

Optimización del proceso VARTM para el prototipado de un guardachoque

Prototipado del Guardachoque Delantero del Vehículo Chevrolet Aveo, Mediante la Optimización del Proceso de Moldeo por Transferencia de Resina Asistida por Vacío VARTM, Empleando Materiales Compuestos Híbridos

Diego Javier Jiménez Pereira

Universidad Particular Internacional SEK

Nota del Autor

Diego Javier Jiménez Pereira, Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Universidad Particular Internacional SEK.

Director: Ing. Diana Belén Peralta Zurita, M.Sc,

Codirector: Ing. Jaime Molina, M.Sc.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

djimenez.mdm@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, Diego Javier Jiménez Pereira, con cédula de identidad 1104065576, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o 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 PARTICULAR INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Diego Javier Jiménez Pereira

CI: 1104065576

Índice de Contenidos

Índice de Tablas	6
Índice de Figuras	8
Resumen	13
Abstract	14
Introducción	15
Antecedentes.....	15
Problemática	17
Justificación.....	18
Estado del Arte	20
Flujo de fluido sobre medios porosos.	20
Proceso VARTM	25
Aplicaciones de los procesos de moldeo con compuestos líquidos (LCM).....	35
Análisis numérico del proceso de moldeo por compuestos líquidos (LCM).....	44
<i>Moldflow Insight</i>	54
Otros estudios en simulación de procesos LCM.....	58
Método	59
Caracterización de la permeabilidad.....	59
Selección de resina para la caracterización de permeabilidad.	61
Equipo y montaje requerido para la caracterización de permeabilidad mediante el proceso VARTM.	62
Proceso de infusión.	63

Recolección de datos.....	66
Validación de la simulación numérica.....	66
Modelado de las muestras de fibra utilizadas en la simulación.....	67
Mallado del modelo CAD utilizado para la simulación del proceso VARTM.....	68
Asignación de propiedades de las fibras utilizadas como refuerzo.	69
Selección de resina a utilizar.....	70
Selección punto de inyección.....	71
Condiciones establecidas para la simulación	71
Diseño y optimización del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque mediante la simulación.	72
Fabricación del prototipo de guardachoque mediante el proceso VARTM.	75
Fabricación del Molde del Guardachoque	76
Fabricación del prototipo del Guardachoque	76
Resultados	83
Caracterización de la Permeabilidad	83
Validación Simulación Numérica.....	88
Diseño y optimización del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque mediante la simulación.	97
Validación de la simulación del llenado y Fabricación del prototipo del Guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.	105
Fabricación del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.	105

Validación de la simulación del llenado del molde del guardachoque con la realización de la experimentación del proceso VARTM.	105
Desmoldeo del prototipo del Guardachoque obtenido mediante VARTM	108
Análisis y Discusión de Resultados	110
Caracterización de la permeabilidad.....	110
Validación Simulación Numérica.....	114
Diseño y optimización del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque mediante la simulación	117
Validación de la simulación numérica con la experimentación del proceso.....	119
Conclusiones	121
Recomendaciones.....	123
Referencias Bibliográficas	124
Anexos.....	130
Anexo 1. Características técnicas del <i>peel ply</i>	130
Anexo 2. Características técnicas de la resina IN2.....	131
Anexo 3. Características técnicas de la bolsa de vacío.....	133
Anexo 4. Código en <i>Wolfram Mathematica</i> para el ajuste de curvas de la fibra de vidrio	134
Anexo 5. Cuadro de diálogo para ubicar las propiedades de la preforma	135

Índice de Tablas

Tabla 1. Denominaciones de la técnica VARTM según autores.....	16
Tabla 2. Valores de permeabilidad para dos tipos de bolsas de vacío	30
Tabla 3. Datos de Permeabilidad según Schmidt, Goss, Amico, y Lekakou	31
Tabla 4. Posición del frente de flujo con respecto al tiempo	33
Tabla 5. Datos de Permeabilidad según Mejía	33
Tabla 6. Porcentaje de aumento de la Permeabilidad.....	34
Tabla 7. Esfuerzo máximo a Tracción	38
Tabla 8. Resistencia máxima al impacto	39
Tabla 9. Esfuerzo máximo a flexión	39
Tabla 10. Propiedades mecánicas del polipropileno utilizado en cubre neumáticos	41
Tabla 11. Propiedades mecánicas del material compuesto (RP+2FV14)	42
Tabla 12. Fibras utilizadas en la medición radial de la permeabilidad	60
Tabla 13. Propiedades de la resina epóxica IN2 y endurecedor.....	61
Tabla 14. Propiedades de curado del endurecedor.....	62
Tabla 15. Condiciones utilizadas para la caracterización de permeabilidad.....	65
Tabla 16. Cantidad de resina utilizada para cada muestra de fibra	65
Tabla 17. Datos de la malla generada para la muestra rectangular	68
Tabla 18. Datos de la malla reparada para la muestra rectangular.....	69
Tabla 19. Porosidad y Permeabilidad utilizada para las simulaciones.....	69
Tabla 20. Tipo de material y fracción volumétrica utilizada para las simulaciones	70
Tabla 21. Datos de densidad y viscosidad utilizadas para la simulación.....	70
Tabla 22. Temperatura y Presión de inyección utilizados en la simulación	71
Tabla 23. Datos de la malla del Guardachoque del Chevrolet Aveo	73
Tabla 24. Propiedades del material híbrido utilizado en la simulación	73

Tabla 25. Materiales a utilizar en la fabricación del molde	76
Tabla 26. Peso de fibras y cantidades de resina y endurecedor a utilizar	80
Tabla 27. Cantidad de endurecedor AT 30 Slow y resina epoxi a utilizar en la mezcla.....	80
Tabla 28. Posición del Frente de Flujo para la Fibra de Vidrio tipo Choped Strand Mat, Cabuya y Material Híbrido.....	83
Tabla 29. Constante utilizada en la caracterización de la Permeabilidad de la fibra de vidrio, cabuya y material híbrido	84
Tabla 30. Permeabilidad calculada para la Fibra de Vidrio, Cabuya y Material Híbrido	86
Tabla 31. Posición del Frente de Flujo en las direcciones “y” y “x” para el Material Híbrido con peel ply y malla de distribución.....	86
Tabla 32. Constante utilizada en la caracterización de la Permeabilidad del Material Híbrido con malla de distribución y peel ply.....	87
Tabla 33. Permeabilidad del Material Híbrido con malla de distribución y peel ply.....	88
Tabla 34. Error entre la simulación y experimentación del proceso VARTM en la fibra de Vidrio Chopped Strand Mat, Cabuya Tejida y el Material Híbrido	94
Tabla 35. Error entre la simulación y experimentación del proceso VARTM en el material híbrido con Peel Ply y malla de distribución.....	96
Tabla 36. Tiempo de llenado para cada opción de simulación del llenado del molde del guardachoque	104

