

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención Fabricación de Autopartes de Vehículos

Análisis del proceso de construcción del molde para la cubierta de guardachoque mediante la técnica de herramienta rápida moldeo por resina

Luis Javier Taipe Yugcha

Nota del autor

Luis Javier Taipe Yugcha, Facultad de Ingeniería Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.

Directora Ing. Diana Belén Peralta Zurita, MSc.

Codirector Ing. Jaime Molina, MSc.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

ltaipe.mdm@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, LUIS JAVIER TAIPE YUGCHA, con cédula de identidad N°. 050291922-8, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

LUIS JAVIER TAIPE YUGCHA
C.I.: 050291922-8

Índice

Lista de Figuras6

Lista de tablas9

Resumen..... 10

Abstract 11

Introducción 12

 Antecedentes12

 Planteamiento del problema.....13

 Justificación14

 Estudio del arte16

 Guardachoques para vehículos 16

 Moldes y matrices 18

 Rapid tooling.....20

 Moldeo por resina22

 Moldes para materiales compuestos24

 Moldes compuestos.....25

 Moldes GRP.....26

 Proceso de estratificación o laminado manual.....27

 Matrices termoestables.....28

 Resinas poliéster28

 Fibra de vidrio.....30

 El gelcoat30

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

Efectos de la manufactura en las superficies	31
Acabado superficial de clase A.....	32
Control del acabado superficial	32
Método	37
Tipo de estudio.....	37
Metodología	37
Fabricación del molde mediante laminación manual por contacto.....	38
Proceso de copiado de la geometría del modelo del guardachoque.....	40
Obtención del modelo CAD del molde.....	43
Verificación de dimensiones mediante comparación del modelo CAD y el molde obtenido	50
Verificación de la afectación al acabado superficial del molde por efectos del desmolde continuo.....	52
Resultados	54
Obtención del molde del guardachoque por contacto.....	54
Modelo CAD del guardachoque original.....	57
Comparación del modelo CAD con el modelo escaneado.....	59
Verificación del acabado superficial.....	65
Discusión de resultados.....	66
Selección de materiales.....	66

Proceso de copiado del guardachoque mediante la técnica de <i>rapid tooling</i> moldeo por resina	66
Comparación entre el molde copiado mediante escaner con el molde CAD.....	68
Análisis de los costos para construir el molde para guardachoques	69
Costos de materia prima.....	69
Costos mano de obra.....	69
Control de Calidad	70
Costo total del molde	70
Diseño de propuesta.....	71
Análisis de resultados	78
Conclusiones	81
Recomendaciones	83
Referencias bibliográficas.....	84
Anexos	86

Lista de Figuras

Figura 1. Cubierta de guardachoques delantero (Pradeep et al., 2017).16

Figura 2. Entradas en la fabricación de moldes (Cakir, Irfan, Cavdar, 2005, p. 180)19

Figura 3. Salidas en la fabricación de moldes (Cakir, Irfan, Cavdar, 2005, p. 180).....19

Figura 4. Clasificación de los métodos Rapid Tooling (Rosochowski & Matuszak, 2000).....21

Figura 5. Proceso RTM (OWENS CORNING [OCV] 2009)22

Figura 6. Esquema del proceso VARTM (OWENS CORNING, 2009).....23

Figura 7. Proceso y molde VARTM (OWENS CORNING [OCV], 2009).....23

Figura 8. Proceso de moldeo por infusión de resina (OWENS CORNING [OCV], 2009).....24

Figura 9. Esquema del proceso de moldeo manual de materiales compuestos (blogspot, 2011)
.....27

Figura 10. Fibra de vidrio para refuerzos (Campbell, 2010)30

Figura 11. Escaneo típico obtenido con un perfilómetro de superficie (Raja, 2005)32

Figura 12. Topografía de la superficie del molde (Mohammadi, Ghani, Komeili, Crawford, & Milani, 2017).....33

Figura 13. Rugosímetro (Process Instruments, 2017).....34

Figura 14. Mapa de desviación de color de la comparación de datos de escaneo de la mitad superior del molde electroformado (Atzeni, Minetola, & Salmi, 2013).....35

Figura 15. Imagen de análisis de desviación de la orientación de impresión vertical del software de modelado Geomagic 3D (Sudbury, Springfield, Kunc, & Duty, 2016).....35

Figura 16. Geomagic Verify (3DZ Franchising, 2017)36

Figura 17. Metodología.....38

Figura 18. Delimitación de aristas40

Figura 19. Aplicación de cera desmoldante41

Figura 20. Aplicación del gel coat mediante brocha.....42

Figura 21. Proceso de colocación manual de la fibra de vidrio	42
Figura 22. Vista frontal y posterior del molde resina reforzado por fibra de vidrio.....	43
Figura 23. Escáner 3D portátil (CREAFORM, ,2017)	44
Figura 24. Obtención de la topografía del guardachoque mediante escáner 3D	44
Figura 25. Interface software para edición de malla Mesh Lab (el autor)	45
Figura 26. Módulo de ingeniería inversa del programa NX	45
Figura 27. Imperfecciones de la malla en varias zonas de la imagen escaneada.....	46
Figura 28. Proceso de eliminación de la sección defectuosa en la malla	46
Figura 29. Relleno del agujero producido al eliminar la sección defectuosa de la malla (el autor).....	47
Figura 30. Textura obtenida luego del suavizado	47
Figura 31. Utilización del comando ajustar la superficie en NX.....	48
Figura 32. Algunas opciones del comando ajustar superficie en NX	48
Figura 33. Superficie construida a partir de la malla obtenido mediante un escáner 3D (El autor).....	49
Figura 34. Sólido del guardachoque obtenido mediante ingeniería inversa	49
Figura 35. Obtención de la topografía del molde construido en fibra de vidrio.....	50
Figura 36. Malla del molde obtenida mediante escaneo 3D	51
Figura 37. Interfaz del software Geomagic Verify	51
Figura 38. Muestras de resina reforzada con fibra de vidrio utilizadas para simular el molde ..	52
Figura 39. Rugosímetro	53
Figura 40. Zonas de ubicación del rugosímetro.....	53
Figura 41. Ajuste de parámetros y medición mediante el rugosímetro	54
Figura 42. Molde obtenido mediante resina poliéster reforzada con fibra de vidrio.....	55
Figura 43. Muestras de superficies copiadas mediante resina	56

Figura 44. Formas de recorte de la fibra de vidrio para solape.....	56
Figura 45. Vistas obtenidas a partir del solido obtenido mediante ingeniería inversa	58
Figura 46. Muestra de la desviación total de la pieza escaneada respecto al modelo CAD.	59
Figura 47. Desviación obtenida mediante secciónamineto horizontal.....	60
Figura 48. Desviación obtenida mediante seccionamiento horizontal lado izquierdo y derecho	61
Figura 49. Comparación y obtención de la desviacion en diferentes límites.....	61
Figura 50. Desviaciones de silueta del guardachoque	63
Figura 51. Desviaciones de silueta desde la vista lateral	64
Figura 52. Molde y pieza original.....	65
Figura 53. Propuesta para el proceso de fabricación del molde por moldeo con resina.....	72
Figura 54. Costillas implementadas para reducir la deformación del molde.....	73
Figura 55. Desviación total molde corregido.....	75
Figura 56. Desviación en la curvatura del molde	75
Figura 57. Desviación de la curvatura en vista de corte vertical	76
Figura 58. Desviación de la curvatura vista desde sección vertical derecha	76
Figura 59. Desviación de los limites de los perfiles total, rejilla y neblineros	77

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades de los materiales de herramientas típicos.....	25
Tabla 2. Vida útil de diferentes materiales de moldes.....	26
Tabla 3. Sistemas catalíticos para resinas poliéster y viniléster.....	29
Tabla 4. Materiales empleados para la fabricación del molde.....	39
Tabla 5. Formulación para preparación del gelcoat.....	41
Tabla 6. Tiempo empleado en la manufactura del molde tipo cascara.....	57
Tabla 7. Dimensiones obtenidas a partir del modelo CAD.....	58
Tabla 8. Desviación total entre el modelo CAD y la imagen escaneada del guardachoque.....	59
Tabla 9. Valores de desviación en los límites del guardachoque	62
Tabla 10. Valores de desviación de la silueta del modelo CAD respecto al molde construido..	63
Tabla 11. Valores correspondientes a las desviaciones de silueta desde la vista lateral.....	64
Tabla 12. Rugosidad medida luego de cada pasada.....	65
Tabla 13. Tiempos de trabajo para la resina poliéster.....	67
Tabla 14. Costos de materia prima del molde.....	69
Tabla 15. Costos de mano de obra para fabricacion del molde.....	70
Tabla 16. Control de Calidad.....	70
Tabla 17. Costo total del molde.....	71
Tabla 18. Nuevos valores una vez aplicadas mejoras en la fabricación del molde.....	74
Tabla 19. Procesos de moldeo.....	78
Tabla 20. Comparación de datos obtenidos antes y despues de la implementación de costillas al molde.....	79

Resumen

Como resultado del presente proyecto se definió un proceso para la obtención de moldes para guardachochos a través de la aplicación de la técnica directa de *rapid tooling* mediante la colocación manual de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio, inicialmente se fabricó un primer prototipo empleando los métodos aplicados por los artesanos del sector con el fin de verificar la calidad del producto obtenido, seguidamente se obtuvo la topografía del guardachoque mediante escaneo en tres dimensiones, luego con la ayuda de un software de ingeniería inversa se obtuvieron los planos de la pieza original, con esta información se hizo una comparación con la imagen escaneada del primer prototipo mediante un software de control de calidad, en el cual se verificaron las desviaciones dimensionales y de forma, después se comprobó la capacidad de la resina para replicar la textura de las superficies en contacto y, el desgaste que le proporciona la producción repetida de piezas mediante mediciones hechas con un rugosímetro luego de cada una de las primeras 5 piezas y después cada 5 piezas hasta un total de 20 piezas, al final de estas pruebas se concluye que la temperatura ambiental afecta tanto a la pieza original como al molde lo que provocó una diferencia entre las dimensiones del molde respecto a la pieza original de alrededor del 9%, de igual manera existió una variación entre el modelo 3D del guardachoque original y el guardachoque original real comparándolo mediante inspección visual, por otro lado se constató que la resina poliéster en la dosificación recomendada por los proveedores es capaz de reproducir la textura de la superficie al detalle y su desgaste es mínimo en un promedio de 0,1 μm por cada pasada con un adecuado proceso de tratamiento de la superficie. Finalmente se propone mejoras al proceso de obtención del molde y aplicables a la obtención de los planos CAD de piezas dimensiones medianas y de secciones delgadas 2 mm para el caso del guardachoque.

Palabras clave: resina poliéster, guardachoque, molde, estratificación manual, *rapid tooling*

Abstract

As a result of the present project, a process was defined to obtain bumpers molds through rapid tooling apply hand lay up, at first a prototype was manufactured using the artisanal methods in order to verify the product quality, next the original bumper topography was obtained by 3D scanning process, and through a reverse engineering software the original piece layout design were obtained, trough quality control software this information was compared with the scanned bumper mold image, then dimensional and shape deviations were verified, also the resin ability to replicate the surfaces contact texture. and, degradation during the composite manufacturing trough of a profilometer, this measurements was development in the first 5 pieces one by one and finally after 5 pieces up to a total of 20 pieces, at the end was concluded that the environmental temperature affects the original piece and the mold, it cause a dimensional difference of the mold with respect to the original piece of around 9%, in the same way there was a variation between the original 3D model and the original bumper, on the other hand polyester resin in the dosage recommended by the suppliers is capable of reproducing the texture of the surface to the detail and minimal wear is in an average of 0.05 μm per pass applying an adequate process of surface treatment. Finally, improvements are proposed to the process of a mold obtaining also applicable to obtain the CAD drawings of medium-sized pieces with sections 2 mm thinned in the case of a bumper

Keywords: polyester resin, bumper, mold, hand lay up, rapid tooling

Introducción

Antecedentes

La industria automotriz está estrechamente ligada a la economía de un país debido a que la mayoría de actividades requieren de medios de transporte, es así que actualmente en el Ecuador existen más de 29 000 empresas dedicadas a mencionada actividad. Hasta finales del 2016 en el país se comercializaron 63 555 unidades de los cuales alrededor del 50 % provienen de plantas ensambladoras nacionales. (AEADE, 2016a), otro dato importante muestra que en el país se comercializan más de 50 marcas de vehículos, entre las que predominan fabricantes como Chevrolet, Kia y Hyundai. A noviembre del 2016 el parque automotor registraba 1 965 538 vehículos livianos y 301 806 vehículos pesados según cifras de la asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE, 2016b), se cuenta además con cuatro empresas ensambladoras, estas cifras pueden traducirse en un crecimiento importante en la demanda de autopartes, constituyéndose en una importante oportunidad para los autopartistas. Sin embargo, la industria de fabricantes de autopartes ofrece un número muy reducido de productos, entre los que constan según datos de PRO ECUADOR (2017):

- Llantas y neumáticos para auto, camioneta y camión, tanto radial como convencional.
- Alfombras termoformadas y planas, insonorizantes para piso, techo, motor y capot.
- Asientos para vehículos: individuales, delanteros y posteriores.
- Forros para asientos de vehículos y tapicería.
- Materiales de fricción para frenos automotrices y productos relacionados con el sistema de frenos y embragues.
- Silenciadores y sistemas de escape automotriz.
- Vidrios y parabrisas para automóviles.
- Hojas y paquetes de resortes o muelles de ballestas.
- Filtros de combustible para línea automotriz.

- Ensamble de auto radios y fabricación de arneses de cables para sistemas de audio y,
- Acumuladores eléctricos.

Acorde con los datos obtenidos no existe, o es sumamente reducida la producción de autopartes de plástico en Ecuador, como es el caso de las cubiertas de guardachoque, esto puede deberse a varios factores, entre los más importantes se puede mencionar los altos costos de la maquinaria especializada y poca oferta de materiales en el mercado.

Planteamiento del problema

Un factor importante que encarece la producción de autopartes plásticas lo constituyen los moldes para la producción mediante técnicas modernas como la inyección de plástico, o la técnica de soplado (Moreno Olalla & Padilla Palacios, 2013, pp. 130-133), debido a la variedad de modelos de vehículos que existen en el mercado y la tecnología que se requiere tanto para el mecanizado como para los tratamientos térmicos elevando los costos y siendo rentables únicamente en producciones altas, generalmente sobre las 50 000 unidades (Busto & Francisco, 2016, p. 73). Por lo que se hace necesaria la búsqueda de métodos alternativos para una producción que cubra la demanda interna y que garantice la calidad del producto de manera que presenten al mercado de guardachoques como una nueva alternativa para la industria. A través de la aplicación de la técnica de estratificación manual y moldeo por contacto se va a construir el molde de un guardachoque mediante el uso de matriz de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio y se va a analizar la capacidad de producción y la precisión dimensional que se puede alcanzar mediante este método de modo que se pueda garantizar la geometría y estética del producto, lo que constituyen factores muy importantes para este tipo de autopartes, con esto se conseguirá obtener un análisis un poco más detallado de la aplicación de los moldes de fibra de vidrio para la producción, debido a que la mayoría de estudios encontrados mediante revisión de bibliografía se enfocan principalmente en las piezas

producidas y no en la validez de este tipo de herramienta, además a través de un sondeo realizado en el medio se puede constatar que no existe un proceso definido para este tipo de técnica y el conocimiento desarrollado se basa en la experiencia de los artesanos dedicados a esta actividad.

Justificación

El diseño y la fabricación de matrices y moldes representan una parte muy importante en toda la cadena productiva de una industria y más aún al tratarse de la industria de las autopartes donde casi todas las partes producidas en masa se fabrican utilizando matrices y moldes (Altan, Lilly, Yen, & Altan, 2001a). Así, la calidad, el coste y los tiempos de diseño y fabricación de los moldes afectan de manera directa la economía especialmente cuando se produce un gran número de componentes, subconjuntos y montajes llegando a costos que bordean los 0,5 millones de dólares y un tiempo de desarrollo entre 6 a 9 meses (Altan et al., 2001b; Hoekstra, 2000). Por esta razón los fabricantes de moldes y matrices se ven obligados a innovar sus procesos, empleando alternativas que incluyen prototipado rápido, herramientas rápidas, generación de trayectoria de herramienta optimizada para corte de alta velocidad y mecanizado duro, maquinaria y herramientas de corte, recubrimiento superficial y reparación, así como maquinados empleando electroerosión EDM y electroquímicos ECM.(Rosochowski & Matuszak, 2000)

El proceso de fabricación de moldes y matrices es un punto crítico para determinar la viabilidad y el plazo de implementación de un programa de producción de autopartes donde se denota la importancia del molde ya que su calidad afecta directamente la calidad de las piezas producidas, a esto se suma actividades complementarias como el mantenimiento, asistencia y fabricación de prototipos para los clientes, que se deben ajustar a tiempos de producción cada vez más reducidos.(Schuh, Salmen, Kuhlmann, & Wiese, 2017)

Según Taylan Altan (2001), los principales problemas que enfrentan los fabricantes de moldes y matrices en países industrializados pueden ser:

1. Alta necesidad de controlar y reducir costos.
2. Demanda de fabricación de moldes en mucho menos tiempo
3. Necesidad de servicio al cliente extendido (manejo de datos, asesoramiento, piezas de prototipos, asistencia en proceso desarrollo).
4. Falta y costo de mano de obra calificada, debido al manejo de nuevas tecnologías.
5. Competencia.

Estos factores se agudizan aún más en países en vías de desarrollo debido a las limitaciones de materiales, tecnología y costos de producción, donde se debe optar por tecnologías alternativas que garanticen piezas de alta calidad a bajo costo con plazos de entrega cortos, para lo cual se debe considerar aspectos como: el proceso de fabricación y sus limitaciones, herramientas y equipo, estabilidad dimensional, comportamiento del material bajo condiciones dinámicas de procesamiento (trabajo), diseño de nuevas herramientas, así como vida útil y velocidad de producción (Altan, Lilly, Yen, & Altan, 2001c).

A partir de lo planteado la siguiente investigación tiene como objetivo principal: El análisis del proceso de construcción del molde del guardachoque de un vehículo, mediante la técnica de *rapid tooling* moldeo por resina, para la fabricación del producto en el mercado ecuatoriano. Para lo cual se han propuesto los objetivos específicos siguientes:

- Seleccionar los materiales más idóneos para la obtención del molde a partir de los materiales existentes en el Ecuador, con la finalidad de la obtención de un buen acabado superficial, estabilidad dimensional y facilidad para desmolde.

- Desarrollar el proceso de copiado del guardachoque mediante la técnica de *rapid tooling* moldeo por resina, para la obtención de la geometría de la cubierta y por ende el prototipo a escala real del molde.
- Obtener el sólido en tres dimensiones del guardachoque mediante técnicas de ingeniería inversa, con el fin de efectuar comparaciones dimensionales.
- Analizar el comportamiento del molde mediante un estudio dimensional antes y después de estar sometido a un proceso de fabricación de cubiertas, con el fin de conocer su capacidad de producción.

Estudio del arte

Guardachoques para vehículos

El conjunto del parachoques protege piezas internas del vehículo que son fundamentales para su funcionamiento entre ellas el sistema de refrigeración, por lo general un conjunto de parachoques está formado de tres partes: la cubierta de plástico que sirve para controlar el flujo de aire y asegurar la estética; un absorbedor de energía generalmente de plástico, para soportar una parte del impacto en caso de choque; y una viga de refuerzo, típicamente de acero, de aluminio o de material compuesto reforzado con el fin de proteger la carrocería del coche (Pradeep *et al.*, 2017). Las cubiertas de guardachoques (figura 1) son estructuras plásticas ubicadas en la parte delantera y posterior de los vehículos destinadas a absorber impactos a velocidades bajas (Chih-Hsing Liu*, 2016).



Figura 1. Cubierta de guardachoques delantero (Pradeep *et al.*, 2017).

Los guardachoques deben poseer ciertas características, para que puedan ser empleados en un vehículo, entre ellos tenemos:

Seguridad: que permita proteger al peatón en caso de una colisión a baja velocidad.

Estética: que garantice una apariencia agradable a la vista

Material: debe tener la suficiente flexibilidad para absorber pequeños impactos sin sufrir deformaciones o roturas al mismo tiempo que debe garantizar compatibilidad con los procesos de pintura.

Forma: debe tener las medidas adecuadas que permitan un correcto ensamblaje y respeten las propiedades aerodinámicas del diseño. (Chih-Hsing Liu*, 2016).

Hace algunas décadas los parachoques eran un solo cuerpo fabricado de aceros de alta resistencia y recubiertos por acabados de cromo, con los consecuentes problemas de corrosión y costos elevados, seguidamente se hicieron análisis para el uso del aluminio como sustituto, debido a su menor densidad, pero la principal desventaja fue el costo; actualmente el enfoque se ha desplazado hacia el uso de plásticos y polímeros compuestos que poseen varias ventajas como son: alta resistencia a la corrosión, estética agradable, bajo peso, facilidad de diseño, mejor absorción de energía y facilidad de fabricación mediante el uso de moldeo por inyección, que constituye un proceso rentable pero en grandes volúmenes de producción de automóviles. (Pradeep *et al.*, 2017).

Pradeep *et al.* (2017) indica que los tres principales materiales empleados para las cubiertas de guardachoques son: polipropileno (PP), poliuretano (PUR), y el policarbonato (PC) debido a su baja densidad, buena resistencia y rigidez.

Según Domínguez y Ferrer (2012, p. 7) “Los compuestos plásticos se emplean cada vez en más elementos de los vehículos, se trata de plásticos termoestables como resinas epoxi y poliéster con fibra de vidrio y termoplásticos, como polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), etc.”

Los plásticos presentan varias ventajas debido a su versatilidad y facilidad de moldeo, donde el principal desafío consiste en identificar el método más idóneo para realizar el proceso de moldeo, ya que existen varios procesos para la manufactura de plástico en los que se deberá tener en cuenta factores como: el presupuesto y las cantidades de producción; debido a que producciones bajas tienden a conducir el diseño a procesos tales como fresado o termo formado, que presentan un costo inicial de herramientas más bajo pero mayor coste marginal en cambio mayores cantidades de producción tienden a representar mayores costos de herramientas y diseños más complejos pero con mejores utilidades (Kazmer, 2017).

Actualmente en la industria del plástico destacan cuatro procesos para el moldeo de plásticos, estos son: moldeo por extrusión, moldeo por inyección, el termo formado y el moldeo por soplado, de los cuales está en auge el termo formado y el moldeo por inyección, siendo este último el empleado en la fabricación de cubiertas de guardachoques (Kazmer, 2017). Cada uno de estos procesos de manufactura de plásticos presenta características únicas que determinan tanto ventajas como desventajas diferentes en cada caso.

Moldes y matrices

Para fabricar una matriz o molde se emplean los procesos de mecanizado con diversidad de herramientas de corte, debido a que cada molde es específico con sus formas complicadas y se deben considerar varios aspectos como: la geometría y el material de la pieza, el material de la herramienta, la condición de la herramienta y el tipo de operación.(Cakir, Irfan, Cavdar, 2005.). Las figuras 2 y 3 muestran respectivamente las entradas y salidas en el proceso de fabricación convencional de moldes y matrices.

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

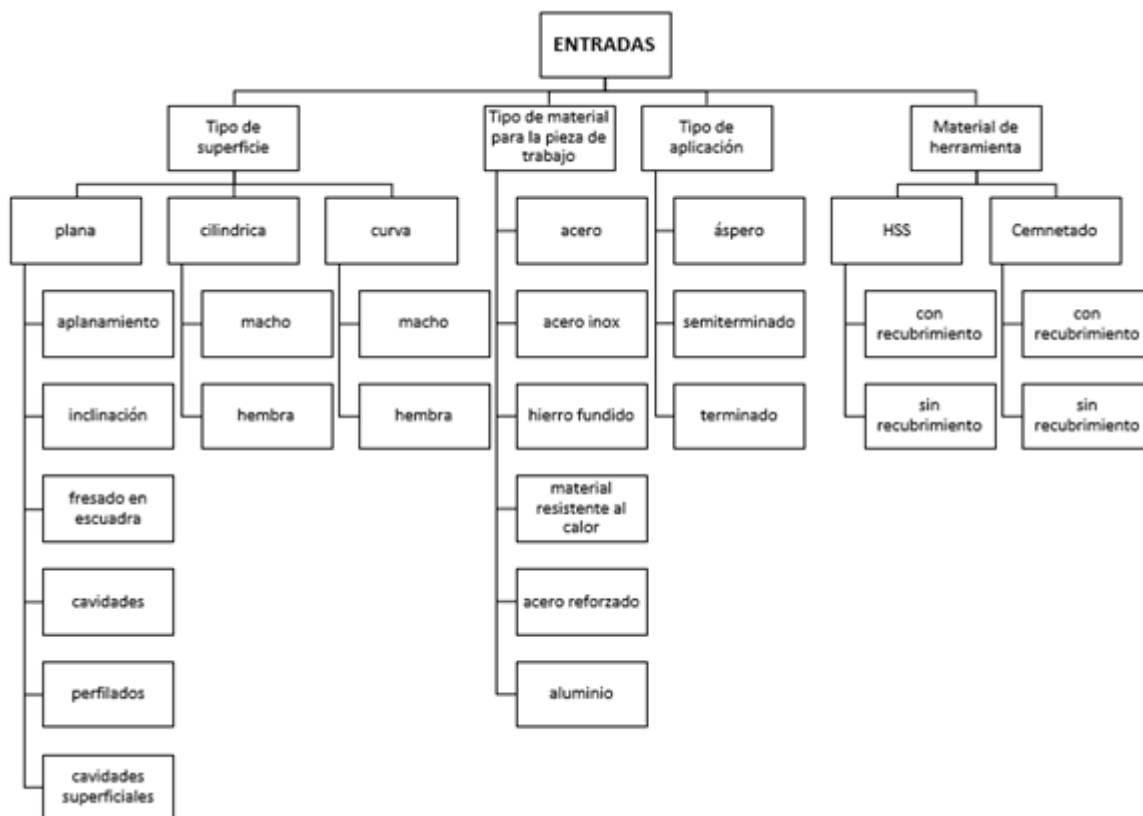


Figura 2. Entradas en la fabricación de moldes (Cakir, Irfan, Cavdar, 2005, p. 180)

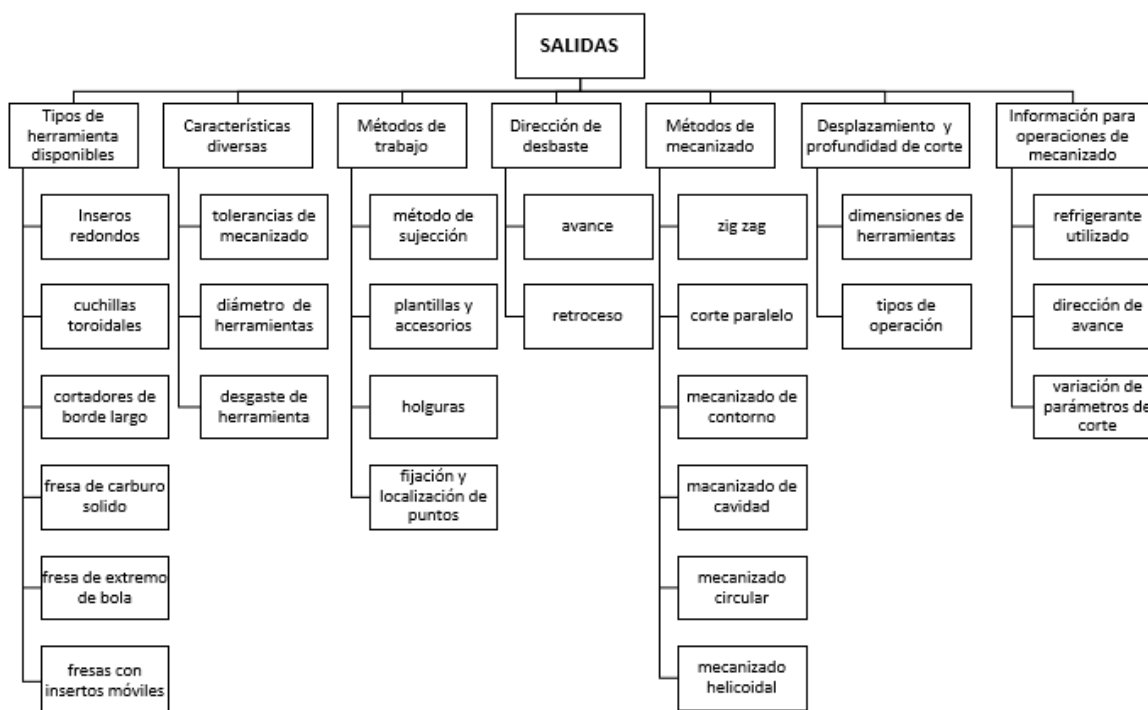


Figura 3. Salidas en la fabricación de moldes (Cakir, Irfan, Cavdar, 2005, p. 180)

Rapid tooling

Desde hace pocos años, ha empezado el uso de tecnologías de “*Rapid Prototyping*” y “*Rapid Tooling*”, teniendo las herramientas rápidas muy poca introducción en el mercado, puesto que, por un lado, la gran mayoría de ellas todavía se encuentran en fases de desarrollo y, por otro, las empresas dedicadas a la fabricación de moldes de inyección se muestran escépticos respecto a su aplicabilidad. (Lorenzo Yustos, 2008, p. 87)

Estos nuevos métodos conocidos como “prototipado rápido” (RP), han pasado de ser procesos aplicados para diseño y creación de prototipos a ser tecnología para la producción de herramientas rápidas, con este fin existen diferentes métodos de obtención, así como materiales entre los que destacan: líquidos (estereolitografía), sólido extruido (modelado de deposición fundido) o polvos (láser selectivo-sinterización). Las técnicas utilizadas para moldear la materia prima emplean un cambio químico activado por láser conocido como estereolitografía, sinterización láser (LENS, SLS), extrusión llamado también modelado por deposición fundida (FDM) o un adhesivo como es en el caso de la impresión 3D derivadas de las herramientas de diseño y visualización mediante software. (Taylan Altan, 2001)

La producción rápida de matrices y moldes mediante procesos aditivos representan una serie de ventajas como reducción del tiempo y costo de producción o la capacidad para incluir nuevas características constructivas. Para efectos de clasificación Chua, Hong, & Ho (1999) las dividen en herramientas duras o blandas y también directos o indirectos. Las herramientas blandas por lo general se aplican para operaciones de fabricación cortas y a menudo son hechas de materiales tales como caucho de silicio, resinas epoxi, aleaciones de bajo punto de fusión, o aluminio, que son más fáciles de trabajar que los aceros de utillaje; por otro lado el mecanizado para ciclos de fabricación más largos se conoce como herramientas duras y se hace generalmente de acero.

