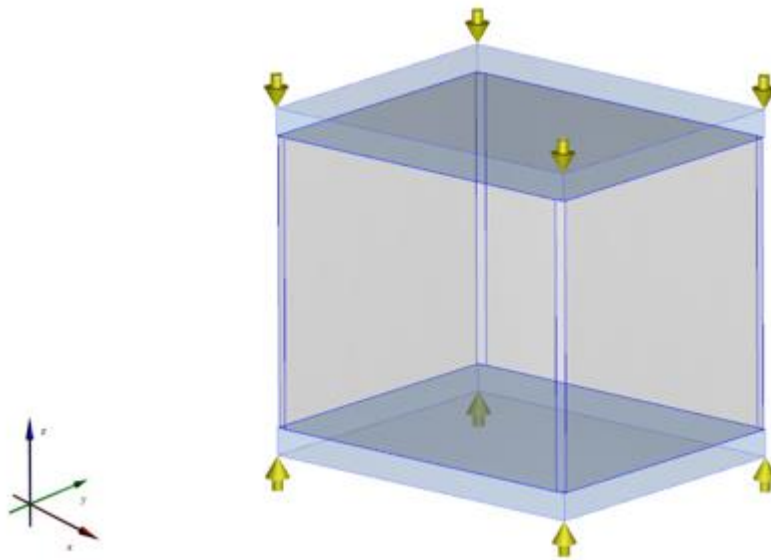


Figura 8. Vector de apertura del molde (Eje Z).

En la figura 9 se muestra el modelo completo para el análisis de inyección de plástico, se observa la parte plástica y el canal de inyección con la finalidad de interpretar la manera en que entra la resina en el canal de inyección y en la parte plástica, a la derecha se observa el modelo completo con todos los componentes que influyen en el análisis de inyección de plástico.

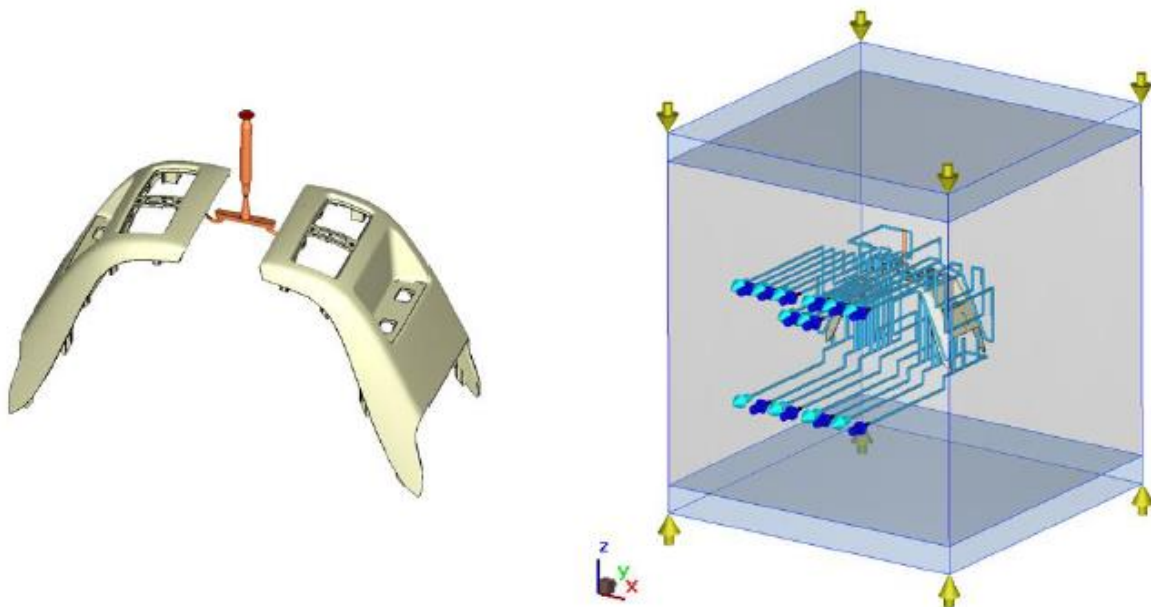


Figura 9. Modelo completo para simulación.

En Moldex3D Desiner se crea una malla del modelo completo, el software crea la malla automáticamente tomando como referencia la malla que previamente se importó desde Hypermesh, Lo que sucede es que el software crea malla tetra para representar

los sólidos, es decir que ahora cada elemento es una pirámide triangular, en la figura 10 se observa la malla que tiene el modelo completo.

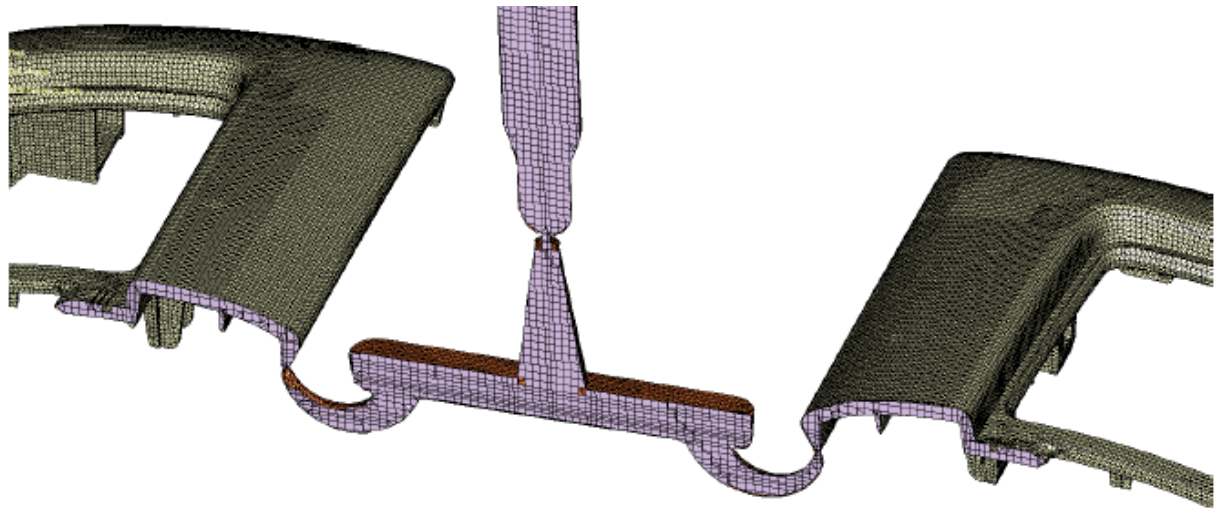


Figura 10. Malla de modelo completo.

Para correr la simulación de flujo de resina es necesario crear un nuevo proyecto en Moldex 3D, se comienza por importar la malla que previamente se configuró en Moldex 3D Designer, luego se define el material de la parte plástica. En este caso el producto es de un polímero llamado ADX1258, la Tabla 3 muestra las propiedades del material que son requeridas por el software, esta información la brinda el proveedor y se obtiene del Datasheet del material (refiérase a anexos para encontrar los Datasheet).

Tabla 3. Propiedades del material ADX1258.

Concepto	Valor	Unidad
Densidad	1.045	g/cc
Índice de flujo de resina	24	g/10 min
Módulo de Flexión	2100	MPa
Temperatura de la resina	185 – 225	°C
Temperatura del molde	25 – 50	°C
Límite Elástico	21	MPa

Después de las consideraciones anteriores es el momento de definir la máquina. Existen diferentes parámetros de la máquina que se deben considerar para definir las capacidades de inyección. En la Tabla 4 se muestran los datos empleados para la configuración de la máquina de extrusión, ya que varían según el fabricante. El software cuenta con algunas máquinas previamente definidas por el desarrollador, sin embargo en este caso la máquina no se encontraba dentro de catálogo y fue necesario

configurarla de acuerdo a la siguiente Tabla 4. Es una máquina de extrusión marca HAITIAN de 700 Tf (toneladas fuerza).

Tabla 4. Especificaciones de máquina de inyección usada.

Concepto	Valor	Unidad
Diámetro del tornillo	70	Mm
Carrera del tornillo	450	Mm
Peso de inyección	1127	G
Presión de inyección	212	MPa
Tasa de inyección	615	cc/s
Fuerza de cierre	700	Tf

Es importante validar que la máquina tiene la capacidad para inyectar la parte plástica, para ello se calcula el volumen de inyección necesario para la inyección. La Figura 11 muestra que el volumen de la parte plástica es de 579967.414 mm³ por lo tanto la máquina debe tener la capacidad de inyectar el volumen de al menos 1159934.828 mm³ ya que el molde crea dos partes plásticas por cada ciclo de extrusión.



Figura 11. Volumen de la parte plástica.

Para calcular la capacidad de la máquina se conoce el diámetro del tornillo que es de 70mm y tiene una carrera de 450mm. El volumen se calcula con la siguiente fórmula:

$$V = \pi r^2 h \quad (\text{Ec. 5})$$

$$r = \frac{d}{2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

r = radio del tornillo

d = diámetro del tornillo

V = volumen (mm³)

h= carrera del tornillo

Entonces la fórmula queda de la siguiente manera:

$$V = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h \quad (\text{Ec. 7})$$

$$V = \pi \left(\frac{70}{2}\right)^2 (450) \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\mathbf{V= 1731802.95 \text{ mm}^3}$$

Por lo tanto, se comprueba que la máquina tiene la capacidad de inyectar las partes plásticas.

Dadas las condiciones que anteceden toca el turno para introducir los parámetros de inyección en el software, estos fueron definidos por el departamento de ingeniería. Es indispensable contar con toda la información ya que esto nos permite replicar las condiciones reales de inyección de la pieza.

Todos los parámetros y configuraciones son de acuerdo a las condiciones reales, con las simulaciones se busca replicar los resultados de pruebas físicas, una vez que se obtienen los mismos comportamientos de inyección y los resultados, lo siguiente es modificar los parámetros de inyección de acuerdo a la matriz de Taguchi propuesta en la Tabla 5, los parámetros que se modifican son el diseño de la parte plástica y se evalúa con dos diferentes temperaturas de la resina, a su vez se evalúa el tiempo de enfriamiento ya que este factor influye directamente en la deformación de la parte plástica después de su proceso de inyección, es evidente entonces que con estos planteamientos se busca mejorar la calidad del producto.

Tabla 5. Matriz de Taguchi para simulación de inyección.

Simulación	Diseño	Temperatura resina	Tiempo enfriamiento	Presión de inyección
Simulación 1	Original	190°C	15 Seg.	80%
Simulación 2	Original	200°C	20 Seg.	80%
Simulación 3	Original	200°C	25 Seg.	85%
Simulación 4	8 refuerzos	190°C	15 Seg.	80%
Simulación 5	8 refuerzos	200°C	20 Seg.	80%
Simulación 6	8 refuerzos	200°C	25 Seg.	85%
Simulación 7	10 refuerzos	190°C	15 Seg.	80%
Simulación 8	10 refuerzos	200°C	20 Seg.	80%
Simulación 9	10 refuerzos	200°C	25 Seg.	85%

En la Figura 12 se observa el diagrama de flujo de forma general sobre el proceso completo para llevar a cabo las simulaciones de inyección de plástico, es importante resaltar que el proceso cuenta con un ciclo en los pasos 10 al 13 debido a que se deben modificar los parámetros de inyección entre una simulación y otra de acuerdo a la Tabla 5 que muestra la matriz de Taguchi. Los pasos del 1 al 9 solo se realizan una vez y se puede estar copiando la información entre cada iteración para el análisis de inyección de plástico.

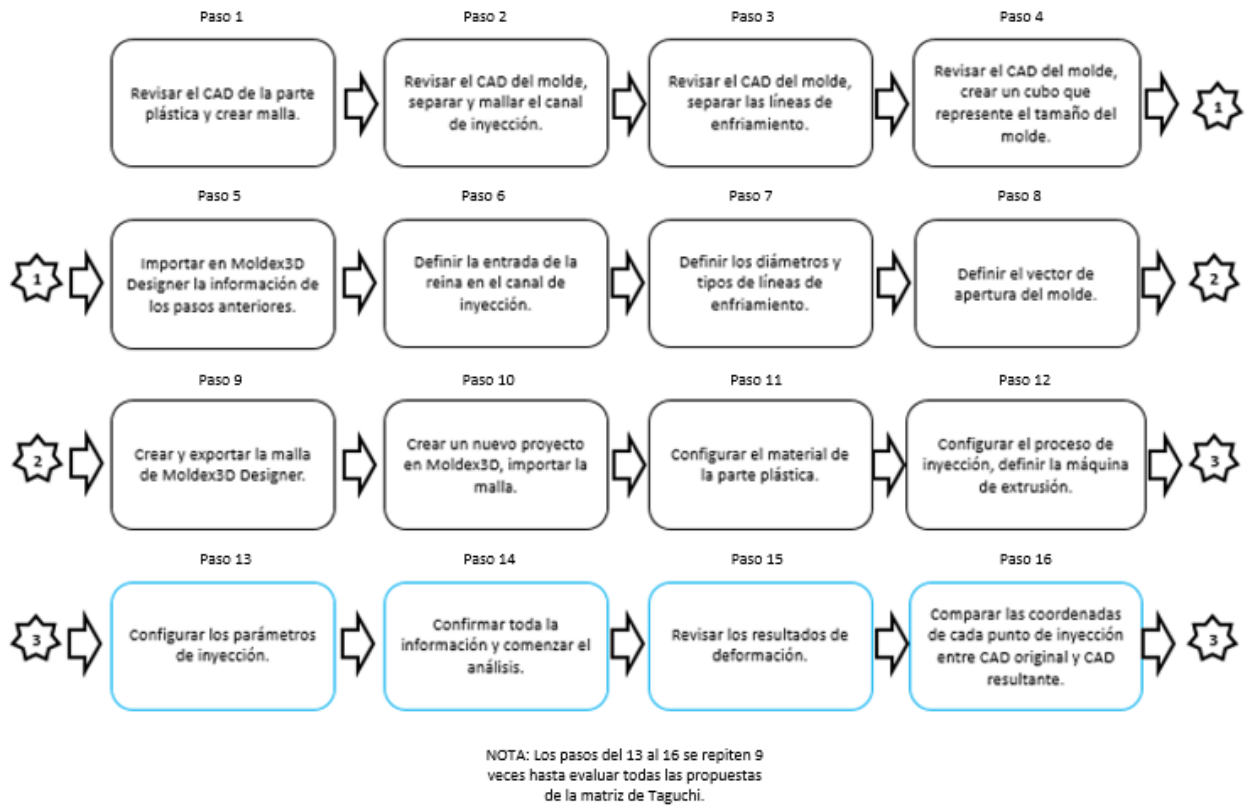


Figura 12. Diagrama de flujo para el análisis de inyección en base la matriz de Taguchi.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

SIMULACIÓN DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO PARA UNA PIEZA CON DEFECTOS DE CALIDAD.

El área de interés donde se presenta la mayor deformación es en las esquinas superiores de la pieza, como referencia se puede observar la Figura 13.

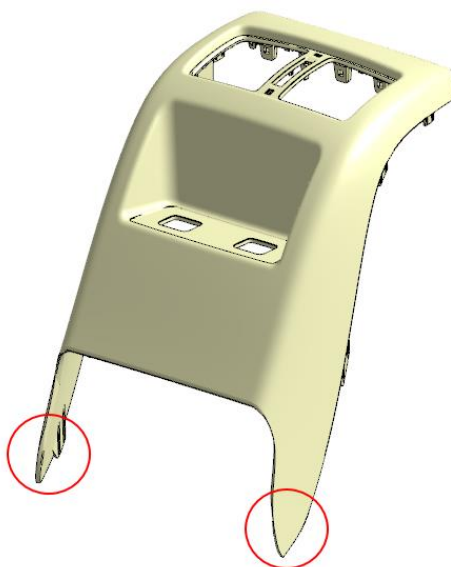


Figura 13. Área de interés donde se presenta la mayor deformación.

Los parámetros utilizados en las condiciones reales de inyección se pueden observar en la Tabla 6, esto representa nuestra primera iteración de acuerdo a la matriz de Taguchi.

Tabla 6. Parámetros reales de la inyección (Primera iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	190°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	80%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	170mm
Tiempo de enfriamiento	15 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

Los porcentajes que están definidos en la Tabla 6 son respecto a los parámetros de la máquina, es decir el 80% de presión de inyección es con respecto a la máxima presión

de inyección de la máquina, para este caso el 80% es equivalente al 169.6 MPa y el 40% de velocidad corresponde a 246 cc/s.

$$\textit{Presión} = 212 \textit{ MPa} * 0.8 \quad (\text{Ec. 9})$$

$$\textit{Presión} = 169.6 \textit{ MPa}$$

$$\textit{Velocidad de inyección} = 615 \frac{\textit{cc}}{\textit{s}} * 0.4 \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\textit{Velocidad de inyección} = 246 \frac{\textit{cc}}{\textit{s}}$$

Simulación 1

Para analizar el comportamiento del proceso de inyección en la Figura 14, se observan las gráficas de presión en MPa (línea roja), la tasa de inyección en cc/s (línea verde) y el volumen de llenado de la parte plástica (línea azul), estos gráficos es en relación al tiempo.

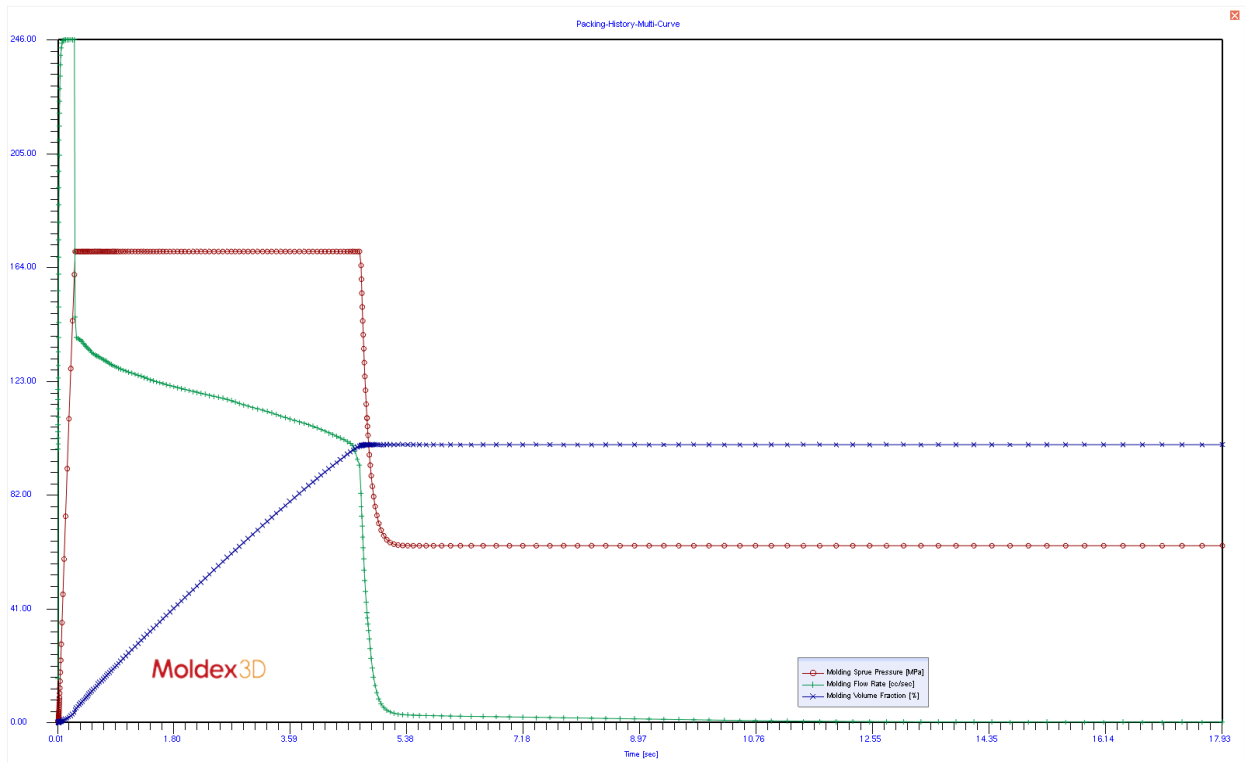


Figura 14. Gráfico del proceso de inyección simulación 1.