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de Infusión por Resina	17
Figura 2. Diferencias entre los procesos RTM y VARTM	22
Figura 3. Comparación entre la experimentación y simulación.....	23
Figura 4. Avance del frente de flujo con respecto al tiempo.....	23
Figura 5. Características de los poros en las fibras utilizadas como refuerzos	24
Figura 6. Curvas de permeabilidad para diferentes fibras.....	25
Figura 7. Configuración detallada del proceso VARTM	26
Figura 8. Posición del frente de flujo según el tiempo de infusión.....	30
Figura 9. Secuencia de imágenes del experimento	31
Figura 10. Montaje experimental para determinar el frente de flujo y variación de presión ...	31
Figura 11. Avance del frente de flujo en la preforma.	32
Figura 12. Curva y ajuste del avance del frente de flujo con respecto al tiempo	32
Figura 13. Montaje real para medición de permeabilidad.....	33
Figura 14. Gradiente de presión dentro de la bolsa de vacío.	34
Figura 15. Esfuerzo máximo a la tracción.....	36
Figura 16. Esfuerzo máximo a la flexión	36
Figura 17. Prototipo de Capot fabricado mediante Hand-Lay up	37
Figura 18. Moldeo por compresión para obtención del prototipo de Capot.	37
Figura 19. Comparación del esfuerzo máximo a la tracción entre un compuesto híbrido y material común.....	38
Figura 20. Comparación de la resistencia máxima al impacto entre un compuesto híbrido y material común.....	38
Figura 21. Comparación del esfuerzo máximo a la flexión entre un compuesto híbrido y material común.....	39

Figura 22. Guardachoque fabricado mediante Hand-Lay up	40
Figura 23. Compresión del molde y contramolde del guardachoque.....	40
Figura 24. Equipo utilizado en el proceso RTM	41
Figura 25. a) Molde y equipo de vacío, b) Producto obtenido.....	42
Figura 26. Infusión de Resina utilizada en la maratón ecológica de Malasya	43
Figura 27. Proceso de infusión de resina para la fabricación de una tapa de filtro de aire	44
Figura 28. Simulación del llenado del molde de una hélice para buques marinos	46
Figura 29. Problemas presentados en la primera simulación	46
Figura 30. Simulación del llenado del molde con la disposición final	47
Figura 31. Molde tridimensional.....	47
Figura 32. Avance de flujo entre Fluent y PAM-RTM	48
Figura 33. Simulación del llenado del molde por RTM.....	48
Figura 34. Simulación del llenado del molde por LRTM	49
Figura 35. Solución para el flujo unidimensional	50
Figura 36. Solución para flujo radial.....	51
Figura 37. Simulación de llenado del molde en una geometría 3D	51
Figura 38. Secuencia de Simulación mediante el software RTM-Worx.....	52
Figura 39. Disposición de entradas y ventilaciones para el proceso de infusión de resina.....	53
Figura 40. Simulación del proceso VARTM en el software PAM-RTM	53
Figura 41. Análisis de formación de burbujas de aire en Moldflow	55
Figura 42. Análisis de pandeo en Moldflow	55
Figura 43. Geometría de la viga a fabricar mediante RTM	56
Figura 44. Simulación de tiempo de llenado diseño 1	57
Figura 45. Simulación de tiempo de llenado diseño 2	57
Figura 46. Simulación de tiempo de llenado diseño 3	58

Optimización del proceso VARTM para el prototipado de un guardachoque	10
Figura 47. Tipos de fibras utilizadas	61
Figura 48. Resina epóxica y endurecedor	61
Figura 49. Disposición de materiales	63
Figura 50. Montaje del equipo para la caracterización de la permeabilidad.....	63
Figura 51. Disposición de materiales en la caracterización de permeabilidad por VARTM...	64
Figura 52. Disposición de capas para el análisis de la influencia de la malla de distribución y peel ply	64
Figura 53. Procedimiento a seguir para la experimentación del proceso VARTM	65
Figura 54. Inicio del experimento VARTM.....	66
Figura 55. Modelado de muestras de fibras para la simulación del proceso VARTM	67
Figura 56. Malla tetraédrica 3D utilizada para el proceso VARTM	68
Figura 57. Canal y punto de inyección para el ingreso de la resina.....	71
Figura 58. Mallado del modelo CAD del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.	72
Figura 59. Diseño 1 para la configuración de VARTM.....	74
Figura 60. Diseño 2 para la configuración de VARTM.....	74
Figura 61. Diseño 3 para la configuración de VARTM.....	74
Figura 62. Diseño 4 para la configuración de VARTM.....	74
Figura 63. Diseño 5 para la configuración de VARTM.....	75
Figura 64. Diseño 6 para la configuración de VARTM.....	75
Figura 65. Disposición del guardachoque original para la fabricación del molde.....	76
Figura 66. Colocación de la cinta sellante sobre el molde.....	77
Figura 67. Disposición de las fibras de vidrio y cabuya sobre el molde.....	77
Figura 69. Manguera espiral, utilizada para distribuir la resina.....	79
Figura 70. Ubicación de la manguera espiral y el punto de vacío utilizados para VARTM....	79
Figura 71. Bolsa de vacío utilizada para el proceso VARTM	79

Optimización del proceso VARTM para el prototipado de un guardachoque	11
Figura 72. Inicio del proceso de infusión para la fabricación del prototipo.....	81
Figura 73. Proceso para la fabricación del prototipo de guardachoque mediante VARTM....	82
Figura 74. Posición del frente de flujo de resina según el tiempo para las fibras: a) Vidrio Choped Strand Mat, b) Cabuya, c) Híbrido	84
Figura 75. Ajuste lineal para la determinación de la pendiente de la recta en las fibras de: a) Vidrio Choped Strand Mat, b) Cabuya, c) Híbrido	85
Figura 76. Posición del frente de flujo de resina para el material híbrido con malla de distribución y peel ply.	87
Figura 77. Ajuste lineal para la determinación de la pendiente de la recta en el material híbrido con malla de distribución y peel ply.	88
Figura 78. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para la Fibra de Vidrio	90
Figura 79. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para la Fibra de Cabuya	91
Figura 80. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para el material híbrido	93
Figura 81. Comparación entre la simulación y experimentación de VARTM para el material híbrido con peel ply y malla de distribución	96
Figura 82. Simulación del proceso VARTM para el diseño 1	98
Figura 83. Simulación del proceso VARTM para el diseño 2	99
Figura 84. Simulación del proceso VARTM para el diseño 3	100
Figura 85. Simulación del proceso VARTM para el diseño 4	101
Figura 86. Simulación del proceso VARTM para el diseño 5	102
Figura 87. Simulación del proceso VARTM para el diseño 6	104
Figura 88. Molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.....	105

Figura 89. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.	108
Figura 90. Vista frontal del prototipo de guardachoque obtenido mediante VARTM	109
Figura 91. Vistas laterales del prototipo de guardachoque obtenido mediante VARTM.	109
Figura 92. Comparación de las posiciones del frente de flujo de resina, determinadas de forma experimental, para las fibras de vidrio, cabuya y material híbrido.	110
Figura 93. Caracterización de la permeabilidad sobre la fibra de vidrio Choped Strand Mat para distinto número de capas	112
Figura 94. Efecto del número de capas sobre la forma del frente de flujo de resina..	112
Figura 95. Forma del frente de flujo para materiales anisotrópicos.....	113
Figura 96. Comparación del avance del frente de flujo de resina con y sin malla de distribución conjuntamente con peel ply.....	114
Figura 97. Comparación del avance del frente de flujo de resina entre la experimentación y la simulación numérica.	115
Figura 98. Comparación del avance del frente de resina entre la experimentación y la simulación numérica para el Material Híbrido con malla de distribución y peel ply.	116
Figura 99. Comparación del avance del frente de resina entre la experimentación y las simulaciones numéricas.....	116
Figura 100. Variación de presión al inicio de la inyección.....	117
Figura 101. Comparación del tiempo de llenado para los diseños propuestos.....	118
Figura 102. Comparación del tiempo de llenado entre la simulación y experimentación.....	119