En herramientas directas, el molde o la matriz se crea directamente mediante el proceso de *rapid tooling*, mientras que, en el mecanizado indirecto, sólo el maestro se crea utilizando la tecnología RP y se hace de un material como el caucho de silicona, resina epoxi, metal blando o cerámica. (Chua, Hong, & Ho, 1999a)

Rosochowski & Matuszak, (2000, p. 193) sugieren una clasificación basada en aspectos prácticos, la cual se muestra en la figura 4.

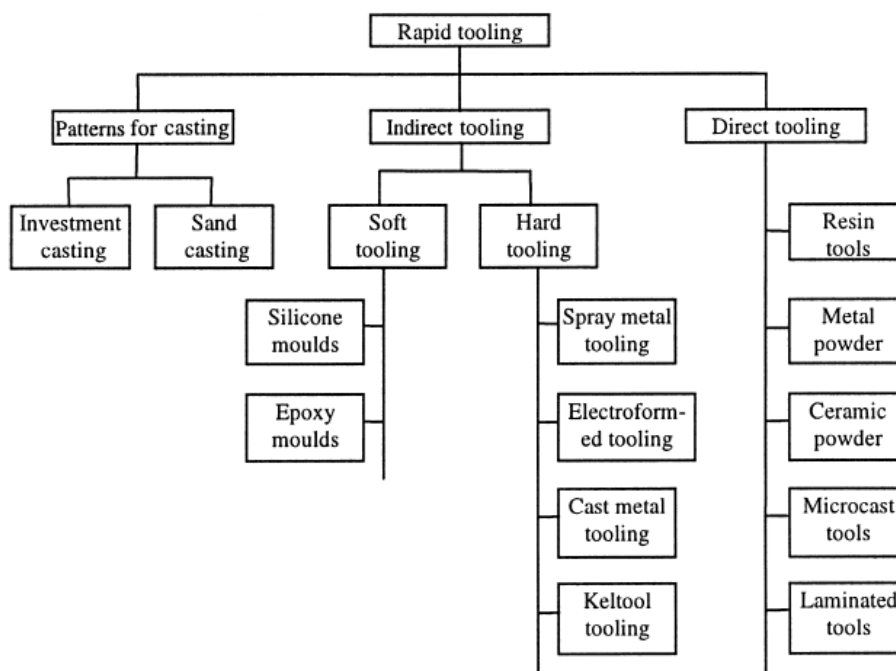


Figura 4. Clasificación de los métodos Rapid Tooling (Rosochowski & Matuszak, 2000)

El mecanizado indirecto son métodos poco costosos, con períodos cortos de desarrollo lo que permite la validación del utillaje, así como la introducción de cambios. Se utiliza un prototipo de la pieza, obtenido por técnicas de prototipado rápido, para usarlo como modelo y dar forma a las cavidades del molde. (Chua, Hong, & Ho, 1999b)

Los métodos de mecanizado directo, permiten la producción de insertos de mayor duración, en estos procesos el utillaje se crea directamente por una técnica de mecanizado directo donde la durabilidad depende del material y el método empleado, para este caso los

moldes se obtienen de forma directa, desde un modelo CAD por técnicas de Prototipado Rápido o por manufacturación rápida.(Coba Salcedo & Serres Moliner, 2006)

Las herramientas directas, en forma de prototipos epoxi se ha utilizado durante algún tiempo. Matrices sólidas de resina epoxi han sido empleados para la inyección de patrones de cera para fundición de inversión. También se han ensayado moldes de epoxi para moldeo por inyección consiguiendo producir hasta 100 partes.(Rosochowski & Matuszak, 2000)

Moldeo por resina

Durante las dos últimas décadas se ha venido desarrollando un proceso denominado moldeo por transferencia de resina RTM (*Resin Transfer Moulding*), que consiste en un proceso de molde cerrado como se muestra en la figura 5, que es capaz de fabricar piezas en base a inyección de polímeros reforzado con fibras de gran tamaño similar al sistema de inyección de plástico.(OWENS CORNING [OCV], 2009a)

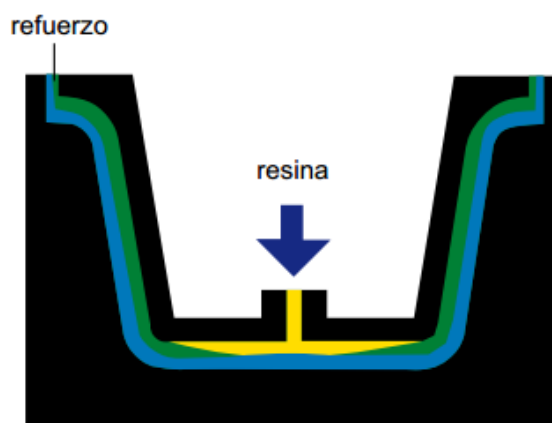


Figura 5. Proceso RTM (OWENS CORNING [OCV] 2009)

En la figura 6 se muestra una variante al proceso RTM, el cual consiste en realizar la transferencia de resina mediante la aplicación de vacío o VARTM (Moldeo por transferencia de resina asistida por vacío), en algunos casos llamado también RTM light, el cual utiliza la diferencia de presión entre la presión de vacío y la presión ambiental para comprimir la

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

preforma como se ve en la figura 7, fijar la preforma contra el molde y extraer la resina en la preforma. (K.-T. HSIAO, 2012).

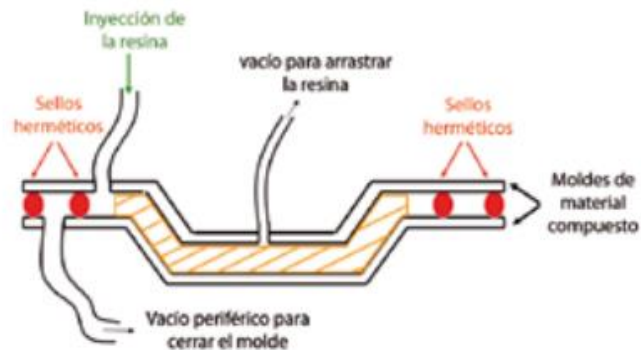


Figura 6. Esquema del proceso VARTM (OWENS CORNING, 2009)



Figura 7. Proceso y molde VARTM (OWENS CORNING [OCV], 2009)

Una tercera variante se muestra en la figura 8, el método manual conocido como proceso por infusión de resina. El proceso de infusión consiste en la impregnación de una o varias capas de refuerzo colocadas en un molde de material compuesto (*composite*) y cubiertas herméticamente por un film usado como molde superior. La resina se lleva por medio de vacío

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

hacia el refuerzo entre el molde y el film, y no entra en contacto con el aire (proceso de “molde cerrado”). Una vez que la resina ha curado, el film puede retirarse. (OWENS CORNING [OCV], 2009b)

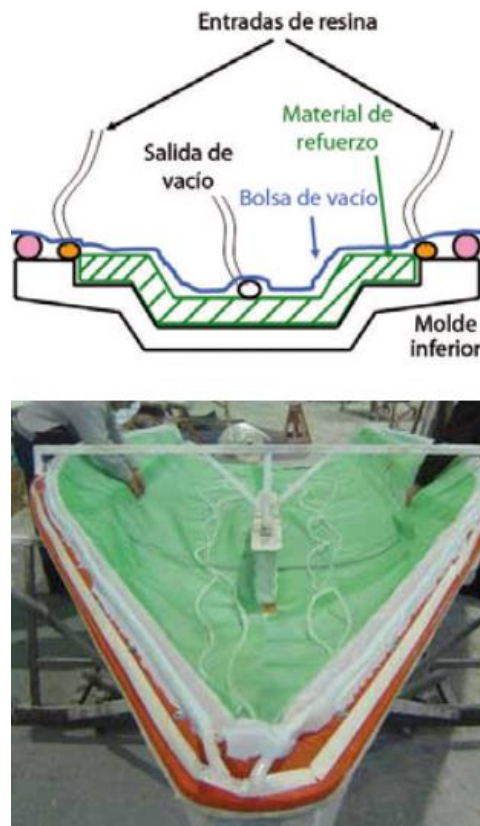


Figura 8. Proceso de moldeo por infusión de resina (OWENS CORNING [OCV], 2009)

Este proceso permite la elaboración de piezas muy grandes, razón por la que es utilizado en diversas ramas como la industria aeronáutica, la fabricación de cascos de embarcaciones o la construcción de palas para los molinos de viento, debido a que presenta varias ventajas como son la flexibilidad para utilizar diversos materiales, el empleo de un molde abierto y bajas presiones de trabajo. (K.-T. HSIAO, 2012)

Moldes para materiales compuestos

Existen muchos requerimientos a tomar en cuenta para el proceso de construcción de herramientas, el primero se refiere al lado donde la pieza debe tener mejor acabado si por el lado interior o exterior lo permitirá priorizar el acabado superficial, otro aspecto es la facilidad

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

para fabricar piezas ya que dependiendo de la geometría de la pieza, puede ser más fácil colocar las capas en una superficie en particular, el material utilizado para la herramienta es otro aspecto importante, por lo general los polímeros reforzados se pueden usar para temperaturas bajas a intermedias, metales para temperaturas bajas a altas y grafito monolítico o cerámicas para temperaturas muy altas, la tabla 1 muestra varias propiedades clave de varios materiales de herramientas (Campbell, 2010, p. 103)

Tabla 1.
Propiedades de los materiales de herramientas típicos

Material	Temperatura máxima de servicio., °F	Coefficiente de expansión térmica x $10^{-6}/^{\circ}F$	Densidad, lb/in ³	Conductividad térmica, Btu/h · ft · °F
Steel	1500	6.3–7.3	0.29	30
Aluminum	500	12.5–13.5	0.10	104–116
Electroformed nickel	550	7.4–7.5	0.32	42–45
Invar/Nilo	1500	0.8–2.9	0.29	6–9
Carbon/epoxy RT/350 °F	350	2.0–5.0	0.058	2–3.5
Glass/epoxy 350 °F	350	8.0–11.0	0.067	1.8–2.5
Glass/epoxy RT/350 °F	350	8.0–11.0	0.067	1.8–2.5
Monolithic graphite	800	1.0–2.0	0.060	13–18
Mass cast ceramic	1650	0.40–0.45	0.093	0.5
Silicone	550	45–200	0.046	0.1
Isobutyl rubber	350	90	0.040	0.1
Fluoroelastomer	450	80–90	0.065	0.1

Nota: Según (Campbell, 2010) esta tabla se muestra solo como referencia. El proveedor del material posee los valores exactos.

Moldes compuestos

Según Cadden y Sadesky (1998) las herramientas compuestas generalmente están hechas de matriz de resina epoxi y ya sea de vidrio E o fibras de carbono como refuerzo, dependiendo del ciclo de vida requerido, las herramientas se pueden hacer a partir de pre impregnados o mediante procedimientos de colocación húmeda, las herramientas fabricadas a partir de pre impregnados son capaces de realizar un mayor número de ciclos de curado que el método de colocación en húmedo. Sin embargo, para herramientas de taller como herramientas de recorte, se recomiendan los sistemas de epoxi de curado a temperatura ambiente.

Cadden & Sadesky (1998, p.15) indica que para las elecciones del material del molde se debe tener en cuenta el número y tamaño de las molduras que se van a producir, el tipo y el acabado requeridos y el proceso de moldeo; para la producción de pocas molduras, los

moldes de madera o yeso suelen ser suficientes, cantidades intermedias que van desde unos cientos hasta mil o más, generalmente se producen con moldes GRP. La vida típica del molde para varios materiales de moldes diferentes se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Vida útil de diferentes materiales de moldes

Material del molde	Número de partes	Colocación manual/pulverización	Adecuación del proceso	
			Moldeo por presión	
			En frío	En Caliente
Yeso	1-5	Factible		
Madera	1-100	Factible		
GRP	100-2000	Común		
endurecido				
GRP con concreto	100-3000		común	
Acero	Más de 1 millón			común

Fuente: (Cadden & Sadesky, 1998)

En el caso de una herramienta rápida basada en polímero, su conductividad térmica relativamente baja es significativa para determinar las propiedades de las piezas moldeadas por lo que es necesario comprender hasta qué punto la elección del material de la herramienta influye en las propiedades de las molduras (Segal & Campbel, 2001)

Moldes GRP

Los moldes hechos de resina de poliéster reforzado con vidrio por lo general son hechos a mano o mediante técnicas de colocación en aerosol y tienen mucha aceptación debido a que los moldeadores tienen todos los materiales necesarios a mano, pero se debe tener en cuenta la contracción del sistema de resina durante el curado, la superficie debe estar sellada para que no sea poroso y luego pulido a un acabado de alto brillo con un esmalte de cera sin silicona de hasta seis capas de esmalte, a continuación, el patrón debe estar recubierto con una película de liberación de alcohol de polivinilo libre de contaminantes y debe dejarse secar completamente antes de que se le aplique resina, de lo contrario, el laminado puede adherirse al patrón y causar

daños irreparables, por otro lado en el diseño de un molde, se debe considerar la terminación de los bordes del molde ya que en muchos casos, si se refuerza adecuadamente, el borde puede actuar como una guía para recortar molduras "verdes".

Proceso de estratificación o laminado manual.

Es una técnica muy adaptable a los sistemas matriz de poliéster y no necesitan aporte de calor externo para la polimerización ni de alta presión para su estratificación, el proceso se basa en la colocación manual de capas sucesivas de material de refuerzo que se van impregnando de resina mediante un rodillo o brocha figura 9, lo que mejora impregnación del refuerzo y elimina las burbujas de aire.(Besednjak, 2005)

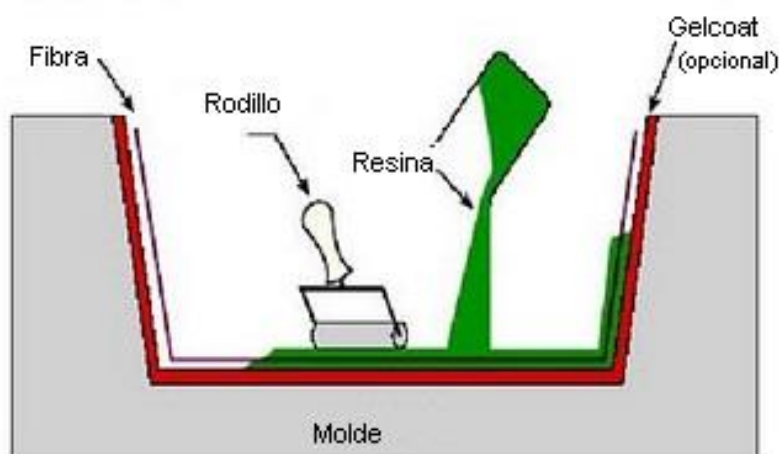


Figura 9. Esquema del proceso de moldeo manual de materiales compuestos (blogspot, 2011)

Cuando el agente de liberación está completamente seco, el *gelcoat* se aplica con brocha o spray con un tiempo de aproximadamente 15 para garantizar la gelación uniforme del abrigo de gel, en algunos casos, se puede usar un tejido de superficie para reforzar el *gelcoat*, luego se aplica una capa de resina de laminación mediante brocha, rodillo de pintura o pulverización seguido de la primera capa de estera de hebras picadas (preferiblemente 300 g / m² o menos), en las esquinas del molde, la estera de vidrio se debe cortar y unir para garantizar que no se produzca un puente; en moldes grandes, donde más de una hoja de estera de hebras

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

tiene que ser aplicado para cubrir la superficie, estas hojas pueden ser empalmadas juntos con unos 30 mm de superposición, se debe procurar que las juntas en diferentes capas estén escalonadas para evitar un espesor excesivo del laminado o debilidad del laminado en la unión. La moldura terminada generalmente contendrá entre 30 y 35 % en peso de refuerzo y para asegurar que las molduras uniformes se produzcan consistentemente, se debe mantener una temperatura de trabajo de 18-20 °C en el taller, manteniendo la humedad por debajo del 70 % . (Wheaterhead, 1980)

Matrices termoestables

Besednjak (2005) indica que las matrices termoestables son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser remodelados, tienden a ser resinas de mucha rigidez y con el fin de aumentar sus características mecánicas, se combinan con diferentes tipos de refuerzos como las fibras de vidrio, carbono o aramiditas, obteniendo laminados compuestos, siendo las más comunes:

- Resinas poliéster
- Resinas Viniléster
- Resinas Epoxi
- Resinas Fenólicas

Resinas poliéster

Según Besejnjak (2005) en su libro sobre procesos de fabricación de embarcaciones, las resinas poliéster presentan baja temperatura de transición vítrea por lo que son utilizadas en procesos de laminado de moldeo por contacto con molde abierto, su resistencia y rigidez no son muy elevadas y tienden a contraerse durante el endurecimiento entre 6 y 10 %, señala además que para facilitar la polimerización y cambio de estado a temperatura ambiente, es

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

necesario añadir un iniciador y un activador donde los tiempos de curado se pueden controlar mediante las variables:

- a) Cantidad de acelerador
- b) Cantidad de catalizador y,
- c) Temperatura del local de trabajo, siendo la temperatura ideal entre 17 y 22 °C

La resina se combina con monómeros, que actúan como disolventes y permiten entrelazar sus cadenas dándoles la propiedad de termoestables, el monómero más utilizado es el estireno, otro de los componentes empleados son los catalizadores encargados de provocar la reacción de iniciación de la polimerización necesaria para el endurecimiento de la resina y están basados en el uso de peróxidos orgánicos altamente explosivos, por otro lado los activadores permiten polimerizar a temperaturas menos elevadas y complementan la acción del catalizador y están formados por compuestos metálicos que pueden ser cobalto, manganeso y vanadio. (Besednjak, 2005). La tabla 3 muestra los diferentes sistemas de catalíticos para resinas poliéster.

Tabla 3.
Sistemas catalíticos para resinas poliéster y viniléster

Catalizador	Acelerador	Vida útil de la resina catalizada	Tiempo de gel	Tiempo de endurecimiento	Campos de utilización
Peróxido de Benzoilo	Dimetil-anilina (DMA)	Largo	Medio	De medio a bastante rápido	Moldeo por contacto Inyección Prensado en frío
	Dietil-anilina (DEA)	Largo	Largo	Largo	<i>Ídem</i>
	Dimetil-p. toluídina (DMPT)	Largo	Corto	Muy Largo	<i>Ídem</i>
Peróxido de metiletilcetona	Naftalato de cobalto	Corto	Medio	Lento	<i>Gelcoats</i> Moldeo contacto Proyección Moldeo inyección

Peróxido de acetilacetona	Naftalato de cobalto	Medio	Medio	Rápido	Moldeo rotación Ídem anterior Prensado en frío
Peróxido de ciclohexanona	Naftalato de cobalto	Medio	Medio	Progresivo	Barnices Placas onduladas

Fuente: (Besednjak, Materiales compuestos, 2005)

Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio se usan ampliamente en aplicaciones compuestas debido a su bajo costo, alta resistencia a la tracción, alta resistencia al impacto, y buena resistencia química (figura 10), existen de varios tipos, pero el *E-glass* es el más común y menos costoso, proporcionando una buena combinación de resistencia a la tracción 500 ksi (3.5 GPa) y módulo 10.0 msi (70 GPa). (Campbell, 2010)

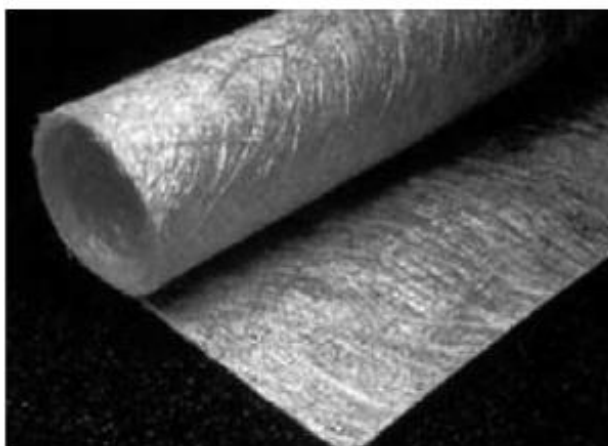


Figura 10. Fibra de vidrio para refuerzos (Campbell, 2010)

El gelcoat

Es la primera capa de resina en contacto con el exterior y forma la barrera de desgaste de la pieza terminada, al no tener el refuerzo de la fibra puede presentar defectos como el laminado desequilibrado y grieta bajo efectos de tracción, por lo que se recomienda un espesor entre 0,25 a 0,4 mm Sin embargo, para moldes su espesor debe ser superior por el desgaste que sufren los mismos (Besednjak, Materiales compuestos, 2005)

Efectos de la manufactura en las superficies

Entre las numerosas ventajas del uso de moldes fabricados con polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) está el bajo costo de fabricación, sin embargo, los moldes compuestos tienen una vida útil nominal de 200 hasta 500 ciclos y requieren un mantenimiento riguroso para alcanzar los 1000 ciclos, por lo que, la gestión del ciclo de vida de los moldes GFRP ha adquirido gran importancia en los entornos de fabricación de materiales compuestos debido a que es imprescindible optimizar la vida útil de un determinado molde para maximizar el retorno de la inversión, por otro lado la calidad de la superficie del molde define el límite superior de la calidad de la superficie de la pieza al desmoldar, además determina cuándo un molde requiere mantenimiento o reparación debido al desgaste o degradación química, por lo que pueden usarse mediciones regulares de su rugosidad superficial para determinar cuándo y qué tratamiento de superficie deben usarse para mantener la rugosidad de la superficie del molde en un rango aceptable para producción y con ello lograr mayores ciclos de producción. (Shah Mohammadi, Ghani, Komeili, Crawford, & Milani, 2017).

Haider, Hubert, & Lessard, (2007, p. 18) muestran que el acabado superficial también conocido como textura superficial o rugosidad es una característica de calidad, que representa el grado de suavidad de una superficie, para lo cual existen métodos para medir la calidad de la superficie y se pueden dividir en técnicas de medición de contacto y sin contacto. Para las mediciones de contacto, se utiliza un lápiz óptico que escanea la superficie y se obtiene un perfil de superficie de forma legítima en cambio para mediciones sin contacto, se utilizan microscopio óptico, microscopio electrónico o sensores ópticos para medir la superficie para obtener finalmente los parámetros de superficie.

Acabado superficial de clase A

El término utilizado para la rugosidad superficial aceptable para paneles de carrocería de automóviles exteriores en la industria automotriz se conoce como acabado superficial class A, que exhibe aspectos de planitud, suavidad y reflexión de la luz similares a los de las láminas de acero estampadas terminadas, pero estos acabados se logran a través de dos procedimientos diferentes. Los automóviles tienen sistemas de pintura y pintura pulverizados sobre superficies metálicas de calidad media y requiere pulido para lograr una verdadera superficie de clase A, sin embargo, el casco de un barco recibe su acabado directamente del propio molde (Raja, 2005)

Control del acabado superficial

Según Raja (2005) existen muchos parámetros que se pueden definir a partir del perfil de una superficie, los más comunes utilizados para el análisis cuantitativo de rugosidad superficial son Ra, Rq y Ry, la figura 11, muestra una señal típica de exploración mediante un perfilómetro para un panel compuesto

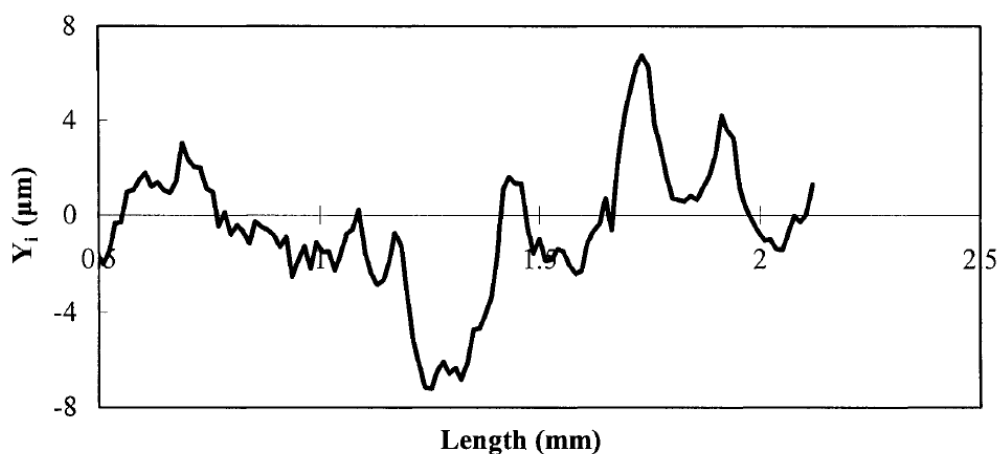


Figura 11. Escaneo típico obtenido con un perfilómetro de superficie (Raja, 2005)

La rugosidad de la superficie también es considerada como la medida de calidad superficial y puede cuantificarse mediante múltiples medidas estadísticas. Mohammadi, Ghani,

Komeili, Crawford, & Milani, (2017) utilizaron un microscopio de interferometría de luz blanca / WLI (Veeco Wyko NT1100), para obtener constantes de rugosidad tales como Ra, Rq, Rt, Aa, Rpk, Rvk, Rsk, y Rku, mediante la aplicación de varias condiciones y pruebas. La figura 12 muestra la topografía del molde luego del desmolde

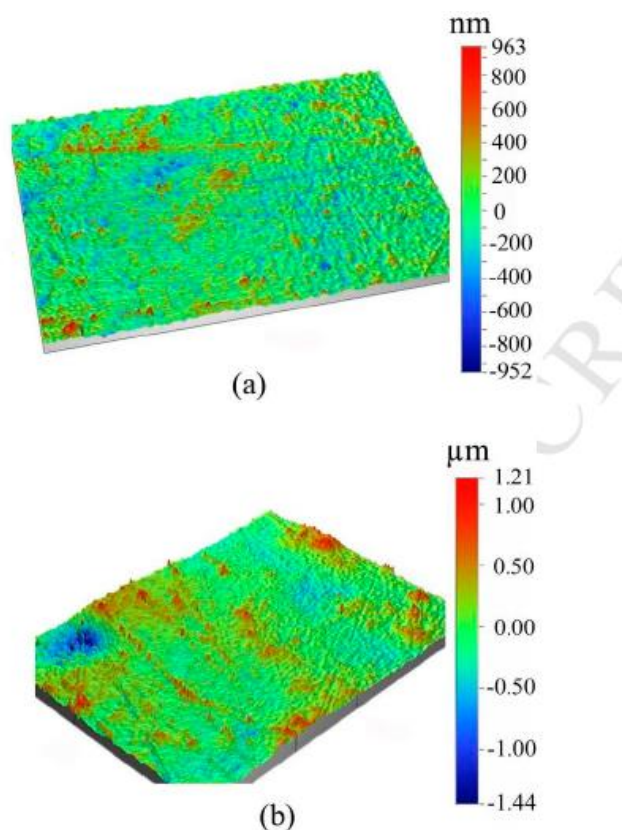


Figura 12. Topografía de la superficie del molde (Mohammadi, Ghani, Komeili, Crawford, & Milani, 2017)

Rugosímetro

Los datos de rugosidad se han tomado con el rugosímetro portátil marca SHIMANA SHBLST241 figura 13, que mide y calcula múltiples parámetros. Se puede conectar a una impresora Bluetooth para imprimir informes de prueba que incluyen todos los parámetros y gráficos mediante un interfaz con una PC a través de un software denominado Presurf Enterprise, se trata de un aparato de medición del tipo palpador capacitivo, es decir, que el sensor posee un movimiento paralelo a la superficie de medición posee un rango de

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

parametrización de: Ra (0.005 μm ~ 16 μm), Rz (0.02 μm ~ 160 μm) y una resolución de 0.001 μm (Process Instruments, 2017)



Figura 13. Rugosímetro (Process Instruments, 2017)

Control de la desviación dimensional

Dippenaar & Schreve (2013) indican que las partes y moldes pueden evaluarse en base a la precisión geométrica y el acabado superficial, mediante mediciones para determinar el efecto sobre la precisión dimensional tanto de las partes como de los moldes, obteniendo resultados mediante el uso de una máquina de mediciones por coordenadas CMM, lo que permite medir una serie de puntos y compararlos con un modelo CAD, donde las desviaciones son la distancia total plasmada desde el modelo CAD.