Se puede observar en la Figura 14, que el proceso de inyección comienza con velocidad ya que el flujo se incrementa hasta 246 cc/s hasta que la presión alcanza el 80% de acuerdo a los parámetros propuestos, a su vez el flujo de inyección decrece ya que la inyección se controla por presión en lugar de velocidad, al tiempo de 4.6 segundos se hace el cambio de etapa de llenado a compactación y la presión decrece hasta 30%, en este punto del proceso la pieza ya alcanzo el 100% de llenado de la parte plástica y los 13 segundos restantes del proceso la maquina inyectora resina para compactar la resina y eliminar cualquier sección que no se haya llenado.

Los resultados obtenidos en la primera simulación se pueden observar en la Figura 15, resulta oportuno mencionar que debido a que la pieza tiene problemas de deformación los resultados que se buscan son el desplazamiento en milímetros de la deformación de la pieza.

A lo largo de los planteamientos hechos cabe agregar que el diseño del molde tiene un factor de compactación, esto quiere decir que la cavidad del molde es más grande que el diseño original de la pieza. Para el caso del material ADX1258 el factor de compactación es de 0.85%, entonces cuando se realiza la inyección, la pieza es más grande y conforme se va enfriando la parte plástica ésta comienza a compactarse hasta llegar a su tamaño normal que en teoría debe ser igual al diseño tridimensional del producto.

En la Figura 15 se observa que el mayor desplazamiento de deformación se encuentra en los localizadores para los puntos de fijación en la parte inferior y a los extremos de la pieza con un desplazamiento de 5.99 mm como máximo. La deformación que se presenta genera problemas ya que no ensambla la pieza correctamente, o de hacerlo, el ensamble presenta mala apariencia. Es importante mencionar que la deformación que sufre la parte plástica es en relación al proceso de inyección, es decir, se toma el CAD original como las medidas nominales del producto, una vez terminado el ciclo de inyección se compara la parte plástica terminada contra el CAD original y la diferencia que existe en milímetros entre una pieza y otra nos indica la deformación que sufre el producto a causa del proceso.

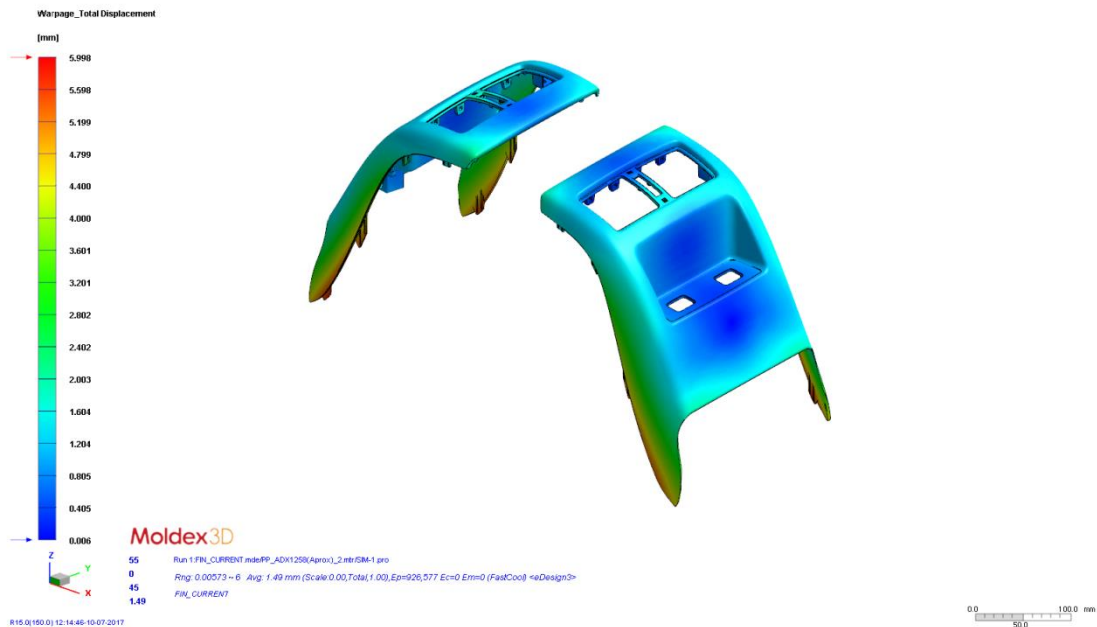


Figura 15. Desplazamiento en milímetros de la deformación de la pieza plástica.

Las mediciones que se realizaron a las piezas físicas fue un estudio para comparar la deformación de las piezas, este consiste en escanear el producto y como resultado se tiene una nube de puntos tridimensionales, que después son importados en un software llamado Polyworks y se comparan las mediciones entre la pieza escaneada y el CAD, los resultados de la comparación se pueden observar en la Figura 16.

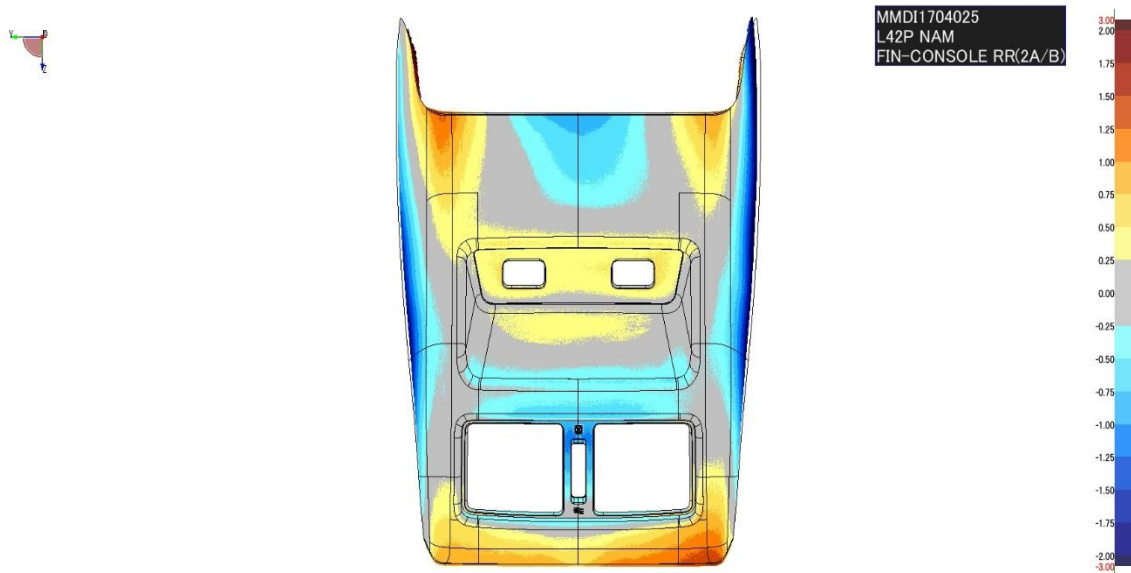


Figura 16. Comparación entre pieza física y el CAD.

Las piezas físicas presentan el mismo comportamiento de deformación que las que se obtuvieron en las simulaciones, sin embargo los valores cambian y esto se puede deber a la resolución que tienen los equipos de escaneo o al factor de compactación que sufre la pieza plástica después del proceso de inyección. Si se observa la deformación que tiene la parte inyectada en comparación con el resultado de deformación por medio de la simulación de flujo de resina, es claro que el comportamiento es muy similar, es decir, la deformación se presenta en las mismas secciones para ambos casos. Por lo tanto existe una deformación en los extremos de la pieza, esta sufre una compactación hacia el centro de la misma lo que provoca que los puntos de fijación en los extremos también se muevan.

Al final esta deformación afecta considerablemente el producto, ya que al moverse los puntos de fijación son complicados de ensamblar con las otras piezas que forman parte del ensamble de la consola central del vehículo. En la Figura 17 se observa en líneas de color negro la geometría tridimensional (CAD) del producto y en escala de colores la pieza plástica después del proceso de inyección.

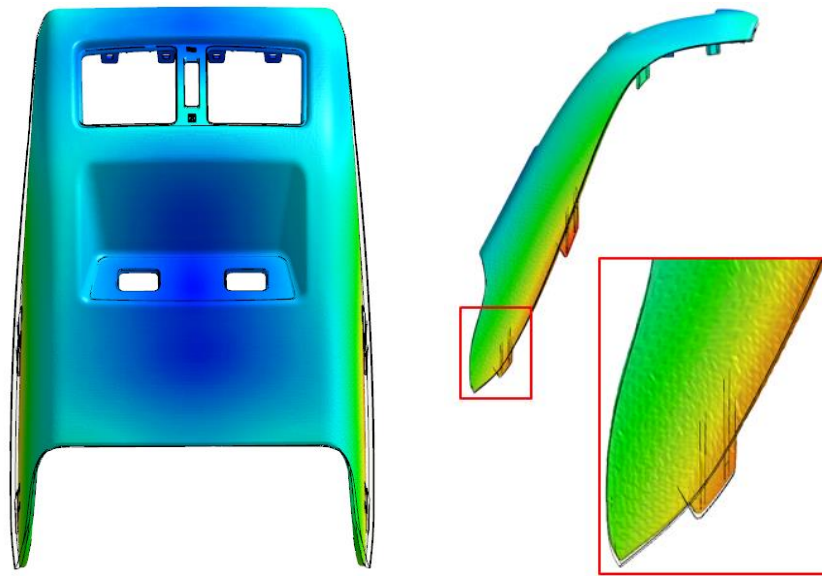


Figura 17. Deformación de la pieza respecto al CAD.

Para determinar el nivel de deformación que sufre la parte plástica se va a tomar como referencia los puntos de fijación, por esta razón, se toma la coordenada central de cada punto de fijación y se comparará entre el CAD del molde, el CAD original del producto y el CAD resultante después del proceso de inyección. Los valores a evaluar son la diferencia entre el CAD original y la deformación después de la inyección, sin embargo también se considera el CAD con el cual se realizó la simulación ya que este tiene el factor de compactación y nos servirá como referencia de acuerdo con las pruebas físicas que se hicieron.

En la Figura 18 se observa los puntos que se midieron en cada punto de fijación, en total son 10 puntos, estos son los puntos que ensamblan la parte plástica con el resto de la consola central. Existen otros puntos de fijación que permiten el ensamble de las ventilas y de los puertos USB, sin embargo estos puntos no son considerados en este estudio.

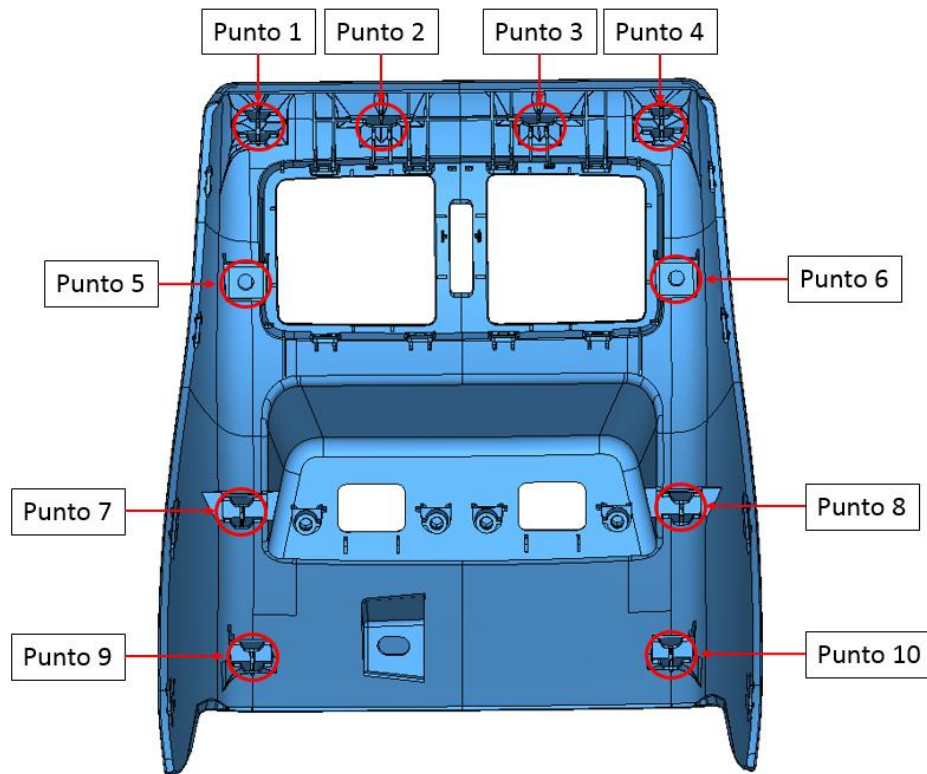


Figura 18. Puntos de fijación de la parte plástica.

Para la simulación 1 que corresponde a las condiciones actuales de la parte plástica, es decir con los parámetros de acuerdo a la Tabla 7, se va a medir la coordenada central de cada punto de fijación y se va a comparar con el CAD original, el CAD del molde (con factor de compactación) y el CAD resultante de la simulación de inyección. Finalmente se medirá la magnitud que existe entre el CAD deformado contra el CAD original.

Con referencia a lo anterior, para cada una de las 9 simulaciones se realiza esta tabla comparativa ya que es el método que determina cual es la mejor propuesta de parámetros de inyección para mejorar la calidad del producto.

Tabla 7. Comparación de resultados de deformación para la simulación 1.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 64.795 Y = 77.136 Z = 126.801	X = 65.428 Y = 77.449 Z = 127.693	Magnitud = 1.137
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 63.646 Y = 30.021 Z = 129.705	X = 63.759 Y = 30.124 Z = 130.07	Magnitud = 0.395
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 63.646 Y = -29.979 Z = 129.704	X = 63.758 Y = -30.065 Z = 130.042	Magnitud = 0.366
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 64.793 Y = -77.094 Z = 126.8	X = 65.377 Y = -77.391 Z = 127.589	Magnitud = 1.026
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 121.514 Y = 82.286 Z = 116.744	X = 122.176 Y = 82.441 Z = 116.392	Magnitud = 0.766
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 121.512 Y = -82.239 Z = 116.742	X = 122.147 Y = -82.407 Z = 116.344	Magnitud = 0.768
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 196.958 Y = 83.981 Z = 29.096	X = 197.632 Y = 83.267 Z = 27.935	Magnitud = 1.52
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 196.956 Y = -83.939 Z = 29.094	X = 197.682 Y = -83.273 Z = 27.963	Magnitud = 1.5
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 239.921 Y = 80.022 Z = -45.426	X = 242.463 Y = 79.702 Z = -45.978	Magnitud = 2.621
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 239.919 Y = -79.978 Z = -45.428	X = 242.429 Y = -79.66 Z = -45.934	Magnitud = 2.58

Simulación 2

Para la segunda iteración o simulación se tomaron los mismos parámetros de inyección a excepción del tiempo de enfriamiento. Se sabe que una parte plástica cuando está en proceso de extrusión la resina se encuentra a temperaturas elevadas, en este caso a 190°C y terminado el proceso de extrusión entra en una etapa de enfriamiento dentro del molde por 15 segundos y el ciclo consiste en pasar agua a 28°C por las líneas de enfriamiento. A partir de esto se modificó el tiempo a 20 segundos en la etapa de enfriamiento y la temperatura de la resina se incrementó a los 200°C, por lo tanto los parámetros utilizados durante esta simulación de flujo de resina es de acuerdo a la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros reales de la inyección (Segunda iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	200°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	80%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	170mm
Tiempo de enfriamiento	20 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

Con la finalidad de observar el comportamiento del proceso de inyección, en la Figura 19 se muestra la presión de inyección en MPa (línea roja), la tasa de inyección en cc/s (línea verde) y el volumen de llenado (línea azul).

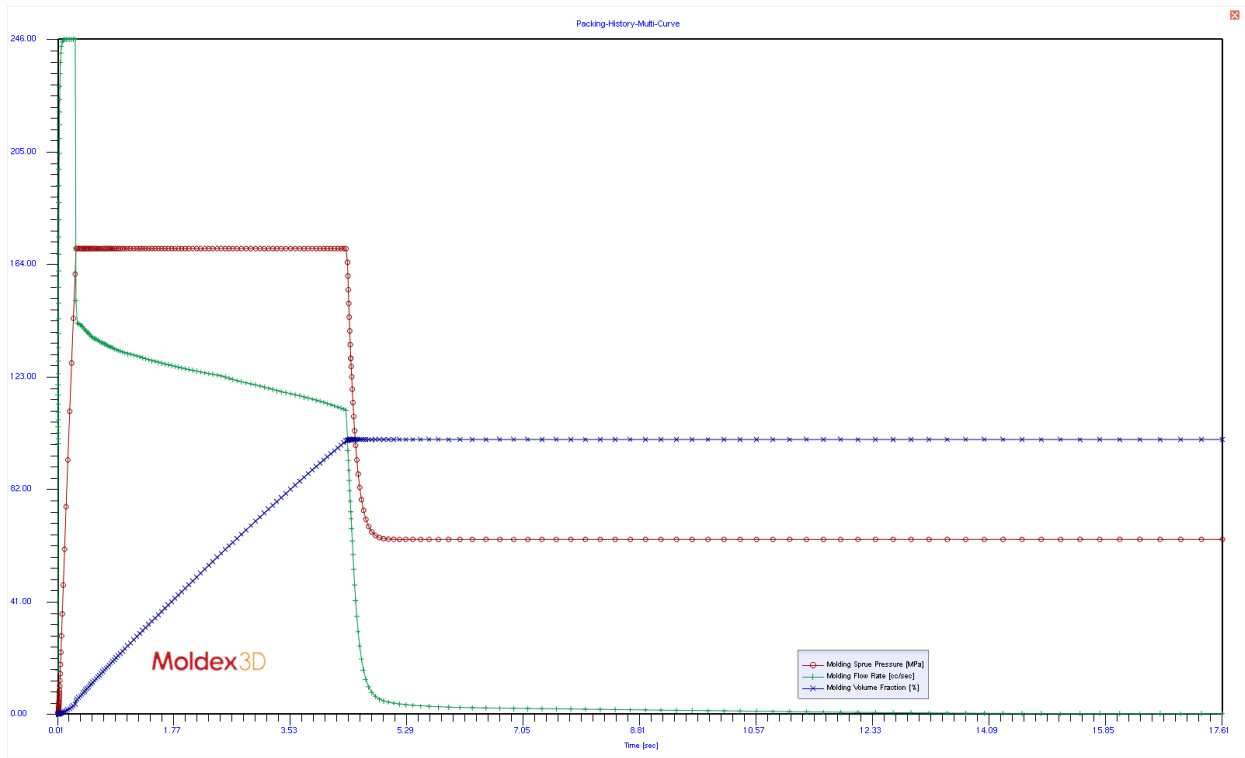


Figura 19. Gráfico del proceso de inyección simulación 2.