Resumen

Con el fin de brindar una alternativa para la manufactura de autopartes en el Ecuador y de aportar al cambio de la matriz productiva, se aplicó el proceso VARTM en el prototipado del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo. Para lo cual se caracterizó la permeabilidad de las fibras utilizadas como refuerzo y del material híbrido con y sin malla de distribución. El uso de fibras naturales dentro del compuesto híbrido disminuyen el tiempo de infusión en un 10.4 % respecto a la fibra de cabuya y un 20.48 % respecto a la fibra de vidrio. Además, con la utilización de una malla de distribución y el peel ply, el tiempo de infusión se reduce en un 64.4 %. Para la optimización del proceso VARTM, en el prototipado del guardachoque, se llevaron a cabo varias simulaciones de los diseños para la ubicación de puntos de entrada de resina y de vacío. El software *Autodesk Moldflow* permitió modificar y agregar puntos de entrada de resina con el fin de observar la evolución del flujo y el tiempo de llenado para cada diseño planteado. El diseño propuesto reduce un 81.56 % el tiempo de llenado del molde del guardachoque. El resultado de la simulación numérica fue validado mediante la experimentación del proceso, obteniendo una gran concordancia entre ambos métodos.

Palabras clave: Permeabilidad, VARTM, infusión de resina, simulación, optimización, guardachoque, materiales híbridos, Autodesk Moldflow

Abstract

With the purpose of providing an alternative for the manufacture of auto parts in Ecuador and to contribute to the change of the productive matrix, the VARTM process was applied in the prototyping of the Chevrolet Aveo vehicle bumper. To get this aim, the permeability of the fibers used as reinforcement and the hybrid material with and without distribution mesh was characterized. The use of natural fibers within the hybrid compound decreases the infusion time by 10.4% and 20.48 %. In addition, with the use of a distribution medium and the peel ply, the infusion time is reduced by 64.4%. For the optimization of the VARTM process, in the prototyping of the bumper, several simulations of the designs for the location of the injection ports and vents were carried out. The Autodesk Moldflow software allowed modifying and adding resin entry points in order to observe the flow evolution and the filling time for each proposed design. The proposed design reduces 81.56% the filling time of the bumper mold. The result of the numerical simulation was validated through the experimentation of the process, obtaining a great concordance between both methods.

Keywords: Permeability, VARTM, resin infusion, simulation, optimization, bumper, hybrid materials, Autodesk Moldflow

Introducción

Antecedentes

Uno de los objetivos principales del Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017 es “Impulsar la transformación de la matriz productiva”, en base al conocimiento y a la innovación. Ésta transformación se centra en incentivar, elaborar, mejorar la producción nacional, dando un valor agregado a los productos fabricados en el país. La industria manufacturera de autopartes del Ecuador, no se queda fuera de esta transformación, donde se ha visto un incremento en los últimos años del componente nacional en el ensamblaje de vehículos. En el año 2007 el componente nacional en los vehículos era del 9%, mientras que para el año 2013 es del 27% (Arias, 2015).

Lastimosamente la falta de inversión e investigación en procesos de manufactura innovadores, hace que el Ecuador sea un importador de distintas autopartes, entre ellas el guardachoque delantero para automóviles. En el año 2016, la importación de guardachoques y sus accesorios alcanzó una inversión de 8.4 millones de dólares (BCE, 2017). El proceso de manufactura tradicional utilizado para la producción de guardachoques es la inyección de plástico, la misma que requiere un alto capital de inversión, plazos largos para la producción de moldes y maquinarias complejas (Bubna et al., 2016). Ésta tecnología es nula en el Ecuador, por lo tanto, los Polímeros Compuestos Reforzados con Fibras que en inglés se los conoce como *Fibre Reinforced Composite Polymers* (FCRP), surgen como una alternativa en procesos de manufactura.

Los FCRP consisten en fibras sintéticas o naturales incrustadas en una matriz polimérica. Las fibras son las responsables de dar las propiedades estructurales al material compuesto (Montés N. , 2009). Dentro de las fibras sintéticas, existen las de vidrio, carbono y boro, entre otros; mientras que en las fibras naturales se encuentran las de arámida, lino, sisal, entre otras. Al utilizar una combinación entre fibras naturales y sintéticas conjuntamente con

una matriz polimérica el material compuesto se denomina híbrido. Este material es de gran interés debido a la preocupación por la preservación del medio ambiente y el uso de materias primas renovables (Paredes, 2012).

Para fabricar componentes hechos de FCRP se utiliza el moldeo por compuestos líquidos, traducido al inglés como *Liquid Composite Molding* (LCM). Una de las técnicas que se encuentra dentro de LCM se denomina Transferencia de resina asistida por vacío, en inglés conocida como *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM), en el cual se utiliza como contramolde un material flexible llamado bolsa de vacío (Summerscales J. , 2012). En otras regiones, ésta técnica tiene nombres diferentes a los antes mencionados. En la tabla 1 se indica un listado de las diferentes denominaciones que se le da a la técnica VARTM dependiendo del autor.

Tabla 1

Denominaciones de la técnica VARTM según autores

Abreviación	Descripción	Traducción	Autor
LRI	<i>Liquid Resin Infusion</i>	Infusión de resina líquida	<i>Hexcel</i>
LRTM	<i>Light (or lite) Resin Transfer Molding</i>	Moldeo de transferencia de resina ligera	<i>Magnum Venus Plastech</i>
RIFT	<i>Resin Infusion under Flexible Tooling</i>	Infusión de resina bajo herramientas flexibles	<i>ACMC Plymouth Magnum Venus Plastech</i>
RTM <i>Light</i>	Similar a LRTM	Similar a LRTM	
SCRIMP™	<i>Seemann Composites Resin Infusion Molding Process</i>	Proceso de moldeo por infusión de resina de compuestos Seemann	<i>TPI</i>
V(A)RTM	<i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i>	Transferencia de Resina Asistida por vacío	
VIM	<i>Vacuum Infusion Molding</i>	Moldeo de infusión por vacío	
VIMP	<i>Vacuum Infusion Molding Process</i>	Proceso de moldeo por infusión de vacío	
VIP	<i>Vacuum Infusion Process</i>	Proceso de infusión por vacío	

Brevemente, VARTM consiste en colocar el material utilizado como refuerzo (fibras) en un molde determinado y encerrarlo en una bolsa flexible. Al aplicar el vacío, la presión dentro de la bolsa disminuye, ocasionando una reducción del aire y permitiendo el paso de la resina para impregnar las fibras a través de tuberías dispuestas en el molde. Este proceso permite el uso de herramientas de bajo costo, para producir piezas compuestas de alta calidad, lo que la convierte en la técnica de fabricación preferida en diferentes industrias (Ruikui, y otros, 2013). La figura 1 indica un esquema del proceso mencionado.