Con el fin de controlar todo el proceso y evaluar la calidad de la pieza fabricada, la desviación dimensional debida a los pasos de fabricación, Atzeni, Minetola, & Salmi, (2013) evaluaron la precisión dimensional de un molde mediante mediciones puntuales tradicionales y escaneo sin contacto para la inspección dimensional, para lo cual los moldes maestros fueron inspeccionados por una máquina de medición por coordenadas CMM y un escáner óptico tridimensional para evaluar su geometría real, mientras que sin contacto se utiliza la inspección mediante técnicas de ingeniería inversa (RE) para toda la superficie de trabajo del molde. El maestro de resina se comparó con el original correspondiente y para evaluar la desviación de todo el molde se realizó una comparación entre la impresión de molde virtual y la impresión original del modelo CAD del molde. La impresión de molde virtual se obtiene por resta booleana a partir de los datos de escaneo del molde y los análisis comparativos de los datos

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

escaneados se realizan por medio de un software de Ingeniería inversa comercial específico para este caso emplearon *Rapidform 2006*. (figura 14)

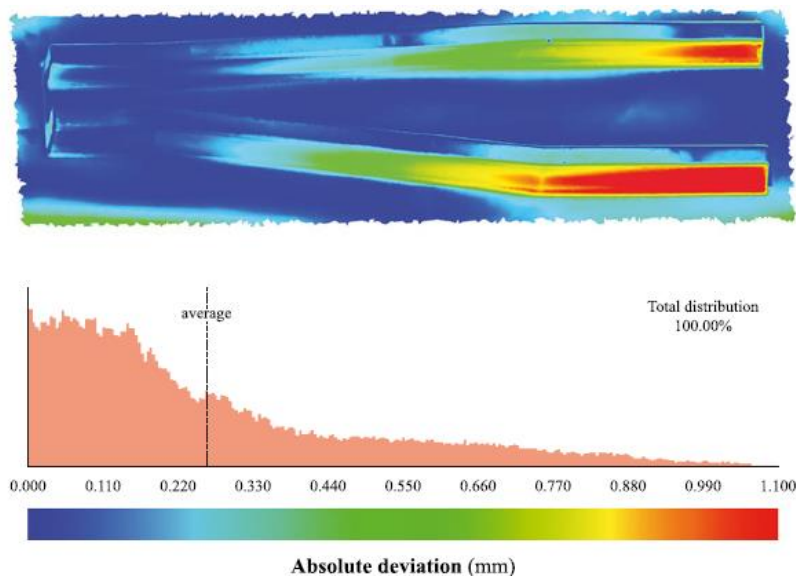


Figura 14. Mapa de desviación de color de la comparación de datos de escaneo de la mitad superior del molde electro formado (Atzeni, Minetola, & Salmi, 2013)

Por otra parte, Sudbury, Springfield, Kunc, & Duty, (2016), realizaron mediciones con una máquina de medición de coordenadas denominada brazo faro con el fin de medir las desviaciones geométricas y luego compararlas con el modelo CAD mediante el uso de software de ingeniería inversa, para este caso se empleó el programa Geomagic 3D, como se observa en la figura 15.

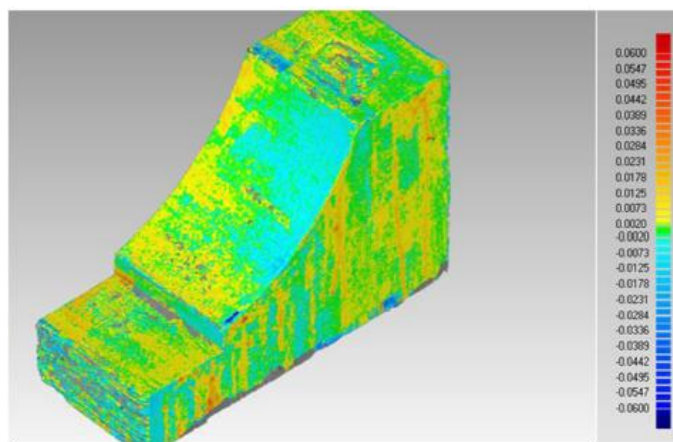


Figura 15. Imagen de análisis de desviación de la orientación de impresión vertical del software de modelado Geomagic 3D (Sudbury, Springfield, Kunc, & Duty, 2016)

Geomagic Verify

Es un software de inspección de artículos para dispositivos de medición 3D con o sin contacto utilizado para medir y comparar partes de modelos CAD con su equivalente digitalizado permitiendo resaltar las desviaciones en detalle y mano de obra, mediante este programa se puede además realizar mediciones, comparaciones y generación de informes para el primer artículo así como procesos de inspección automatizados, para las verificaciones se pueden usar los datos de la nube de puntos obtenidos mediante los escáneres 3D y las máquinas de medición por coordenadas (CMM), así como los datos CAD importados en el sistema. (3DZ Franchising, 2017)

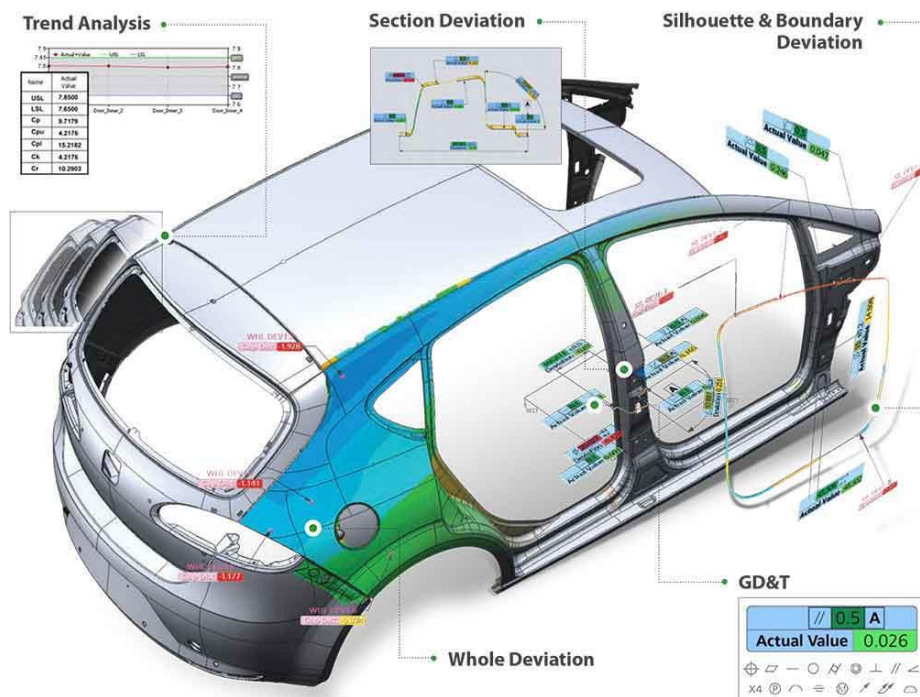


Figura 16. Geomagic Verify (3DZ Franchising, 2017)

Método

Tipo de estudio

Este estudio se fundamenta inicialmente en una investigación exploratoria la que permite obtener información mediante el análisis de literatura, conocer los diferentes procesos empleados para la fabricación de moldes y matrices, así como las características primordiales para definir el tiempo de vida útil de un molde. A través de una investigación descriptiva se establece el proceso para la construcción del molde mediante laminación manual, la obtención del modelo CAD mediante el uso ingeniería inversa, además se efectúa en una parte de este estudio un análisis cuantitativo donde se obtendrán valores numéricos en cuanto a las desviaciones y desgastes que sufre el molde durante el trabajo que ayudarán a determinar la precisión dimensional, así como el desgaste. Por último, se establece una investigación analítica en la que recopila y procesa la información obtenida mediante el análisis de mediciones realizadas al prototipo del molde y factores de desgaste luego de los procesos de desmolde.

Metodología

Para el desarrollo de este estudio se parte una metodología de tipo experimental la cual se realiza por etapas:

Se inicia por la selección de materiales disponibles de forma local, para mediante el proceso estratificación manual o laminado manual por resina construir el molde, aplicando ingeniería inversa se obtiene el modelo CAD del molde para las pruebas dimensionales, se desarrollará un proceso experimental para simular el proceso de moldeo abierto por laminación manual , y se comprobará mediante recopilación de datos dimensionales utilizando un rugosímetro y brazo faro (máquina de medición por coordenadas), para analizar los resultados mediante la aplicación del software denominado Geomagic Verify finalmente se aplican mejoras en el

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

diseño del molde y se obtiene un prototipo a escala real, la figura 17 muestra las etapas que se seguirán para la obtención del molde definitivo.



Figura 17. Metodología

Fabricación del molde mediante laminación manual por contacto

Para la fabricación del molde se empleará una matriz de resina de poliéster isoftálica reforzada con fibra de vidrio colocada por capas, como catalizador se utilizará peróxido de metil etil cetona o Peróxido de mek, el octoato de cobalto 12% servirá como acelerante, adicionalmente se usará monómero de estireno como diluyente, alcohol de viniléster servirá como desmoldante de cera desmoldante, y *gelcoat* para matrices. Los materiales fueron adquiridos en PINTULAC según tabla 4.

Tabla 4*Materiales empleados para la fabricación del molde***Resina de poliéster isoftálica**

Temperaturas de curado inferiores a 82°C.

Propiedades anticorrosivas

Para laminación manual

**Monómero de estireno**

Diluye la resina

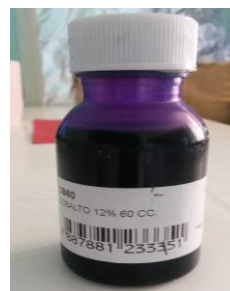
Mejora el impregnado de la fibra de vidrio.

Reduce el peso del molde

**Octoato de Cobalto al 12%**

Actúa como acelerante

Endurecedor

**Peróxido de metil etil cetona**

Actúa como catalizador

Inicia el proceso de gelificación

**Fibra de vidrio 375 g/m²**

Aporta resistencia y buen comportamiento mecánico al material compuesto.



Cera desmoldante

Permitirá un fácil desmolde entre la pieza modelo y el molde fabricado por contacto



Alcohol polivinílico

Desmoldante líquido de baja densidad



Nota: materiales adquiridos de forma local en la empresa Pintulac

Proceso de copiado de la geometría del modelo del guardachoque

Para la obtención de la geometría del molde se empleó la técnica de moldeo por contacto directo mediante laminación manual con resina, para lo que se siguió el proceso a continuación:

- 1) Mediante cartón gris se delimitaron las aristas (figura 18) que contienen los puntos de anclaje del guardachoque, lo que permitirá el retiro de la pieza original, evitando que quede atrapada



Figura 18. Delimitación de aristas

- 2) Como paso siguiente se aplicó 5 capas de cera desmoldante, empleando un lienzo fino y limpio de acuerdo a las directrices indicadas por Delta Glass (2017):

- a) Aplicar la primera capa en sentido vertical, extenderla en la superficie y retirarla con otro paño limpio procurando lustrar hasta disminuir notoriamente la resistencia a la fricción.
- b) Aplicar la segunda capa, ahora en sentido horizontal, lustrar nuevamente, luego se aplica la tercera capa en diagonal y se vuelve a lustrar, repitiendo estas operaciones hasta completar las 5 capas con el fin de obtener una superficie lisa, de forma adicional se le aplicó una capa de alcohol polivinílico el cual actuara como agente de desmolde. (Figura 19)



Figura 19. Aplicación de cera desmoldante

- 3) Mediante una brocha se aplicó una capa de gelcoat (figura 20) con el fin de proteger el plástico reforzados de la acción corrosiva y destructora de los agentes externos, y al mismo tiempo provee una solución estética, para lo cual se utilizó la formulación indicada por Delta Glass (2017) a continuación en la tabla 5:

Tabla 5

Formulación para preparación del gelcoat

Catalizador (Peróxido de MEK)	Acelerador (Octoato de cobalto)	Temperatura de trabajo	Espesor de la capa	Tiempo de curado
0,5 – 2%	2%	20 °C	0,5 mm	25 min

Nota: formulación para catálisis del *gelcoat* de acuerdo con (Delta Glass, 2017)



Figura 20. Aplicación del gelcoat mediante brocha

- 4) Una vez que el gelcoat ha alcanzado la última fase de gelificación, se inició el proceso del laminado manual, para lo cual se preparó la resina según el orden a continuación descrito: en primer lugar, se coloca el acelerador (líquido violeta) y en segundo lugar el catalizador (líquido transparente), en una proporción del 2 % de cada uno. La cantidad de ambos componentes está calculada para una temperatura de 20 ° a 25 °C, se debe evitar la mezcla directa de estos dos componentes ya que produce una reacción explosiva (Delta Glass, 2017). En total se colocaron 4 capas de fibra de vidrio de 375 gr.



Figura 21. Proceso de colocación manual de la fibra de vidrio

- 5) Una vez que la resina ha curado por completo se procedió a retirar la pieza original, quedando de esta forma liberado el molde que se muestra la figura 22.



Figura 22. Vista frontal y posterior del molde resina reforzado por fibra de vidrio

Obtención del modelo CAD del molde

Para la obtención del modelo CAD del molde se utilizó el software NX 10 de Siemens, a través del módulo de ingeniería inversa. Se partió por la obtención de la topografía de la pieza mediante el uso del escáner 3D marca CREAFORM GO SCAN mostrado en la figura 23, el cual permite obtener mediciones rápidas y confiables, incluso puede capturar datos en 3D a todo color. Este equipo posee una precisión de hasta 0,1 mm, precisión volumétrica de 0.300 mm/m y una resolución de 0,500 mm, permitiendo escanear objetos con un tamaño de hasta 3 metros. (CREAFORM, 2017)



Figura 23. Escáner 3D portátil (CREAFORM, ,2017)

La figura 24 muestra el proceso de obtención de la topografía del guardachoque original, para lo cual como paso previo se pintó la autoparte de un color blanco mate para reducir el brillo, debido a que el tipo de escáner empleado no captura imágenes de piezas de color negro o que posean brillo excesivo.



Figura 24. Obtención de la topografía del guardachoque mediante escáner 3D

Antes de proceder a la obtención del modelo CAD, se optimizó la malla a través de la aplicación de filtros de reconstrucción y simplificación de malla basados en el método de pivote de bola mediante la aplicación del software libre llamado Mesh Lab (figura 25), esto permite reducir el uso del recurso computacional una vez que se utilice el módulo de ingeniería inversa con el que cuenta el software NX.

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

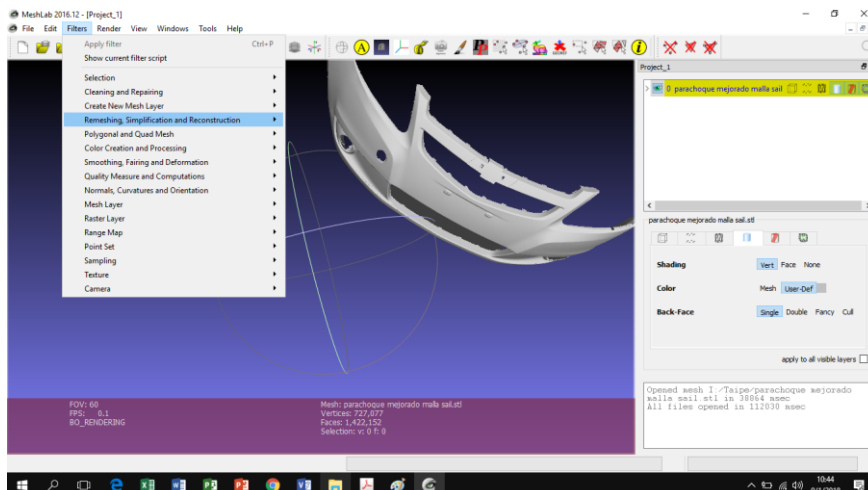


Figura 25. Interface software para edición de malla Mesh Lab (el autor)

Mediante la utilización de los comandos del menú de operaciones del cuerpo de faceta que se encuentra en el módulo de ingeniería inversa del NX, ver figura 26, se fue corrigiendo las diferentes imperfecciones generadas en la malla debido a que existieron zonas a las cuales no tuvo acceso el escáner 3D

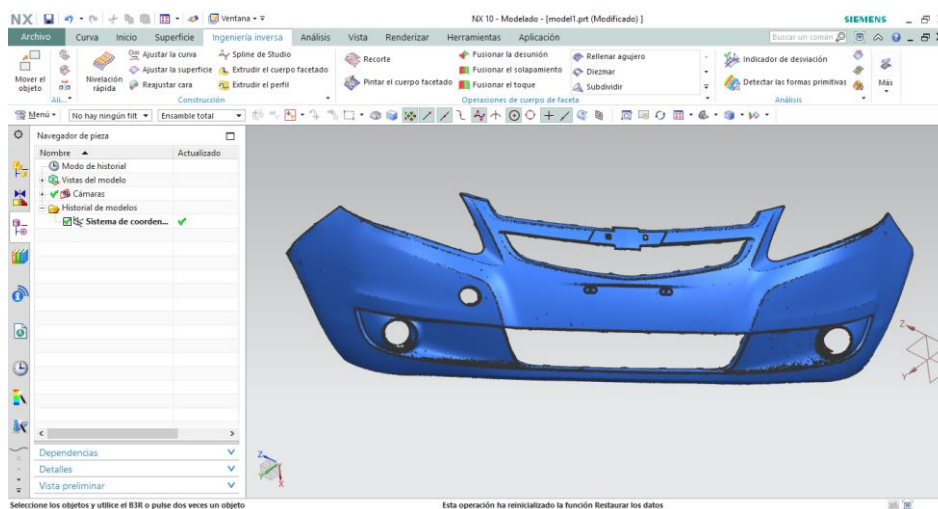


Figura 26. Módulo de ingeniería inversa del programa NX

En la figura 27 se muestran algunas imperfecciones en la malla que debieron ser corregidas mediante el software.

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

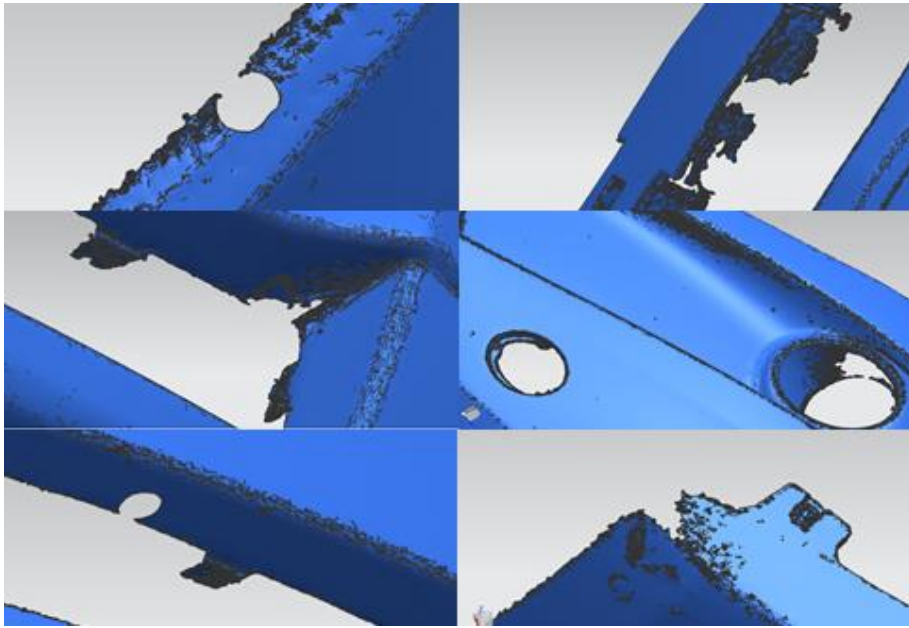


Figura 27. Imperfecciones de la malla en varias zonas de la imagen escaneada

Para las operaciones de reparación de la topografía de la malla se recortaron las áreas donde se encontraban las imperfecciones, luego mediante el comando de relleno de puente se taparon los agujeros, seguidamente se mejoró la textura mediante el suavizado de la superficie, en las figuras 28 y 29 se observa el proceso desarrollado.

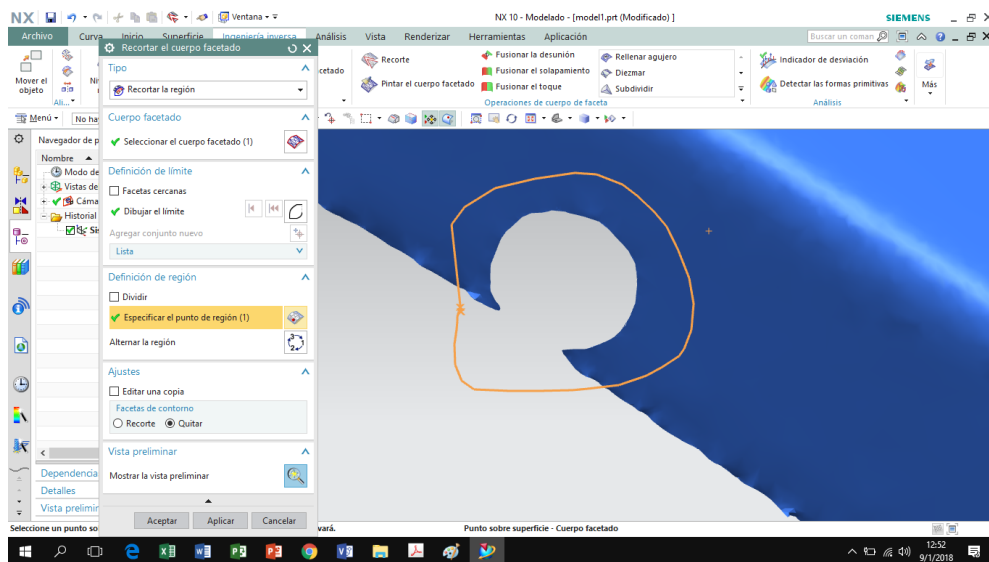


Figura 28. Proceso de eliminación de la sección defectuosa en la malla

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

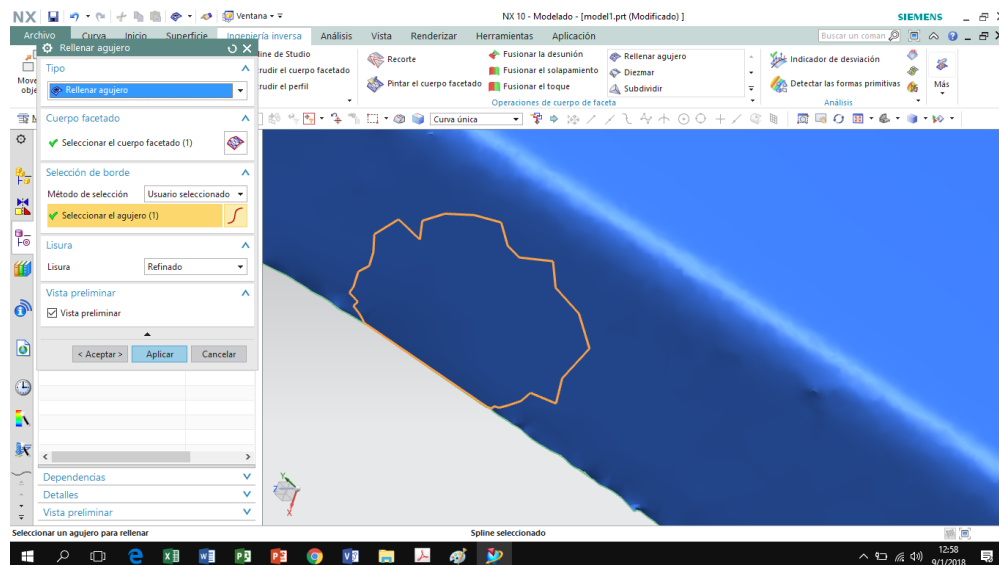


Figura 29. Relleno del agujero producido al eliminar la sección defectuosa de la malla (el autor)

La figura 30 muestra el resultado obtenido una vez que se ha suavizado la malla, este proceso se replicó en cada una de las imperfecciones de la malla para así obtener una textura limpia con la menor cantidad de imperfecciones para a paso seguido convertirla en una superficie.

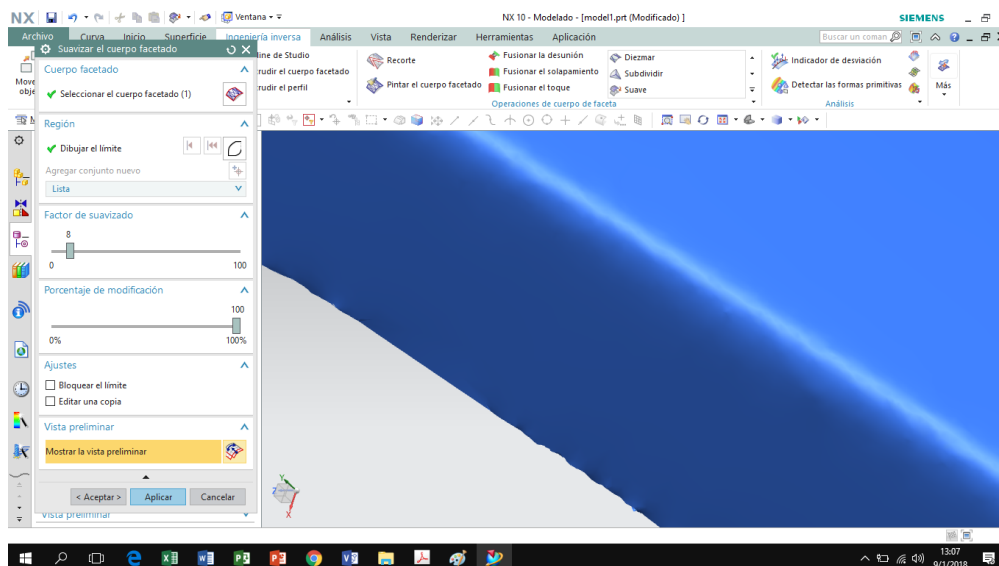


Figura 30. Textura obtenida luego del suavizado

El programa de diseño NX de Siemens posee un módulo para edición de superficies, dentro del cual se pueden ir ajustando las láminas al cuerpo facetado (malla escaneada), para este caso fue muy útil el comando de ajuste de superficie mediante el cual se van creando

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

regiones de forma paulatina las cuales se van convirtiendo en láminas editables como se muestra en la figura 31.

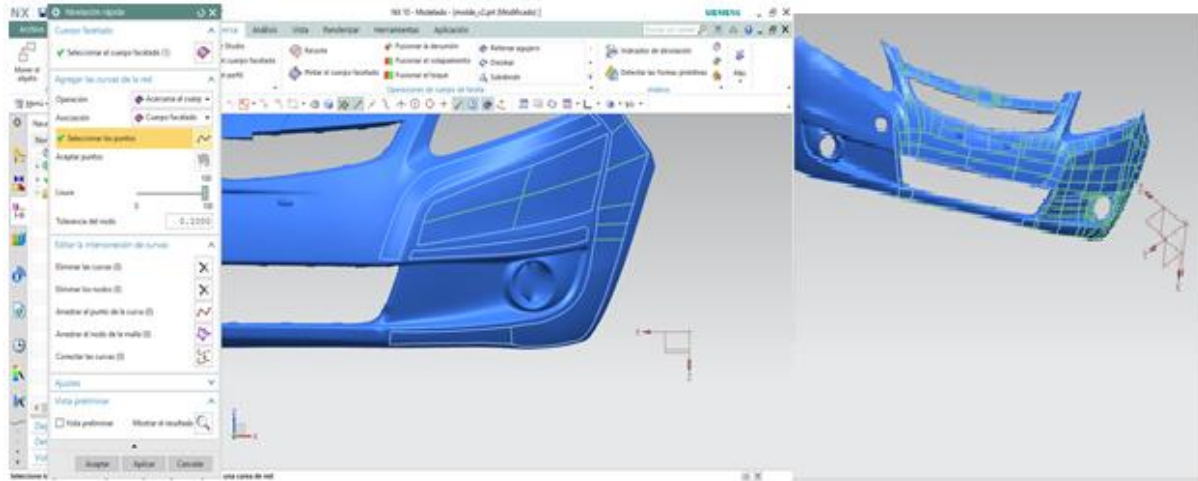


Figura 31. Utilización del comando ajustar la superficie en NX

Con la finalidad de mejorar la precisión de las formas el comando ajustar la superficie posee opciones de ajuste entre los que se emplearon esta es de ajuste de cilindros y superficies libres, que a la vez permiten ahorrar tiempo y obtener superficies primitivas para los lugares donde se las localice, la figura 32 muestra las aplicaciones utilizadas en el presente diseño.

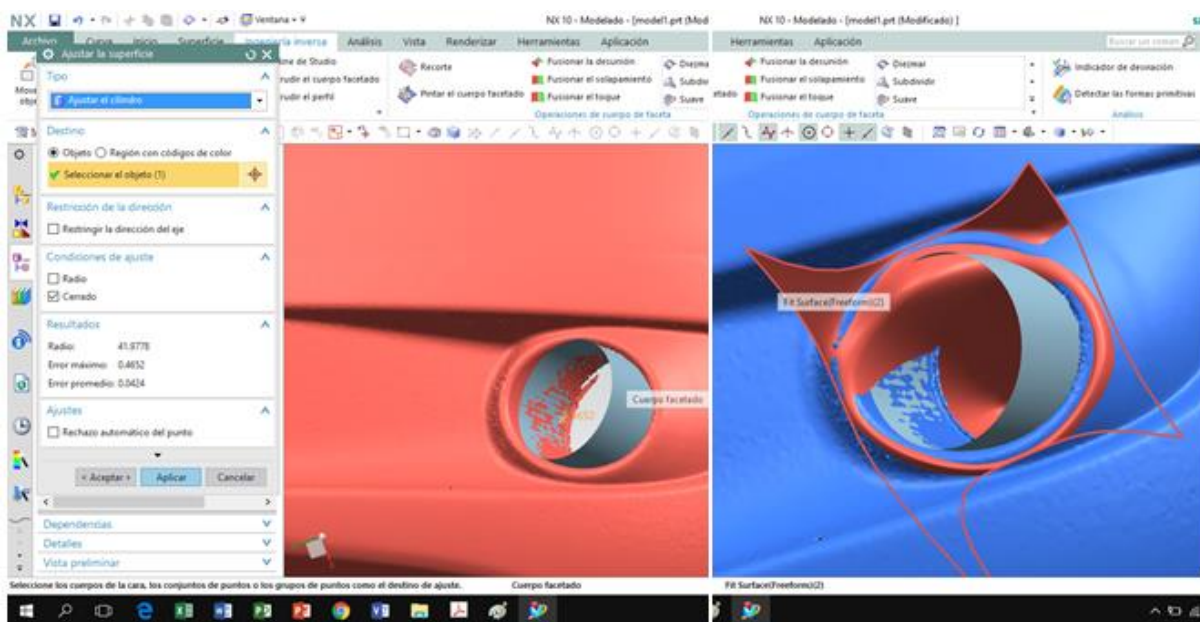


Figura 32. Algunas opciones del comando ajustar superficie en NX

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

Una vez finalizado el proceso de construcción de la superficie, se obtuvo el modelo presentado en la figura 33.