El comportamiento de inyección es muy similar al mostrado en la simulación 1, al inicio del proceso el flujo es de 246cc/s equivalente al 40% de velocidad, una vez que se alcanza la presión del 80% comienza a descender el flujo hasta que se hace el cambio a la etapa de compactación, prácticamente la parte plástica ya se llenó completamente y se puede observar que el flujo de inyección es muy bajo ya que es poca resina la que sigue entrando dentro del molde.

Una vez realizada la simulación se obtuvo como resultado que el máximo desplazamiento de deformación es de 5.176mm equivalente a un 13.58% de mejora y se presenta en la misma zona, es decir en los localizadores que se encuentran en la parte inferior y a los extremos de la parte plástica. En la Figura 20 se observa el resultado del análisis.

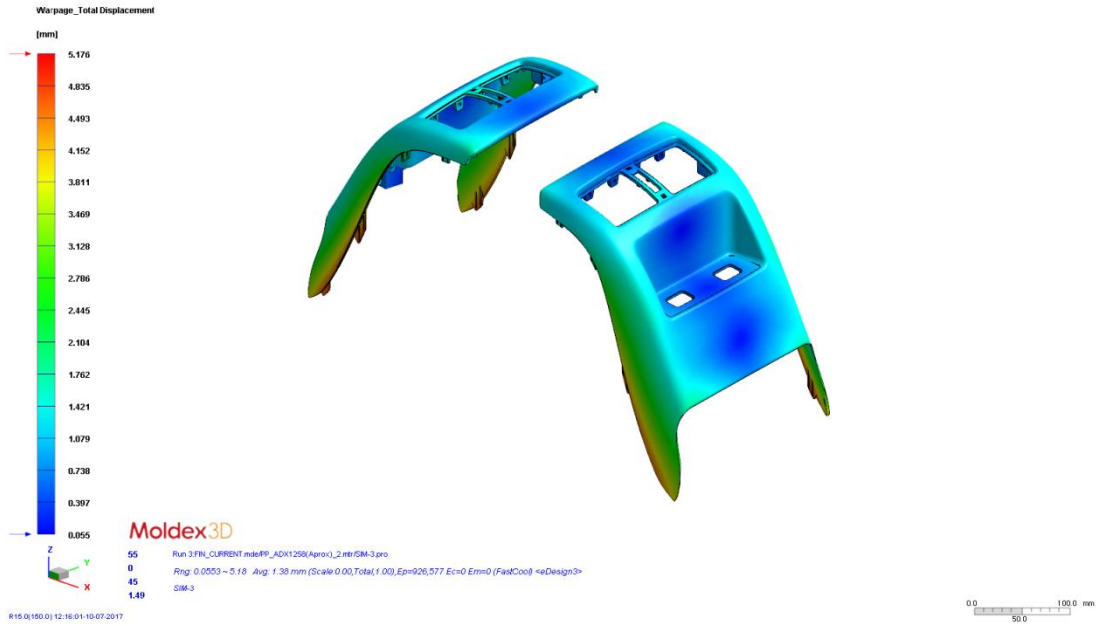


Figura 20. Resultado de deformación para la simulación 2.

De acuerdo a los resultados, se obtuvo una mejora al modificar el tiempo de enfriamiento y la temperatura de la resina, en la Tabla 9 se puede observar la comparación de las coordenadas de los puntos de fijación de los tres diferentes modelos, el CAD de la pieza del molde, el CAD original y el CAD resultante del estudio.

Tabla 9. Comparación de resultados de deformación para la simulación 2.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 65.809 Y = 77.25 Z = 125.761	X = 65.49 Y = 77.462 Z = 127.365	Magnitud = 0.952
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 64.66 Y = 30.135 Z = 128.665	X = 63.802 Y = 30.145 Z = 129.794	Magnitud = 0.218
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 64.66 Y = -29.865 Z = 128.664	X = 63.776 Y = -30.011 Z = 129.715	Magnitud = 0.135
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 65.809 Y = -76.98 Z = 125.759	X = 65.383 Y = -77.327 Z = 127.151	Magnitud = 0.724
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 122.528 Y = 82.4 Z = 115.704	X = 122.314 Y = 82.42 Z = 116.418	Magnitud = 0.874
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 122.527 Y = -82.125 Z = 115.702	X = 122.224 Y = -82.381 Z = 116.299	Magnitud = 0.851
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 197.971 Y = 84.096 Z = 28.056	X = 197.828 Y = 83.218 Z = 28.193	Magnitud = 1.468
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 197.971 Y = -83.824 Z = 28.053	X = 197.906 Y = -83.217 Z = 28.227	Magnitud = 1.475
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 240.934 Y = 80.137 Z = -46.467	X = 241.984 Y = 79.883 Z = -46.05	Magnitud = 2.16
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 240.934 Y = -79.863 Z = -46.469	X = 242.068 Y = -79.848 Z = -45.972	Magnitud = 2.22

Simulación 3

En esta iteración para el análisis de flujo de resina se mantuvieron los mismos parámetros de inyección de la simulación 2, con la excepción de que se incrementó el tiempo de enfriamiento a 25 segundos y se incrementó la presión a 85%. En la Tabla 10 se observa la configuración con la cual se realizó la tercera simulación.

Tabla 10. Parámetros reales de la inyección (Tercera iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	200°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	85%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	170mm
Tiempo de enfriamiento	25 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

En la Figura 21 se observa el comportamiento de inyección, a diferencia de las simulaciones anteriores, la presión durante esta iteración se incrementó a 85%, en la gráfica la presión se representa con una línea roja, la tasa de inyección en color verde y el volumen de llenado con una línea azul.

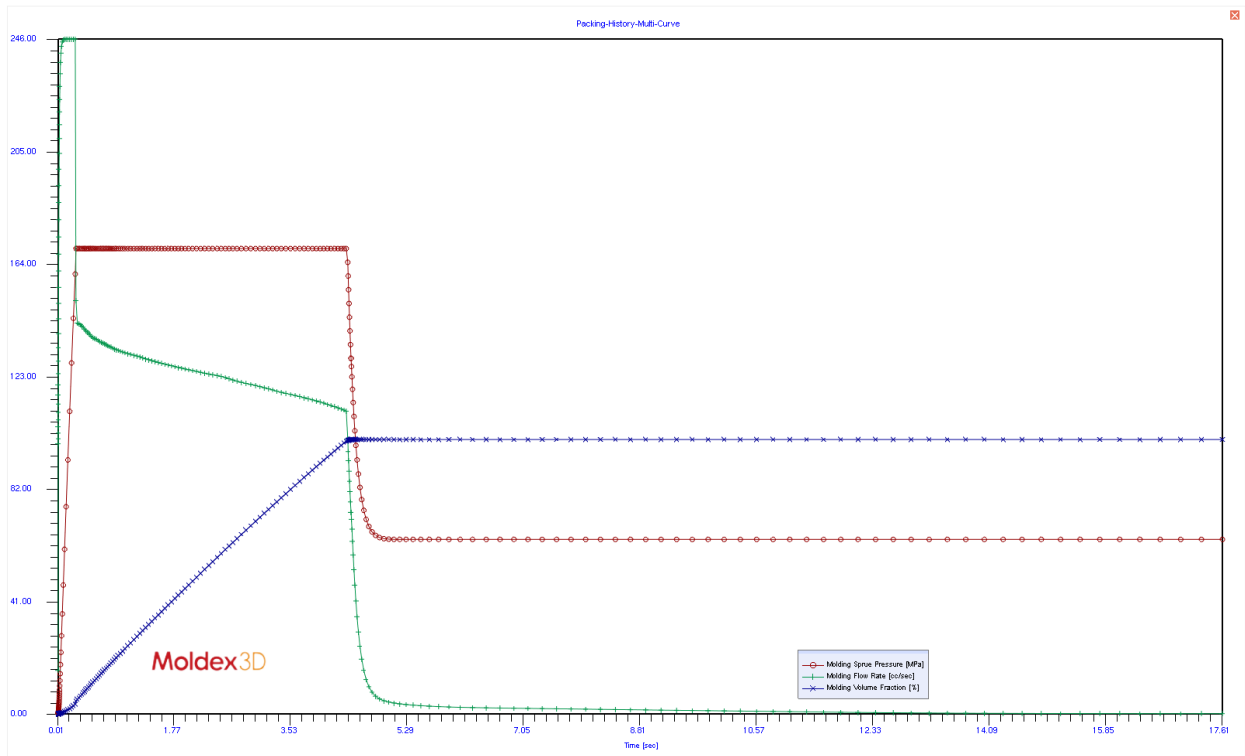


Figura 21. Gráfico del proceso de inyección simulación 3.

Básicamente el comportamiento del proceso de inyección es igual a la simulaciones anteriores, el proceso comienza con el 40% de velocidad hasta alcanzar la presión de 85%, se hace el cambio a la etapa de compactación una vez que a la posición de 10mm y en ese punto la parte plástica está casi completamente llena, el flujo de inyección es muy bajo ya que entra muy poca resina dentro del molde.

Los resultados obtenidos muestran que hubo mejoría con respecto a las condiciones actuales o iniciales, incluso hubo una mejora respecto a los resultados obtenidos en la simulación anterior, ahora el máximo desplazamiento de deformación es de 5.047mm de acuerdo a la Figura 22, esto es equivalente a un 15.74% de mejora.

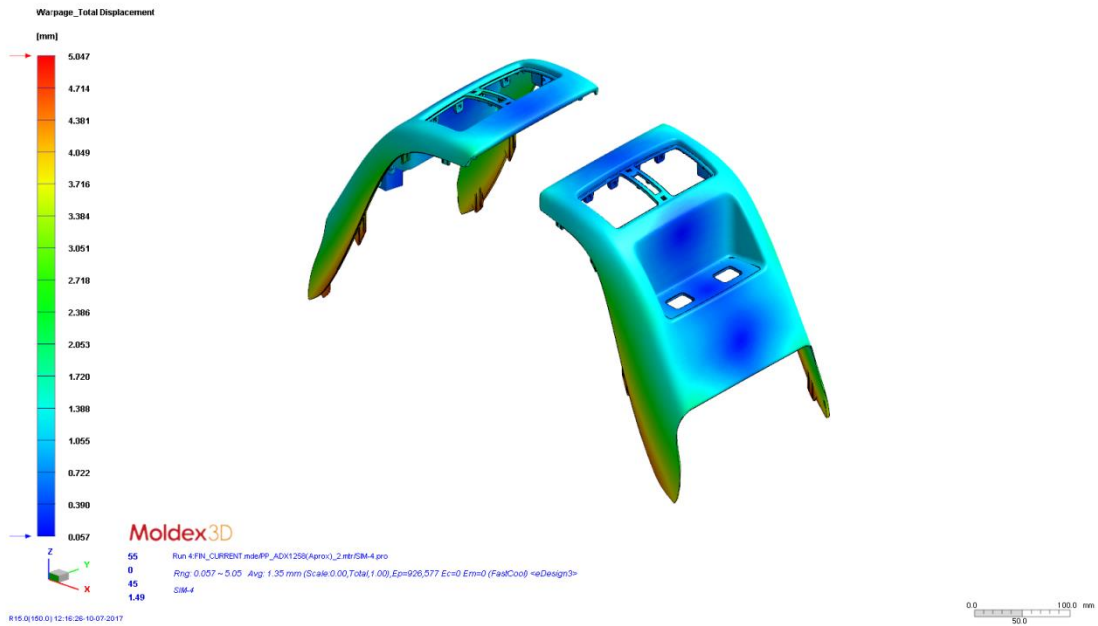


Figura 22. Resultados de desplazamiento para la tercera simulación.

En la Tabla 11 se puede observar la comparación de los resultados obtenidos en la simulación, se comparan las coordenadas resultantes de la deformación en esta iteración con respecto al CAD original y el CAD del molde.

Tabla 11. Comparación de resultados de deformación para la simulación 3.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 65.809 Y = 77.25 Z = 125.761	X = 65.468 Y = 77.452 Z = 127.355	Magnitud = 0.926
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 64.66 Y = 30.135 Z = 128.665	X = 63.809 Y = 30.135 Z = 129.859	Magnitud = 0.251
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 64.66 Y = -29.865 Z = 128.664	X = 63.788 Y = -30.013 Z = 129.785	Magnitud = 0.166
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 65.809 Y = -76.98 Z = 125.759	X = 65.369 Y = -77.33 Z = 127.158	Magnitud = 0.717
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 122.528 Y = 82.4 Z = 115.704	X = 122.282 Y = 82.425 Z = 116.302	Magnitud = 0.847
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 122.527 Y = -82.125 Z = 115.702	X = 122.209 Y = -82.389 Z = 116.302	Magnitud = 0.838
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 197.971 Y = 84.096 Z = 28.056	X = 197.808 Y = 83.251 Z = 28.186	Magnitud = 1.444
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 197.971 Y = -83.824 Z = 28.053	X = 197.88 Y = -83.248 Z = 28.217	Magnitud = 1.449
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 240.934 Y = 80.137 Z = -46.467	X = 241.999 Y = 79.89 Z = -46.056	Magnitud = 2.175
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 240.934 Y = -79.863 Z = -46.469	X = 242.069 Y = -79.853 Z = -45.979	Magnitud = 2.222

Simulación 4

Para la cuarta iteración se modificó la parte plástica al agregarle unos pequeños refuerzos en las paredes laterales con la finalidad de darle una estructura más robusta al diseño y con ello evitar la deformación hacia el centro de la pieza. En la Figura 23 se observa los refuerzos que se agregaron a la pieza.

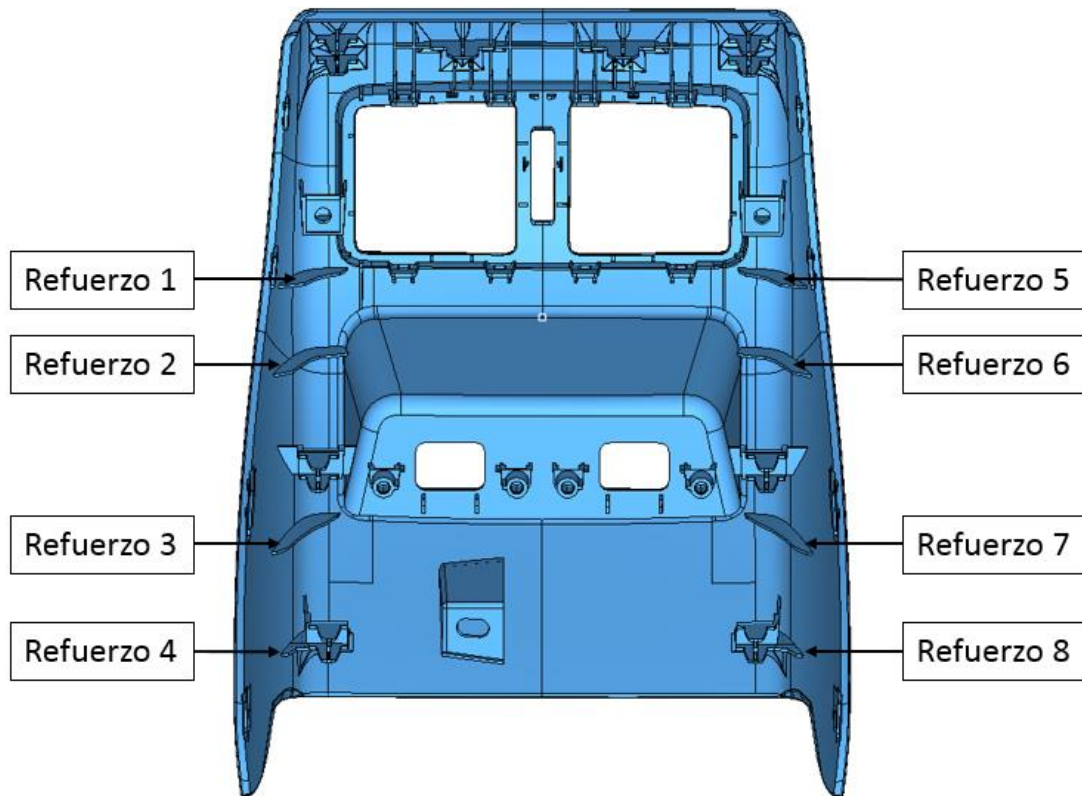


Figura 23. Rediseño en la parte plástica.

Los parámetros utilizados para la simulación 4 son iguales a las condiciones iniciales o actuales de la parte plástica. Se pretende observar cual es el comportamiento de la deformación al agregar estos refuerzos. En la Tabla 12 se observan los parámetros utilizados.

Tabla 12. Parámetros reales de la inyección (Cuarta iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	190°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	80%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	170mm
Tiempo de enfriamiento	15 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

La gráfica del comportamiento del proceso de inyección es prácticamente igual a los gráficos mostrados en la simulaciones anteriores, esto se debe a que los parámetros de inyección son iguales solo cambia el diseño de la parte plástica al añadir los refuerzos que brindan rigidez al producto. Sin embargo estos cambios en el diseño de la parte plástica no afectan el comportamiento de inyección.

Después de realizar la simulación se tiene como resultado que el máximo desplazamiento de la deformación es de 4.358mm que es lo equivalente a un 27.24% de mejora. En la Figura 24 se observa el comportamiento que tuvo la pieza, el máximo desplazamiento se encuentra en la misma zona que las iteraciones anteriores.

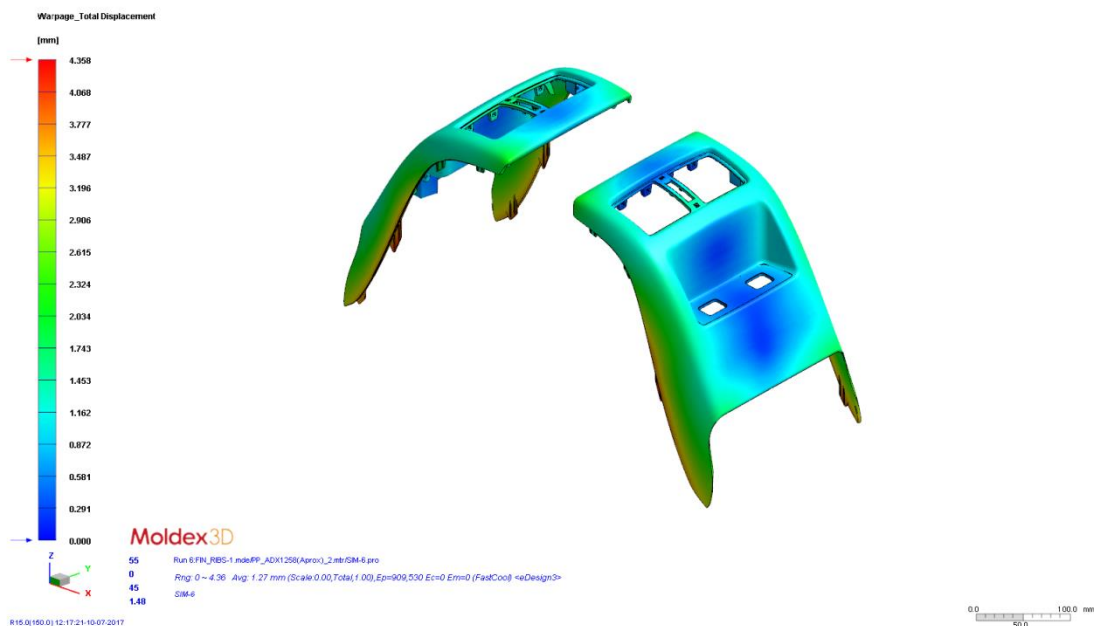


Figura 24. Resultado de deformación para la cuarta simulación.