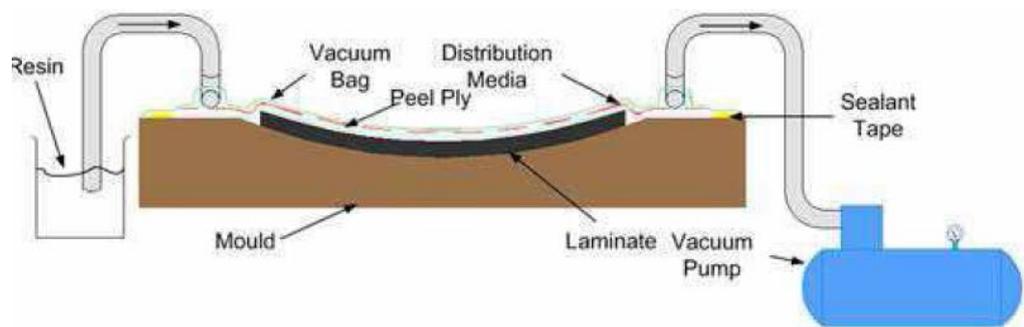


Figura 1. Proceso de Infusión por Resina (VARTM) (Sunaryo, Liston, y Maharani, 2013)

Problemática

Según (Santoso, 2010) la técnica VARTM podría aumentar la eficiencia y la resistencia del material compuesto en muchas aplicaciones. Lastimosamente este método no se lo ha aplicado para la fabricación de autopartes en el Ecuador. Tal es el caso que, en la fabricación de guardachoques para buses, carrocerías como Ibimco, Miral y Cepolfi utilizan la variante *Hand Lay-up* con fibra de vidrio y resinas (Paredes, 2012). En cambio para el caso de guardachoques de automóviles, se realiza la importación del 100 % de esta autoparte desde países como: Taiwán, China, Brasil, Colombia entre otros (BCE, 2017). Cairns, Skramstad, y Mandell (2001) manifiestan que la variante *Hand Lay-up* es un proceso muy intensivo en mano de obra y que en algunos casos puede dar lugar a partes con orientaciones de fibras

incoherentes. Por lo tanto, se espera que la técnica VARTM sea una alternativa en procesos de fabricación de guardachoques de automóviles y de otras autopartes con buenas propiedades mecánicas.

Además, al aplicar la técnica VARTM se debe garantizar que la resina logre impregnar todo el material utilizado como refuerzo en el molde para evitar zonas secas, ya que éstas son perjudiciales para las propiedades mecánicas del material (Porto J et al., 2012). Por otro lado, en piezas grandes la infusión se vuelve lenta, haciéndolo al proceso poco rentable para producción a gran escala. Asimismo, el alto número de ensayos de prueba y error en la etapa de fabricación, impiden que el proceso se posesione como una alternativa para la producción de guardachoques en el Ecuador. Es por eso que se requiere un análisis mediante simulación numérica del avance del frente del flujo de resina con respecto al tiempo de inyección, para evitar la problemática antes señalada. Finalmente, en la simulación del avance de la resina por las fibras utilizadas como refuerzo en este proyecto, se debe caracterizar su permeabilidad, ya que no se cuenta con una base de datos sobre este parámetro.

Justificación

Según Trochu et al. (2005), los FRCP se utilizan en un gran número de aplicaciones automotrices y aeroespaciales debido a que combinan alto rendimiento mecánico, bajo peso y buena resistencia a la corrosión. Además, un factor clave para el éxito de los FRCP es la capacidad de modelar el comportamiento material ya sea bajo cargas estáticas como dinámicas (Mitschang y Hildebrandt, 2012). Además, los procesos para fabricar FRCP permiten el uso de fibras naturales, sintéticas o híbridos. Los materiales compuestos híbridos tienen un gran interés hoy en día ya que están formados por materiales primas renovables y de bajo costo que ayudan a preservar el medio ambiente (Paredes, 2012).

Para poder producir materiales compuestos reforzados con fibras naturales o sintéticas, el proceso VARTM surge como una alternativa ya que permite una producción rápida y de alta calidad de compuestos avanzados (Mitschang y Hildebrandt, 2012). Brouwer, van Herpt, y Labordus (2003) citado por Ruikui et al. (2013, p.236) menciona que VARTM permite el uso de herramientas de bajo costo para producir piezas de alta calidad de material compuesto. Además, Sunaryo, Liston, y Maharani (2013) manifiestan que con la técnica VARTM la calidad del material compuesto se mejora y la resistencia final del material obtenido aumenta en comparación al método de colocación manual de resina.

Para que el proceso VARTM sea eficiente y por ende tenga éxito en la fabricación de autopartes, se debe analizar la permeabilidad de las fibras utilizadas como refuerzo. Según Loendersloot (2011), el conocimiento de la permeabilidad de un refuerzo de fibra permite la estimación del tiempo de procesamiento, así como también la solidez del proceso. Michaud (2011) expone que la necesidad de fabricar piezas sólidas y homogéneas al menor costo ha impulsado la investigación de la permeabilidad de los refuerzos utilizados en los procesos LCM, entre ellos VARTM. Finalmente Verleye, Lomov, y Roose (2011) mencionan que la permeabilidad es un factor importante para la predicción del tiempo de llenado y las posibles zonas secas de la parte obtenida.

Por tal razón, el objetivo principal de este proyecto de investigación, es prototipar el guardachoque delantero del vehículo Chevrolet Aveo, mediante la optimización del proceso de moldeo por transferencia de resina asistida por vacío (VARTM), utilizando un material compuesto híbrido de resina epóxica como matriz, reforzada con fibra de vidrio y cabuya. Dentro de los objetivos específicos se plantea realizar la caracterización de la permeabilidad del refuerzo híbrido mediante la experimentación del proceso VARTM, con el fin de simular y estimar el tiempo de llenado del molde en el proceso de fabricación del prototipo del guardachoque. Otro de los objetivos consiste en realizar la simulación del proceso VARTM

aplicado en la fabricación del prototipo mediante el software *Autodesk Moldflow Insight*, con el fin de determinar la ubicación óptima de los puntos de entrada y salida de resina, así como el diseño del molde para el prototipo. Finalmente se realiza el montaje de los materiales y equipos sobre el molde del prototipo basándose en la información obtenida en las simulaciones con la finalidad de optimizar el proceso VARTM y se realiza el prototipo.

Estado del Arte

Flujo de fluido sobre medios porosos.