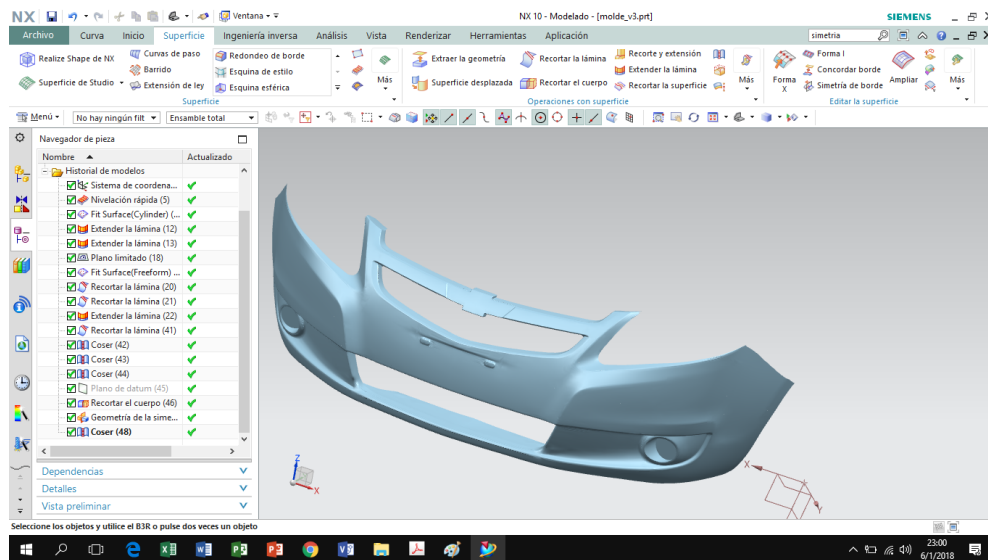


Figura 33. Superficie construida a partir de la malla obtenido mediante un escáner 3D (El autor)

Mediante la aplicación del comando engrosar del módulo para editar superficies se simula la obtención del molde, para lo cual se creó una extrusión de 2 mm de espesor sobre la superficie obtenida similar al molde real obtenido por contacto empleando la resina reforzada por fibra de vidrio, la figura 34 muestra el sólido obtenido en NX.

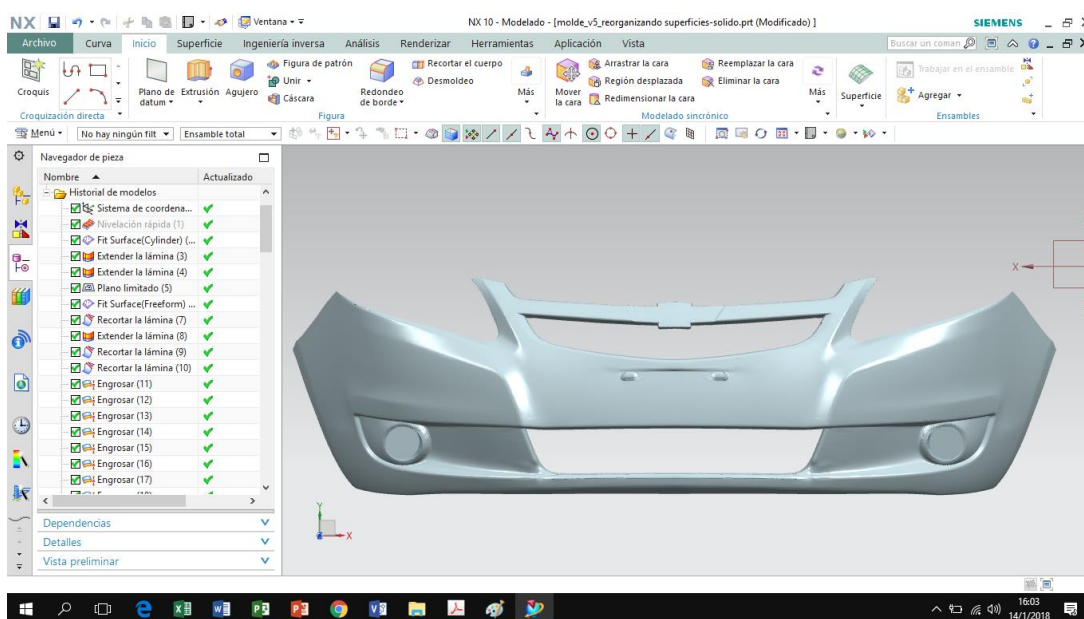


Figura 34. Sólido del guardachoque obtenido mediante ingeniería inversa

Verificación de dimensiones mediante comparación del modelo CAD y el molde obtenido

El presente proceso permitió verificar las dimensiones del molde construido en fibra de vidrio de manera que se pueda garantizar que las dimensiones de las partes producidas a partir del molde posean las mismas características y dimensiones que la pieza original, para lo cual se realizó una comparación entre el modelo CAD obtenido mediante ingeniería inversa y la topografía capturada mediante un escáner 3D del molde construido en fibra de vidrio mediante el software de verificación denominado Geomagic Verify.

Para obtener la malla de puntos del molde construido con fibra de vidrio se siguió un procedimiento similar al empleado para obtener la topografía del guardachoque original, como se ve en la figura 35.

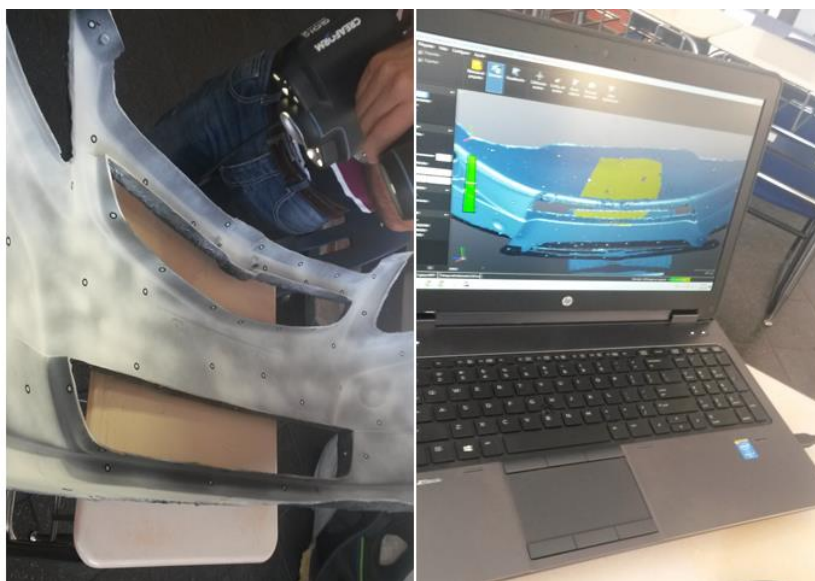


Figura 35. Obtención de la topografía del molde construido en fibra de vidrio

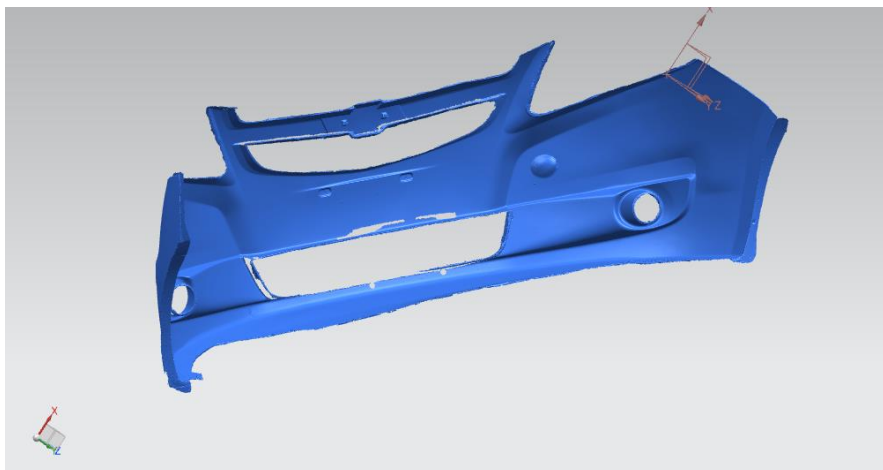


Figura 36. Malla del molde obtenida mediante escaneo 3D

Al haber obtenido los dos modelos para comparación se empleó el software para comprobaciones metrológicas denominado Geomagic Verify, para llevar a cabo estas verificaciones se utilizó una versión de prueba que está disponible en la página electrónica de 3D SYSTEMS. Este programa nos permite realizar comparaciones entre un modelo nominal y un modelo obtenido a partir de un escáner 3D, cuyos resultados pueden indicar tolerancias tanto dimensionales como geométricas. Las figuras 36 y 37 muestran las dos geometrías siendo comparadas mediante el software de comprobación.

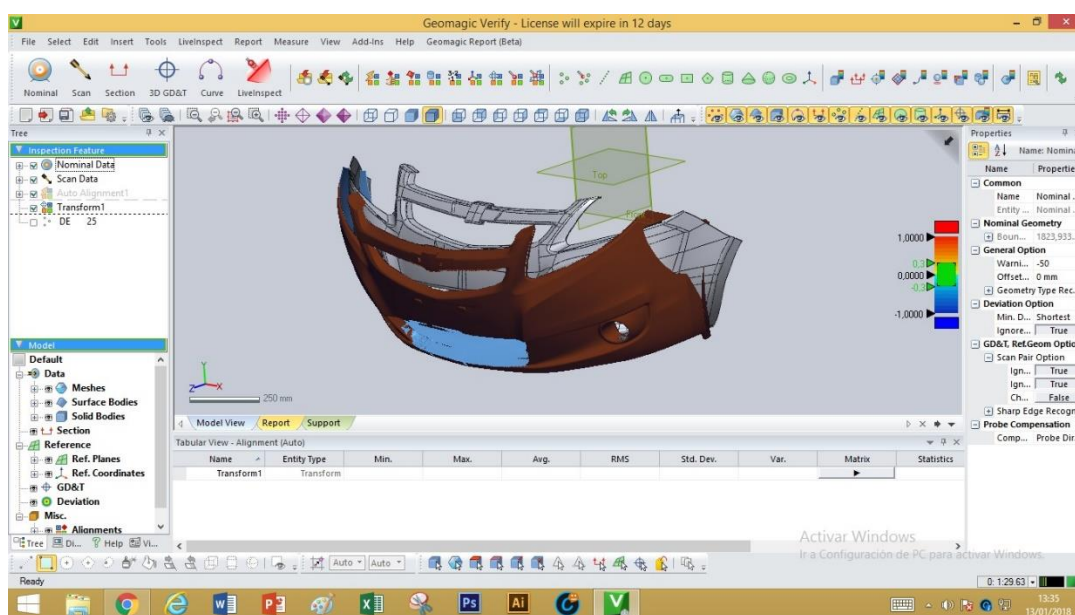


Figura 37. Interfaz del software Geomagic Verify

Verificación de la afectación al acabado superficial del molde por efectos del desmolde continuo

Se realizó un procedimiento experimental para simular un proceso de moldeo abierto con múltiples pasadas bajo dos condiciones, una con agente desmoldante y la otra únicamente tratada con cera de desmolde, con el fin de determinar la degradación gradual de la superficie por efectos del desmolde. Las muestras se produjeron con una geometría de 260 mm x 360 mm x 3 mm en una formación estratificada. Ilustrado en la Figura 38, las dos muestras que se emplearon para las pruebas simulando la superficie del molde, las cuales consistieron en laminado de fibra de vidrio cortada / resina de poliéster laminada con una capa de *gelcoat*, y para la producción de las piezas se empleó cera desmoldante, alcohol de polivinilo (agente desmoldante), *gelcoat* y laminado de fibra /resina poliéster.



Figura 38. Muestras de resina reforzada con fibra de vidrio utilizadas para simular el molde

Por medio de un rugosímetro se realizaron las mediciones de las superficies tanto de las muestras de los moldes, así como de las partes producidas, en la figura 39 se observa el equipo empleado.



Figura 39. Rugosímetro

Se realizaron mediciones en diferentes partes de las muestras para identificar la máxima y mínima rugosidad, ubicando la herramienta en tres partes diferentes según se muestra en la figura 40.

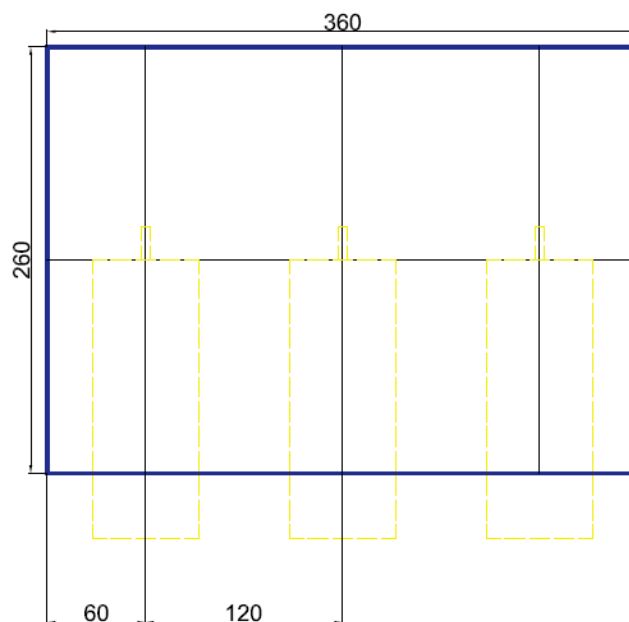


Figura 40. Zonas de ubicación del rugosímetro

Para la medición se parametrizo para pruebas según norma ISO, con una longitud de corte de 0,8 mm y 5 secciones, con una rugosidad media de Rz de $\pm 0,40$, como muestra la figura 41.



Figura 41. Ajuste de parámetros y medición mediante el rugosímetro

Resultados

Obtención del molde del guardachoque por contacto

La obtención del relieve de la pieza o auto parte en nuestro caso el guardachoque se fundamenta en los siguientes aspectos:

- La facilidad que proporciona la matriz de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio para amoldarse a cualquier superficie.
- La capacidad del *gelcoat* para copiar la textura de la superficie con la que está en contacto.
- La habilidad del operario para ubicar las diferentes secciones de fibra de vidrio y

- d) Los tiempos de gelificación, curado y desmolde de las piezas a obtener.
- e) El factor de contracción de la matriz polimérica.

La matriz de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio es capaz de reproducir cualquier tipo de geometría debido a su acción adhesiva, por lo que se obtuvo el negativo del guardachoque que se muestra en la figura 42, otorgando mayor interés a la superficie de contacto, sin mucha atención a la parte externa.



Figura 42. Molde obtenido mediante resina poliéster reforzada con fibra de vidrio. El gelcoat presenta una gran capacidad para reproducir la textura de la superficie con la que se encuentra en contacto directo, esto se pudo evidenciar al momento de elaborar las muestras para medición de acabado superficial, mediante una inspección visual se observan rasgos y defectos copiados de la superficie del molde, otra característica relacionada con la superficie se refiere a la similitud del brillo que tienen todas las partes, como puede observarse en la figura 43 con diferentes muestras copiadas de la parte inicial.

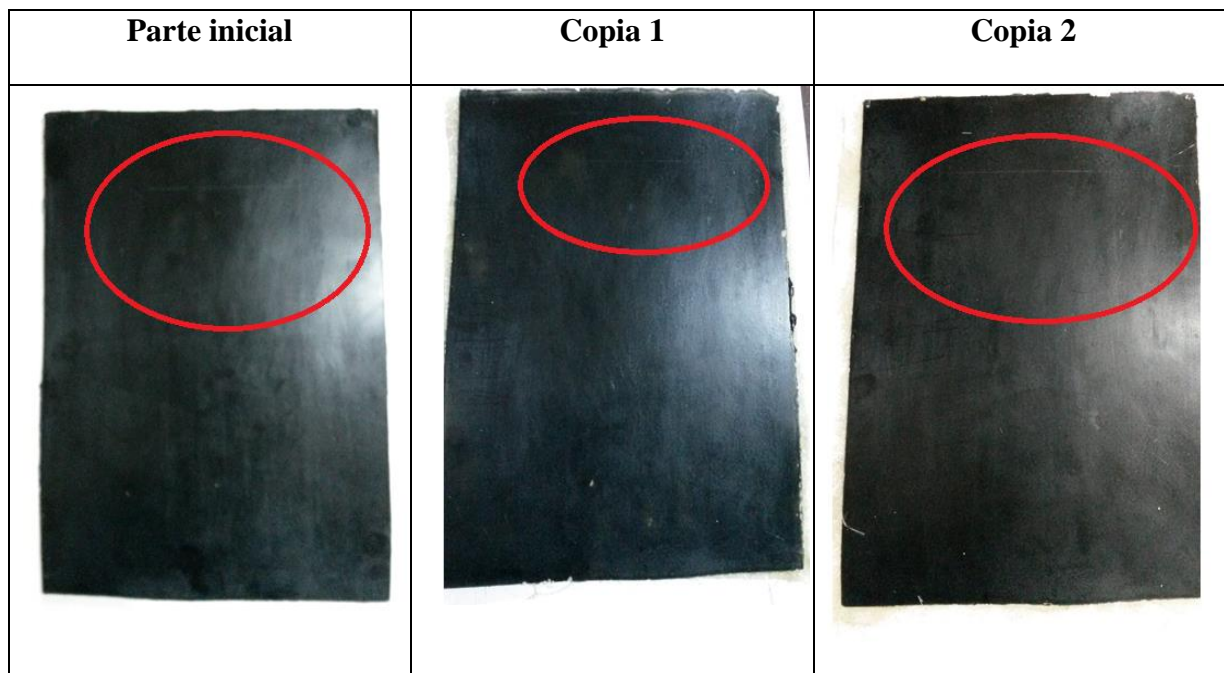


Figura 43. Muestras de superficies copiadas mediante resina

La bibliografía indica que para conseguir un laminado uniforme en piezas de gran tamaño se deberán realizar juntas solapadas con distancias comprendidas entre 50 mm y 150 mm, en lo posible evitando cortes rectos, con una tendencia a utilizar secciones obtenidas mediante trozado con esto se garantiza el cruce de las fibras, como se ve en la figura 44.



Figura 44. Formas de recorte de la fibra de vidrio para solape

Se debe tomar en cuenta la temperatura de trabajo ya que incide directamente en los resultados a obtener, los mejores resultados se obtienen a temperaturas comprendidas entre 17 °C y 22 °C (Besednjak, Procesos de fabricación de embarcaciones, 2005). Acorde lo indica (Delta Glass, 2017), en primer lugar se debe mezclar la resina con el acelerador, luego agregar el catalizador, para el caso que la temperatura ambiente fuera mayor que la indicada, se puede reducir la cantidad de acelerador con lo que se mantendrá el tiempo de trabajo caso contrario se debe aumentar con lo que se reduce o aumenta el tiempo de trabajo. El curado se verifica a las 24 horas, y en todos los casos la dureza final se obtiene a los 7 días (25°C).

La tabla 6 presenta el tiempo empleado para la obtención del molde mediante el proceso de moldeado por contacto.

Tabla 6.

Tiempo empleado en la manufactura del molde tipo cascara

	sección 1 Neblinero RH	sección 2 Neblinero LH	sección 3 Rejilla inferior	sección 4 Mascarilla	Total
Colocación de límites para desmolde	15	15	10	10	50
Preparación de la superficie (Cera)x 5	24	24	30	30	108
Colocación desmoldante	2	2	3	3	10
Aplicación gelcoat(brocha)	4	4	5	5	18
Aplicación primera capa	18	18	15	15	66
Aplicación segunda capa	18	18	15	15	66
Aplicación tercera capa	15	15	12	12	54
Aplicación capa final	15	15	12	12	54
Elaboración contra molde anclajes	20	20	15	15	70
Tiempo total (min)	131	131	117	117	496
Tiempo en horas de trabajo	2,18	2,18	1,95	1,95	8,27

Nota: se debió dividir al guardachoque en 4 regiones debido a la complejidad de la geometría

Modelo CAD del guardachoque original

Mediante la aplicación de técnicas modernas de ingeniería inversa se logró obtener el modelo CAD, a partir del cual se pueden obtener los planos con las dimensiones y formas

constructivas del modelo, lo que permitió una comparación con el modelo obtenido a través del copiado por contacto mediante resina, figura 45.

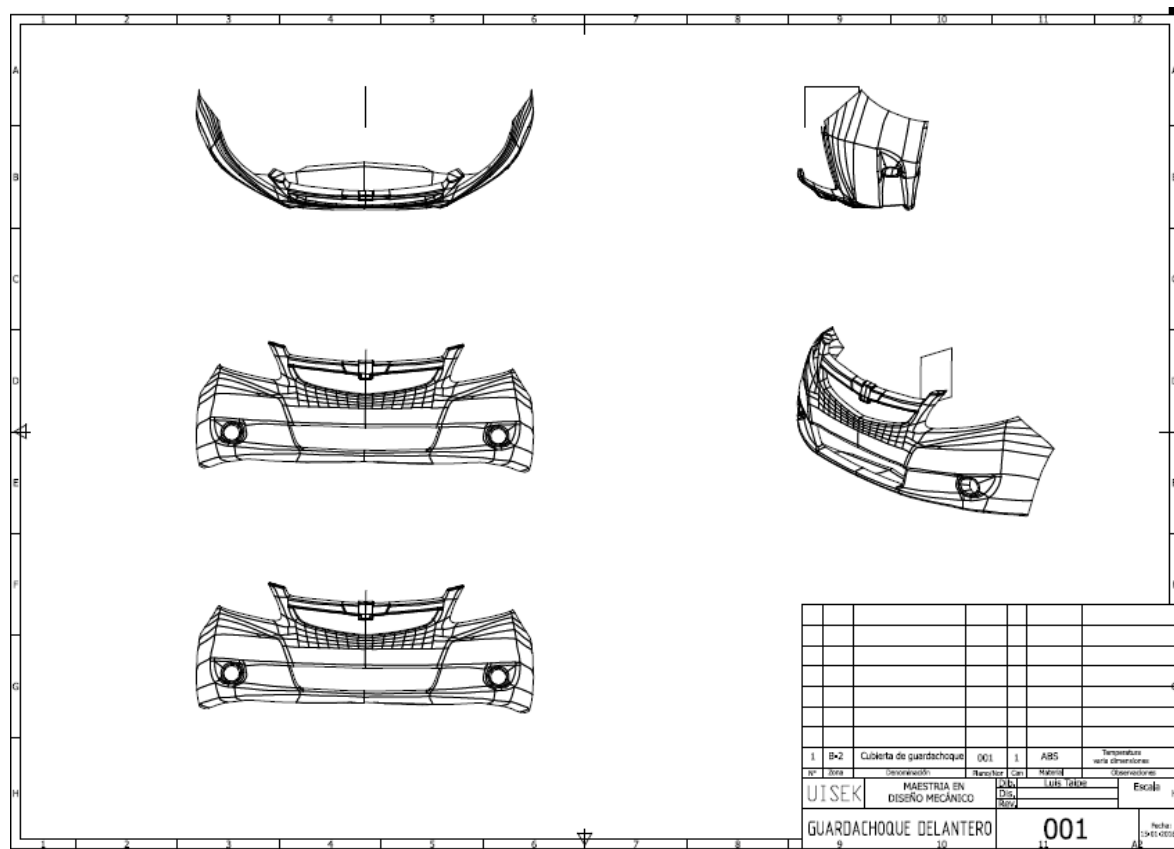


Figura 45. Vistas obtenidas a partir del sólido obtenido mediante ingeniería inversa

A partir del modelo CAD sólido que se obtuvo al aplicar una pared con un grosor de 2 mm, se pudieron obtener varios valores muy útiles para el presente trabajo, la tabla 7 muestra los valores de superficie, volumen y peso obtenidos:

Tabla 7.

Dimensiones obtenidas a partir del modelo CAD

Dimensiones	Valores obtenidos
Volumen	2417023,21 mm ³
Área	2481937,25 mm ²
Masa	18,92 kg
Peso	185 N

Nota: dimensiones conseguidas por el autor a partir del modelo CAD obtenidas mediante ingeniería inversa

Comparación del modelo CAD con el modelo escaneado.

Se obtuvieron datos de la desviación completa de la pieza escaneada respecto al modelo CAD, donde se observa que las áreas pintadas de rojo muestran un exceso de material y en azul el caso contrario, llegando a evidenciarse un desvío total de la pieza, la tolerancia admitida por defecto por el programa es de ± 0.1 mm, pero al tratarse de una pieza flexible se aplicó una tolerancia de 2 mm, tomando en cuenta que se empleó un factor de engrosamiento en la construcción del modelo CAD de 2 mm, cómo se observa en la figura 46.

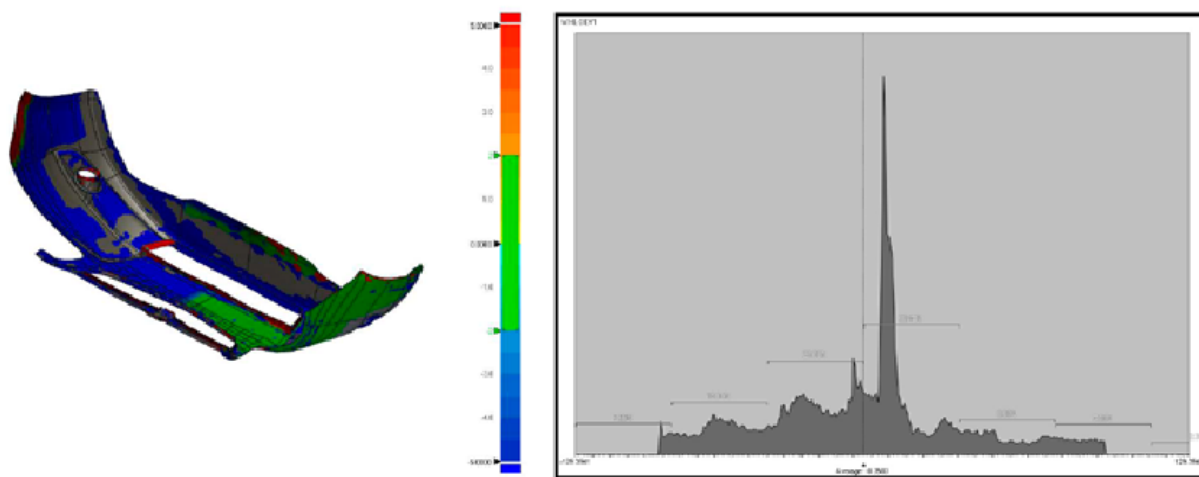


Figura 46. Muestra de la desviación total de la pieza escaneada respecto al modelo CAD.

La tabla 8 muestra los valores de desviación obtenidos del reporte que arroja el software Geomagic Verify, donde se indica que existe una desviación de 93,4mm y únicamente una parte del molde está dentro de la tolerancia especificada lo que representa un 23% del total de la pieza. Las partes resaltadas en azul muestran la región donde el molde se ha dilatado y separado.

Tabla 8.

Desviación total entre el modelo CAD y la imagen escaneada del guardachoque

Desviaciones	Valores en mmm
Mínimo	-93.4002
Máximo	93.4003

Promedio	-8.3503
RMS	41.2029
Desviación estándar	40.3479
Variación	1627.954
+Promedio	24.5656
-Promedio	-36.2084
En tolerancia (%)	23.8069
Fuera de tolerancia (%)	76.1931
Sobre tolerancia (%)	48.3163
Bajo tolerancia (%)	27.8767

Nota: La tabla muestra valores de desviación total en relación a todo el guardachoque

En las figuras 47 y 48 se muestran comparaciones entre los perfiles obtenidos al realizar seccionamientos en tres diferentes regiones, el primer corte realizado de forma horizontal muestra una desviación en el lado izquierdo del molde del guardachoque (línea punteada), lo que coincide con los cortes verticales realizados en los lados derecho e izquierdo del molde.