Esta simulación dio como resultado una mejora con respecto a las condiciones iniciales al igual que una mejora con respecto a las otras simulaciones. En la Tabla 13 se puede observar los resultados obtenidos en la simulación así como la comparación que existe respecto al CAD original.

Tabla 13. Comparación de resultados de deformación para la simulación 4.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 65.809 Y = 77.25 Z = 125.761	X = 65.354 Y = 77.318 Z = 127.488	Magnitud = 0.903
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 64.66 Y = 30.135 Z = 128.665	X = 63.747 Y = 30.029 Z = 130.032	Magnitud = 0.342
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 64.66 Y = -29.865 Z = 128.664	X = 63.831 Y = -30.147 Z = 130.138	Magnitud = 0.5
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 65.809 Y = -76.98 Z = 125.759	X = 65.491 Y = -77.424 Z = 127.744	Magnitud = 1.22
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 122.528 Y = 82.4 Z = 115.704	X = 122.219 Y = 82.409 Z = 116.287	Magnitud = 0.849
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 122.527 Y = -82.125 Z = 115.702	X = 122.316 Y = -82.426 Z = 116.443	Magnitud = 0.878
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 197.971 Y = 84.096 Z = 28.056	X = 197.707 Y = 83.284 Z = 27.96	Magnitud = 1.512
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 197.971 Y = -83.824 Z = 28.053	X = 197.583 Y = -83.237 Z = 27.96	Magnitud = 1.473
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 240.934 Y = 80.137 Z = -46.467	X = 242.218 Y = 79.814 Z = -45.93	Magnitud = 2.361
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 240.934 Y = -79.863 Z = -46.469	X = 242.077 Y = -79.79 Z = -46.028	Magnitud = 2.247

Simulación 5

La quinta iteración consiste en tomar como base el CAD rediseñado de la parte plástica donde se agregaron los refuerzos, sin embargo se modificó la temperatura de la resina hasta los 200°C y el tiempo de enfriamiento se modificó a 20 segundos, por lo tanto la Tabla 14 muestra los parámetros utilizados durante esta simulación de flujo de resina.

Tabla 14. Parámetros reales de la inyección (Quinta iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	200°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	80%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	160mm
Tiempo de enfriamiento	20 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

Como resultado se obtuvo un desplazamiento máximo de deformación igual a 4.057mm que en porcentaje esta mejora representa un 32.27%, en la Figura 25 se puede observar el comportamiento que tiene la pieza después del análisis y el máximo desplazamiento se presenta en la misma zona al igual que las iteraciones pasadas.

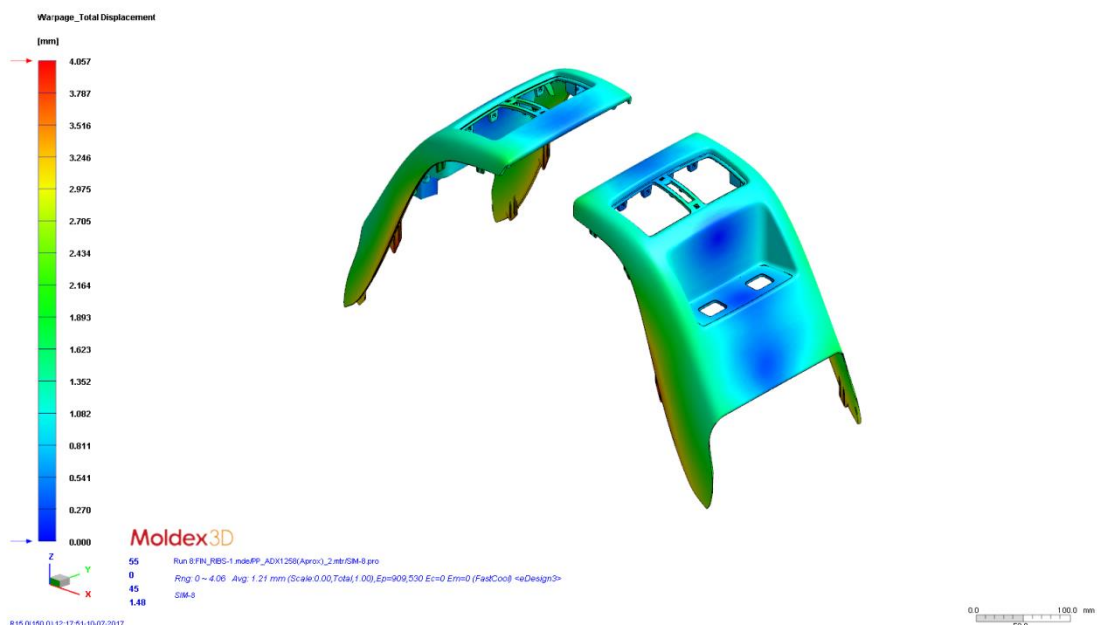


Figura 25. Resultados de deformación para la quinta simulación.

De acuerdo a los resultados del análisis, se obtuvo una mejora con respecto a las condiciones iniciales y también mejora respecto a las otras simulaciones realizadas, en la Tabla 15 se observan las coordenadas resultantes del análisis y su comparativa contra el CAD original del producto.

Tabla 15. Comparación de resultados de deformación para la simulación 5.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 65.809 Y = 77.25 Z = 125.761	X = 65.342 Y = 77.255 Z = 126.992	Magnitud = 0.591
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 64.66 Y = 30.135 Z = 128.665	X = 63.751 Y = 29.989 Z = 129.633	Magnitud = 0.131
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 64.66 Y = -29.865 Z = 128.664	X = 63.863 Y = -30.166 Z = 129.761	Magnitud = 0.292
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 65.809 Y = -76.98 Z = 125.759	X = 65.561 Y = -77.433 Z = 127.308	Magnitud = 0.981
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 122.528 Y = 82.4 Z = 115.704	X = 122.258 Y = 82.391 Z = 116.225	Magnitud = 0.913
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 122.527 Y = -82.125 Z = 115.702	X = 122.454 Y = -82.409 Z = 116.434	Magnitud = 1.006
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 197.971 Y = 84.096 Z = 28.056	X = 197.963 Y = 83.242 Z = 28.253	Magnitud = 1.506
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 197.971 Y = -83.824 Z = 28.053	X = 197.825 Y = -83.206 Z = 28.225	Magnitud = 1.431
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 240.934 Y = 80.137 Z = -46.467	X = 241.754 Y = 79.819 Z = -46.935	Magnitud = 1.913
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 240.934 Y = -79.863 Z = -46.469	X = 241.492 Y = -79.851 Z = -46.127	Magnitud = 1.725

Simulación 6

De manera similar a la iteración anterior, en esta simulación se modifican los parámetros de inyección y se utiliza el mismo CAD rediseñado. En la Tabla 16 se muestran los valores asignados que corresponde a 200°C de temperatura de la resina, tiempo de enfriamiento de 25 segundos y presión de inyección de 85%.

Tabla 16. Parámetros reales de la inyección (Sexta iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	200°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	85%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	170mm
Tiempo de enfriamiento	25 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

Los resultados de esta simulación muestran que el máximo desplazamiento es de 3.957mm, si existe una mejora de un 33.93% con respecto a las condiciones iniciales incluso existe una mejora con respecto a la simulación anterior. En la Figura 26 se observa el comportamiento que tuvo la parte plástica con respecto a la deformación después del proceso de inyección.

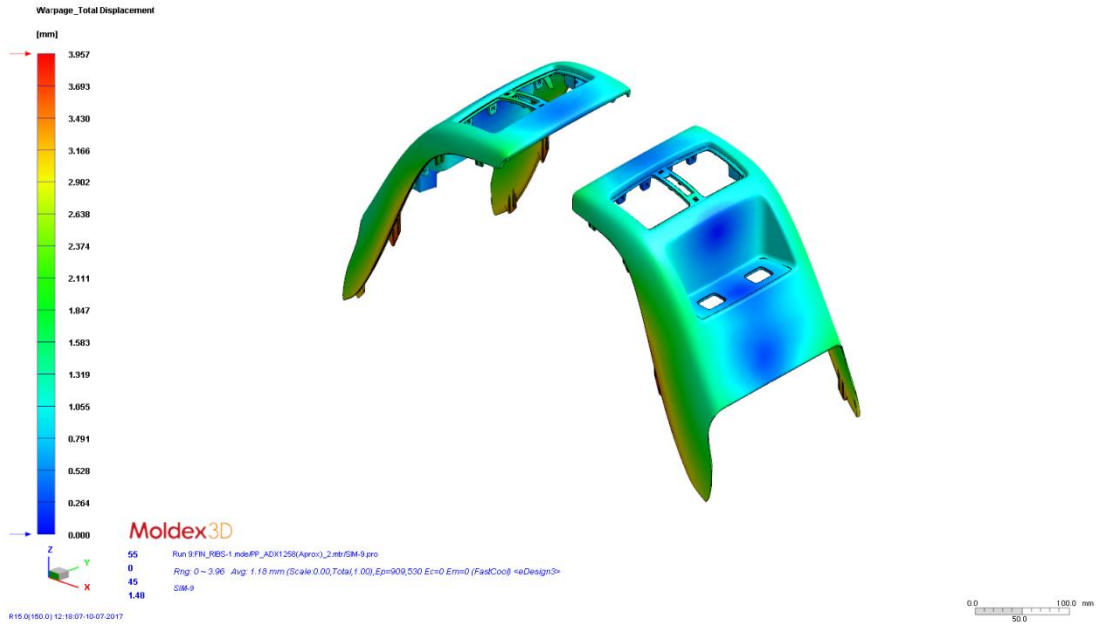


Figura 26. Resultado de desplazamiento para la sexta simulación.

Ahora respecto a las coordenadas resultantes de los puntos de fijación de la parte plástica, se puede observar en la Tabla 17 el comportamiento que sufrió la pieza en relación con el CAD original del producto.

Tabla 17. Comparación de resultados de deformación para la simulación 6.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 65.809 Y = 77.25 Z = 125.761	X = 65.321 Y = 77.26 Z = 127.031	Magnitud = 0.587
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 64.66 Y = 30.135 Z = 128.665	X = 63.759 Y = 29.992 Z = 129.722	Magnitud = 0.117
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 64.66 Y = -29.865 Z = 128.664	X = 63.869 Y = -30.159 Z = 129.839	Magnitud = 0.317
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 65.809 Y = -76.98 Z = 125.759	X = 65.538 Y = -77.426 Z = 127.32	Magnitud = 0.967
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 122.528 Y = 82.4 Z = 115.704	X = 122.227 Y = 82.406 Z = 116.232	Magnitud = 0.886
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 122.527 Y = -82.125 Z = 115.702	X = 122.427 Y = -82.421 Z = 116.436	Magnitud = 0.982
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 197.971 Y = 84.096 Z = 28.056	X = 197.911 Y = 83.277 Z = 28.221	Magnitud = 1.474
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 197.971 Y = -83.824 Z = 28.053	X = 197.818 Y = -83.248 Z = 28.211	Magnitud = 1.414
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 240.934 Y = 80.137 Z = -46.467	X = 241.801 Y = 79.831 Z = -45.939	Magnitud = 1.958
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 240.934 Y = -79.863 Z = -46.469	X = 241.515 Y = -79.857 Z = -46.132	Magnitud = 1.748

Simulación 7

En esta simulación se realizó un nuevo rediseño a la parte plástica, con la finalidad de darle mayor estructura y rigidez a la pieza. Lo que se busca es evitar que la pieza sufra una deformación hacia el centro de la misma, que básicamente es el problema de calidad que se tiene.

En la Figura 27 se observa la modificación que se realizó a la pieza, el cambio consiste en incrementar el tamaño de los refuerzos y como base se tomó la posición de tenían los refuerzos en el primer rediseño que se realizó, además se agregó un refuerzo extra a cada lado.

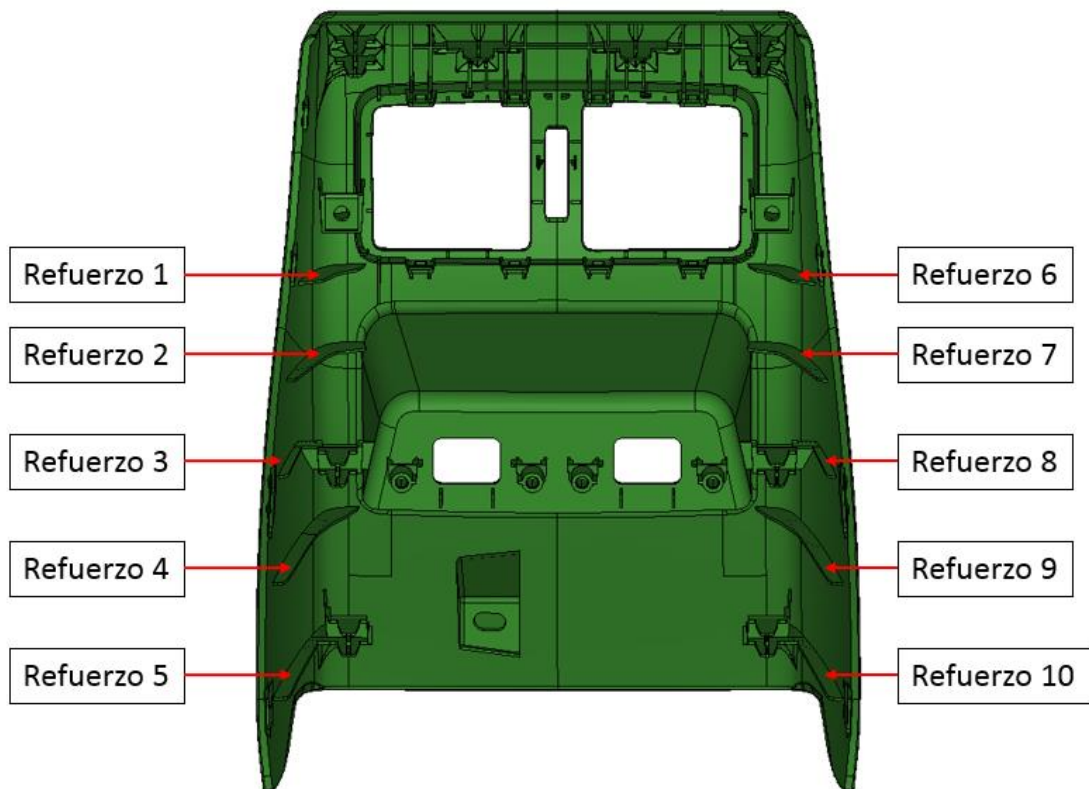


Figura 27. Detalle del rediseño a la parte plástica.

Respecto a los parámetros utilizados en esta simulación son los mismos de las condiciones iniciales, es decir se utilizan los mismos parámetros de la simulación 1. Esto con la intención de observar el comportamiento que tienen los refuerzos si se compara con los resultados de la primera iteración. En la Tabla 18 se observan los parámetros utilizados.

Tabla 18. Parámetros reales de la inyección (Séptima iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	190°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	80%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	160mm
Tiempo de enfriamiento	15 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

Los resultados obtenidos durante esta simulación muestra que hay una mejora respecto a la primera iteración ya que el esfuerzo máximo es de 3.867mm, es decir hubo un 35.44% de mejora en comparación con la primer simulación, en la Figura 28 se puede observar el comportamiento de deformación que sufre la parte plástica.

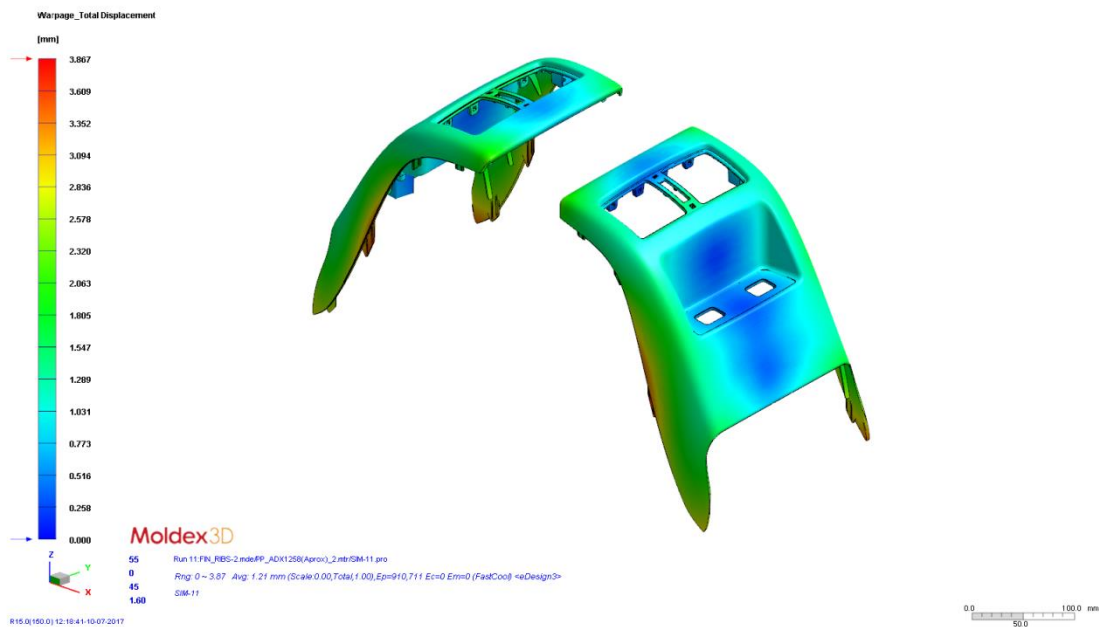


Figura 28. Resultados de deformación para la simulación 7.

De acuerdo a la Tabla 19, en los resultados de las coordenadas de los puntos de fijación se observa el comportamiento de deformación que sufre el producto después de la simulación de inyección.

Tabla 19. Comparación de resultados de deformación para la simulación 7.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 65.809 Y = 77.25 Z = 125.761	X = 65.361 Y = 77.281 Z = 127.435	Magnitud = 0.861
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 64.66 Y = 30.135 Z = 128.665	X = 63.762 Y = 29.996 Z = 130.021	Magnitud = 0.337
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 64.66 Y = -29.865 Z = 128.664	X = 63.843 Y = -30.174 Z = 130.162	Magnitud = 0.535
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 65.809 Y = -76.98 Z = 125.759	X = 65.509 Y = -77.543 Z = 127.781	Magnitud = 1.267
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 122.528 Y = 82.4 Z = 115.704	X = 122.219 Y = 82.379 Z = 116.261	Magnitud = 0.859
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 122.527 Y = -82.125 Z = 115.702	X = 122.343 Y = -82.43 Z = 116.467	Magnitud = 0.896
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 197.971 Y = 84.096 Z = 28.056	X = 197.643 Y = 83.262 Z = 28.038	Magnitud = 1.451
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 197.971 Y = -83.824 Z = 28.053	X = 197.512 Y = -83.213 Z = 28.02	Magnitud = 1.411
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 240.934 Y = 80.137 Z = -46.467	X = 242.149 Y = 80.049 Z = -46.053	Magnitud = 2.315
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 240.934 Y = -79.863 Z = -46.469	X = 241.953 Y = -80.017 Z = -46.172	Magnitud = 2.165

Simulación 8

Esta iteración se realizó con el segundo rediseño de la parte plástica, es decir con los 10 refuerzos y de mayor tamaño, con referencia a los parámetros de inyección solo se modificó el tiempo de enfriamiento a 20 segundos y se incrementó la temperatura de la resina a 200°C. En la Tabla 20 se puede observar la configuración que tienen los parámetros de inyección para esta octava simulación de flujo de resina.