Para analizar el flujo de resina en los procesos LCM y por ende en el proceso VARTM es necesario comprender como es la dinámica de los fluidos sobre un medio poroso. En general, el flujo de resina a través del refuerzo de fibra se considera como flujo newtoniano en medio poroso, el mismo que se puede analizar a nivel microscópico como macroscópico (Park, 2015). En la escala macroscópica el refuerzo textil se observa a simple vista, por tal razón se supone al refuerzo de fibra se como un medio poroso homogéneo, sin embargo en la mayoría de refuerzos que se utilizan en los materiales compuestos se componen de hilos, ocasionando que el refuerzo sea un medio poroso altamente heterogéneo (Park, 2015). En el análisis microscópico, el flujo a través del refuerzo fibroso se rige por la ecuación de *Navier-Stokes*, mientras que, a nivel macroscópico, el flujo de resina a través de un lecho de fibras es modelado por la ley de *Darcy* (Ruiz y Trochu, 2011).

Ley de Darcy.

Para modelar matemáticamente el avance de flujo de resina se utiliza la Ley de Darcy, que asocia la velocidad del flujo con el gradiente de presiones dentro del medio poroso (Bejan, 1995). Con la aplicación de este modelo matemático se puede optimizar ciertas variables que intervienen en el diseño del proceso, tales como el tiempo de llenado, el grado

de vacío, las ubicaciones de compuerta y de ventilación (Renliang et al., 2004). La ecuación 1 indica los parámetros que se utilizan en esta Ley.

$$[V] = -\frac{[K]}{u} \nabla P \quad (1)$$

Donde:

[V]: Vector superficial de velocidad

u= Viscosidad de las resina

∇P = Gradiente de presión

[K]= Tensor de permeabilidad de la fibra.

Al considerar un molde cerrado como es el caso del proceso RTM, se aplica el concepto de divergencia sobre la ley de *Darcy* obteniendo la expresión de la ecuación 2 (Simacek y Advani, 2017). Sin embargo para el proceso VARTM, se debe tomar en cuenta el cambio de espesor del refuerzo en relación a la presión de la resina y la variación de la permeabilidad y porosidad en relación a la fracción de volumen de la fibra (Simacek y Advani, 2017). La ecuación 3 indica como se ha modificado la Ley de *Darcy* para tomar en cuenta los efectos del proceso VARTM durante el flujo de resina.

$$\nabla \cdot \left(\frac{[K]}{u} \nabla P \right) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{h(x,t) \cdot K(h)}{h_0(x) \cdot u} \cdot \nabla P \right) = \frac{h(x,t)}{h_0(x)} \quad (3)$$

Donde:

$K(h)$ = Permeabilidad dependiendo del espesor h

$h(x, t)$ = Espesor del refuerzo dependiendo de la posición x y del tiempo

$h_0(x)$ = Espesor inicial del refuerzo

En la figura 2 se observa gráficamente las diferencias del espesor y flujo entre los procesos RTM y VARTM. La simulación numérica, basado en el modelo matemático de la Ley de *Darcy* para procesos VARTM, no es muy eficiente, por tal razón se opta por programas que simulen el proceso RTM ya que los datos obtenidos del proceso VARTM de forma experimental, concuerdan razonablemente con las simulaciones en los programas de RTM (Simacek y Advani, 2017).

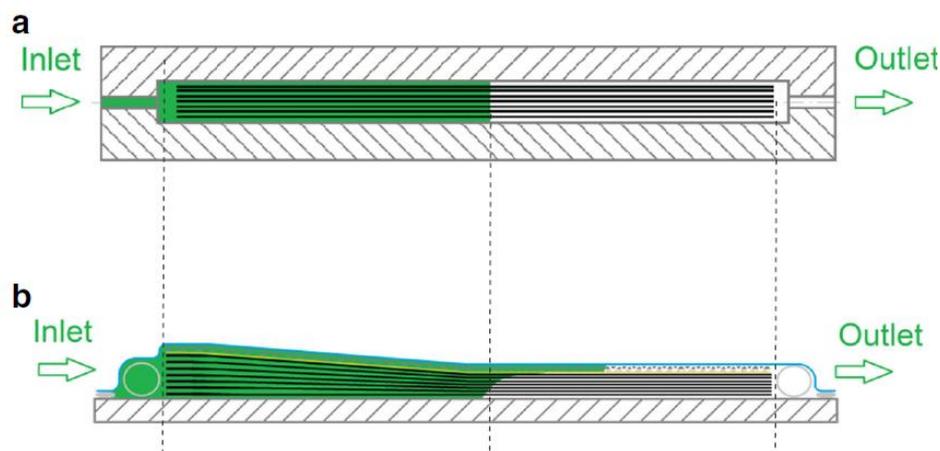


Figura 2. Diferencias entre los procesos a) RTM; b) VARTM (Sirtautas, Pickett, y George, 2015)

La aplicación de esta ley se la ha hecho ya sea para realizar la simulación numérica del proceso como para la caracterización de parámetros como la permeabilidad, presión de compactación, viscosidad entre otros, los mismos que intervienen en el proceso RTM o VARTM. Oliveira et al. (2014) investigan la infiltración de una resina cargada con CaCO_3 utilizando experimentos y el software PAM-RTM para la simulación del proceso RTM. Todas las simulaciones realizadas se basan en la ley de *Darcy*, donde los resultados numéricos se evaluaron mediante comparación directa con datos experimentales. Observaron que la velocidad del llenado disminuye al aumentar el contenido de CaCO_3 y, cuanto mayor es la cantidad de CaCO_3 en la resina, menor es la permeabilidad del refuerzo de fibra de vidrio. Al comparar los datos experimentales con las simulaciones, determinaron que el análisis de flujo de fluido computacional con PAM-RTM es un estudio preciso de herramientas para el procesamiento de materiales compuestos. La figura 3 muestra la comparación de la

simulación con el experimento realizado, mientras que en la figura 4 se indica una gráfica del avance de flujo con respecto al tiempo tanto en la experimentación como en la simulación. En la sección de Permeabilidad y Análisis numérico del proceso de moldeo por compuestos líquidos (LCM) se detallan más estudios basados en la Ley de *Darcy*.

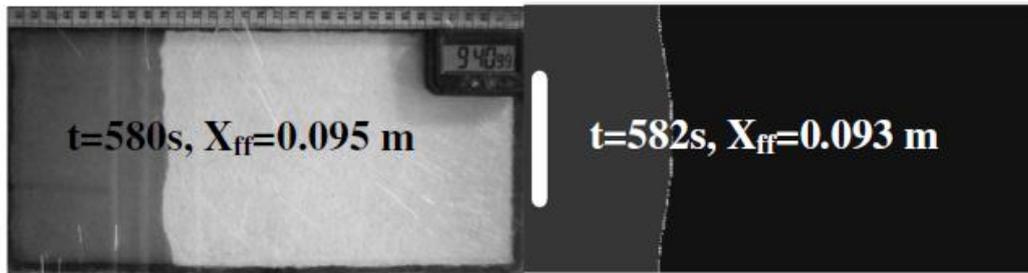


Figura 3. Comparación entre la experimentación y simulación (Oliveira, Amico, Souza, y Lima, 2014).