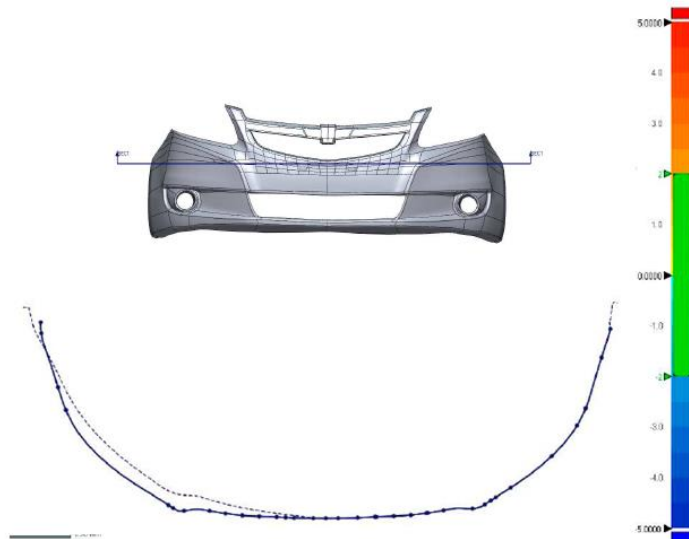


Figura 47. Desviación obtenida mediante seccionamiento horizontal

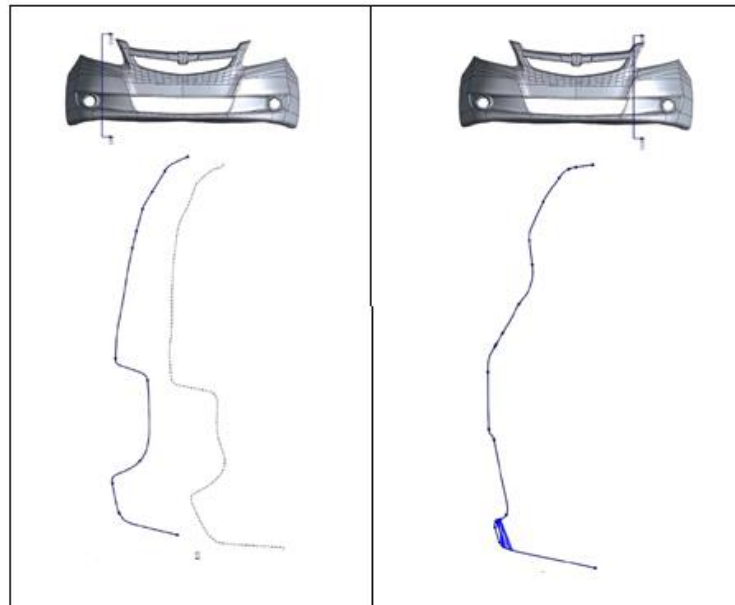


Figura 48. Desviación obtenida mediante seccionamiento horizontal lado izquierdo y derecho

A continuación, se observa la desviación de los límites del guardachoque, tomados del perfil total del molde, de la cavidad de la rejilla y del alojamiento del neblinero, donde la figura 49 muestra un exceso de material del molde escaneado en relación con el molde construido mediante dibujo asistido por computadora.

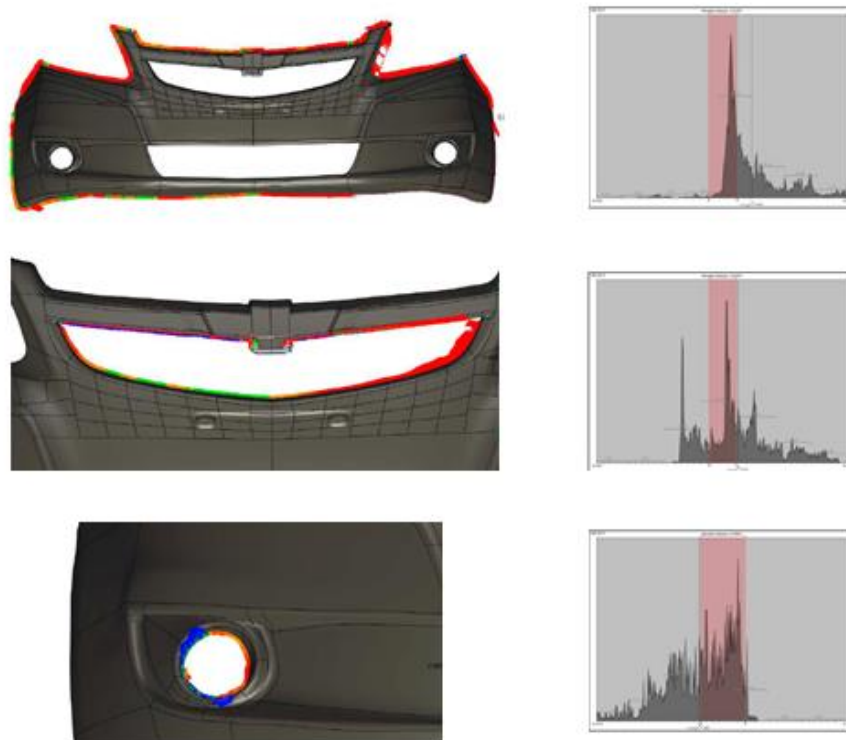


Figura 49. Comparación y obtención de la desviación en diferentes límites

La tabla 9 a continuación muestra los valores arrojados por el programa donde el dato más importante es la sobre tolerancia ya que indica que existe un exceso de material del molde construido con respecto al molde CAD,

Tabla 9*Valores de desviación en los límites del guardachoque*

Desviaciones	Perfil total	Alojamiento	Neblineros
Mínimo	-29.9612	-17.7309	-28.7562
Máximo	46.5961	42.8588	7.819
Promedio	10.1069	5.5164	-5.2469
RMS	15.1683	14.5941	9.2509
Desviación estándar	11.3105	13.5114	7.619
Variación	127.9282	182.5584	58.0491
+Promedio	10.9569	11.9859	2.6602
-Promedio	-10.2025	9.3854	-8.9994
En tolerancia (%)	41.5132	32.0332	52.6803
Fuera de tolerancia (%)	58.4868	67.9668	47.3197
Sobre tolerancia (%)	56.164	44.6603	2.6015
Bajo tolerancia (%)	2.3227	23.3065	44.7182

Nota: los valores mostrados en la tabla, indican las desviaciones en mm en tres sectores distintos

Seguidamente, la figura 50 muestra otra prueba desarrollada, en la cual se analizan las desviaciones de las siluetas, donde las partes pintadas de azul indican una excesiva desviación al lado izquierdo del guardachoque, acorde con los datos de la tabla 10.

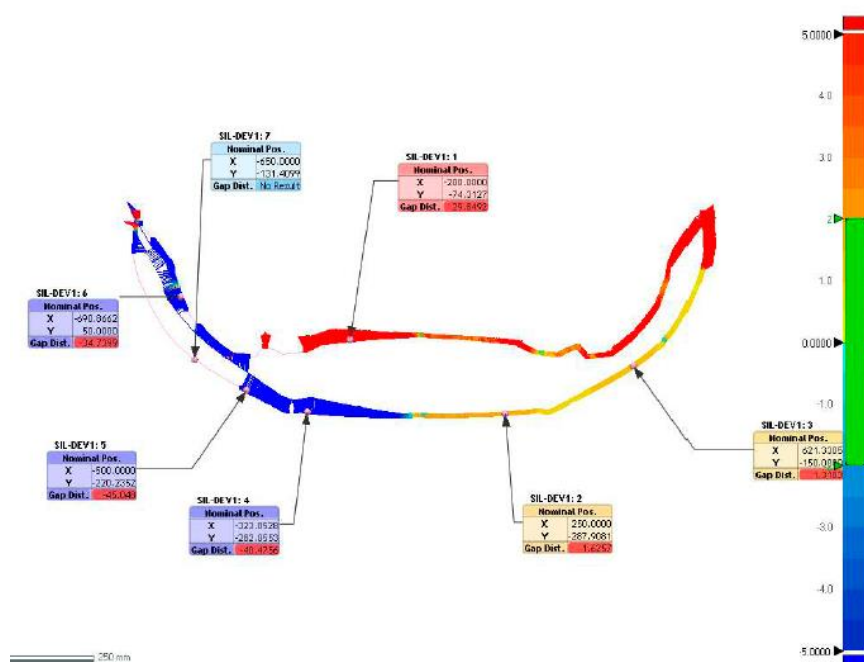


Figura 50. Desviaciones de silueta del guardachoque

Tabla 10

Valores de desviación de la silueta del modelo CAD respecto al molde construido

Desviaciones	Valores en mm
Mínimo	-47.5232
Máximo	46.5496
Promedio	7.0454
RMS	17.3638
Desviación estándar	15.8702
Variación	251.864
+Promedio	11.9515
-Promedio	-18.9613
En tolerancia (%)	0.1843
Fuera de tolerancia (%)	99.8157
Sobre tolerancia (%)	84.04
Bajo tolerancia (%)	15.7757

Al analizar la silueta lateral (figura 51) se observan desviaciones de hasta 41 mm según la tabla 11, evidenciando que las geometrías no se corresponden entre sí.

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

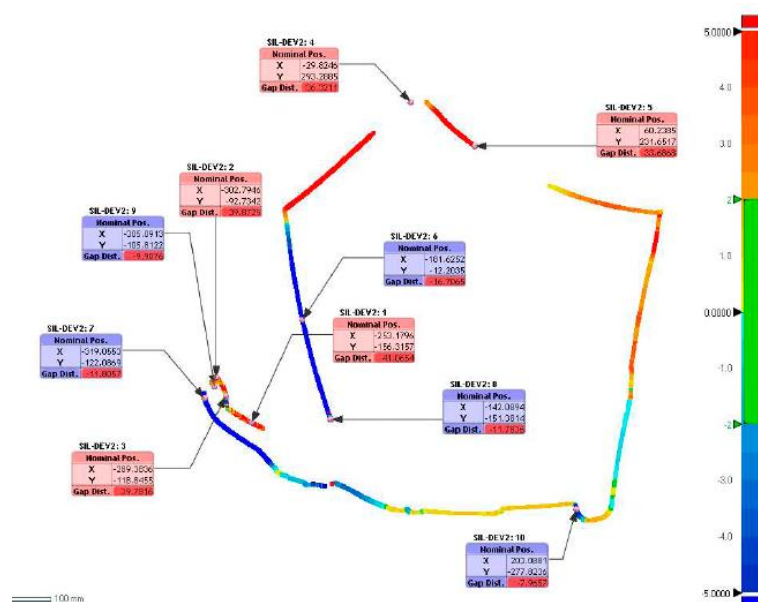


Figura 51. Desviaciones de silueta desde la vista lateral

Tabla 11.

Valores correspondientes a las desviaciones de silueta desde la vista lateral

Desviación	Valores en mm
Mínimo	-16.7605
Máximo	41.0654
Promedio	3.0083
RMS	12.6676
Desviación estándar	12.3052
Variación	151.4176
+Promedio	9.2756
-Promedio	-7.861
En tolerancia (%)	1.6543
Fuera de tolerancia (%)	98.3457
Sobre tolerancia (%)	62.5
Debajo de la tolerancia (%)	35.8457

Los datos mostrados anteriormente en esta sección se contraponen a los resultados obtenidos en los modelos reales, donde se puede observar (figura 52) que tanto el guardachoque original como el molde calzan perfectamente, este clase de error se debe al tamaño y flexibilidad de la pieza motivo de este estudio ya que al momento de escanear tanto el guardachoque para obtener el CAD, como el molde de fibra no mantuvieron una sola

configuración en su geometría, para lo cual se deberá limitar la flexibilidad de ambas partes mediante una estructura rígida.



Figura 52. Molde y pieza original

Verificación del acabado superficial.

Las mediciones realizadas a la superficie mediante el rugosímetro indican un valor de rugosidad máxima de $0,339 \mu m$ para la probeta sin agente desmoldante por otra parte se muestra un valor de rugosidad máximo de $0,200 \mu m$ para la probeta con agente desmoldante, datos tomados luego de producir 20 copias para esta prueba, la tabla 12 muestra los datos obtenidos luego de cada pasada en dos diferentes sectores de prueba.

Tabla 12

Rugosidad medida luego de cada pasada

Molde	Rugosidad 1 (μm)	Rugosidad 2 (μm)
Valores iniciales	0,138	0,339
Valores primera pieza	0,142	0,311
Valores segunda pieza	0,190	0,307
Valores tercera pieza	0,244	0,349
Valores cuarta pieza	0,239	0,367
Valores quinta pieza	0,244	0,315
Valores decima pieza	0,224	0,250
Valores decima quinta pieza	0,200	0,375

Nota: Los valores han sido obtenidos luego de cada desmolde de la pieza

Análisis de resultados

Selección de materiales.

A pesar que Besednjak (2005) en su libro de procesos de fabricación de embarcaciones, menciona la existencia de una amplia gama de resinas para elaboración de materiales compuestos, en el país es muy limitada la gama de resinas disponibles en el mercado, por lo que se ha popularizado el uso de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, los demás tipos únicamente se los puede conseguir bajo pedidos especiales que significan un encarecimiento en el costo final de la pieza. Por otro lado, los poliésteres presentan ventajas como son: el bajo costo, un tiempo específico de trabajo sin cambio de viscosidad hasta que ocurre la gelificación pudiéndose ajustar para el proceso y otras condiciones de fabricación al equilibrar los efectos del inhibidor, el promotor y el catalizador, de forma adicional la simplicidad de modificar las propiedades mecánicas y ambientales para adaptarse a los requisitos del proceso de fabricación o el uso final previsto variando los componentes según lo mencionan Cassis & Talbot (1982) en el manual de materiales compuestos.

Proceso de copiado del guardachoque mediante la técnica de *rapid tooling* moldeo por resina

Una de las ventajas que presenta la resina poliéster es que puede ser moldeada a mano con la ayuda de utillaje simple, Sudbury, Springfield, Kunc, & Duty (2016), menciona la importancia del prototipado rápido y la producción rentable partes compuestas de volumen limitado son vitales reducir el ciclo de diseño y los tiempos de producción, mediante la técnica de colocación manual se puede obtener tiempos bastante cortos de fabricación y copiado de piezas, la tabla 13, muestra una comparación entre los tiempos de fabricación a temperatura ambiente (20 °C), donde se puede observar que los tiempos obtenidos son similares a los recomendados por 2 fabricantes como son Delta Glass y AOC, así como la información

existente en el manual para materiales compuestos. Por otro lado si comparamos los datos proporcionados por Chua, Hong, & Ho (1999), donde indica que los tiempos para la obtención de herramientas rápidas puede superar las dos semanas, para el caso del presente estudio se construyó un molde de una sola parte mediante la técnica de moldeo directo donde se obtuvo únicamente el negativo tipo cáscara en un tiempo de 8,5 horas. Otro aspecto muy importante es que se pueden acelerar los tiempos de gelación y curado al modificar la dosis de acelerador y catalizador, Wheaterhead (1980) indica que una reducción en el contenido de catalizador aumentará el tiempo de gelificación y una reducción en el contenido del acelerador aumentará el tiempo de gelificación, pero por otro lado, el aumento de la temperatura de curado reduce el tiempo de gelificación y el aumento del grosor de la película o del laminado reduce el tiempo de gelificación.

Tabla 13.

Tiempos de trabajo para la resina poliéster

	Tiempos tomados de la experimentación	(Delta Glass, 2017)	(AOC Resins, 2018)	(Sidwell, 1998)
Gelificación	18 min	20 min	10-20 min	15-50 min
Curado	4 horas	24 horas	2-4 horas a 82°C	4 horas
Dureza final	7 días	7 días	3 días	8 días

Nota: Comparación de los diferentes tiempos para trabajo con resina poliéster según varios autores

Otro aspecto importante es la capacidad del gelcoat para copiar la textura de la superficie de la pieza a ser copiada como lo explica Campbell (2010), como se vio en el capítulo anterior la calidad superficial del molde dependerá del acabado superficial de la pieza que se está copiando, según lo indica Cheah, Chua, Lee, Feng, & Totong, (2004, pág. 311) los índices de calidad aceptables para las superficies producto del rapid tooling están entre 15-20

μm , por lo que si se observan las muestras se han obtenido valores comprendidos entre 0,137 y 0,368 μm , con lo que tomando como base estos valores se podría obtener una proyección del tiempo de vida útil de la herramienta obtenida.

Comparación entre el molde copiado mediante escáner con el molde CAD

La aplicación de software para ingeniería inversa para obtener la geometría de piezas complejas es parte esencial hoy en día en la fabricación de moldes, en este caso el modelo CAD sirve como referencia para que el software de verificación lo compare con la pieza física mediante la información tomada con un escáner 3D. Al realizar la comparación entre el modelo obtenido mediante software de ingeniería inversa y el modelo real escaneado se observó que el 24 % del molde está dentro de la tolerancia con diferencias de 93 μm en las regiones de mayor desviación esto al analizar la desviación total del molde, pero si se observa la figura 49, el código de colores indica que toda la tolerancia está ubicada en la parte derecha del molde, lo que se corrobora al observar las desviaciones obtenidas mediante seccionamiento donde se ve que la desviación está ubicada en la mitad izquierda del molde (figura 47 y 48) generando los altos valores de desviación, sin embargo al realizar los análisis en las diferentes siluetas se observa que la similitud mejora ya que bordea el 50 % (tabla 9), esto al realizar la comparación en sitios específicos como son los alojamientos de los neblineros o de las rejillas, por lo que se deduce que estas diferencias se deben por un lado a la flexibilidad del guardachoque a partir del que se tomó la información para la obtención del modelo CAD así como del molde construido de resina ya que como se observa en la figura 52 al comparar los modelos reales, estos encajan perfectamente, otra de las razones por la cual el error aumenta se debe a la calidad de la nube de puntos del escaneo ya que al tener regiones no detectadas por el escáner 3D la información aparece incompleta generando vacíos que el programa de verificación los pinta de color azul como ausencia de material.

Análisis de los costos para construir el molde para guardachoques

Uno de los aspectos de mayor influencia en cualquier tipo de proyecto son los costos ya que de esto depende la factibilidad o no para la producción, a continuación, se presentan los valores invertidos:

Costos de materia prima

La tabla 14 describe cada uno de los materiales utilizados para la construcción del molde, algunos de estos materiales no se utilizaron en su totalidad ya que son presentaciones mínimas las que se adquirieron.

Tabla 14.

Costos de materia prima del molde

Detalle	Cantidad	Unidad	Valor unitario	Valor Total
cera desmoldante	1	kg	13	13
alcohol polivinílico	1	kg	8	8
gelcoat	1	kg	15	15
resina poliéster	5	kg	4	20
estireno	2	kg	3,5	7
cobalto 12%	2	60cc	4	8
meck	2	120 cc	3	6
fibra de vidrio	5	m	3	15
brochas	4	unidad	1,5	6
cartón gris	1	pliego	4	4
cemento de contacto	1	frasco	2,5	2,5
waipe	1		1	1
Total				105,5

Costos mano de obra

Esta sección describe los valores por concepto de mano de obra empleada en la construcción del molde, los valores presentados en la tabla 15 se han calculado en base a un promedio del ingreso mensual percibido por un artesano dedicado a esta actividad que es de

USD 600. Cabe señalar que esta actividad requiere de mucha habilidad y experiencia por parte del operario.

Tabla 15.

Costos de mano de obra para fabricación del molde

Concepto	Cantidad	Unidad	Hora/hombre	Total
preparación superficie	8	hora	3,75	30
colocación fibra de vidrio	8,5	hora	3,75	31,875
desmolde	2	hora	3,75	7,5
reparaciones molde	8	hora	3,75	30
Total M.O.				99,375

Control de Calidad

Acorde el análisis presentado en las secciones anteriores, la fabricación del molde por el método de colocación manual tipo cascara de una sola pieza tendría un costo de USD 205, pero las exigencias del sector automotriz hacen que se requiera de un control de calidad de las piezas fabricadas, a continuación en la tabla 16 se presentan estos costos.

Tabla 16.

Control de Calidad

Concepto	cantidad	unidad	valor unitario	valor total
escaneo pieza	1	pieza	300	300
ingeniería inversa	40	hr/hombre	12,5	500
escaneo molde	1	pieza	300	300
pruebas metrología	1	pieza	300	300
Total, control de calidad				1400

Costo total del molde

Finalmente, la tabla 17 muestra los costos que generaría la fabricación de un molde de manera que permita cumplir los requisitos mínimos de calidad.

Tabla 17.*Costo total del molde*

Denominación	valor
costo mano de obra	99,375
costo materia prima	105,5
control de calidad	1400
Costo total	1604,875

Diseño de propuesta

La figura 53 presenta el proceso de fabricación de un molde para guardachoque mediante la técnica de colocación manual donde se han añadido algunos pasos con el fin de mejorar el proceso y a la vez garantizar la estabilidad dimensional, el proceso normal se muestra en color azul y la propuesta de mejora en color verde, de esta manera se deberá procurar la calidad de la autoparte.

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

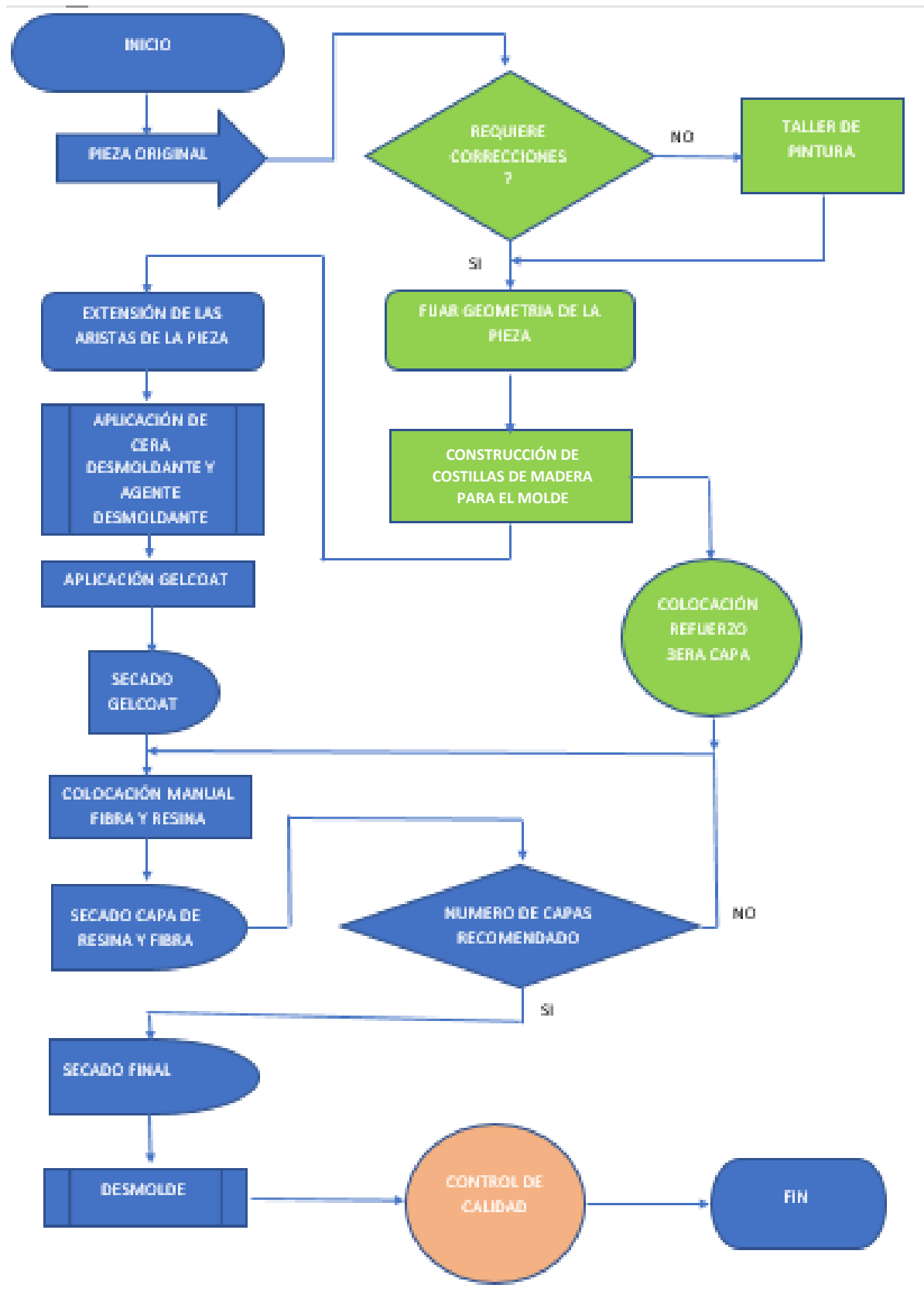


Figura 53. Propuesta para el proceso de fabricación del molde por moldeo con resina

Acorde con los análisis anteriores uno de los factores que provocan deficiencias de forma tanto en la construcción del molde como en los procesos de control de calidad e ingeniería inversa lo constituye la flexibilidad del guardachoque debido al tamaño y la delgada sección por lo que se hace necesaria la implementación de costillas de refuerzo en los lugares donde se observan mayor deformación, es decir tanto en la sección horizontal que constituye la curvatura del frontal del vehículo como las secciones horizontal, como se ve en el modelo mostrado en la figura 54, donde has añadido costillas o nervios ubicados al lado opuesto de la zona de moldeo, siguiendo la consideraciones que hace Wheaterhead (1980, p18) para moldes grandes, donde indica que deben rigidizarse con nervios en el reverso fabricados ya sea con tubos de plástico o metal, plástico espumoso, cuerda de papel o costillas de madera.

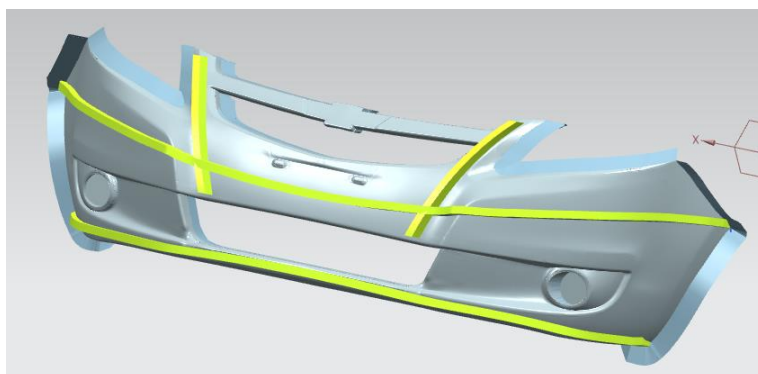


Figura 54. Costillas implementadas para reducir la deformación del molde.

Por otro lado, se debe realizar la limpieza de la nube de puntos obtenida del modelo real, ya que como se vio antes también genera información errónea, y limitar la flexibilidad del guardachoque original tanto en el proceso de moldeo como al momento de capturar la información para obtención del modelo mediante dibujo asistido por computadora, con el fin de mejorar la información que se obtenga mediante el software de control de calidad.

Una vez implementados estos cambios se evidencian mejoras en la forma del molde lo que se verifica mediante la aplicación del proceso de control de calidad mediante el software Geomagic Verify mediante el cual se realizaron mediciones similares a las presentadas en las secciones anteriores, los datos consolidados se muestran a continuación en la tabla 18.

Tabla 18.

Nuevos valores una vez aplicadas mejoras en la fabricación del molde

Desviaciones	Desviación Total	Sección Horizontal	Sección vertical RH	Sección vertical LH	Limite exterior	Perfil rejilla	Perfil neblineros
Mínimo	-66,3832	-1,0042	-8,1946	-5,0567	-19,7939	-26,5869	-28,2038
Máximo	66,3894	1,8247	6,6865	3,635	12,7665	14,6822	8,5824
Promedio	4,1552	0,1004	0,0342	-0,0617	2,9366	2,3414	-4,4274
RMS	14,2697	0,3329	1,0702	0,7944	4,3936	6,5459	8,497
Desviación estándar	13,6513	0,3174	1,0697	0,792	3,268	6,1128	7,2524
Variación	186,359	0,1007	1,1443	0,6272	10,6799	37,3664	52,5974
+Promedio	9,9405	0,3039	0,5545	0,4611	3,5701	4,6292	3,2271
-Promedio	-2,2541	-0,1469	-0,2677	-0,3721	-1,5418	-6,2994	-8,2293
En tolerancia (%)	65,0082	100	97,358	95,3765	44,1687	32,8968	15,1574
Fuera de tolerancia (%)	34,9918	0	2,642	4,6235	55,8313	67,1032	84,8426
Sobre tolerancia (%)	8,3678	0	1,7173	1,5852	52,9992	50,063	25,9525
Bajo tolerancia (%)	26,624	0	0,9247	3,0383	2,8321	17,0402	58,8901

Nota: los valores mostrados indican desviaciones medidas en mm y en porcentajes

La figura 55 muestra la desviación total donde se observa que existe mayor un mayor porcentaje de similitud, llegando al 65% del total del molde que se encuentra dentro de una tolerancia de 2mm.



Figura 55. Desviación total molde corregido

Si se observa la curva producida obtenida a partir de seccionar de forma horizontal el guardachoque se nota que no existe desviación dentro del modelo real y el modelo CAD, esto debido al análisis en la región de la costilla principal, de forma adicional la figura 56 muestra las desviaciones en cuatro puntos diferentes donde arrojan valores de desviación menores a 0,3 mm.

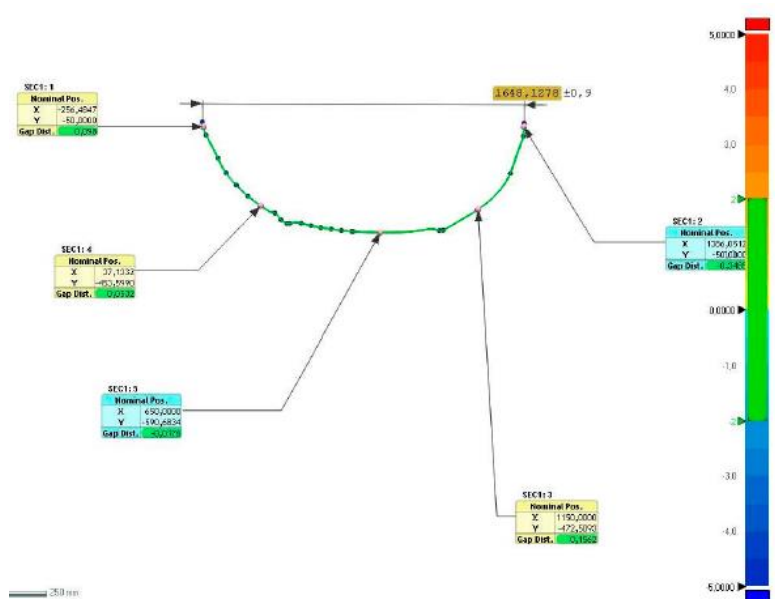


Figura 56. Desviación en la curvatura del molde

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

Las figuras 57 y 58 muestran las desviaciones obtenidas a partir de secciones verticales y muestran una similitud de alrededor del 95% según lo indica la tolerancia en esta región.