Tabla 20. Parámetros reales de la inyección (Octava iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	200°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	80%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	170mm
Tiempo de enfriamiento	20 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

Después de realizar el análisis se obtuvo como resultado que el máximo desplazamiento de deformación es de 3.617 mm que es equivalente a un 39.61% de mejora, sin duda esta configuración es la que ha dado los mejores resultados referentes a la deformación que sufre la pieza. En la Figura 29 se puede observar el comportamiento que tiene la parte plástica después de la simulación de flujo de resina. El máximo desplazamiento sigue presentándose en la misma área, es decir, en la parte inferior y a los extremos de la pieza.

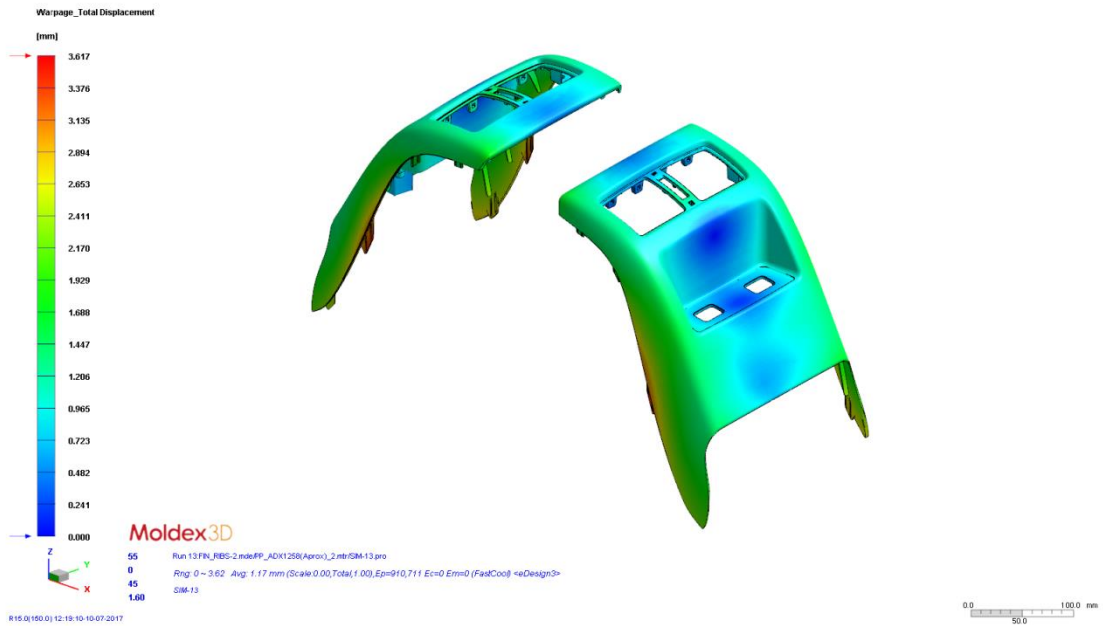


Figura 29. Resultado de deformación para la simulación 8.

En la Tabla 21 se puede observar el comportamiento resultante en las coordenadas de los puntos de fijación, son estos valores los que determinan cual es la configuración del modelo que brinda los mejores resultados con respecto a la deformación que sufre la pieza.

Tabla 21. Comparación de resultados de deformación para la simulación 8.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 65.809 Y = 77.25 Z = 125.761	X = 65.363 Y = 77.241 Z = 126.917	Magnitud = 0.589
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 64.66 Y = 30.135 Z = 128.665	X = 63.797 Y = 29.968 Z = 129.572	Magnitud = 0.208
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 64.66 Y = -29.865 Z = 128.664	X = 63.901 Y = -30.186 Z = 129.725	Magnitud = 0.329
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 65.809 Y = -76.98 Z = 125.759	X = 65.574 Y = -77.452 Z = 127.287	Magnitud = 0.987
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 122.528 Y = 82.4 Z = 115.704	X = 122.28 Y = 82.362 Z = 116.214	Magnitud = 0.934
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 122.527 Y = -82.125 Z = 115.702	X = 122.476 Y = -82.405 Z = 116.439	Magnitud = 1.024
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 197.971 Y = 84.096 Z = 28.056	X = 197.942 Y = 83.232 Z = 28.331	Magnitud = 1.455
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 197.971 Y = -83.824 Z = 28.053	X = 197.79 Y = -83.194 Z = 28.277	Magnitud = 1.384
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 240.934 Y = 80.137 Z = -46.467	X = 241.725 Y = 80.033 Z = -45.998	Magnitud = 1.893
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 240.934 Y = -79.863 Z = -46.469	X = 241.441 Y = -80.068 Z = -46.202	Magnitud = 1.709

Simulación 9

Para la última simulación se tomara el CAD con el segundo rediseño, se modifica el tiempo de enfriamiento a 25 segundos, la temperatura de la resina a 200°C y la presión de inyección a 85%. En la Tabla 22 se muestran los valores de los parámetros de inyección utilizados en la simulación de flujo de inyección.

Tabla 22. Parámetros reales de la inyección (Novena iteración).

Concepto	Valor
Material	ADX1258
Temperatura de la resina	200°C
Temperatura del molde	31°C
Velocidad de inyección	40%
Presión de inyección	85%
Cambio de posición	10mm
Presión de compactación	30%
Tiempo de compactación	13 seg
Position final de inyección	170mm
Tiempo de enfriamiento	25 seg.
Fuerza de sujeción	700 Ton

Como resultado de esta simulación se obtuvo un desplazamiento máximo de deformación de 3.508 mm, es decir hay un 41.43% de mejora en comparación con las condiciones iniciales, esta simulación muestra los mejores resultados al tener el menor desplazamiento de deformación. En la Figura 30 se observa el comportamiento que tuvo la parte plástica en relación a la deformación después de la simulación de flujo de resina.

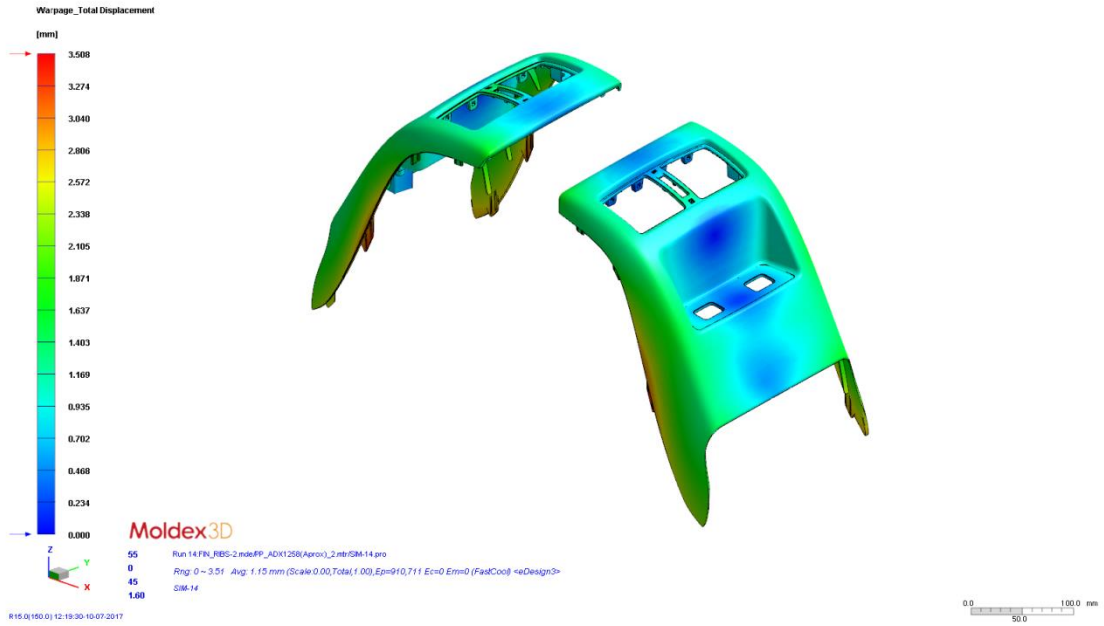


Figura 30. Resultados de deformación para la simulación 9.

En la Tabla 23 se muestra el resultado de las coordenadas de los puntos de fijación para la simulación 9 en comparación con las coordenadas del CAD original de la parte plástica. Estos resultados permiten observar el comportamiento que sufre la pieza por la deformación.

Tabla 23. Comparación de resultados de deformación para la simulación 9.

Punto de fijación	CAD del molde (Modelo de inyección)	CAD original del producto	CAD resultante de la deformación	Magnitud de deformación
Punto de fijación 1	X = 65.865 Y = 77.768 Z = 126.729	X = 65.809 Y = 77.25 Z = 125.761	X = 65.332 Y = 77.234 Z = 126.972	Magnitud = 0.572
Punto de fijación 2	X = 63.706 Y = 30.253 Z = 129.658	X = 64.66 Y = 30.135 Z = 128.665	X = 63.79 Y = 29.967 Z = 129.692	Magnitud = 0.154
Punto de fijación 3	X = 63.706 Y = -30.258 Z = 129.657	X = 64.66 Y = -29.865 Z = 128.664	X = 63.892 Y = -30.179 Z = 129.841	Magnitud = 0.345
Punto de fijación 4	X = 64.863 Y = -77.773 Z = 126.727	X = 65.809 Y = -76.98 Z = 125.759	X = 65.54 Y = -77.447 Z = 127.341	Magnitud = 0.987
Punto de fijación 5	X = 122.065 Y = 82.956 Z = 116.586	X = 122.528 Y = 82.4 Z = 115.704	X = 122.241 Y = 82.379 Z = 116.214	Magnitud = 0.904
Punto de fijación 6	X = 122.063 Y = -82.962 Z = 116.584	X = 122.527 Y = -82.125 Z = 115.702	X = 122.438 Y = -82.419 Z = 116.448	Magnitud = 0.988
Punto de fijación 7	X = 198.15 Y = 84.671 Z = 28.193	X = 197.971 Y = 84.096 Z = 28.056	X = 197.896 Y = 83.259 Z = 28.283	Magnitud = 1.436
Punto de fijación 8	X = 198.149 Y = -84.676 Z = 28.191	X = 197.971 Y = -83.824 Z = 28.053	X = 197.774 Y = -83.238 Z = 28.257	Magnitud = 1.364
Punto de fijación 9	X = 241.478 Y = 80.678 Z = -46.964	X = 240.934 Y = 80.137 Z = -46.467	X = 241.775 Y = 80.046 Z = -46.012	Magnitud = 1.945
Punto de fijación 10	X = 241.476 Y = -80.682 Z = -46.966	X = 240.934 Y = -79.863 Z = -46.469	X = 241.474 Y = -80.062 Z = -46.2	Magnitud = 1.738

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Resultados del análisis de inyección de plástico

Para determinar cuál iteración dio los mejores resultados se puede observar la Tabla 24 donde se observa la magnitud de cada coordenada para las 9 simulaciones y en color verde se marca la celda que dio el mejor resultado por cada punto de fijación.

Tabla 24. Comparación de resultados por cada coordenada.

Desplazamiento en cada punto de fijación (mm)										
	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10
Sim-1	1.137	0.395	0.366	1.026	0.766	0.768	1.52	1.5	2.621	2.58
Sim-2	0.952	0.218	0.135	0.724	0.874	0.851	1.468	1.475	2.16	2.22
Sim-3	0.926	0.251	0.166	0.717	0.847	0.838	1.444	1.449	2.175	2.222
Sim-4	0.903	0.342	0.5	1.22	0.849	0.878	1.512	1.473	2.361	2.247
Sim-5	0.591	0.131	0.292	0.981	0.913	1.006	1.506	1.431	1.913	1.725
Sim-6	0.587	0.117	0.317	0.967	0.886	0.982	1.474	1.414	1.958	1.748
Sim-7	0.861	0.337	0.535	1.267	0.859	0.896	1.451	1.411	2.315	2.165
Sim-8	0.589	0.208	0.329	0.987	0.934	1.024	1.455	1.384	1.893	1.709
Sim-9	0.572	0.154	0.345	0.987	0.904	0.988	1.436	1.364	1.945	1.738

Al analizar la Tabla 24 se puede observar que la simulación 9 es la que registra mayor cantidad de mejores aproximaciones con respecto al CAD original. Por lo tanto se puede considerar que los parámetros utilizados en la simulación 9 son los mejores de acuerdo a la matriz de Taguchi, se tiene una mejora de 41.43% en relación con las condiciones iniciales que corresponden a los parámetros actuales de producción.

En la Figura 31 se observa una gráfica que muestra en que puntos de fijación se presenta el mayor desplazamiento de deformación en milímetros con respecto a cada simulación.

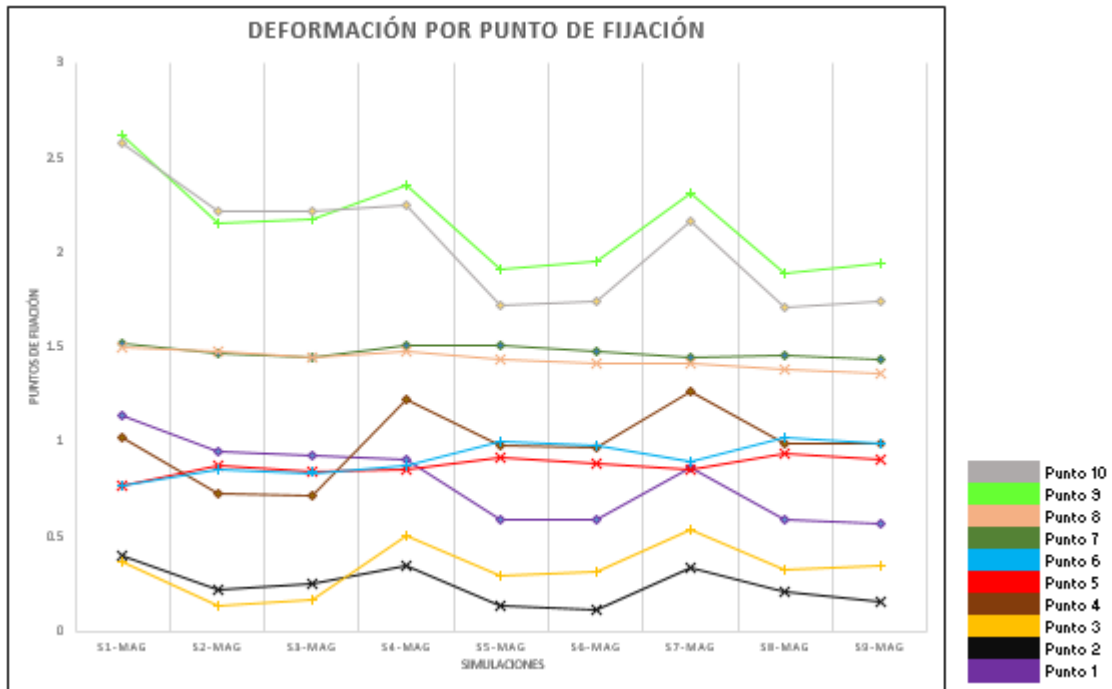


Figura 31. Puntos coordenados con mayor deformación.

La deformación que existe en los puntos de fijación 6 y 7 de acuerdo a la Figura 31 presentan una deformación promedio de 1.45mm, sin embargo los puntos de fijación 8 y 9 son los más críticos ya que en promedio tienen una deformación de 2.1 mm de desplazamiento. Con esto se comprueba que la zona mayor afectada en la parte plástica es la parte inferior y a los costados.

En la Tabla 25 se observa la deformación máxima que sufrió la parte plástica en cada simulación, a su vez se muestra el porcentaje de mejora que hubo en cada simulación respecto a las condiciones iniciales del proceso.

Tabla 25. Deformación máxima.

Experimento	Desplazamiento máximo (mm)	Porcentaje de mejora
1	5.998	0%
2	5.176	13.58%
3	5.047	15.74%
4	4.358	27.24%
5	4.057	32.27%
6	3.957	33.93%
7	3.867	35.44%
8	3.617	39.61%
9	3.508	41.43%

En la Figura 32 se puede observar el comportamiento que tuvieron los resultados de desplazamiento máximo en cada una de las simulaciones realizadas.

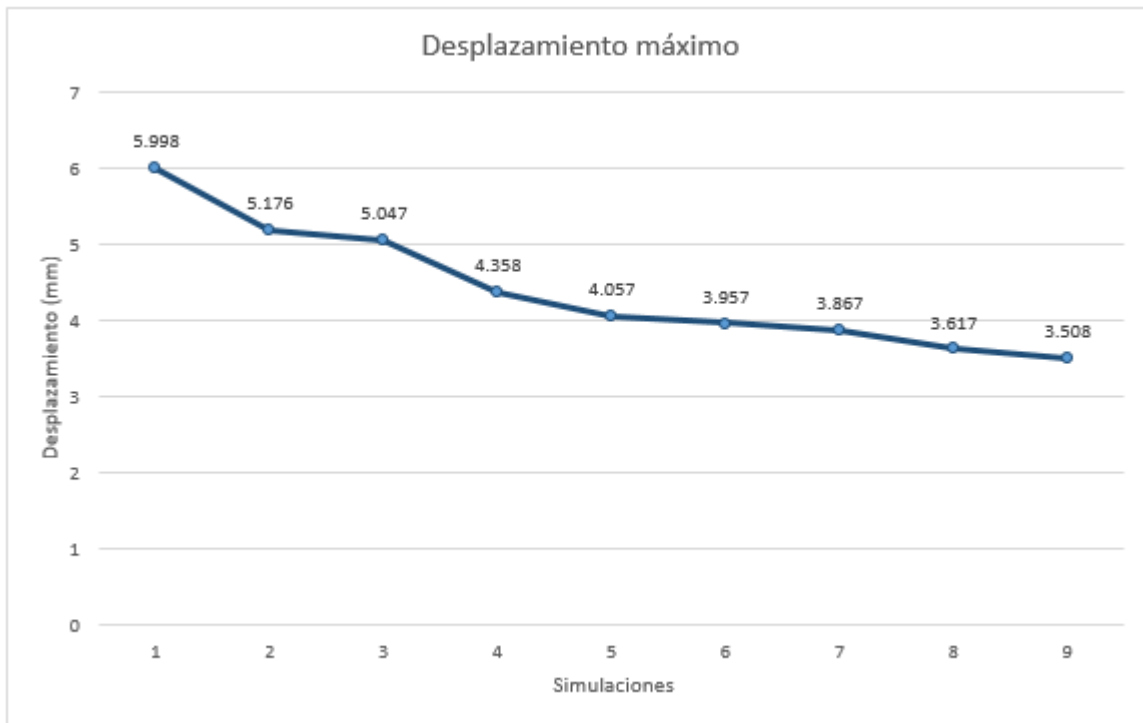


Figura 32. Deformación en la parte plástica.