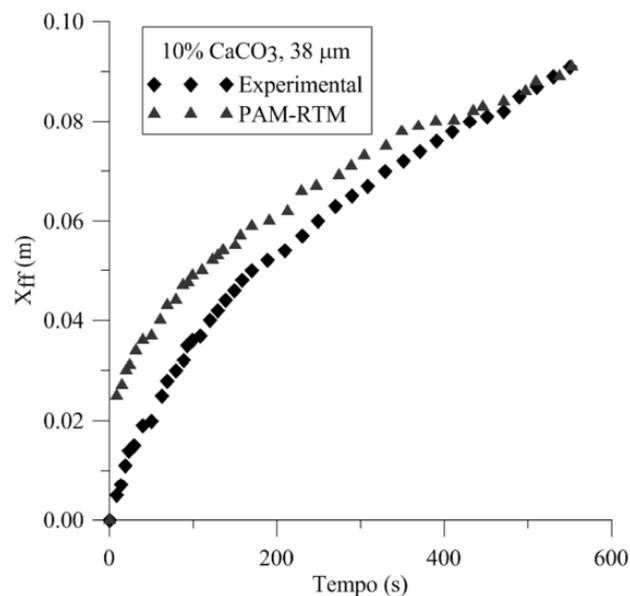


Figura 4. Avance del frente de flujo con respecto al tiempo (Oliveira et al., 2014).

Ecuación de Navier-Stokes.

Cuando el material utilizado como refuerzo se considera heterogéneo, se puede obtener distintos tamaños de poros en el refuerzo tal como lo muestra la figura 5. Al tener macroporos, el flujo de resina puede modelarse como el flujo de Stokes a un bajo número de Reynolds, mientras que en microporos el flujo de resina puede considerarse como capilar que

atraviesa un medio poroso (Park, 2015). Por lo tanto para la simulación numérica se deben tomar en cuenta estos dos tipos de flujos diferentes en un mismo dominio computacional para lo cual se utiliza la ecuación de Stokes-Brinkman, la misma que se muestra en la ecuación 4 (Park, 2015).

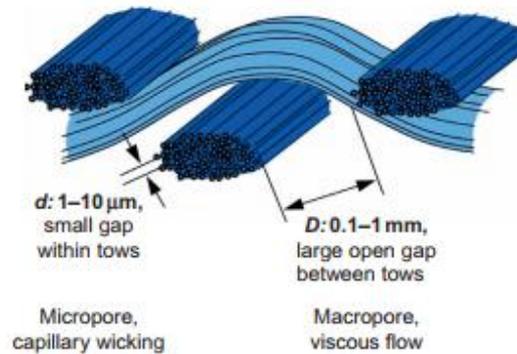


Figura 5. Características de los poros en las fibras utilizadas como refuerzos (Park, 2015)

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right] = -\nabla P - \frac{\mu}{K} \vec{u} + \mu_e \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_b \quad (4)$$

Donde:

\vec{u} = Vector Velocidad

μ = Viscosidad

μ_e = Viscosidad efectiva

\vec{f}_b = Vector de la fuerza de cuerpo como la gravedad

Al elegir un valor pequeño para la viscosidad efectiva, la ecuación de *Stokes-Brinkman* se reduce a la ley de *Darcy* para el flujo de resina en la zona porosa dentro del haz de fibra (Park, 2015). Por el contrario al tomar un valor un valor grande de permeabilidad (K) y la viscosidad de la resina es igual a la efectiva, la ecuación de Stokes-Brinkman se reduce a la ecuación 5, la misma que es la de Stokes para el flujo de resina, donde se lo considera como flujo progresivo a bajo número de Reynolds (Park, 2015).

$$0 = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (5)$$

Verleye et al. (2008) presentan un método de simulación rápido y preciso para la permeabilidad de un refuerzo textil, basado en una discretización de diferencia finita de las ecuaciones de *Navier Stokes*. Utilizan 3 tipos de refuerzo, tejido monofilamento (MFF), tejido plano (PWF) y fibras no tejidas con sus respectivos parámetros de los hilos como ancho, largo, densidad entre otros. Con la ayuda del Instituto de Simulación Numérica de la Universidad de Bonn y mediante un solucionador Navier-Stokes de diferencia finita determinan la permeabilidad de los refuerzos antes descritos y los comparan mediante la experimentación. La figura 6 indica la comparación entre las curvas de permeabilidad calculada mediante Stokes y en la experimentación, donde se destaca que para las fibras no tejidas, los valores numéricos de permeabilidad se encuentran dentro de las barras de error de las predicciones experimentales, mientras que en las fibras tejidas se observa una diferencia relativa del 40-50% entre los valores experimentales y numéricos.

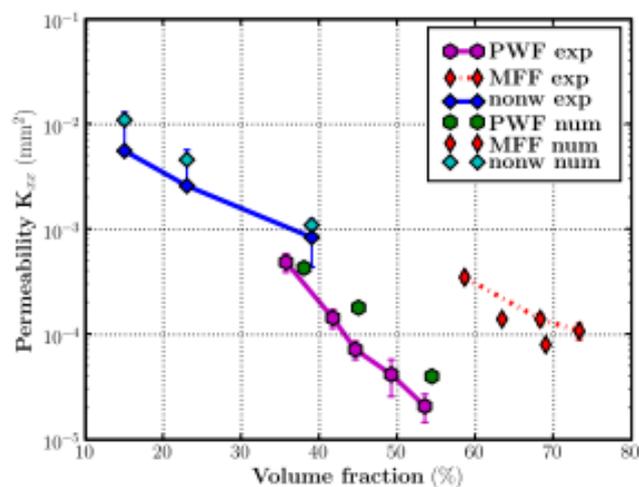


Figura 6. Curvas de permeabilidad para diferentes fibras según el cálculo numérico y experimentación (Verleye et al., 2008)

Proceso VARTM

El proceso VARTM, es un proceso de molde cerrado que combina los beneficios de alta calidad, repetibilidad y manejo limpio del proceso de moldeo por transferencia de resina (RTM). Este proceso ha sido ampliamente utilizado en las industrias marina, energética, de

construcción de infraestructura, aeroespacial, automotriz etc, permitiendo fabricar piezas compuestas complejas con calidad mejorada y menor costo (Hsiao y Heider, 2012).

En el proceso VARTM, la presión atmosférica se utiliza típicamente para proporcionar la presión de compactación contra las fibras dispuestas en el molde, es decir utiliza la diferencia de presión entre la presión de vacío y la presión atmosférica para comprimir las fibras, asegurarlas contra el molde y extraer la resina de las mismas (Hsiao y Heider, 2012). En la figura 7 se ilustra una configuración detallada del proceso VARTM donde se observa cómo actúa la presión atmosférica como una presión de compactación.

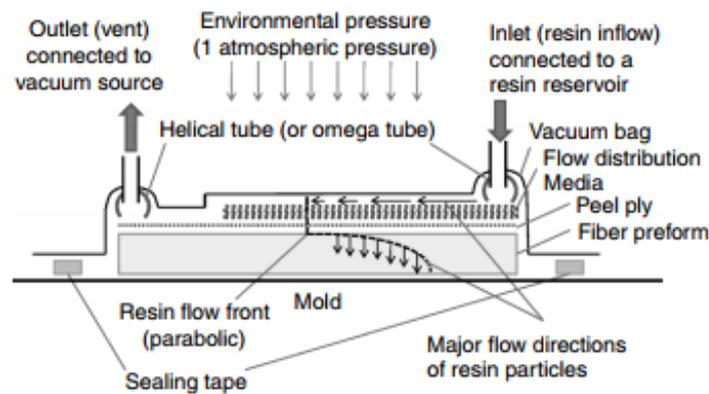


Figura 7. Configuración detallada del proceso VARTM (Hsiao y Heider, 2012).