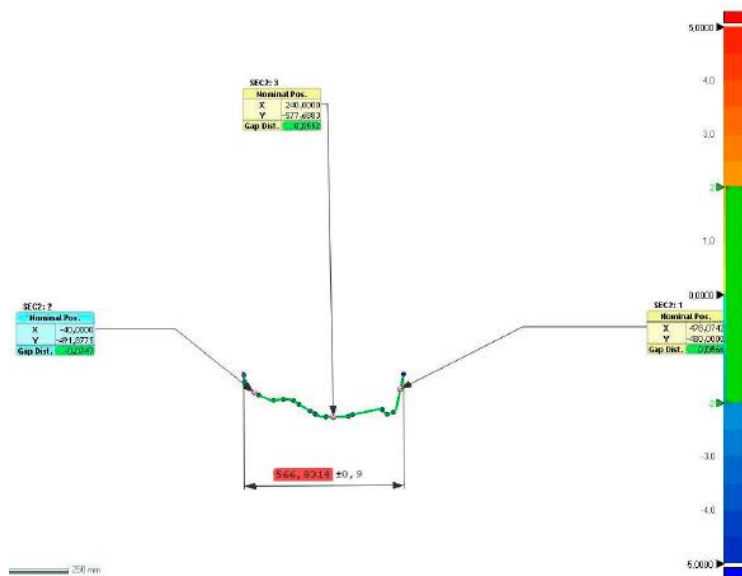


Figura 57. Desviación de la curvatura en vista de corte vertical

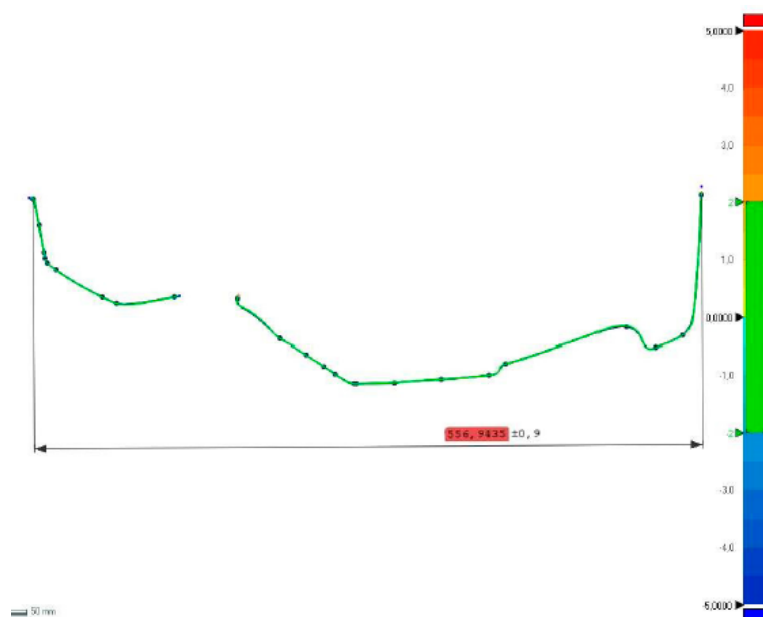


Figura 58. Desviación de la curvatura vista desde sección vertical derecha

Por otra parte, la figura 59 muestra las desviaciones en los perfiles o siluetas del molde donde existen desviaciones elevadas debidas principalmente a excesos de material en el

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

modelo real y producto de las extensiones de las aristas, por lo que los excesos sobrepasan los 2 mm y se alejan del límite de tolerancia.

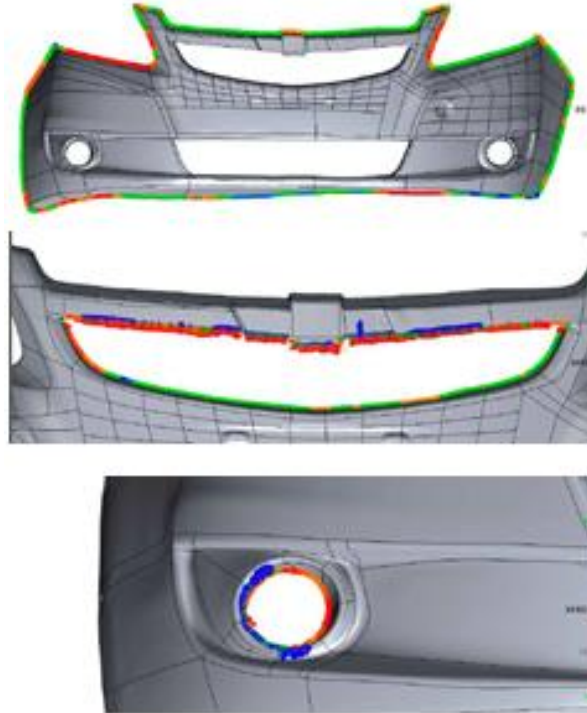


Figura 59. Desviación de los límites de los perfiles total, rejilla y neblineros

Discusión de resultados

La propuesta descrita en el diagrama anterior aplica mejoras al proceso artesanal de producción de moldes mediante la técnica de rapid tooling moldeo por resina ya que acorde con el análisis realizado pueden llegar a generar hasta un 75 % de error, desembocando en piezas deformadas o de mala calidad. La tabla 19 muestra los procesos de moldeo y los requerimientos de cada uno tomando la información proporcionada por Wheaterhead, (1980) en su libro de tecnología en Sistemas de Resina Fibra Reforzada, el proceso de fabricación del molde cumple con una adaptación del proceso seguido en la fabricación de otros componentes como botes y secciones de aviones, ya que se utiliza colocación manual y como materia prima la resina de poliéster con tiempos de gelificación de 15 minutos, para este caso se aplicarán hasta 6 láminas para que puedan cubrir las costillas y se consiga un molde lo suficientemente rígido.

Tabla 19.
Procesos de moldeo

Proceso	Moldeo por contacto		Bolsa de vacío
	Colocación manual	Colocación por aspersión	
Sistema de resina	Líquido-Poliéster, epóxica, furane	Líquido -Poliéster, epóxica	Líquido-Poliéster, epóxica, pre impregnados epóxica, poliéster
Refuerzos	Vidrio, carbón, otros	vidrio	Vidrio, carbón, otros
Contenido de fibra por % peso	25-35	25-35	25-60
Grosos de laminado en mm	2-25 generalmente 2-10	2-25 generalmente 2-10	2-6
Temperatura de curado	Ambiente hasta 40°C	Ambiente hasta 40°C	Ambiente hasta 50°C y 80 °C para pre impregnados
Tipo de molde requerido	Molde único, fibra de vidrio, madera	Molde único, fibra de vidrio, madera	Molde único, fibra de vidrio, madera, metal
Moldes con costillas, insertos de fijación, paneles de espuma	Si Si Si	Si Si Si	Si Si Generalmente no
Equipamiento	Brochas y rodillos	Pistola de pulverizar	Dispensador de mano / pulverización, cinta automática rodillos que ponen la máquina, autoclave / vacío bomba / compresor
Numero de moldeos	Más de uno	Más de uno	Más de uno
Tasa de producción	Baja	Baja	Baja

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

Carga laboral	alta	alta	alta
Calidad de la pieza	Acabado en una cara	Acabado en una cara	Acabado en ambas caras
Productos típicos	Botes, paneles de construcción, general	Botes, paneles de construcción, general	Secciones de aviones, varios paneles, general

Otro punto importante a tener en cuenta es la necesidad de extender las aristas del molde con el fin de crear superficies que permitan el posicionamiento de la pieza a producir y servirán como puntos de apoyo para el desmolde de la pieza producida.

Si se comparan los valores obtenidos antes y después de la implementación de las costillas se observa que aumenta el porcentaje de similitud entre el molde real y el molde dibujado reduciéndose las regiones que están fuera de tolerancia hasta un 34,9918% de la pieza, de lo cual un dato a tener en cuenta es el porcentaje que muestra que se muestra bajo la tolerancia debido a que no varía al tratarse de partes vacías o no captadas por el escáner 3D. Sin embargo la información referente a la similitud correspondiente a la curvatura vista desde una sección horizontal (figura 56) mejora ya que se consigue un 100% de similitud en referencia a la información obtenida antes de la implementación donde debido a que la totalidad de la pieza se encontraba fuera de tolerancia no arrojó información, un caso similar se presenta en la sección vertical tomada desde el lado izquierdo del molde donde se consigue que alrededor del 95% de la pieza está dentro del rango de tolerancia.

Tabla 20.

Comparación de datos obtenidos antes y después de la implementación de costillas al molde

Desviaciones	Desviación Total antes	Desviación Total después	Sección horizontal antes	Sección horizontal después	Sección vertical lh antes	Sección vertical lh después	Sección vertical rh antes	Sección vertical rh después
Mínimo	-93.4002	-66,3832	Sin info.	-1,0042	Sin info.	-5,0567	-	-8,1946
Máximo	93.4003	66,3894	Sin info.	1,8247	Sin info.	3,635	46.6458	6,6865
Promedio	-8.3503	4,1552	Sin info.	0,1004	Sin info.	-0,0617	38.1733	0,0342
RMS	41.2029	14,2697	Sin info.	0,3329	Sin info.	0,7944	40.8442	1,0702
Desviación estándar	40.3479	13,6513	Sin info.	0,3174	Sin info.	0,792	40.9477	1,0697
Variación	1627.954	186,359	Sin info.	0,1007	Sin info.	0,6272	2.9084	1,1443

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

+Promedio	24.5656	9,9405	Sin info.	0,3039	Sin info.	0,4611	-	0,5545
-Promedio	-36.2084	-2,2541	Sin info.	-0,1469	Sin info.	-0,3721	40.8442	-0,2677
En tolerancia (%)	23.8069	65,0082	0	100	0	95,3765	0	97,358
Fuera de tolerancia (%)	76.1931	34,9918	100	0	100	4,6235	100	2,642
Sobre tolerancia (%)	48.3163	8,3678	Sin info.	0	Sin info.	1,5852	0	1,7173
Bajo tolerancia (%)	27.8767	26,624	Sin info.	0	Sin info.	3,0383	100	0,9247

Nota: se ha tomado en cuenta en esta tabla la información de desviación total y la curvatura vista al seccionar la pieza

Con el fin de garantizar un correcto desmolde se deberán aplicar al menor 5 capas de cera desmoldante para de esta forma evitar que el molde se quede pegado al modelo original y a las piezas producidas, lo que mantiene la textura dentro de un rango aceptable ya que el desgaste por pieza producida se encuentra en valores de alrededor de $0,1\mu\text{m}$,

Conclusiones

La técnica de rapid tooling moldeo por resina presenta grandes ventajas para la obtención de herramientas rápidas, en este caso el molde para un guardachoque, debido principalmente a la facilidad con la que los materiales empleados (resinas) en mencionado proceso pueden replicar las formas y texturas, lo que resulta conveniente al momento de producir geometrías complejas a bajo costo, esto puede resultar beneficioso para la industria automotriz local, donde los principales limitantes son los costos de la maquinaria y de manera especial el herramental, el cual al fabricarlo de la forma convencional no generaría un retorno de la inversión a consecuencia del consumo interno de este tipo de autoparte.

Al aplicar refuerzos en forma de nervios o costillas al modelo se consigue mejoras importantes en cuanto a mantener la curvatura original de la autoparte, pero por otro lado al obtener únicamente un 65% de regiones que están dentro de la tolerancia si se mide la desviación total, observa la influencia que tiene la contracción que presenta la resina poliéster, por lo que para mejorar esta tendencia se deberá utilizar compuestos basados en resina epoxi la cual según la literatura muestra índices de contracción debajo del 1%.

Una de las principales limitantes para el desarrollo de la industria de los materiales compuestos es sin duda la limitada gama de materia prima existente en el país, al igual que las empresas que se dedican a proveer estos productos, a esto se suma la falta de capacitación, difusión e investigación de las potencialidades que tiene este tipo de materiales, más aún cuando varios de los productos elaborados en varios centros de comercio son elaborados bajo técnicas similares. Para este proyecto se ha empleado resina poliéster reforzada con fibra de vidrio que viene a constituirse en la materia prima de mayor difusión entre los artesanos que están dedicados a este tipo de oficio, debido a su bajo costo y a que posee propiedades muy buenas para la fabricación de diferentes piezas. Actualmente a nivel mundial se han realizado

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

estudios que han permitido mejorar las propiedades de los materiales compuestos y que están disponibles al público y que se pueden aplicar para mejorar la viabilidad del proyecto.

Por otro lado una de las técnicas de que está teniendo más aceptación a nivel mundial es el uso de sistemas computarizados que poseen módulos que permiten la aplicación de técnicas de ingeniería inversa para de obtener la geometría de diferentes piezas en especial las que poseen formas complejas del tipo orgánico, para el caso del presente proyecto se pudo obtener la geometría del guardachoque y convertirlo en un gráfico de tres dimensiones a partir del que se pueden aplicar varios análisis muy útiles al momento de seleccionar procesos idóneos para la fabricación.

Los datos arrojados por el rugosímetro en el momento de medir el acabado superficial luego de varias pasadas o partes producidas se puede concluir que la cantidad de partes que se pueden obtener mediante este tipo de moldes están limitadas al correcto manejo del proceso de laminación, preparación de la superficie y manejo del molde, pudiendo llegar fácilmente a la producción de 75 piezas antes de la primera reparación como lo menciona el catálogo presentado por el fabricante de resinas (Delta Glass, 2017)

Recomendaciones

La superficie de la cavidad del molde se debe corregir con gelcoat en el caso de observar defectos, y luego pintarlo con una imprimación de automóvil para llenar pequeñas cavidades y pulir hasta obtener una superficie lisa. Cuando se ha alcanzado un acabado superficial uniformemente liso, el molde deberá ser pintado por pulverización con una capa superficial final en un color contrastante para visualizar cuando se produce desgaste o daño en la superficie del molde.

El manejo de resinas y productos químicos genera varios tipos contaminantes peligrosos tanto para el medio ambiente como para la salud, por lo que se debe prestar mucha atención a las recomendaciones que dan los fabricantes de este tipo de materiales, uno de los temas a ser investigados debería ser la búsqueda de métodos de bajo costo para el tratamiento y desecho de este tipo de materiales.

Uno de los principales limitantes para la producción de guardachoques producidos bajo este tipo de procesos lo constituye el precio final de venta, debido a que en el mercado local existe una amplia variedad de guardachoques alternos de baja calidad que presentan precios relativamente bajos respecto a las partes originales incluso con las producidas de resina reforzadas con fibra de vidrio, por lo que se hace necesario un análisis de mercado con el fin de obtener el público objetivo al cual dirigir el producto, un tema de investigación que puede quedar planteado es mejorar los procesos de fabricación de piezas de resina reforzadas para reducir los costos de producción, ya que como se vio en el análisis de costos los factores que encarecen el producto están relacionados con la mano de obra y el control de calidad.

Referencias bibliográficas

- 3DZ Franchising. (12 de 2017). *3DZ*. Obtenido de <https://www.3dz.it/en/products/geomagic-verify/>
- AOC Resins. (2018). *Guía para la fabricación de compuestos FRP*. Obtenido de http://www.aoc-resins.com/pdf/lit_es_Guia_fabricacion_FRP_1.pdf
- Atzeni, E., Minetola, P., & Salmi, A. (2013). Dimensional analysis of a prototype mould-making process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 309-317.
- Bendezu Reyes, J. H. (2002). *Los plásticos reforzados en fibra de vidrio, sus aplicaciones y desarrollo en la industria nacional*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Besednjak, A. (2005). *Materiales compuestos*. Catalunya: Iniciativa Digital Politécnica.
- Besednjak, A. (2005). *Procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona: Quality Impres, S.L.
- blogspot, M. (1 de noviembre de 2011). *tecnologiadelosplasticos*. Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/moldeo-manual-de-materiales-compuestos.html>
- Cadden, J. L., & Sadesky, P. F. (1998). TOOLING FOR COMPOSITES. En S. T. Peters, *Handbook of Composites* (págs. 556-575). California: Springer Science+Business Media Donlrecht.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural Composite Materials*. Ohio 44073-0002: ASM International.
- Cassis, F. A., & Talbot, R. C. (1982). POLYESTER AND VINYL ESTER RESINS. En S. T. Peters, *Handbook of composites* (págs. 34-47). California: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V.
- Cheah, C. M., Chua, C., Lee, C. W., Feng, C., & Totong, K. (2004). Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid. *Springer-Verlag London Limited*, 308-320.
- Chih-Hsing Liu*, Y.-C. H.-H.-C.-Y. (30 de 09 de 2016). *Scientific.Net*. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.715.174
- Chua, C. K., Hong, K. H., & Ho, S. L. (1999). Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study. *Advanced Manufacturing Technology*.
- CREAFORM. (2017). *PORTABLE 3D MEASUREMENT SOLUTIONS*. Obtenido de <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/handheld-portable-3d-scanner-goscan-3d#section-1>
- Delta Glass. (2017). *Delta Glass Centro Integral del Plástico Reforzado*. Obtenido de <http://www.deltaglass.com.ar/contactos.html>

- FARO Technologies. (Diciembre de 2017). *FARO*. Obtenido de FARO ARM: <http://www.faro.com/es-es/productos/metrologia-industrial/faroarm/applications/>
- K.-T. HSIAO. (2012). Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites. *Woodhead Publishing Limited*,, 310-347.
- Kazmer, D. (2017). Design of Plastic Parts. En W. Andrew, *APPLIED PLASTICS* (págs. 593-615). Chadds Ford, PA, USA: Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-323-39040-8.00028-6
- Milton Coba Salcedo, E. S. (2006). *Scielo*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302006000400006
- Mohammadi, M. S., Ghani, M., Komeili, M., Crawford, B., & Milani, A. (2017). The effect of manufacturing parameters on the surface roughness of glass fibre. *Composites part B*.
- OWENS CORNING. (2009). *ocvreinforcements*. Obtenido de http://ocvreinforcements-a.hansonstatus.com/pdf/library/CLOSED_MOLDS_ES_OCV_Range_ww_04_2009_Rev0_ES.pdf
- Process Instruments. (2017). *Digital Measurement Metrology*. Obtenido de <http://www.processinstruments.ca/store/surface-gauges-and-testers/portable-surface-roughness-tester.htm>
- Raja, M. R. (2005). *Experimental Optimization of Process Parameters to Obtain Class A Surface Finish in Resin Transfer Molding Process*. Montreal: Department of Mechanical Engineering McGill University .
- Reinforced Plastics. (2008). *Mould releases an overview*, 33-34.
- Segal, J. I., & Campbel, R. I. (2001). A review of research into the effects of rapid tooling on part properties. *Rapid Prototyping Journal*, 90-98.
- Sidwell, D. R. (1998). Handbook of Composites. En S. T. Peters, *HAND LAY-UP AND BAG MOLDING* (págs. 352-377). California: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V.
- Sudbury, T. Z., Springfield, R., Kunc, V., & Duty, C. (2016). An assessment of additivemanufacturedmolds for hand-laid fiber. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Taylan Altan, B. L. (2001). *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. (E. Ltd., Ed.) doi:10.1016/S0007-8506(07)62988-6
- Wheatherhead, R. G. (1980). *FRP TECHNOLOGY Fibre Reinforced Resin Systems*. Nec Delhi: Applied Science Publishers LTD.

Anexos

Anexo A. Ficha técnica proporciones de mezcla de la resina poliéster

**FORMULACIONES – RESINAS POLIESTER**

Cada 100 g _n de resina	Agregar⇒	Acelerador 0,6%	Catalizador MEK	Tiempo de trabajo	Temperatura ambiente
Náutica		2 cc	2 cc	15 min	25 °C
R-211 -Coladas		2 cc	2 cc	10 min	25 °C
R-211 -Preacelerada			2 cc	8 min	25 °C
PT – 505 Tereftálica		2 cc	2 cc	10 min	25 °C
Gel Coat		2 cc	2 cc	25 min	25 °C
		Acelerador 2 %	Catalizador MEK	Tiempo de trabajo	Temperatura ambiente
Isoftálica		2 cc	2 cc	20 min	25 °C
H-197 – Antiácida/Ignífuga		1 cc	2 cc	30 min	25 °C

Preparación: Mezclar la resina con el acelerador durante 1 ó 2 minutos, luego agregar el catalizador y mezclar otra vez durante 1 ó 2 minutos. Si la temperatura ambiente fuera mayor que la indicada, se puede reducir la cantidad de acelerador con lo que se mantendrá el tiempo de trabajo. A la inversa si la temperatura es menor. Tener en cuenta que a mayor masa de mezcla, menor tiempo de trabajo.

Asimismo reduciendo ó aumentando el acelerador se reduce ó aumenta el tiempo de trabajo.

El curado se verifica a las 24 horas, y en todos los casos la dureza final se obtiene a los 7 días (25°C) ó se puede hornear durante 4 a 6 horas a 80 °C.

Anexo B. Tiempos de gelificación acorde formulaciones

Typical Formulations and Gel Times of Select Vipel® Resins

Gel Times for Vipel® F701-BBB series

Cobalt Naphthenate (8%) & DMA with HiPoint 90 – MEKP Catalyst

Resin Temperature (°F)→		60s	70s	80s
10 – 20 min.		No Data	18	18
	MEKP, %		1.0	1.0
	CoNAP, %		0.6	0.2
20 – 40 min.		23	24	21
	MEKP, %	1.0	1.5	0.75
	CoNAP, %	0.6	0.2	0.2
40 – 70 min.		70	43	No Data
	MEKP, %	1.0	1.0	
	CoNAP, %	0.2	0.2	

Typical Formulations and Gel Times of Select Vipel® Resins

Gel Times for Vipel® K085-AAA-00

Cobalt Naphthenate (8%) & DMA with CHP (90% active)

Resin Temperature (°F)→		60s	70s	80s
10 – 20 min.		No Data	20	18
	CHP, %		1.5	1.5
	CoNAP, %		0.4	0.2
	DMA, %		0.1	0.05
20 – 40 min.		35	30	30
	CHP, %	2.0	1.5	1.0
	CoNAP, %	0.4	0.2	0.2
	DMA, %	0.2	0.05	0
	2,4-P, %	0	0	0.05
40 – 60 min.		45	45	45
	CHP, %	1.5	1.0	1.0
	CoNAP, %	0.2	0.2	0.2
	DMA, %	0.05	0	0.1

Abreviaturas

2,4-P:	Pentanodiona
CoNap:	Naftenato de cobalto, solución al 8%
BPO:	Peróxido de benzilo, 90% activo (Con otras concentraciones, adapte el volumen)
DEA:	N,N-dietilanolina
DMA:	N,N-dimetilanolina
TBC:	Catecol butílico terciario
THQ:	Tolhidroquinona, solución al 10% en estireno (AOC la suministra como "Inhibidor A")

Información sobre las marcas registradas

Aercol® es una marca registrada de Degussa Corp. • Arapal® es una marca registrada de Ashland Inc.
 BYK® es una marca registrada de BYK. • Cab-O-Sil® es una marca registrada de Cabot Corp.
 Chroma-Tek® es una marca registrada de AOC, LLC. • CoREZYNE® es una marca registrada de Interplastic Corp.
 Derakane® es una marca registrada de Ashland, Inc. • DION® es una marca registrada de Reichold Inc.
 Heltron® es una marca registrada de Ashland, Inc. • Lupenox® es una marca registrada de Arkema Inc.
 Mylar® es una marca registrada de DuPont Teijin Films. • Norox® es una marca registrada de Ashland, Inc.
 Nyacol® es una marca registrada de Nyacol Nano Technologies, Inc. • Trigamox® es una marca registrada de Alza Nobel sv.
 Underwriters Laboratories® es una marca registrada de Underwriters Laboratories Inc. • Vipel® es una marca registrada de AOC, LLC.

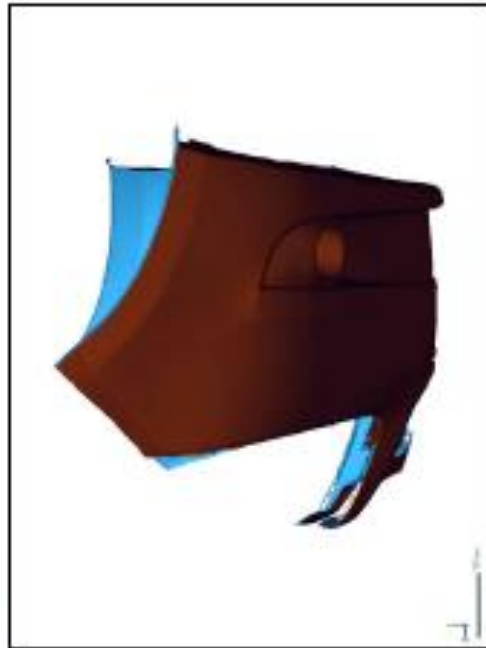
Anexo C. Análisis dimensional reporte Geomagic Verify

Nominal Data - corrección cotas-2 corrección cotas-3 corrección cotas-4 corrección cotas-1



Product Name	SAIL	Department	DISEÑO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAIPE	Unit	mm

Scan Data - tessmoide

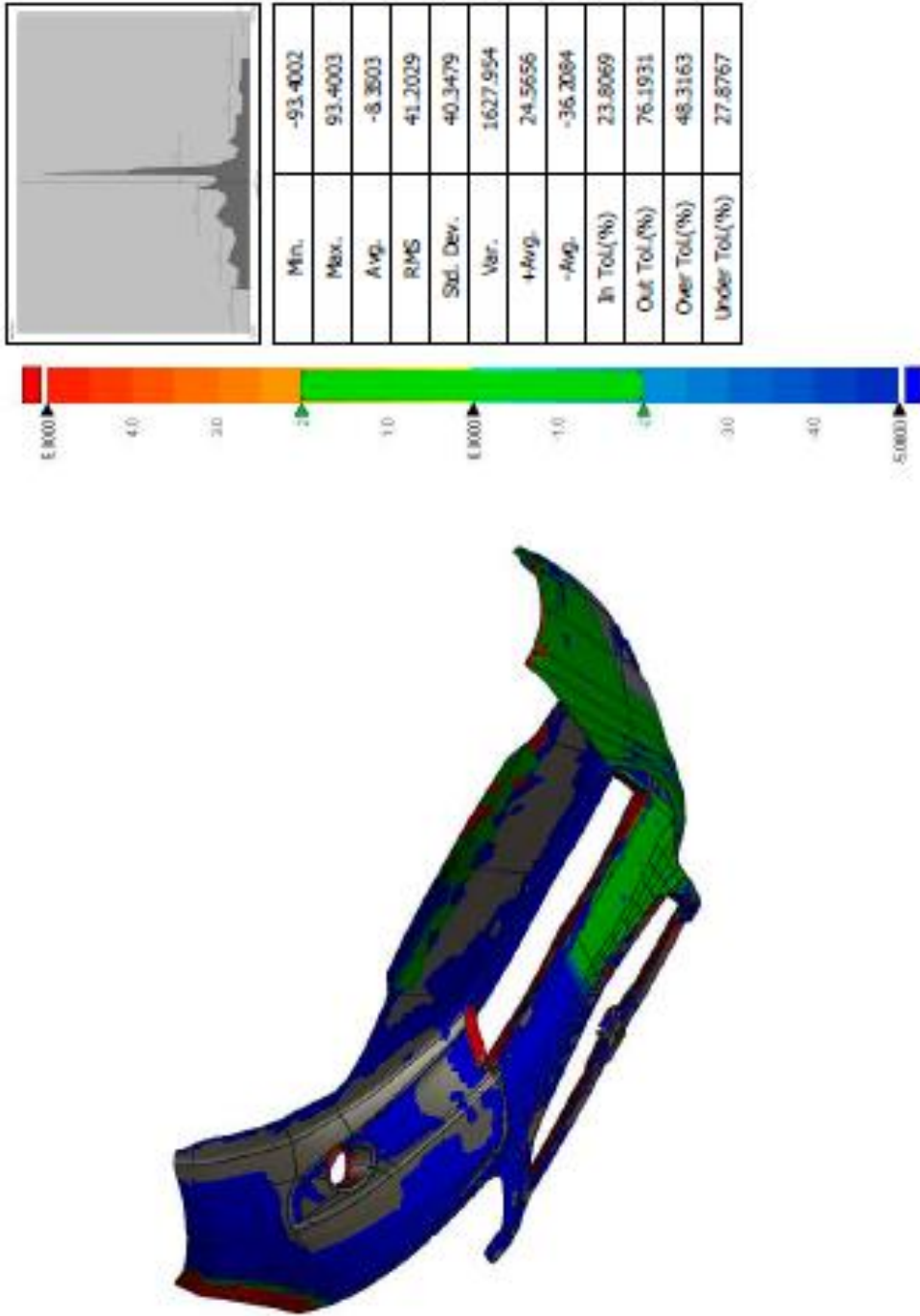


Product Name	SAIL
Part Name	FRONT BUMPER

Department	DISEÑO MECANICO
Inspector	LUIS TAIPE

Date	Feb 03, 2018
Unit	mm

WHL-DEV1



Min.	-93.4002
Max.	93.4003
Avg.	-8.3003
RMS	41.2029
Std. Dev.	40.3479
Var.	1627.954
+Avg.	24.5656
-Avg.	-36.2084
In Tol.(%)	23.8069
Out Tol.(%)	76.1931
Over Tol.(%)	48.3163
Under Tol.(%)	27.8767