Los resultados obtenidos en la simulación 8 son significativos ya que se tiene una mejora de 39.61%, es decir solo hay 1.81% de diferencia entre los resultados obtenidos entre la simulación 8 y 9. Además la simulación 8 tiene un tiempo de enfriamiento de 20 segundos, son 5 segundos menos que la simulación 9.

Resultados del análisis estadístico por método de Taguchi

Se utilizó un diseño de experimentos empleando una matriz ortogonal L9 del método de Taguchi, la finalidad es encontrar el efecto de los diferentes parámetros de inyección empleados en las simulaciones para mejorar la deformación que sufre la parte plástica. En la Tabla 26 se muestra la transformación del desplazamiento máximo de deformación de la pieza a la relación S/N y en la Tabla 27 se muestran los parámetros estadísticos y el análisis de varianza.

Tabla 26. Transformación de la deformación de la pieza.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
mm	5.998	5.176	5.047	4.358	4.057	3.957	3.867	3.617	3.508
S/N	15.56	14.28	14.06	12.79	12.16	11.95	11.75	11.17	10.9

Tabla 27. Parámetros estadísticos y análisis de varianza.

Factores	Media de la relación S/N			Grados de libertad	SS	Varianza
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3			
A	14.63	12.3	11.27	2	17.81	8.90294
B	13.36	12.54	12.3	2	1.855978	0.932989
C	12.8915	12.556	12.6574	2	0.110419	0.055209
D	12.88	12.66	12.67	2	0.088838	0.044419
Error				0		
Total				8	19.87	

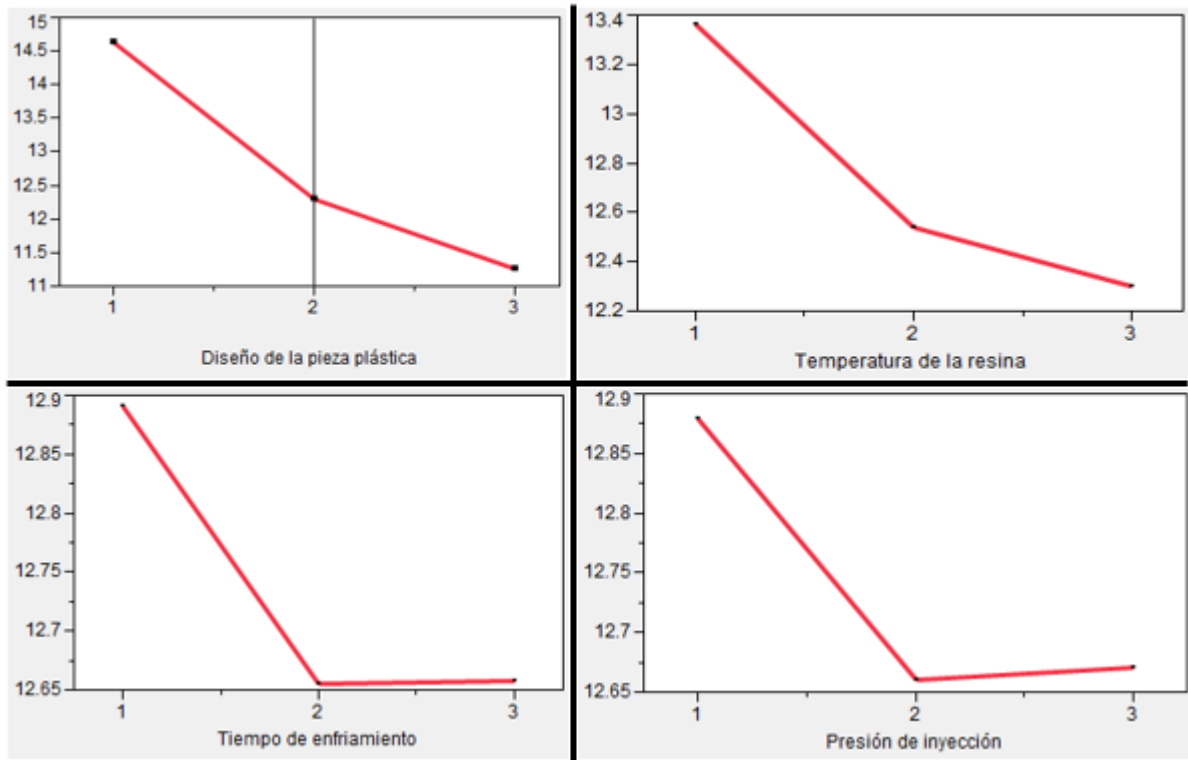


Figura 33. Gráficas de los cuatro factores en sus tres niveles.

De esta manera el método de Taguchi brinda la posibilidad de encontrar los mejores parámetros para el proceso de inyección que den como resultado una menor deformación de la parte plástica. En todo caso las condiciones óptimas son: A3, B3, C2 y D2 de acuerdo a la Tabla 27 y Figura 33, es decir que el diseño de la parte plástica con los 3 refuerzos, temperatura de 200°C, enfriamiento de 20 segundos y presión de 80% son las mejores condiciones para que la parte plástica presenté la menor deformación.

Por lo tanto, los resultados obtenidos por medio del método de Taguchi coinciden con los parámetros utilizados en la simulación 8, la comparación de los desplazamientos en los puntos de fijación así como también el desplazamiento máximo que se obtuvieron como resultado en la simulación 8 con los parámetros de inyección propuestos son las condiciones óptimas para la inyección de la parte plástica.

El alcance de esta investigación llega hasta los resultados de las simulaciones, sin embargo el departamento de ingeniería debe hacer las pruebas físicas con los parámetros propuestos y comparar ambos resultados, es decir, ellos harán la comparación entre los resultados obtenidos en las simulaciones contra los resultados físicos con la finalidad de validar la información obtenida de este estudio.

SIMULACIÓN DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO PARA UNA PIEZA EN ETAPA DE DESARROLLO

Este trabajo de investigación considera dos objetivos principales para validar la implementación del análisis de inyección de plásticos como parte del proceso de validación del diseño de un nuevo producto, el primer objetivo era analizar el proceso de inyección de un producto que tuviera problemas de calidad con la finalidad de solucionarlo o mejorar el proceso y la calidad del mismo, el segundo objetivo consiste en justificar los requerimientos de inyección para el nuevo desarrollo con la intención de validar que las condiciones propuestas cumplen con los requerimientos, es decir que se analicen los parámetros establecidos para la inyección y comprobar con los resultados de la simulación que se obtienen los comportamientos esperados.

La parte plástica en estudio forma parte del tablero de instrumentos, específicamente es parte del control del aire acondicionado donde se encuentran las perillas que ajustan los niveles de la temperatura del aire acondicionado, la velocidad del ventilador y la dirección que tendrá la refrigeración. En la Figura 34 se puede observar la parte plástica que se estudiará.

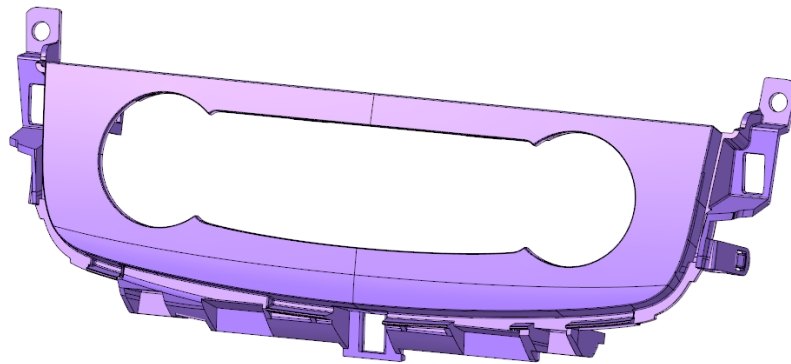


Figura 34. Parte plástica del panel de control de aire acondicionado.

Como parte de los requerimientos de inyección de este producto es que la línea de unión de la resina se ubique en una zona que no pueda presentar problemas de mala apariencia, conociendo esto es importante controlar la posición de la línea de unión y la manera en cómo se realizará, es decir, se busca que los flujos de la resina dentro del molde no colisionen con ángulos muy cerrados ya que esto podría provocar turbulencia y el producto tendría una mala apariencia, es mejor tener ángulos de choque abiertos para que sea más suave la línea de unión.

Dadas las condiciones anteriores, se tienen dos propuestas la localizar el punto de inyección, en la Figura 35 se muestran las dos propuestas a evaluar por medio de la simulación de inyección de plástico.

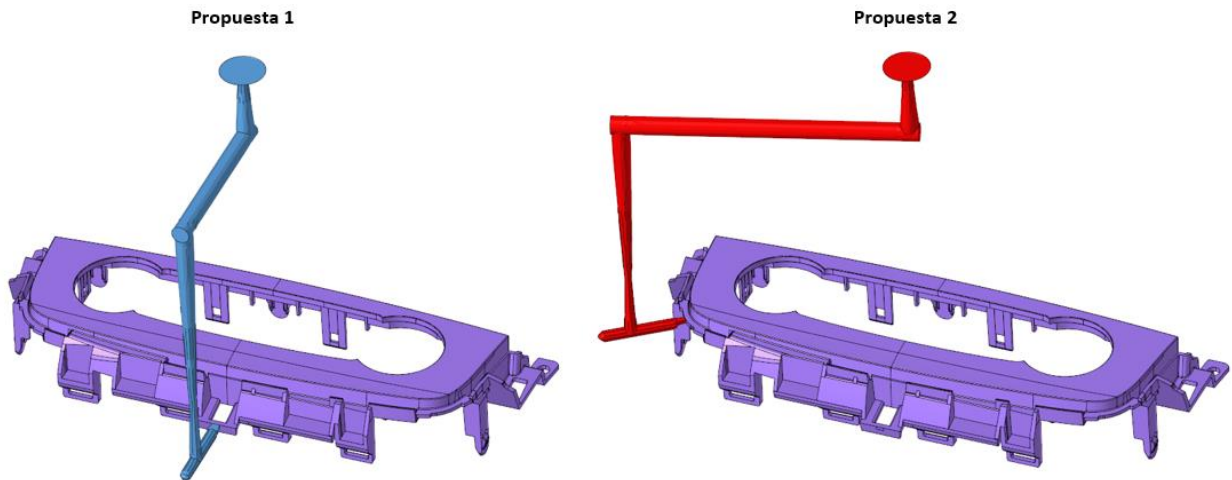


Figura 35. Propuestas de canal de inyección.

En la Figura 36, se puede observar la posición de los puntos de inyección desde una vista frontal, es importante mencionar que la forma y la tipo de canal de inyección son de esa manera debido que se inyecta la resina en una superficie que forma parte del grosor de la parte plástica, de esta manera la marca que deja el punto de inyección no es visible para el cliente, además la forma del canal permite que la resina fluya con mayor facilidad en comparación a tener el punto de inyección perpendicular a una superficie de vista.

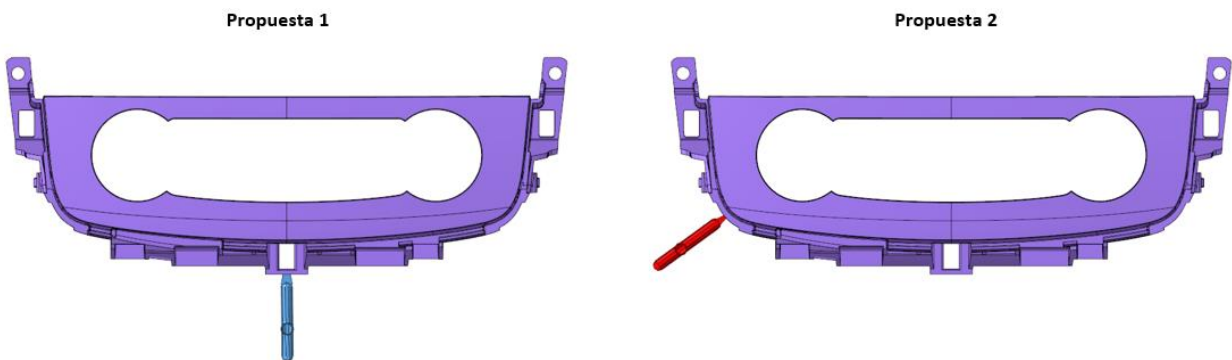


Figura 36. Posición del punto de inyección en ambas propuestas.

Esta parte plástica está compuesta por un material llamado MC8002, la característica de este material es que es poco flexible, su forma es similar a un acrílico, es decir es un material rígido pero frágil, si se cae puede fracturarse con relativa facilidad. Las propiedades de este plástico se pueden observar en la Tabla 28.

Tabla 28. Propiedades del material MC8002.

Concepto	Valor	Unidad
Densidad	1.14	g/cc
Índice de flujo de resina	9	g/10 min
Módulo de Flexión	2343.8	MPa
Temperatura de la resina	275 – 300	°C
Temperatura del molde	60 – 90	°C
Límite Elástico	56	MPa

Lo siguiente por definir es la máquina que se utilizará para la inyección de la parte plástica, de acuerdo al tamaño de la pieza, el departamento de ingeniería propuso la máquina Toshiba IS220GN, ya que esta máquina se tiene en la planta de producción y tiene la capacidad que requiere el molde inyección. En la Tabla 29 se muestran las especificaciones de este modelo de máquina.

Tabla 29. Especificaciones de máquina de inyección.

Concepto	Valor	Unidad
Diámetro del tornillo	50	Mm
Carrera del tornillo	250	Mm
Peso de inyección	450	G
Presión de inyección	201	MPa
Tasa de inyección	250	cc/s
Fuerza de cierre	220	Tf

Para confirmar que la máquina puede inyectar el volumen requerido por la parte plástica, se va a calcular de acuerdo a las especificaciones antes mencionadas. En la Figura 37 se muestra el volumen en mm³ que tiene la pieza.



Figura 37. Volumen de la parte plástica.

Lo siguiente es calcular la capacidad de la máquina y para ello se conoce el diámetro del tornillo que es de 50mm y tiene una carrera de 250mm. El volumen se calcula con la siguiente formula:

$$V = \pi r^2 h \quad (\text{Ec. 11})$$

$$r = \frac{d}{2} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

r = radio del tornillo

d = diámetro del tornillo

V = volumen (mm³)

h= carrera del tornillo

Entonces la formula queda de la siguiente manera:

$$V = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h \quad (\text{Ec. 13})$$

$$V = \pi \left(\frac{50}{2}\right)^2 (250) \quad (\text{Ec. 14})$$

$$V = 490,873.9 \text{ mm}^3$$

De esta manera se confirma que la máquina tiene la capacidad de inyectar la parte plástica ya que el volumen de inyección es superior al volumen de la parte plástica.

Es el turno de definir los parámetros de inyección en el software, existen dos maneras de realizar el estudio, la primera de ellas y más sencilla es considerar los parámetros de inyección por default pero la desventaja es que los resultados son cualitativos y probablemente no sean aproximados a los resultados reales. La segunda opción es hacer el cálculo de los parámetros de inyección, sin embargo el cálculo de los mismos es empírico, existen unas fórmulas que permiten hacer aproximaciones a los parámetros de inyección pero esto no garantiza que sean las mejores condiciones, es decir, dichos cálculos solo permiten determinar condiciones iniciales para los parámetros de inyección y luego se van ajustando mediante pruebas en piezas prototipo hasta controlar el proceso.

El cálculo de los parámetros de inyección dependerá del tipo de punto de inyección, en este caso está localizado en un borde la pieza, en la Figura 38 se muestra una imagen que representa el modelo para este tipo de punto de inyección.

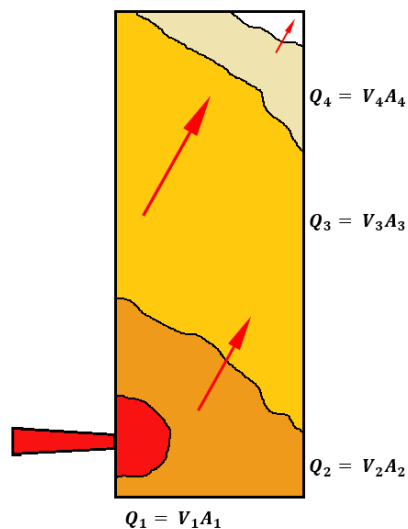


Figura 38. Representación del modelo de inyección.

Como se puede observar en la Figura 38, el punto de inyección está localizado a un costado de la pieza permitiendo que la resina fluya fácilmente sobre la cavidad del molde. El flujo se calcula de acuerdo a la velocidad de inyección por el área.

$$Q_1 = V_1 A_1 \quad (\text{Ec. 15})$$

En general:

$$A_1, A_4 < A_2, A_3 \quad (\text{Ec. 16})$$

Si se desea mantener un flujo constante entonces:

$$Q_1 = V_1 A_1 = V_2 A_2 = V_3 A_3 = V_4 A_4 \quad (\text{Ec. 17})$$

$$V_1, V_4 > V_2, V_3 \quad (\text{Ec. 18})$$

En cambio sí es un flujo variable entonces:

$$Q_1, Q_4 < Q_2, Q_3 \quad (\text{Ec. 19})$$

En la Figura 39 se muestra una gráfica que representa el comportamiento del flujo de inyección respecto el tiempo o la posición, este comportamiento permitirá controlar el proceso de inyección en la etapa de llenado.

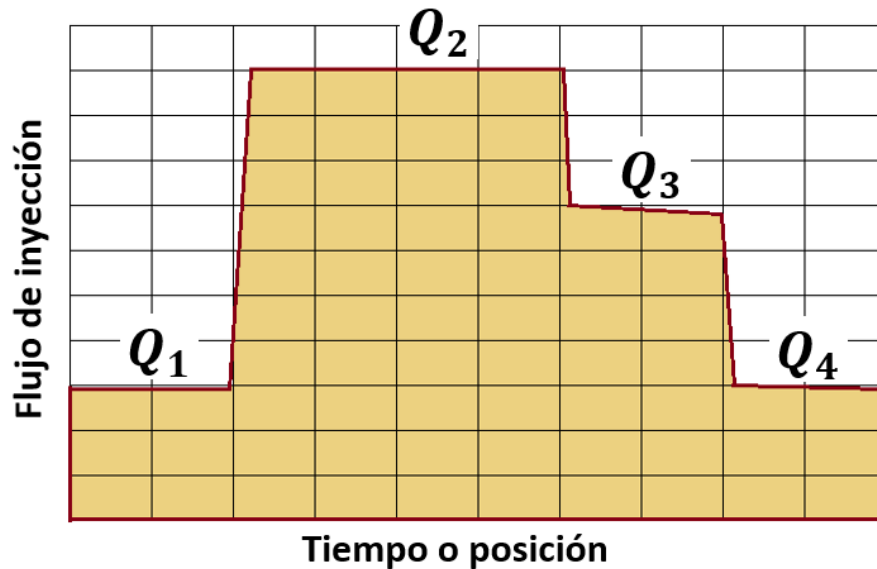


Figura 39. Grafica del comportamiento del flujo de inyección en la etapa de llenado.