Para elaborar piezas grandes o complejas con sistemas de tejido híbrido, se podrían usar múltiples líneas de inyección y respiraderos para mejorar la infusión de resina. La capa de medio de distribución de flujo también podría colocarse en patrones diferentes para crear caminos de infusión de resina versátiles que puedan promover la calidad de la infusión de resina de una parte compuesta grande o compleja (Hsiao y Heider, 2012).

Factores que intervienen en el proceso VARTM.

Como se dijo anteriormente, el flujo de resina sobre el material utilizado refuerzo se puede modelar mediante la Ley de Darcy o la ecuación de Stokes. Al momento de aplicar y optimizar el proceso VARTM Existen ciertos factores que se debe tomar en cuenta, los

principales son: fracción de volumen de la fibra, presión de compactación, permeabilidad del material o refuerzo, viscosidad de la resina.

Fracción de volumen de la fibra.

La relación de volumen de fibra con el volumen total de una estructura compuesta se denomina fracción de volumen de fibra, la misma que interviene directamente en las propiedades mecánicas del material obtenido (Polowick, 2013). Según Wasik (2005), la resistencia a la tracción, compresión y cizallamiento de las estructuras compuestas es proporcional a la fracción de volumen de la fibra. En los procesos VARTM, la fracción teórica máxima de volumen de fibra que se utiliza para compactar la preforma está limitada a 50-60 %, sin embargo, la fracción real de volumen de fibra es inferior a este límite teórico debido a los gradientes de espesor que se dan durante la infusión dentro de la preforma (Polowick, 2013). Según Easy Composites (2016) para el proceso VARTM se utiliza una relación del 60/40, es decir 60 % de volumen del material pertenece a la fibra y el 40 % a la resina.

Permeabilidad.

La permeabilidad es una medida que nos indica la facilidad con que el fluido fluye a través de un material poroso bajo la influencia de un gradiente de presión de conducción (Pierce, 2014). Si la permeabilidad del refuerzo es elevada, el fluido fluye con más rapidez, en cambio si la permeabilidad es baja, el fluido tiene más resistencia al flujo. Hoy en día no existe un método estandarizado para la caracterización de la permeabilidad de los refuerzos, es por eso que se utiliza enfoques experimentales para determinar la permeabilidad de los refuerzos (Pierce, 2014). Sin embargo existe un enfoque analítico donde se utiliza la ecuación de *Kozeny-Carman*, la misma que determina el valor de la permeabilidad en función de la

fracción de volumen de la fibra (Polowick, 2013). En la ecuación 6 se indican las variables utilizadas en la ecuación de *Kozeny-Carman*.

$$K = \frac{1}{s^2 k} \frac{(1-v_f)^3}{v_f^2} \quad (6)$$

Donde:

s^2 = Superficie específica de las fibras

k = Constante de *Kozeny-Carman*

v_f = Fracción de volumen de la fibra

Durante el proceso de fabricación mediante VARTM, la permeabilidad del refuerzo es un parámetro especialmente importante que influye directamente en la calidad del material obtenido (Li et al., 2015). La permeabilidad se la puede medir en estado saturado o no saturado. En el estado saturado, la preforma se impregna de líquido inicialmente para luego medir la variación de presión y la velocidad del flujo, mientras que en el estado no saturado la preforma seca se coloca en el molde y se anotan los datos de la distancia del frente de flujo (Naik et al., 2014). Existen 2 métodos para determinar la permeabilidad de forma experimental, estos son: flujo unidireccional y flujo radial (Naik et al., 2014). Para el flujo unidireccional se puede reescribir la ecuación 1 (Ley de *Darcy*) tal como se muestra en la ecuación 7.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{K}{\mu \varepsilon} \frac{\Delta P(t)}{x(t)} \quad (7)$$

Despejando K de la ecuación 7, se obtiene la permeabilidad mostrada en la ecuación 8, cuando se utiliza una presión de infusión constante.

$$K = \frac{x^2 \mu \varepsilon}{2t \Delta P} \quad (8)$$

Donde:

x = Posición del frente de flujo

μ = Viscosidad

ε = Porosidad

t = Tiempo

ΔP = Presión de inyección

Mientras que, para el caso de flujos radiales, utilizando la misma ecuación de *Darcy* se obtiene la ecuación 9 de la permeabilidad para materiales isotrópicos. En los materiales isotrópicos el comportamiento del flujo es el mismo en todas direcciones, por tal razón la forma del frente es circular (Naik et al., 2014).

$$K = \frac{u \varepsilon}{4t\Delta P} \left\{ r_f^2 \left[2 \cdot \ln \left(\frac{r_f}{r_0} \right) - 1 \right] + (r_0^2) \right\} \quad (9)$$

Donde:

r_f = Radio del frente de flujo

r_0 = Radio de entrada de resina

Existen múltiples enfoques experimentales para determinar la permeabilidad. Tal es el caso de Polowick (2013), donde realizó 3 experimentos utilizando 2 capas de fibra de carbono BGF 94107. Utilizando una cámara y la lectura manual determinó las ubicaciones del frente de flujo según el tiempo. Los datos obtenidos los gráfico y luego los reajusto a una curva mostrada en la figura 8. Este reajuste de curva sirve para poder determinar los datos de permeabilidad en dos tipos de bolsas de vacío, la misma que utilizando la Ley de Darcy se muestran en la tabla 2.

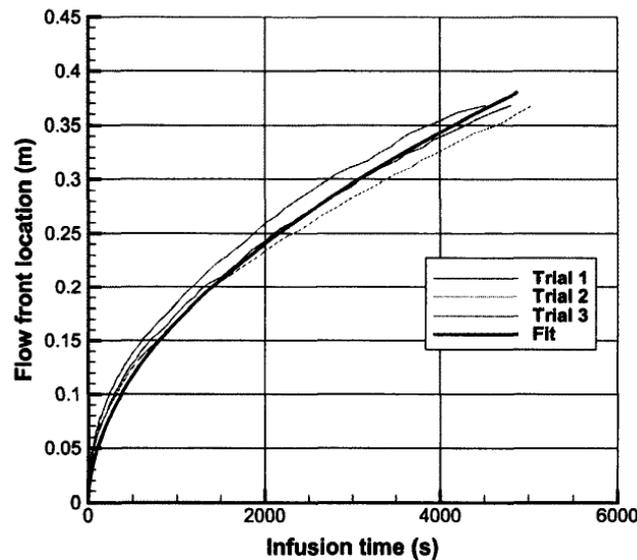


Figura 8. Posición del frente de flujo según el tiempo de infusión (Polowick, 2013).

Tabla 2

Valores de permeabilidad para dos tipos de bolsas de vacío

Tipo de Bolsa	K_o (m^2)	σ
Bolsa con flexibilidad alta	0.76×10^{-11}	0.066×10^{-11}
Bolsa con flexibilidad baja	1.45×10^{-11}	0.137×10^{-11}

Nota: Los datos se obtienen del estudio presentado por (Polowick, 2013).