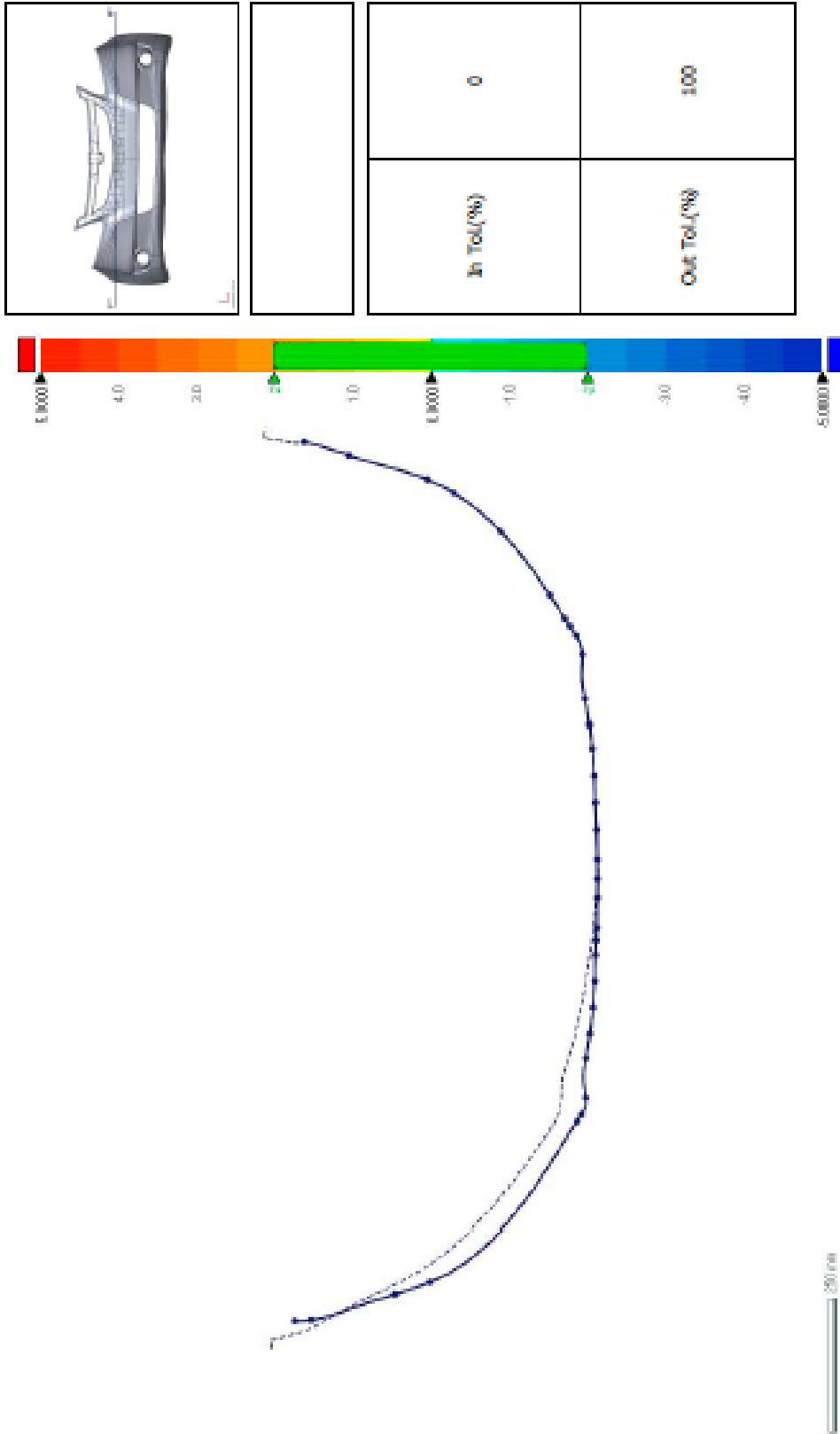
Product Name	SAIL	Department	DISEÑO MECÁNICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAÍPE	Unit	mm

SIM-PT1

Name	Position			Pair Pos.			ΔPos.
	X	Y	Z	X	Y	Z	
SIM-PT1	660	-990.079	-162.6352	660.084	-991.1054	-161.6506	1.2947

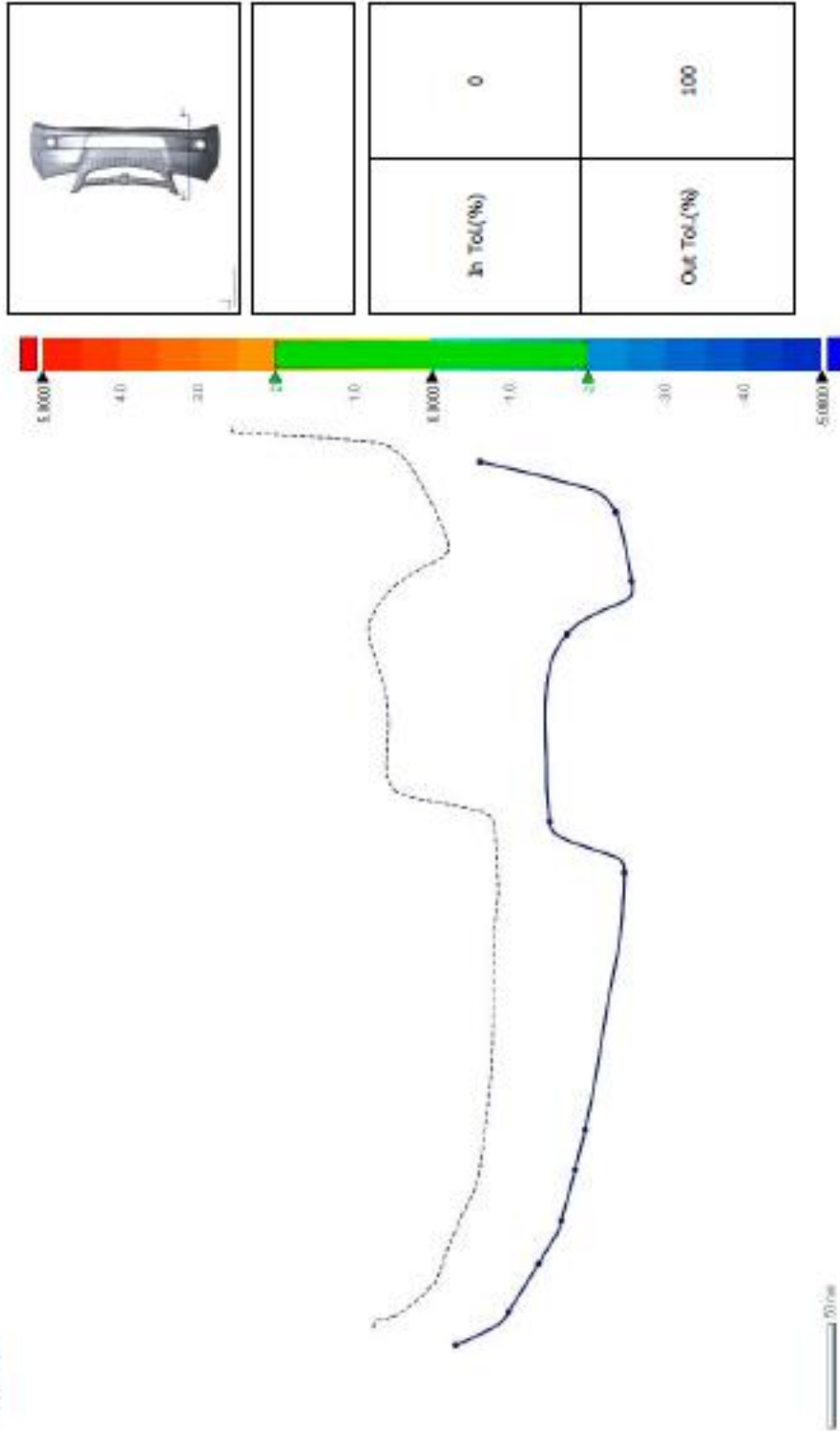
Product Name	SAIL	Department	DISEÑO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAIPE	Unit	mm

SEC1



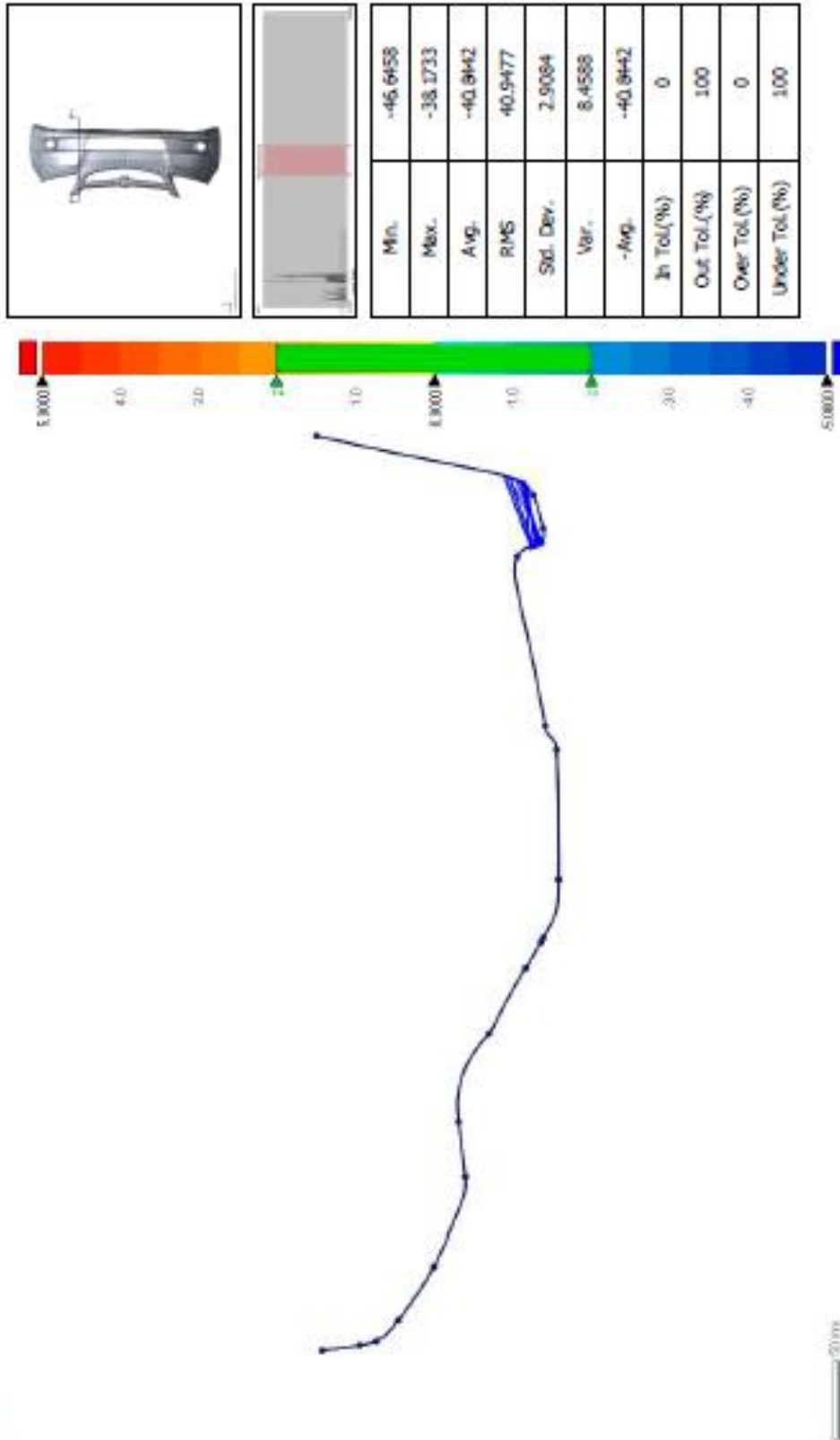
Product Name	SAIL	Department	DISENO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAPIE	Unit	mm

SEC2



Product Name	SAL	Department	DISENO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAIPE	Unit	mm

SEC3

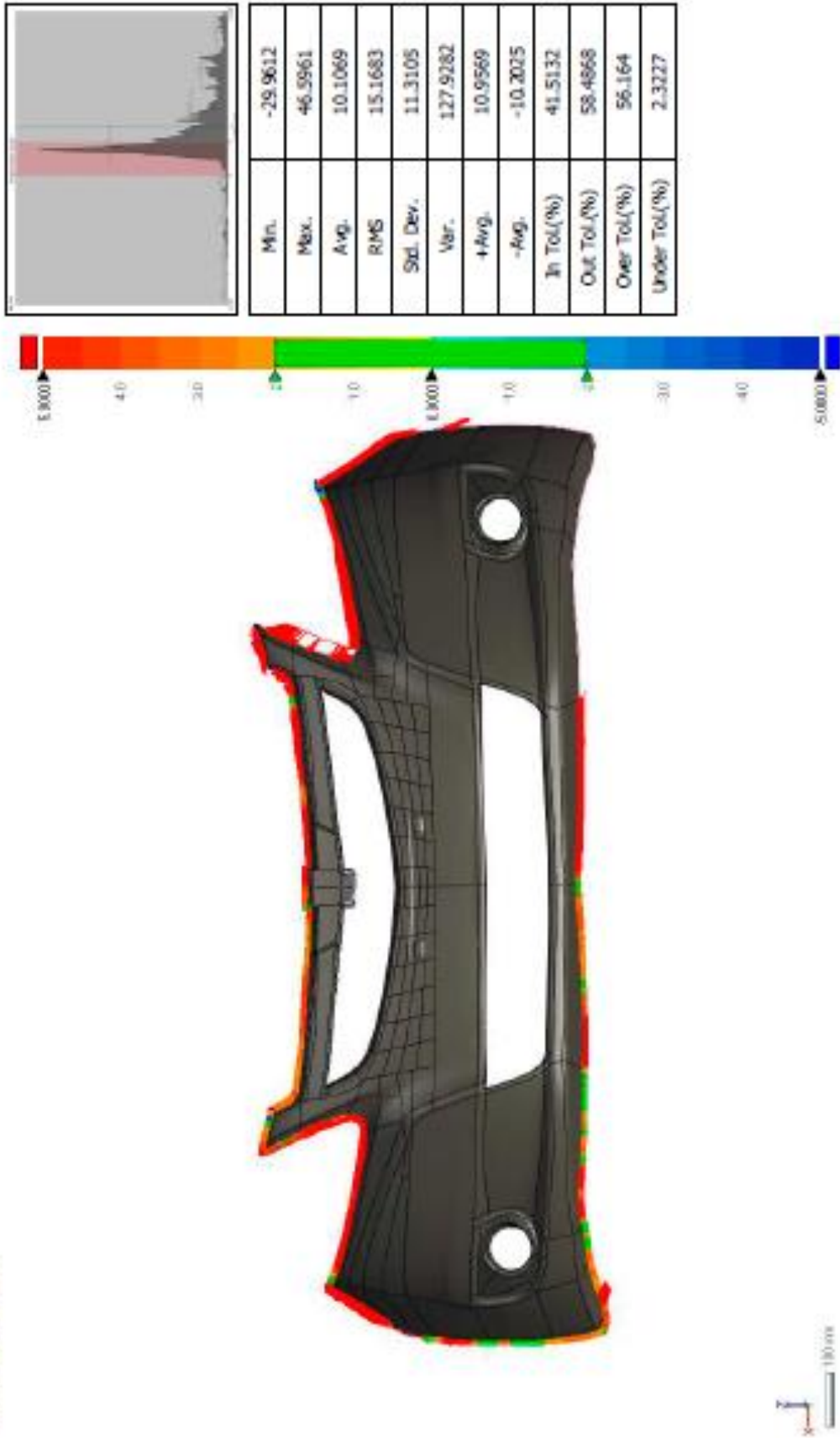


Min.	-46.6458
Max.	-38.1733
Avg.	-40.8442
RMS	40.9477
Std. Dev.	2.9084
Var.	8.4588
-Avg.	-40.8442
In Tol.(%)	0
Out Tol.(%)	100
Over Tol.(%)	0
Under Tol.(%)	100



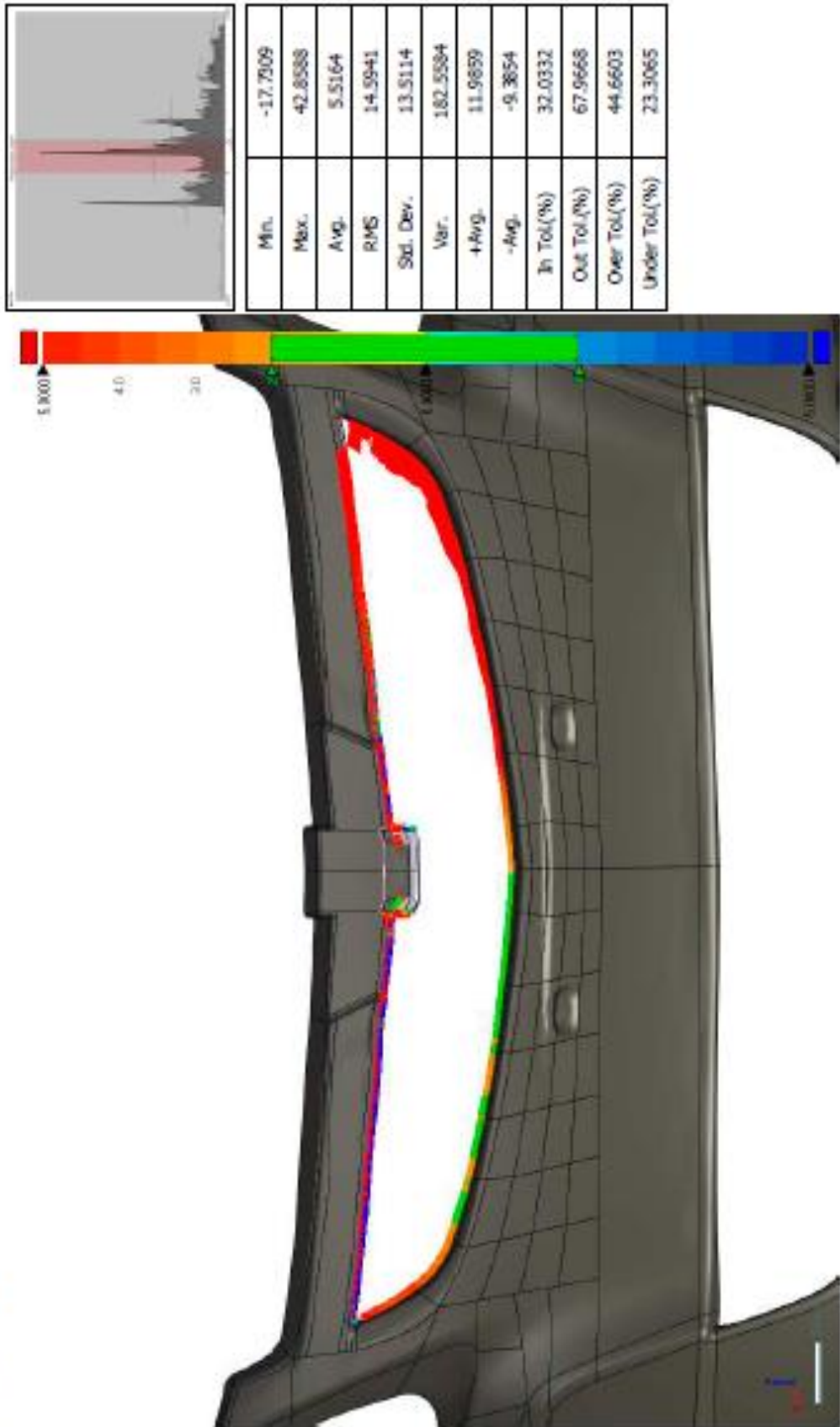
Product Name	SAIL	Department	DISENO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAJPE	Unit	mm

BND-DEV1



Product Name	SAL	Department	DISENO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAJPE	Unit	mm

BND-DEV2



Min.	-17.7509
Max.	42.8538
Avg.	5.5164
RMS	14.5941
Std. Dev.	13.5114
Var.	182.5584
+Avg.	11.9659
-Avg.	-9.3654
In Tol.(%)	32.0332
Out Tol.(%)	67.9668
Over Tol.(%)	44.6603
Under Tol.(%)	23.3065

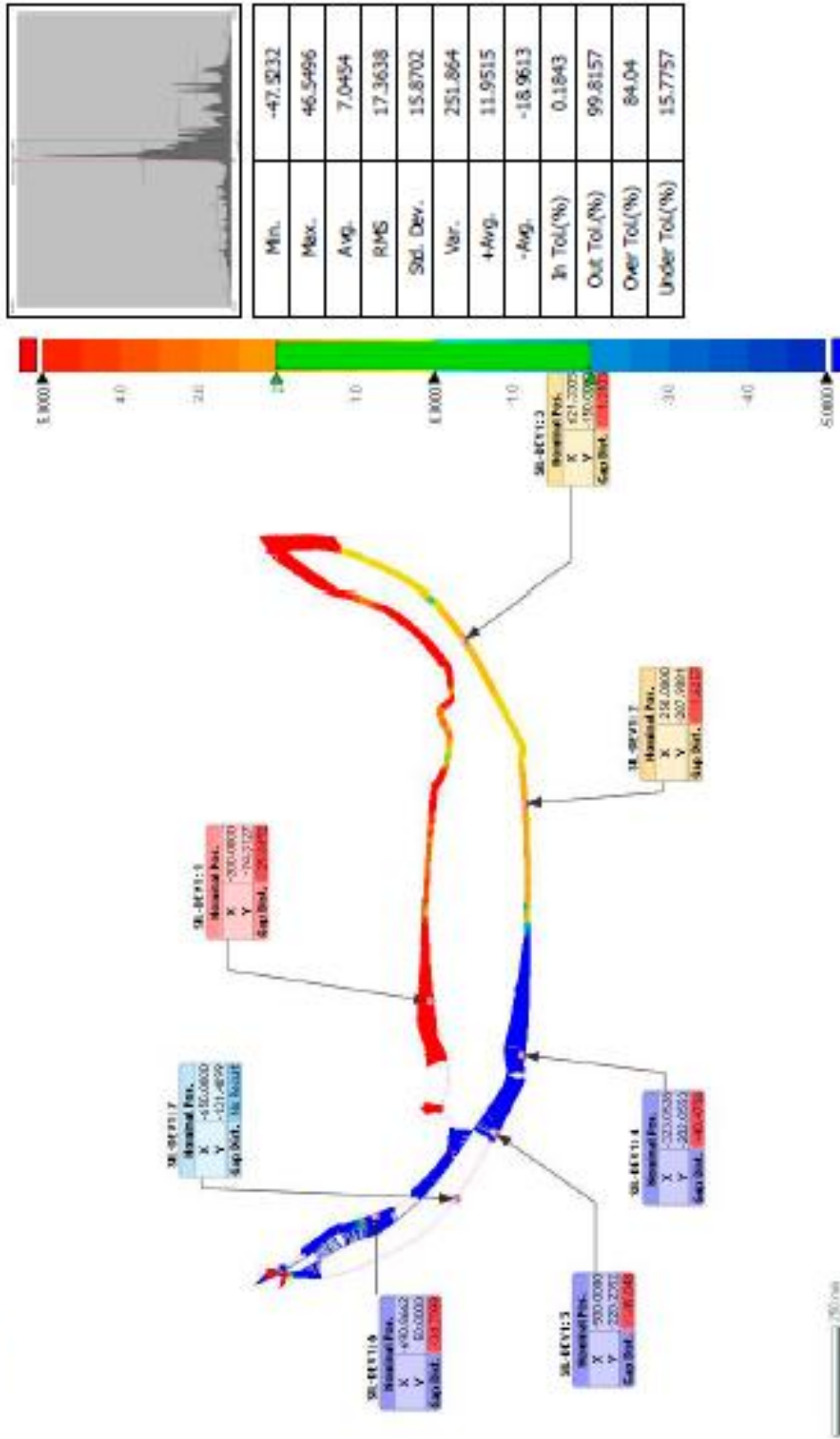
Product Name	SAIL	Department	DISINO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAIPE	Unit	mm

BND-DEV3



Product Name	SAIL	Department	DISENO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAIPE	Unit	mm

SIL-DEV1

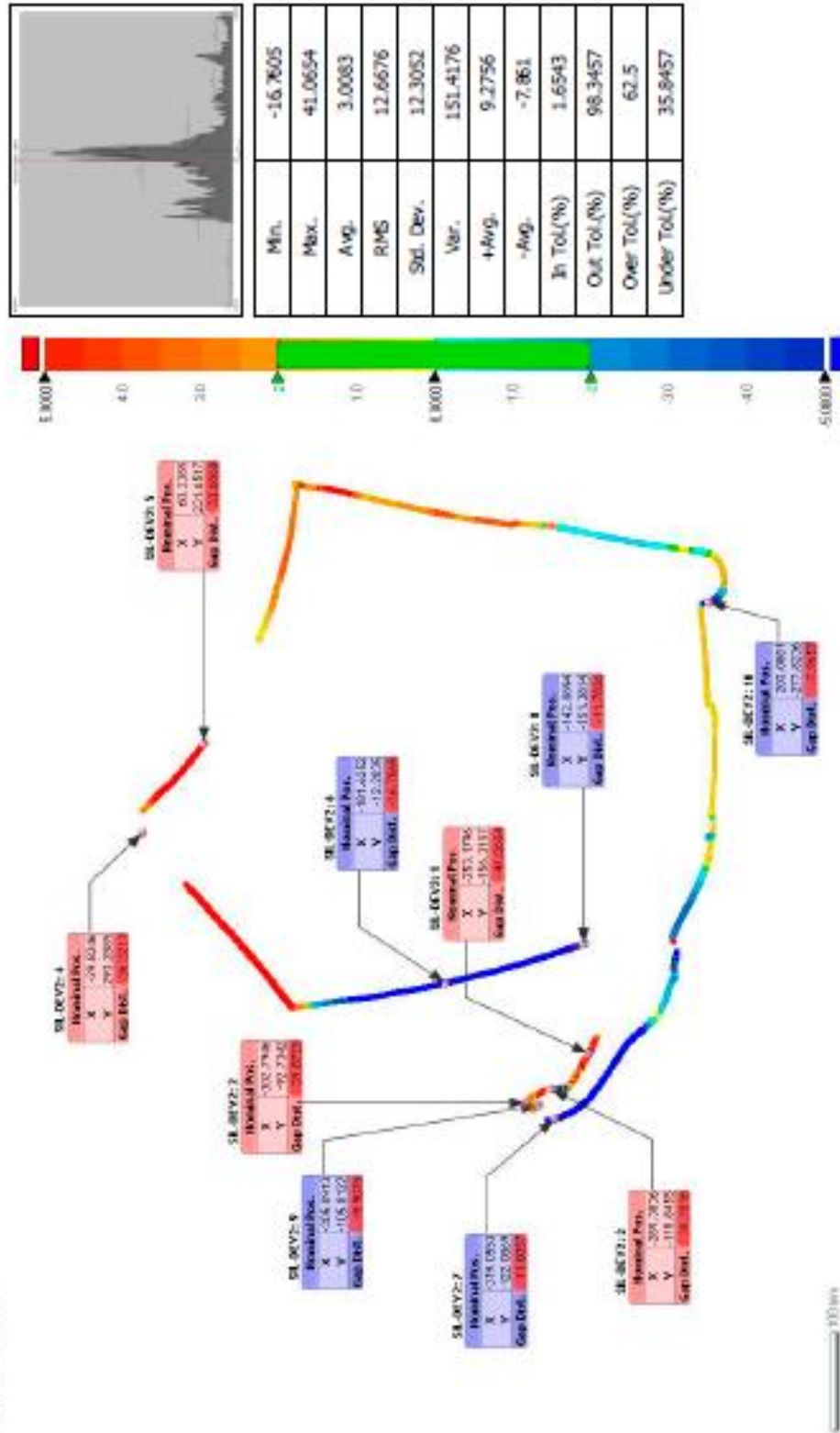


Product Name	SAIL	Department	DISENO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAJPE	Unit	mm

Name	Nominal Pos.		Scan Pos.		Gap Dist.	Tolerance
	X	Y	X	Y		
SIL-ORVI: 1	-200	-74.3127	-202.7751	-44.5927	29.8492	±0.1
SIL-ORVI: 2	260	-287.908	250.1125	-289.5299	1.6257	±0.1
SIL-ORVI: 3	621.3305	-150	622.0542	-151.0924	1.3103	±0.1
SIL-ORVI: 4	-323.0528	-282.0553	-317.8326	-241.9178	-40.4756	±0.1
SIL-ORVI: 5	-500	-220.2352	-479.8997	-179.9202	-45.048	±0.1
SIL-ORVI: 6	-690.8662	50	-723.6451	38.4935	-34.7399	±0.1
SIL-ORVI: 7	-650	-131.4099	-650	-131.4099		±0.1
Min.	-690.8662	-287.908	-723.6451	-289.5299	-45.0480	
Max.	621.3305	50.0000	622.0542	38.4935	29.8492	

Product Name	SAIL	Department	DISEÑO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAIPE	Unit	mm