De acuerdo a la gráfica que se muestra en la Figura 39, el comportamiento del flujo de inyección es variable, al tener un flujo bajo en Q_1 se evita que la resina entre muy rápido al molde, de no ser así se pueden presentar problemas de mala apariencia ya que se notarían las líneas del flujo de inyección en el producto final, enseguida se incrementa el flujo de inyección en Q_2 para que la parte plástica se llene a mayor velocidad y como la resina se encuentra a una temperatura muy elevada podrá fluir con relativa facilidad dentro de la cavidad del molde, en la etapa de Q_3 se baja el flujo de inyección para llegar a la etapa Q_4 , en este punto el flujo ya disminuyó considerablemente, esto ayuda a que la pieza no se sobre llene y puedan aparecer rebabas en lo que es la línea de partición del producto, además tener un flujo bajo en la última etapa ayuda a rellenar las secciones donde se pudo haber generado una burbuja.

Continuando con el cálculo de los parámetros de inyección sigue la etapa de compactación, usualmente el tiempo es entre 3 y 10 segundos cuando se tiene un espesor de la pieza menor a 3mm. En la Figura 40 se muestra una gráfica del comportamiento de la presión respecto al tiempo durante esta etapa.

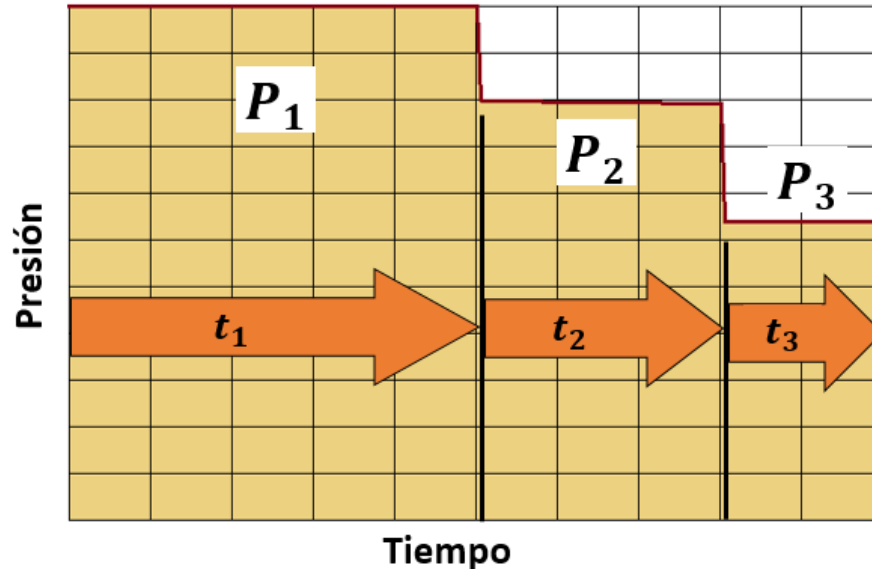


Figura 40. Gráfica para comportamiento en etapa de compactación.

En la Figura 40 se muestra el comportamiento que tiene la presión respecto al tiempo, en este ejemplo se observa que son 3 etapas, por lo tanto el cálculo del tiempo es de la siguiente manera:

$$t_1 = \frac{1}{2}t_p \quad t_2 = \frac{1}{3}t_p \quad t_3 = \frac{1}{6}t_p \quad (\text{Ec. 20, 21, 22})$$

Donde t_p es el tiempo total de compactación.

En caso de que solo fueran dos etapas para la compactación, entonces el cálculo sería:

$$t_1 = \frac{2}{3}t_p \quad t_2 = \frac{1}{3}t_p \quad (\text{Ec. 23, 24})$$

La presión está en función de la velocidad de enfriamiento.

Finalmente en la Figura 41 se muestra el comportamiento de la presión durante todo el proceso de inyección, el importante asegurar que el punto de cambio entre la etapa de llenado (control de velocidad de inyección) y compactación (control de presión de inyección) se haga una transición suave. Lo recomendable para que se dé el punto de cambio entre las etapas es entre el 95% y 98% del volumen de llenado de la parte plástica.

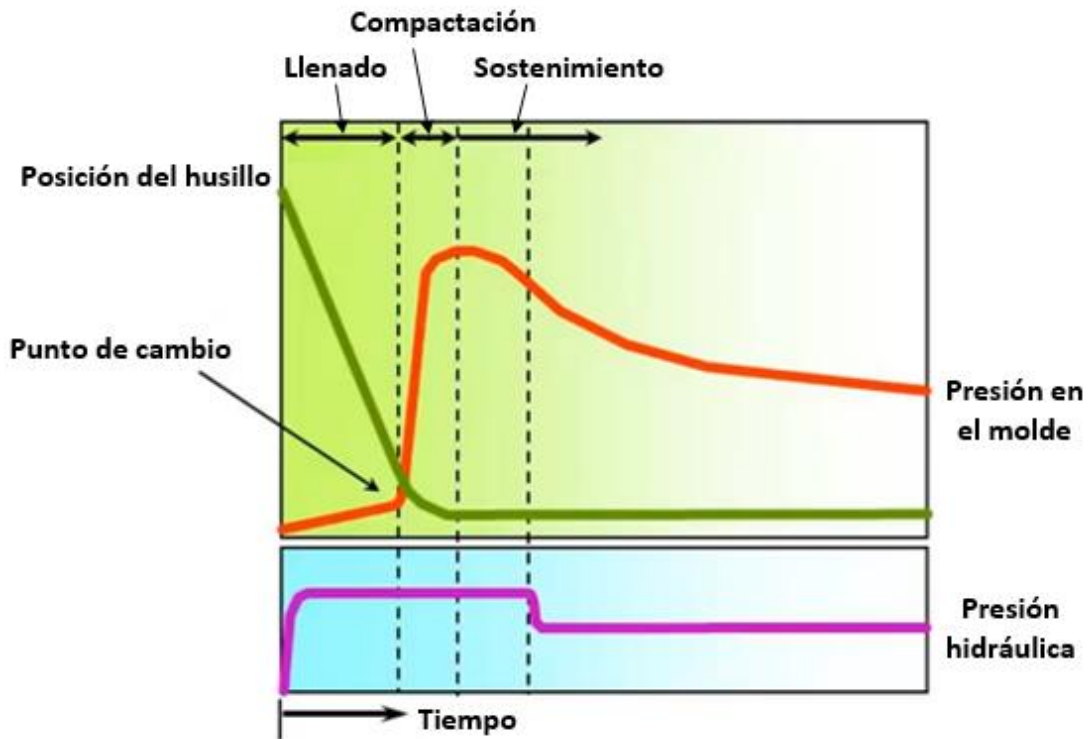


Figura 41. Gráfica del proceso completo de inyección.

En la etapa de enfriamiento existe una ecuación que determina el tiempo mínimo teórico de enfriamiento, en base a esa ecuación se realizó una tabla que indica el tiempo de enfriamiento recomendado según el tipo de plástico usado y el espesor general de la pieza. En la Tabla 30 se muestra la información, sin embargo, el tiempo de enfriamiento utilizado puede ser modificado de acuerdo a pruebas físicas que se realicen en piezas prototipo con la finalidad de mejorar el proceso.

Tabla 30. Tiempos de enfriamiento recomendados.

Plásticos	Tiempo de enfriamiento (seg) por espesor de la parte plástica (mm)														
	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5	3.0	3.75	4.5	5.0	5.5	6.25
ABS	-	1.8	2.9	4.1	5.7	7.4	9.3	11.5	13.7	18.8	28.5	40.1	49	58.3	75
PA	-	2.5	3.8	5.3	7	8.9	11.2	13.4	15.9	21.5	32	44.5	53.9	63.9	80.8
HDPE	1.8	3	4.5	6.2	8	10	12.5	14.7	17.5	23.5	34.5	47.7	57.5	67.9	85
LDPE	-	2.3	3.5	4.9	6.6	8.4	10.6	12.8	15.2	20.7	30.9	43.2	52.4	62.1	79
PP	1.8	3	4.5	6.2	8	10	12.5	14.7	17.5	23.5	34.5	47.7	57.5	67.9	85
PS	1.0	1.8	2.9	4.1	5.7	7.4	9.3	11.5	13.7	18.9	28.5	40.3	49	58.3	75
PVC	-	2.1	3.3	4.6	6.3	8.1	10.1	12.3	14.7	20	30	42.2	51.1	60.7	77.5

El Refrigerante utilizado puede ser agua o aceite mineral, en el caso del agua pueden ser temperaturas entre 10 a 80 °C y para aceite pueden temperaturas entre 0 a 200°C. En la Tabla 31 se muestran los valores de flujo recomendados dependiendo del diámetro de la línea de enfriamiento.

Tabla 31. Flujo recomendado para las líneas de enfriamiento.

Diámetro del canal de enfriamiento D(mm)	Tasa de flujo del Agua Q(cc/s)	Tasa de flujo del aceite mineral Q(cc/s)
5	16	46
8	26	74
10	32	92
12	38	110
14	45	129
15	48	138
20	64	184
25	80	230
30	96	276

En este caso fue el departamento de ingeniería quien proporcionó toda la información de los parámetros de inyección, en la Tabla 32 se muestran los parámetros utilizados para la simulación de flujo de inyección.

Tabla 32. Parámetros de inyección para la parte plástica.

Concepto	Valor			
Temperatura de la resina	270 °C			
Temperatura del molde	50°C			
Velocidad de inyección (%)	24	6	30	18
Posición (mm)	47.5	45	14	6.5
Punto de cambio (mm)	6.5			
Presión de compactación (%)	90	60	45	
Tiempos de compactación (seg)	5	1.5	0.5	
Tiempo de enfriamiento (seg)	18			
Fuerza de sujeción (Tf)	220			

Simulación 1

Al realizar la simulación de la propuesta 1 de la posición del canal de inyección al centro de la parte plástica, se tiene como resultado que la línea de unión se presenta al centro de la pieza, en la Figura 42 se observan los resultados obtenidos.

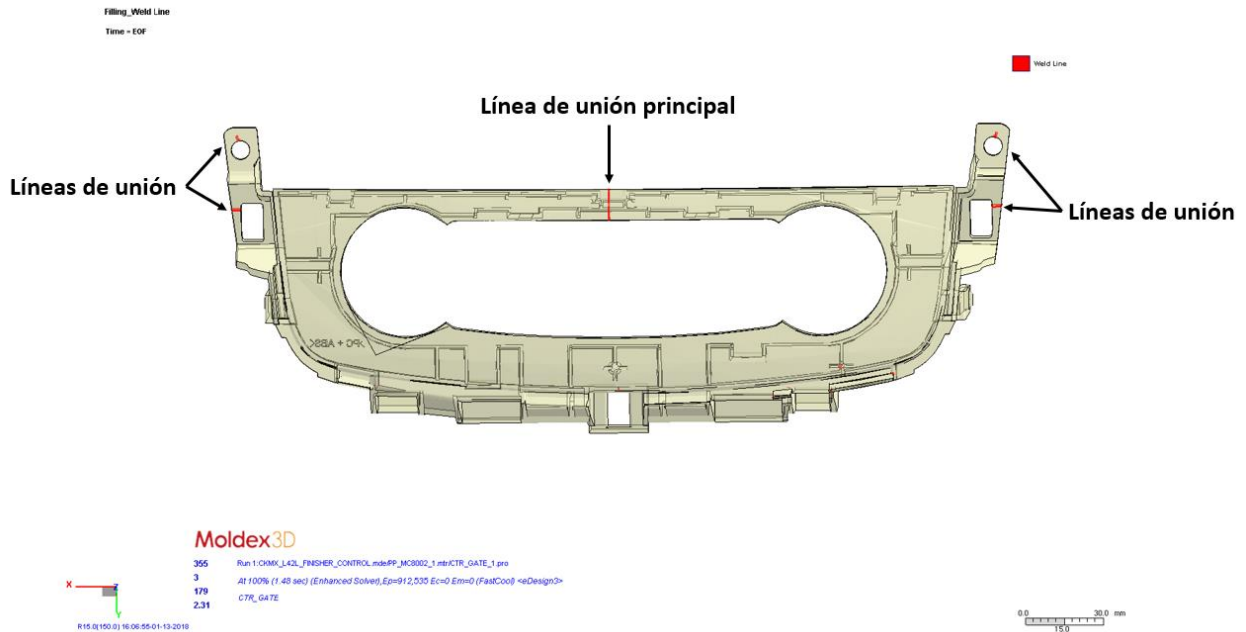


Figura 42. Línea de unión con el punto de inyección al centro de la pieza.

Los ángulos de unión que se presentaron están cerrados, se encuentran en un rango entre 70° y 80° , lo cual no es recomendable ya que esto podría generar un defecto de calidad por mala apariencia en la parte plástica. En la Figura 43 se muestran los resultados.

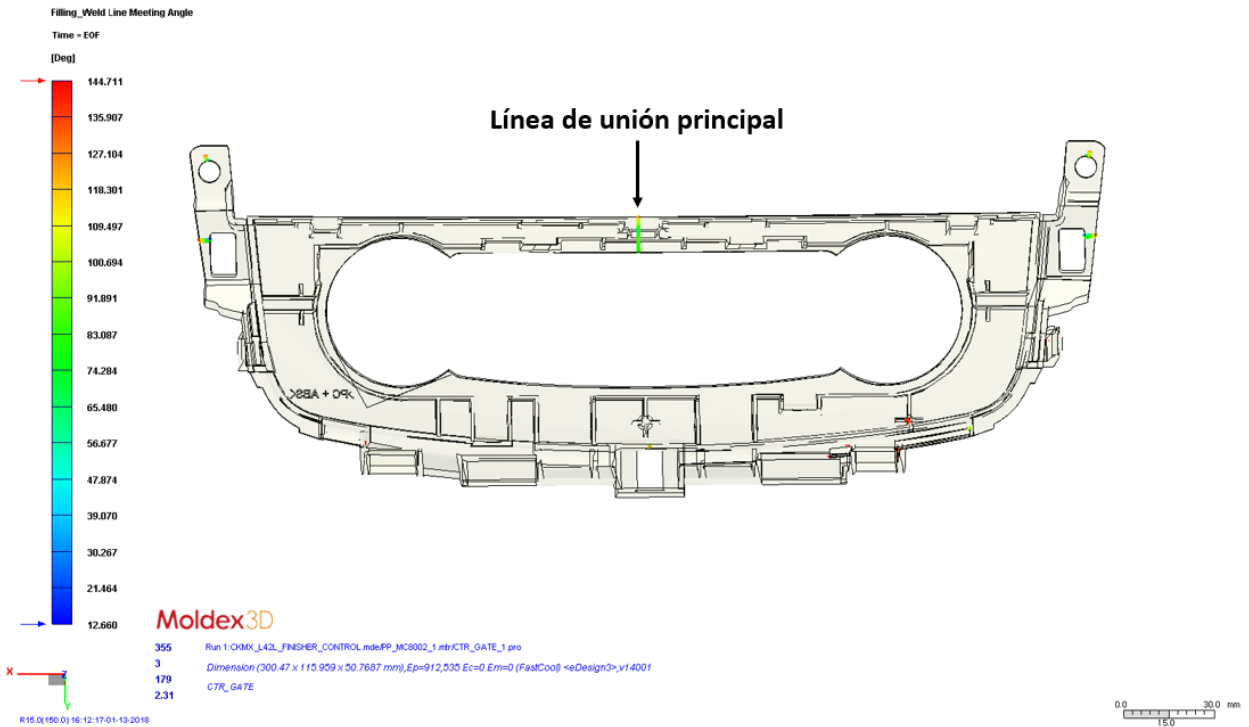


Figura 43. Ángulos de unión.

Estos resultados muestran que la posición del punto de inyección puede generar problemas de calidad debido a mala apariencia ya que la soldadura o línea de unión principal se encuentra al centro de la pieza y con ángulos de unión cerrados, se puede interpretar que los flujos de la resina colisionan al centro de la pieza lo cual podría provocar una marca visible en el producto final.

Simulación 2

La segunda propuesta del canal de inyección tiene una ubicación al costado de la parte plástica como se observó previamente, los resultados de la simulación se pueden observar en la Figura 44, en este caso la línea de unión principal está localizada a un costado, existen otras líneas de unión en la pieza, sin embargo se encuentran en zonas no visibles para el usuario.

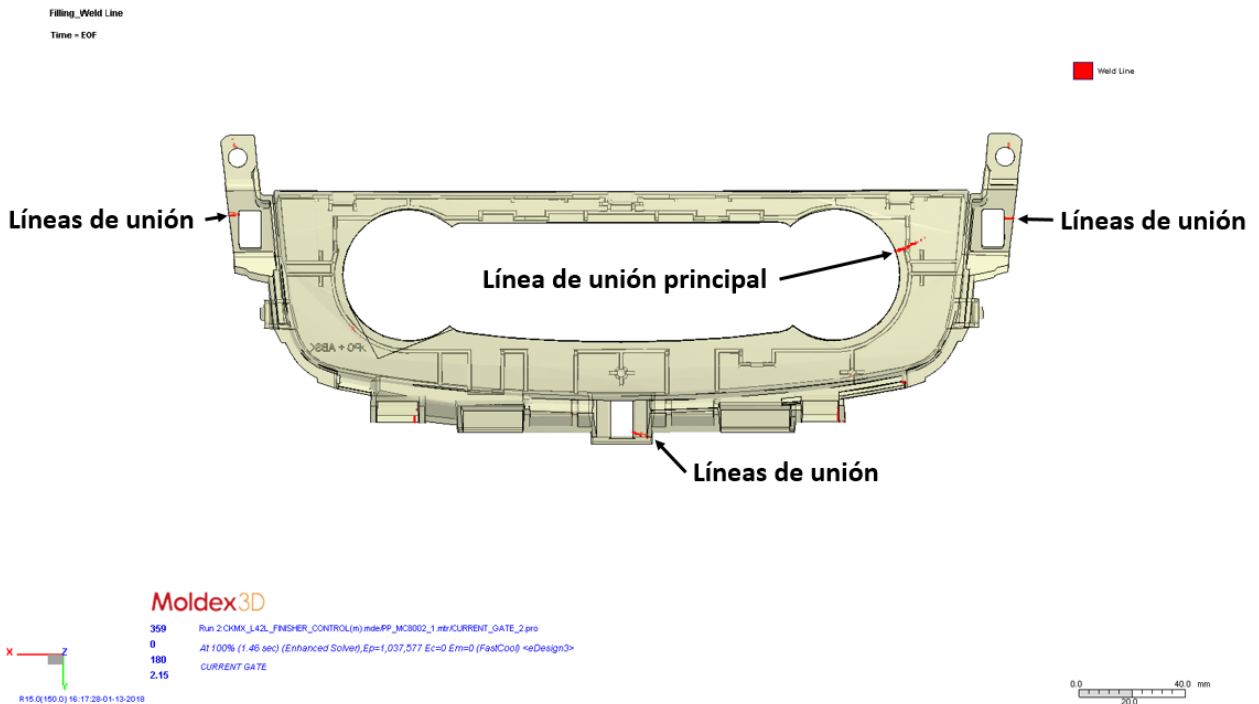


Figura 44. Posición de la línea de unión para la propuesta 2.

Respecto al ángulo de unión se encuentra en un rango entre 100° y 110° , es decir el ángulo es más amplio y crece conforme de unen los flujos, es decir los flujos se unen suavemente hasta formarse uno solo para continuar el llenado de la parte plástica. Esta condición es favorable para el producto ya que existe menos probabilidad de que exista alguna marca que pueda representar un defecto de calidad por mala apariencia. En la Figura 45, se muestran los resultados obtenidos.