SIL-DEV2



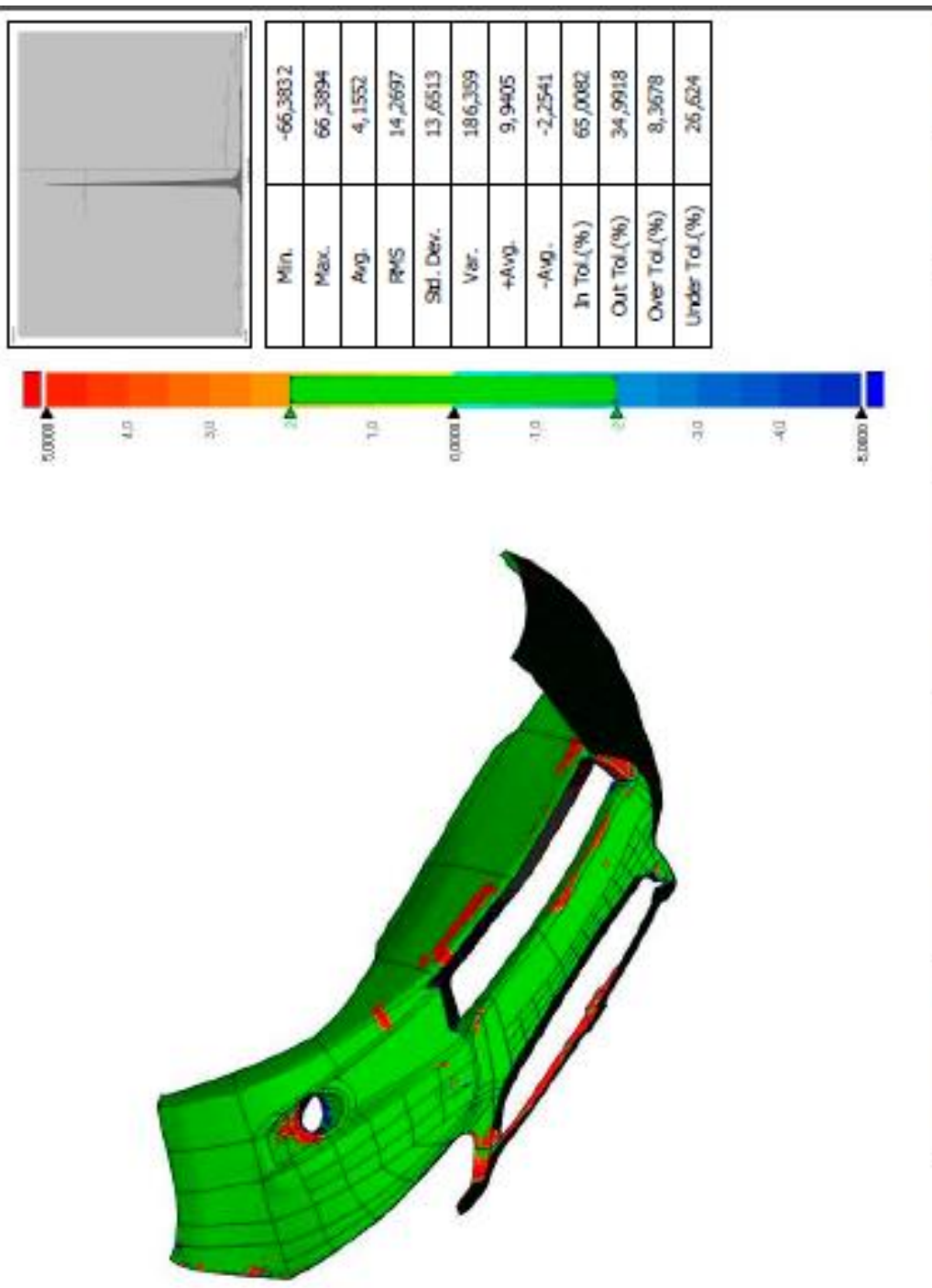
Product Name	SAIL	Department	DISEÑO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAÍPE	Unit	mm

Name	Nominal Pos.		Scan Pos.		Gap Dist.	Tolerance
	X	Y	X	Y		
SL-OEV2: 1	-253.1796	-156.3157	-234.1719	-119.9142	41.0654	+0.1
SL-OEV2: 2	-302.7946	-92.7242	-300.663	-52.9187	39.8725	+0.1
SL-OEV2: 3	-289.3856	-118.8455	-250.0965	-112.5927	39.7816	+0.1
SL-OEV2: 4	-29.8246	293.2885	-37.7973	328.7238	36.3211	+0.1
SL-OEV2: 5	60.2385	231.6517	80.1325	258.8367	33.6868	+0.1
SL-OEV2: 6	-181.6252	-12.2035	-165.3466	-8.4467	-16.7065	+0.1
SL-OEV2: 7	-319.0553	-122.0849	-307.5266	-119.5448	-11.8057	+0.1
SL-OEV2: 8	-142.0844	-151.3814	-131.0023	-147.3899	-11.7836	+0.1
SL-OEV2: 9	-305.0913	-105.8122	-308.1556	-115.234	-9.9076	+0.1
SL-OEV2: 10	203.0881	-277.8236	211.0106	-276.9951	-7.9657	+0.1
Min.	-319.0553	-277.8236	-308.1556	-276.9951	-16.7065	
Max.	203.0881	293.2885	211.0106	328.7238	41.0654	

Product Name	SAIL	Department	DISENO MECANICO	Date	Feb 03, 2018
Part Name	FRONT BUMPER	Inspector	LUIS TAJPE	Unit	mm

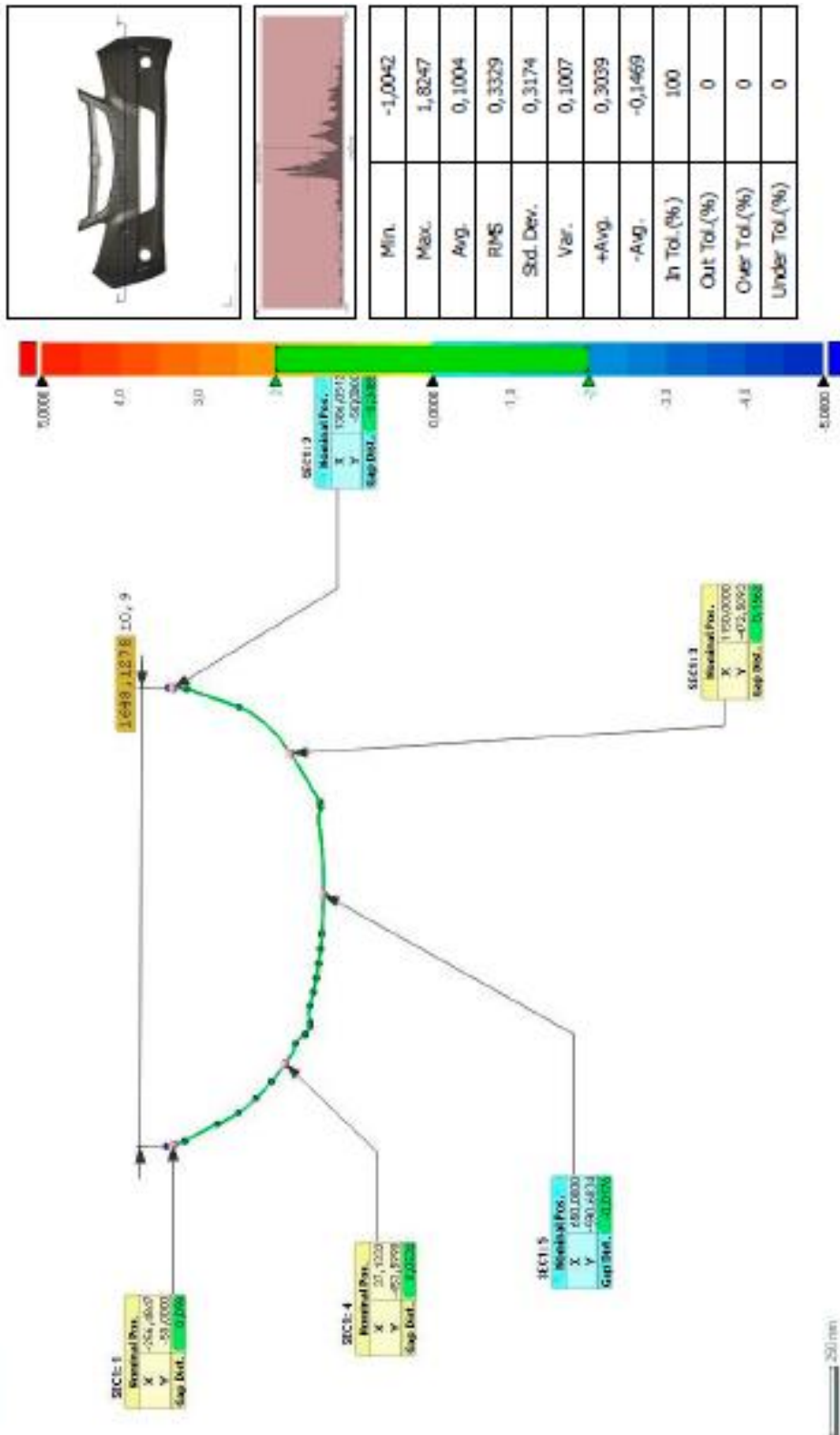
Anexo C. Reporte analisis dimensional Geomagic Verify (molde con correcciones)

WHL-DEV1



Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2018
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

SECI



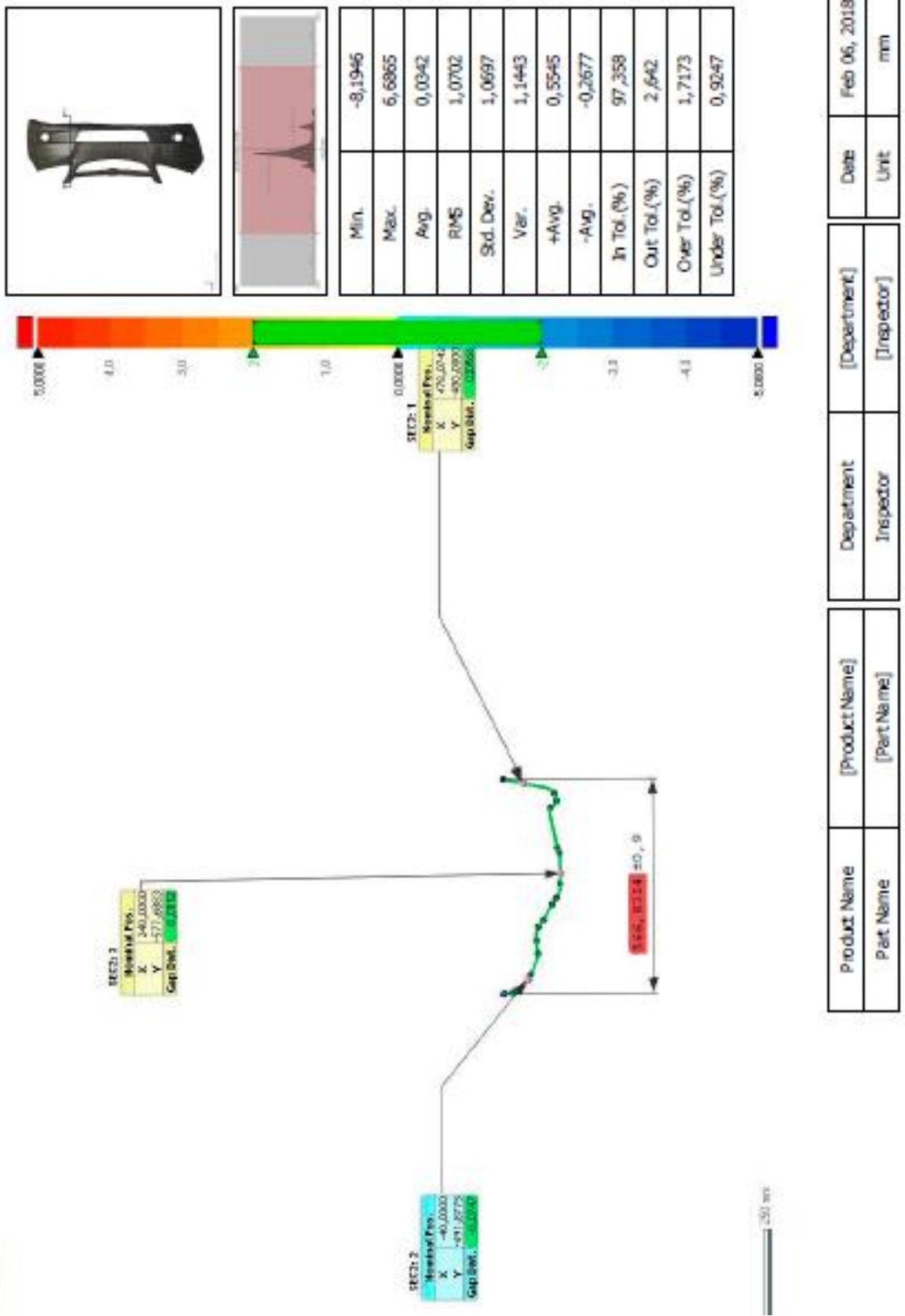
Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2012
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

250 mm

Name	Nominal Pos.		Scan Pos.		Gap Dist.	Tolerance
	X	Y	X	Y		
SEC1: 1	-256,4847	-50	-256,3884	-49,9816	0,098	±2
SEC1: 2	1386,0512	-50	1386,3997	-50,0075	-0,3485	±2
SEC1: 3	1150	-472,5093	1149,9122	-472,3802	0,1562	±2
SEC1: 4	37,1332	-453,599	37,1631	-453,555	0,0532	±2
SEC1: 5	650	-590,6834	649,9999	-590,7009	-0,0176	±2
Min.	-256,4847	-590,6804	-256,3884	-590,7009	-0,3485	
Max.	1386,0512	-50,0000	1386,3997	-49,9816	0,1562	
Name	Nominal Value	Actual Value	Deviation	Tolerance	# OffPoints	
Linear Dim.1	1648,1278	1647,6142	-0,5136	±0,9	2	

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2018
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

SEC2

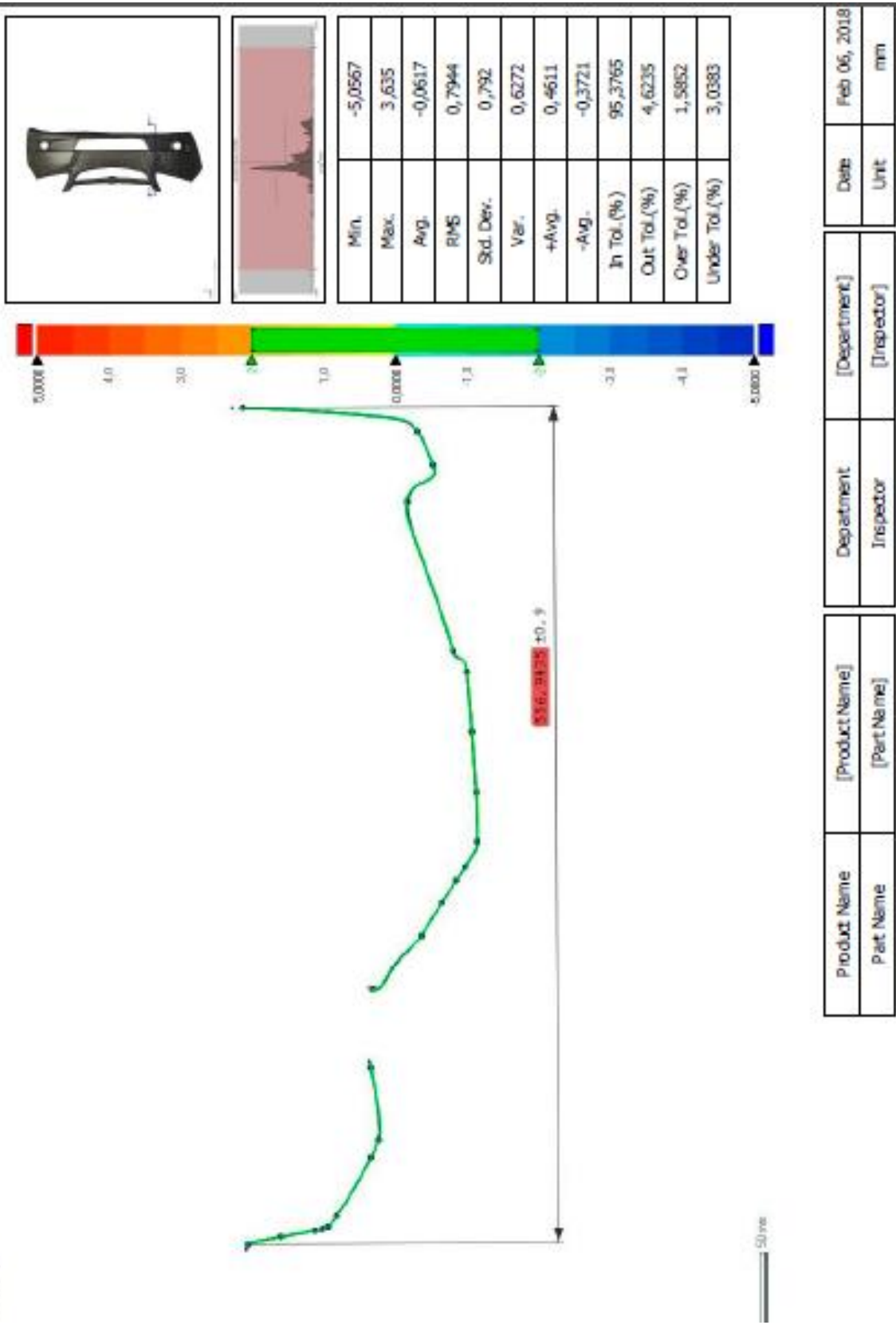


Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2018
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Name	Nominal Pos.		Scan Pos.		Gap Dist.	Tolerance
	X	Y	X	Y		
SEC2: 1	478,0742	-480	478,0187	-479,9887	0,0566	#
SEC2: 2	-40	-491,8775	-40,0421	-491,9392	-0,0747	#
SEC2: 3	240	-577,6883	239,9997	-577,6331	0,0532	#
Min.	-40,0000	-577,6883	-40,0421	-577,6331	-0,0747	
Max.	478,0742	-480,0000	478,0187	-479,9887	0,0566	
Name	Nominal Value	Actual Value	Deviation	Tolerance	# Of Points	
Linear Dim.2	566,8314	568,382	1,5506	±0,9		

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 201
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

SEC3

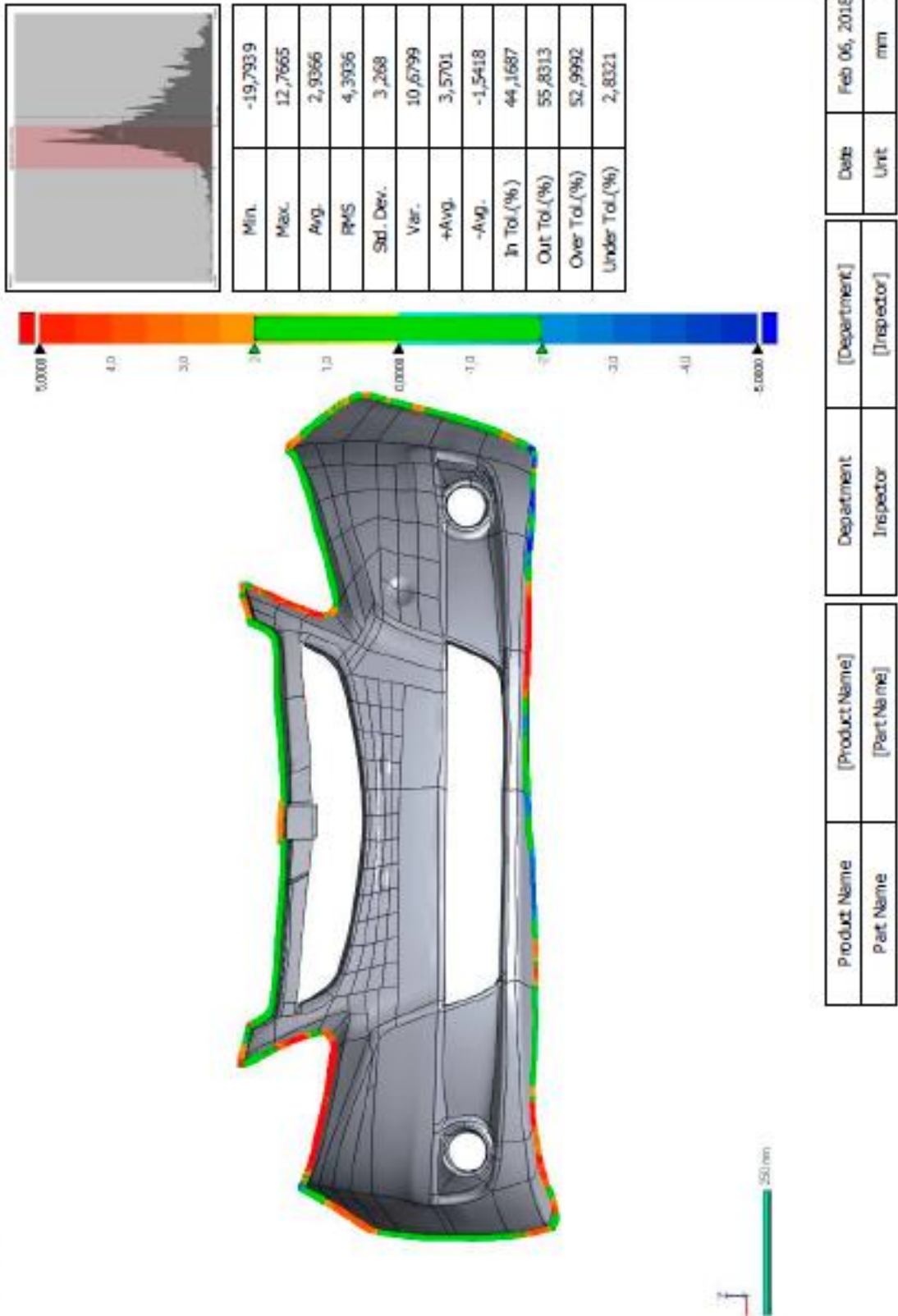


Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2018
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

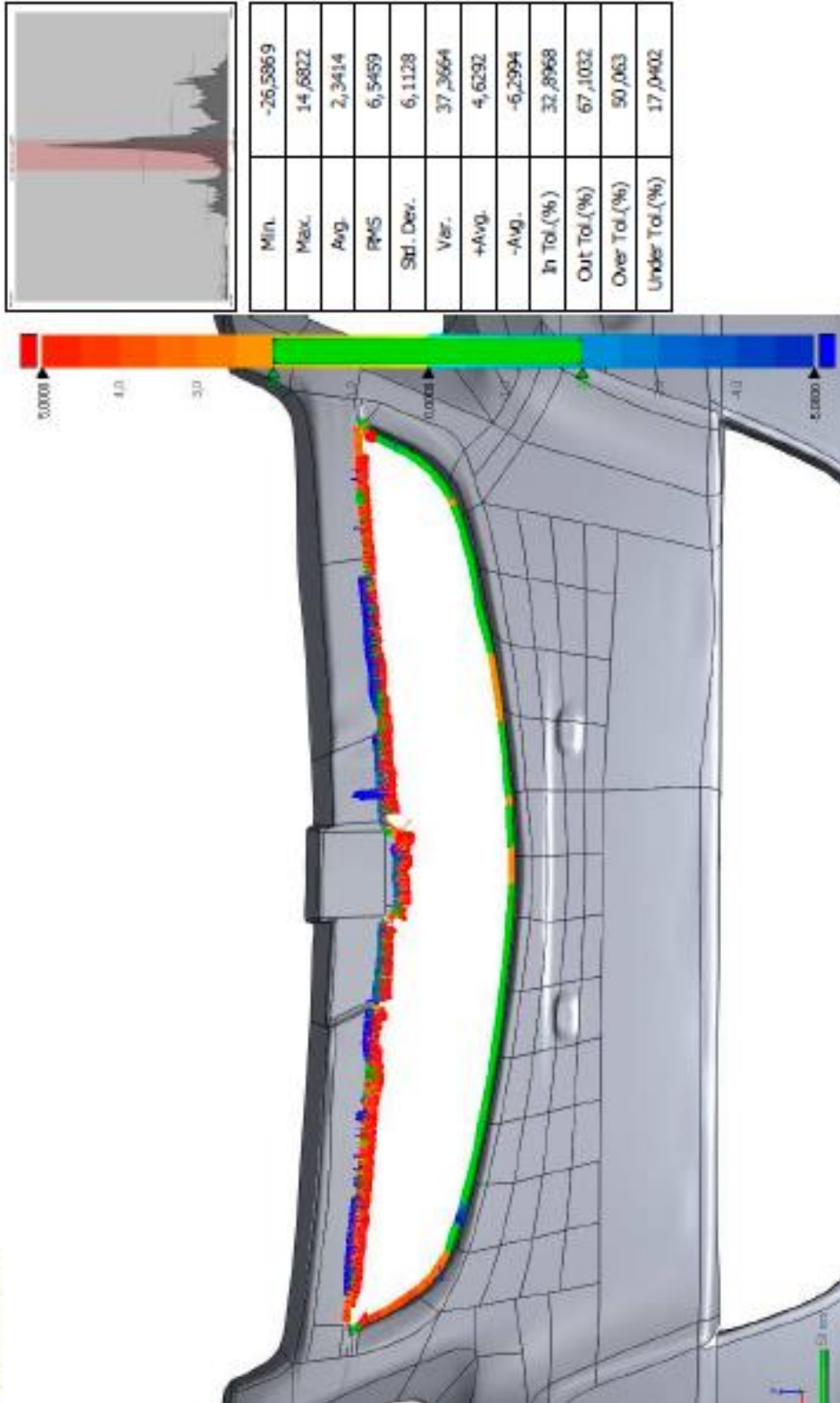
Name	Nominal Value	Actual Value	Deviation	Tolerance	# Of Points
Linear Dim.3	556,9435	560,5793	3,6358	±0,9	

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2011
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

BND-DEV1

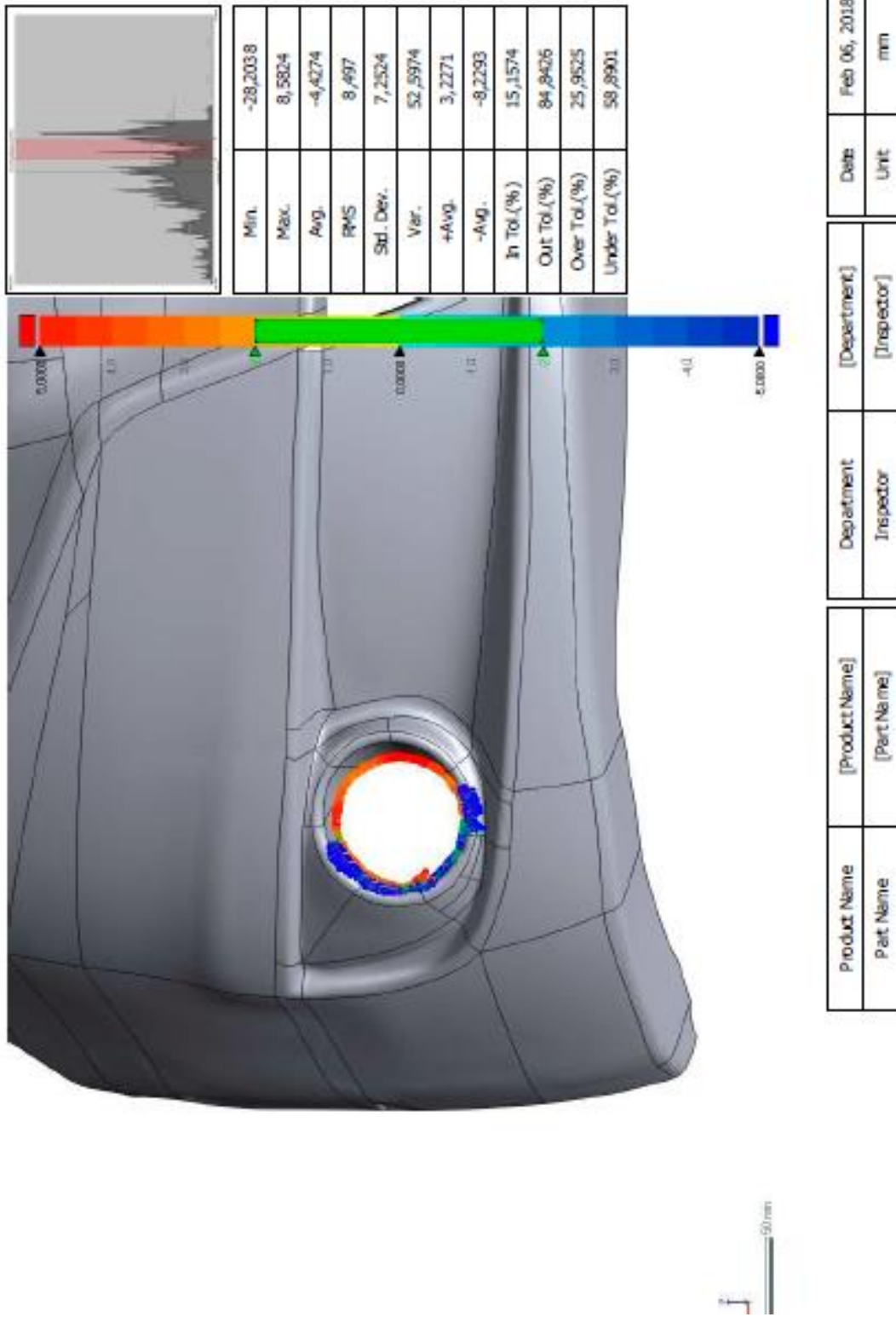


BND-DEV2



Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2018
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

BND-DEV3



Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2018
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Feb 06, 2018
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

MOLDES PARA CUBIERTAS DE GUARDACHOQUE

Anexo E. Planos constructivos del guardachoque