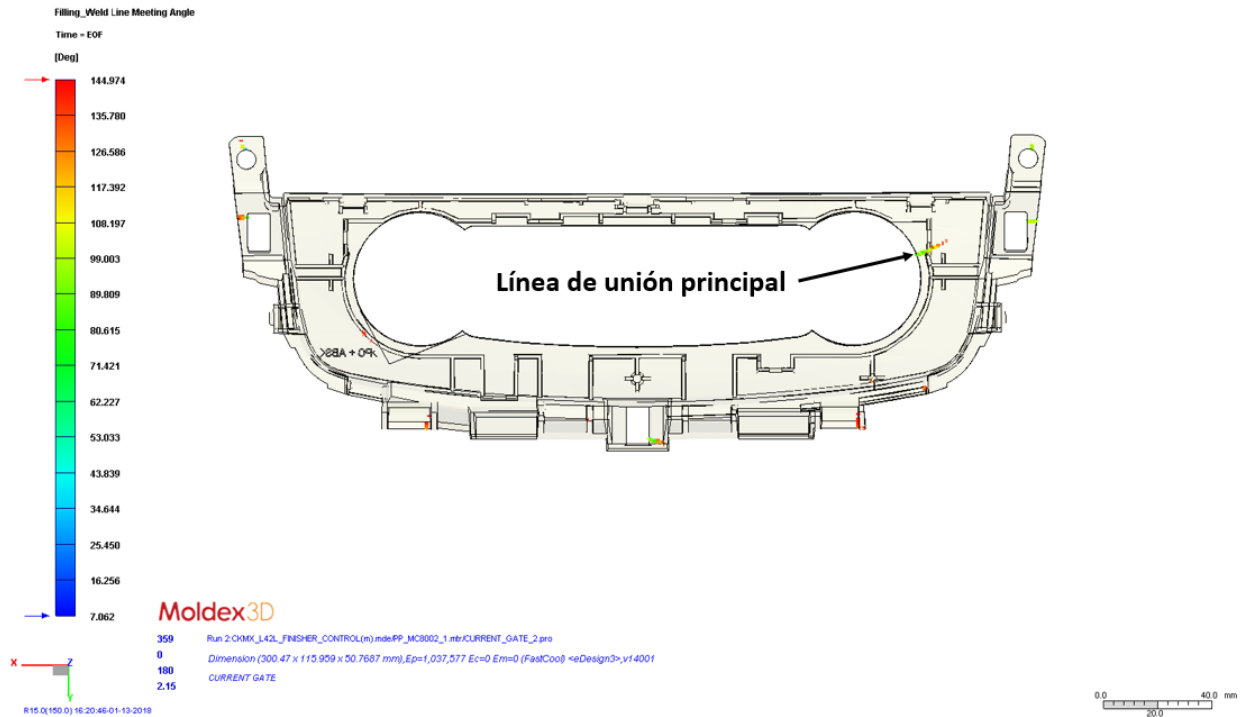


Figura 45. Ángulos de unión para la línea de unión de la propuesta 2.

Los resultados obtenidos en la segunda simulación son mejores que la primera simulación debido a que la transición de los flujos de la resina es más suave y se desvanece en un único flujo, permitiendo que sea menos visible la línea de unión, además como sigue existiendo una porción de la parte plástica por llenarse da oportunidad a cualquier turbulencia o anomalía generada en la unión de la resina se regularice con el flujo que sigue existiendo para llenar la pieza completamente.

Interpretación de resultados para la simulación de la parte plástica en desarrollo.

Estas simulaciones realizadas a la parte plástica permiten al ingeniero de diseño encargado del desarrollo del producto tener una mayor confianza en que el producto tendrá la calidad requerida ya que con los resultados obtenidos puede justificar y validar la ubicación del canal de inyección porque le permiten controlar la línea de unión en un área y con un desempeño óptimo asegurando que en la producción del producto este problema no se presentará durante el proceso de inyección.

CONCLUSIONES

- La implementación de los análisis de inyección por medio del método de elemento finito aplicado a las partes plásticas puede mejorar el proceso de inyección actual cuando se tienen problemas de calidad debido a diferentes factores, como el diseño del producto, diseño del molde, parámetros de inyección, inclusive debidos a la máquina de inyección.
- El análisis de inyección de plástico ayuda tanto a las piezas que se encuentran en producción, como a los nuevos productos porque se puede validar el diseño de la parte plástica desde una temprana etapa de desarrollo.
- El método de Taguchi y las simulaciones de inyección de plástico permitieron encontrar y validar las mejores condiciones de inyección con los factores propuestos al mejorar los resultados del proceso.
- Al implementar un diseño de experimentos por el método de Taguchi y realizando simulaciones de inyección de plástico se encontró los mejores parámetros de inyección que mejoran el proceso un 41.4% respecto a la deformación que sufre la pieza.
- De acuerdo a los resultados obtenidos se observó que el incremento de la presión de inyección no afectó los resultados de deformación de la parte plástica.
- La temperatura de la resina permite que fluya el proceso de inyección sea más balanceado y en este caso se estudió el incrementar la temperatura a 200°C dio como resultado una mejora en la deformación de la parte plástica.
- El tiempo de enfriamiento de 20 segundos fue el mejor parámetro para reducir la deformación de la parte plástica, este tiempo fue suficiente para solidificar la resina y obtener un buen resultado, considerar 5 segundos adicionales al tiempo de enfriamiento no mejoraba los resultados.
- Por medio del análisis de inyección de plástico se logró definir la mejor ubicación del canal de inyección para evitar problemas de calidad debido a mala apariencia en zonas visibles para el cliente. Las simulaciones permiten observar el comportamiento y control de la línea de unión de los flujos de resina dentro del molde.
- Es posible evaluar el diseño de una parte plástica que se encuentra en desarrollo, se pueden definir y controlar condiciones de inyección antes de llegar a la etapa de producción.

- El análisis de inyección de plástico permite mejorar los procesos de fabricación de productos plásticos, implementar estos análisis en la empresa ayuda a mejorar la calidad de los productos y la rentabilidad de fabricación.

APORTACIÓN DE LA TESIS.

La industria automotriz se desarrolla rápidamente y cada vez son más sorprendes los desarrollos tecnológicos que se ven en los vehículos, día con día se trabaja para hacer los automóviles más seguros, cómodos e interconectados con dispositivos móviles y a redes de internet, sin olvidar que la industria automotriz se mueve a favor del medio ambiente y debido a esto existen grandes desarrollos para hacer los vehículos más eficientes al combinar o cambiar los combustibles o energías, tal es el caso de los vehículos híbridos y eléctricos.

La industria automotriz no es la única que se encuentra en desarrollo, al observar nuestra vida diaria podemos observar que todo está cambiando y mejorando rápidamente, si se observa detalladamente también podemos darnos cuenta que cada vez estamos más rodeados de productos plásticos, es claro darse cuenta que conocer los procesos de fabricación de este material ayudará a cualquier industria ya sea en sus procesos actuales o en desarrollos futuros, la implementación de estudios de análisis de inyección de plásticos por medio de elemento finito ayudará a tener un mejor aprovechamiento de la materia prima al poder controlar los procesos de producción desde antes de implementarse físicamente.

Esta investigación sirve para comprobar que la implementación del análisis de inyección de plástico por medio de elemento finito es una herramienta que puede mejorar los procesos y la calidad de los productos plásticos. Es conveniente mencionar que este estudio sirvió como base para entender el proceso de inyección y aprender cómo realizar el análisis a piezas que se encuentran en etapa de diseño o incluso que ya están en producción masiva, sin embargo es importante mencionar que los resultados obtenidos en esta investigación pueden no ser los mejores para otro producto plástico, dependerá del problema que se presente o los requerimientos que se deban cumplir para poder evaluar los factores correctos. Es decir, si se desea implementar el análisis de inyección de plástico a un producto diferente al de este estudio, es conveniente realizar un diseño de experimentos en base al método de Taguchi con los factores y niveles que puedan tener mayor influencia en los resultados que se buscan. En general los pasos para realizar el análisis serán los mismos, solo cambiará la información correspondiente al producto (pieza, molde, máquina), y los parámetros de inyección pueden ser diferentes también.

RECOMENDACIONES

Los resultados de esta investigación sirven para incentivar el uso del software Moldex3D en los análisis de inyección de plástico para cualquier producto que sea fabricado en una máquina de extrusión de plástico, ya que permite simular el proceso completo de inyección. El software permite evaluar la etapa de llenado, compactación y enfriamiento, dentro de cada etapa se pueden observar diferentes resultados como pueden ser presiones durante el llenado, temperaturas de la resina durante todo el proceso, el comportamiento del llenado, analizar la línea de unión y los ángulos de la unión del flujo de la resina, así como también se pueden analizar burbujas atrapadas, marcas tipo rasguño que se pueden presentar en la pieza debido al espesor que tiene la parte plástica en algunas zonas de la misma pieza o por el flujo de la resina que sigue dentro del molde, entre otros resultados más. Es decir es un potente software que puede ser utilizado para observar el comportamiento del flujo de inyección tanto para piezas de producción que pueden llegar a tener defectos de calidad así como también para piezas que están en etapa de diseño y se desea asegurar que el proceso de inyección no presentará problemas cuando llegue a producción.

Al considerar todas las variables que influyen en el proceso de inyección se pueden tener resultados más precisos, para ello es necesario contar con el modelo tridimensional del producto, el modelo tridimensional del molde, la hoja técnica del material, la hoja técnica de la máquina y la hoja con los parámetros de inyección ya que con toda esta información se pueden simular las condiciones reales que se tienen en la producción de un producto plástico.

Se recomienda implementar el análisis de inyección de plástico para todos los productos manufacturados en la empresa ya que de esta manera se pueden mejorar los procesos, ahorrar costos de fabricación al reducir defectos de calidad y hacer más eficientes los procesos de inyección en la empresa, a su vez, se puede ir ganando experiencia en este tipo de análisis y en base a los resultados se pueden ir creando estándares en el diseño de los productos y en la configuración de los parámetros de inyección, de esta manera cada vez será más fácil encontrar la solución a los defectos de calidad que se puedan presentar en los productos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. The role of electric vehicles for supply chain sustainability in the automotive industry. H.O., Günther. s.l. : Journal of cleaner production., 2014.
2. A sustainable assesment of electric vehicles as a personal mobility system. Faria R., Moura P., Delgado J., de Almeida A.T. Coimbra, Portugal : Energy Conversion and Management, 2012, Vol. 61.
3. Evaluating the potential for secondary mass savings in vehicle lightweighting. Alonso E., Lee T.M., Bjelkengren C., Roth R., Kirchain R.E. Massachusetts : Enviromental Science & Technology, 2012, Environmental Science & Technology, Vol. 46.
4. Life-cycle energy and greenhouse gas emission benefits of lightweighting in automobiles: review and harmonization. Kim H.C., Wallington T.J. 12, Michigan : Systems Analytics and Enviromental Sciences Department, 2013, Environmental Science & Technology, Vol. 47.
5. The impact of the chinese automotive industry: Scenarios based on the National Environmental Goals. Yijie Liu, Yi Liu. 1, Beijing, China : Journal of Cleaner Production, 2015, Journal of Cleaner Production, Vol. 96.
6. Bring back the steel? The growth of plastics in automotive applications. Ryntz, Rose A. 1, s.l. : JCT Research, 2006, Vol. 3.
7. Enhancement of accuracy of automotive crash analysis for plastic material parts. Ichinose, N. Nagoya : International Polymer Science and Technology, 2016, Vol. 12.
8. Spiral and Conformal Cooling in Plastic Injection Molding. Yu Wang, Kai-Min Yu, Charly C.L. Wang. Hong Kong : Computer-Aided Design, 2015, Computer-Aided Design, Vol. 63.
9. Visibility-based conformal cooling channel generation for rapid tooling. Chiu, K.M. Au. K.M. Yu. W.K. 4, Hong Kong : Computer-Aided Design, 2011, Computer-Aided Design, Vol. 43.
10. Dimensional accuracy optimization of the micro-plastic injection molding process using the Taguchi Design Method. Chil-Chyuan KUO, Hsin-You LIAO. 2, New Taipei City, Taiwan : Materials science, 2015, Vol. 21.
11. Test method development for deformation analysis of injection moulded plastic parts. J.G. Kovács, B. Sikló. s.l. : Polymer Testing, 2011, Polymer Testing, Vol. 30.
12. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. Hasan Oktem, Tuncay Erzurumlu, Ibrahim Uzman. 4, Kocaeli, Turkey : Materials and Design, 2007, Materials and Design, Vol. 28.

13. A procedure for plastic parts demoldability analysis. M.A. Rubio Paramio, J.M. Perez Garcia, J. Rios Chueco, A. Vizan Idoipe, J.J. Marquez Sevillano. 1, Madrid, España : Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 22.
14. A principal Component analysis model-based predictive controller for controlling part warpage in plastic injection molding. Songtao Zhang, Rickey Dubay, Meaghan Charest. 6, New Brunswick, Canada : Expert Systems with Applications, 2014, Expert Systems with Applications, Vol. 42.
15. Heating/cooling channels design for an automotive interior part and its evaluation in rapid heat cycle molding. Gui-long Wang, Guo-qun Zhao, Xiao-xin Wang. Shandong, China : Materials and Design, 2014, Materials and Design, Vol. 59.
16. Challenges and Alternatives to Plastic Recycling in the Automotive Sector. Lindsay Miller, Katie Soulliere, Susan Sawyer-Beaulieu, Simon Tseng, Edwin Tam. Windsor, Canada : Materials, 2014, Vol. 8.
17. Grey based Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead-on-plate welding. Datta, Saurav, Bandyopadhyay, Asish y Kumar, Pal Pradip. 11-12, s.l. : International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2008, Vol. 39.
18. General frameworks for optimization of plastic injection molding process parameters. Dang, Xuan-Phuong. 15-27, s.l. : Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, Vol. 41.
19. Fault Diagnosis in Injection Molding via Cavity Pressure Signals. Alexander Suraj M, Jin Zhang. University of Louisville : International Journal of Production Research, 2008, Vol. 46.
20. Recent methods for optimization of plastic injection molding process - A retrospective and literature review. P.K. Bhari, M. I. Khan, Harbinder Singh. India : s.n., 2012.
21. Optimization of machining techniques A retrospective and literature review. Aggarwal, Aman y Singh, Hari. 6, s.l. : Sadhana, 2005, Vol. 30.
22. Artificial Neural Network Based Model for Computation of Injection Mould Complexity. Raviwongse, Rawin y Allada., Venkat. 8, s.l. : International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, Vol. 13.
23. Optimization of injection molding process for contour distortions of polypropylene composite components by a radial basis neural network. Shie, Jie-Ren. 11-12, s.l. : International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, Vol. 36.

24. Fuzzy neural network-based in-process mixed material-caused flash prediction in injection molding operations. Zhu, Jie y Joseph, C. Chen. 3-4, s.l. : International Journal of Manufacturing Technology, 2006, Vol. 29.
25. A Genetic Algorithm for Multiobjective Robust Design Kluwer. B., Forouraghi. 3, s.l. : Kluwer Academic Publishers, Applied Intelligence, 2000, Vol. 12.
26. Prediction of sink depths using nonlinear modeling of injection molding variables. Mathivanan, D. y Parthasarathy, N. S. 7, s.l. : International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, Vol. 43.
27. Design of runner and gating system parameters for a multi-cavity injection mould using FEM and neural network. Lee, K.S y Lin, J.C. 11-12, s.l. : International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, Vol. 27.
28. Influence of processing parameters on micro injection molded weld line mechanical properties of polypropylene. Lei, Xie y Gerhard, Ziegmann. 9, s.l. : Microsystem Technologies, 2009, Vol. 15.
29. García, Karla Aleandra Rodriguez. Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de la pasta de cemento fabricadas a partir de adsorbentes saturados con metales pesados. Aguascalientes : s.n., 2015.
30. Optimal cooling system design for multicavity injection molding. LQ Tang, C Chassapis, S Manoochehri. 3, s.l. : Finite Elements in Analysis and Design, 1997, Vol. 26.
31. D, Kazmer. Injection Mold Design Engineering. Munich : Hanser, 2007.
32. Optimization of the injection molding process parameters based on mold flow and orthogonal experiment. Nie Y., Zhang H.M., Niu J.T. s.l. : Key Engineering Materials, 2013, Key Engineering Materials.
33. A sustainable assesment of electric vehicles as a personal mobility system. Faria R., Moura P., Delgado J., de Almeida A.T. Coimbra, Portugal : Energy Conversion and Management, 2012, Energy Conversion and Management., Vol. 61.
34. Blind separation of manufacturing variability with independent component analysis: A convolutive approach. Gandini M., Lombardi F., Vaccarino F. 8, Torino, Italia : Expert System with Applications, 2011, Expert Systems with Applications, Vol. 38.
35. The role of electric vehicles for supply chain sustainability in the automotive industry. H.O. Günther, M. Kannegiesser, N. Autenrieb. Seoul, Republica de Korea : Journal of Cleaner Production, 2015, Journal of Cleaner Production, Vol. 90.

36. Optimization of injection molding process by MPX. M. Stanek, D. Manas, M.M., Suba
O. 5, s.l. : International Journal of Mathematics and Computer in Simulation, 2011,
International Journal of Mathematics and computers is simulation, Vol. 5.

ANEXOS



Advanced Composites, Inc.
1062 S. 4th Avenue, Sidney, Ohio 45365 Phone: (937) 492-9187 Fax: (937) 498-4837

Preliminary Data Sheet

ADX-1258

High Stiffness, High Impact Polypropylene

Physical Properties ¹	Test Method	Unit	Typical Value
Melt Flow Index	ISO 1133	g/10min	24
Specific Gravity	ISO 1183	-	1.045
Tensile Properties			
Yield Strength	ISO 527	MPa	21
Elongation at Break		%	40
Flexural Properties			
Strength	ISO 178	MPa	31
Modulus		MPa	2,100
Notched Izod Impact			
23°C	ISO 180	kJ/m ²	35
-30°C		kJ/m ²	4.5
Heat Deflection Temp.			
0.45 MPa	ISO 75	°C	110

ADX-1258

START-UP RECOMMENDATIONS

Barrel Temperatures

Nozzle	C4	C3	C2	C1
400°F (205°C)	420°F (215°C)	390°F (200°C)	355°F (180°C)	340°F (170°C)

For harder to fill parts the temperatures may have to be increased. Keep lower temperatures in the rear zones to allow venting through hopper.

Melt Temperature

Maximum temperature with a hand pyrometer should be 365°F to 440° F (185°C to 225°C).

Mold Temperature

Typically 80 to 120°F (25°C to 50°C).

Injection Pressure

The preferred range is 20 to 60% of machine capacity. Pressure should be sufficient to fill the mold without hesitation or flashing.

Holding Pressure

Setting should be lower than boost pressure with a minimum amount of time to prevent over-packing of the part.

Injection speed

Slow to medium speed to prevent excessive shear on the material.

Cushion

Maintain at 0.20-0.40" (5-10 mm) to provide enough material for consistent parts.

Decompression

Use only when necessary to prevent nozzle drool.

Screw RPM

Screw should stop 1 to 2 seconds before mold open. A lower RPM is preferred for mixing and uniform melt temperature.

Drying

Material should be dried at a minimum of 2 hours and maximum 4 hours at 180° F (82°C).

Disclaimer: The user assumes all risk and liability concerning the use of these recommendations.

Issue Date: 7/24/14

Rev Level:0

Author: Steve Osminski