En el estudio presentado por Schmidt et al. (2009) determinan experimentalmente la permeabilidad de la fibra de vidrio clase E para un proceso RTM. Utilizando un molde de placa de vidrio plano con medidas de 320mm x 150mm, una cámara digital para tomar fotografías del frente al flujo, aceite de soja como fluido realizan el experimento como se indica en la figura 9. Se determinó que la velocidad del flujo de fluido disminuye con el tiempo. En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos de la permeabilidad a distintas posiciones conforme avanza el frente de flujo.

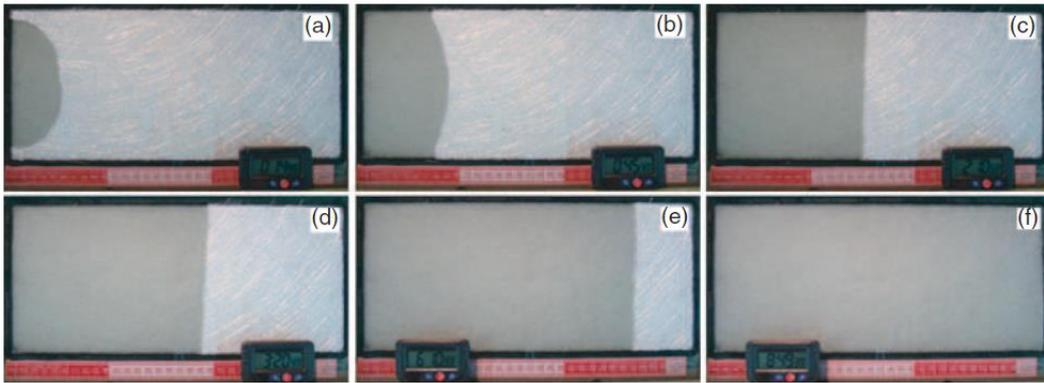


Figura 9. Secuencia de imágenes del experimento. a) 14s, b) 45s, c) 130 s, d) 200 s, e) 370 s, f) 520 s (Schmidt et al., 2009).

Tabla 3

Datos de Permeabilidad según Schmidt, Goss, Amico, y Lekakou

Longitud de la fibra	Tratamiento de la fibra	K (m ²)	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tiempo de llenado (s)
10 mm	No	3.16 x 10 ⁻⁹	3.56 x 10 ⁻¹⁰	11 %	122
20 mm	No	3.61 x 10 ⁻⁹	6.86 x 10 ⁻¹¹	2 %	110
30 mm	No	4.00 x 10 ⁻⁹	1.97 x 10 ⁻¹⁰	5 %	104
40 mm	Si	3.78 x 10 ⁻⁹	2.84 x 10 ⁻¹⁰	8 %	110
50 mm	No	3.78 x 10 ⁻⁹	1.42 x 10 ⁻¹⁰	4 %	104
100 mm	No	3.88 x 10 ⁻⁹	1.69 x 10 ⁻¹⁰	4 %	102

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Schmidt et al., 2009).

Verrey et al. (2006) presentan un diseño experimental para determinar el efecto de la capilaridad dinámica durante la infiltración de preformas. Utilizan el montaje mostrado en la figura 10, el mismo que consta de una cámara, unidad de inyección, molde entre otros, los mismos que sirven para determinar el frente de flujo y la presión durante la impregnación de la preforma.

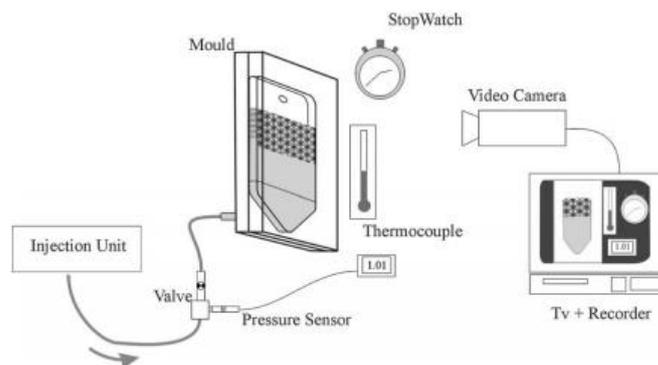


Figura 10. Montaje experimental para determinar el frente de flujo y variación de presión (Verrey et al., 2006).

En la figura 11, se observa cómo avanza el frente de flujo de acuerdo al tiempo determinado. Estos datos permiten realizar la curva de avance con respecto al tiempo, la cual se indica en la figura 12 y sirve para determinar la permeabilidad de la preforma.

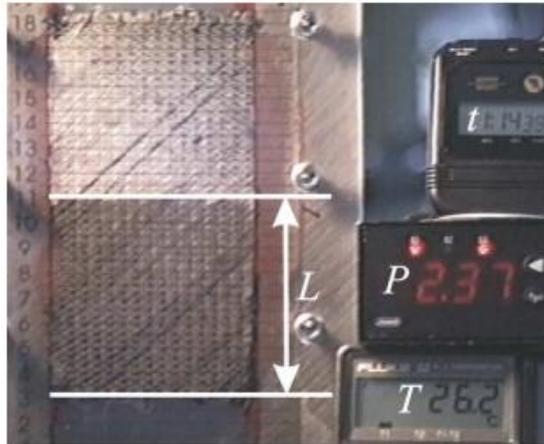


Figura 11. Avance del frente de flujo en la preforma (Verrey et al., 2006).

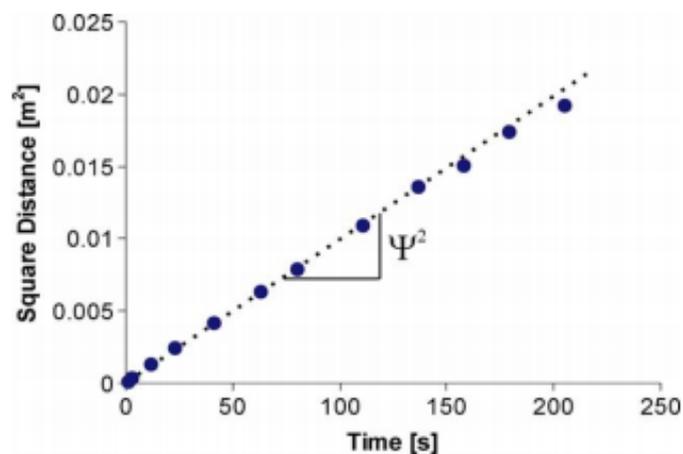


Figura 12. Curva y ajuste del avance del frente de flujo con respecto al tiempo (Verrey et al., 2006).

Para el flujo radial, Mejía (2013) realiza ensayos de permeabilidad sobre tres tipos diferentes de fibras de vidrio. Utiliza un montaje del experimento mostrado en la figura 13 para establecer la velocidad del avance del frente de flujo. Los datos experimentales obtenidos se muestran en la tabla 4, los mismos que basándose en la ecuación 9 sirven para obtener la permeabilidad de la preforma. En la tabla 5 se detallan los datos de permeabilidad para los tres tipos de fibras de vidrio a distintas porosidades: Mat núcleo, Mat y Woven.

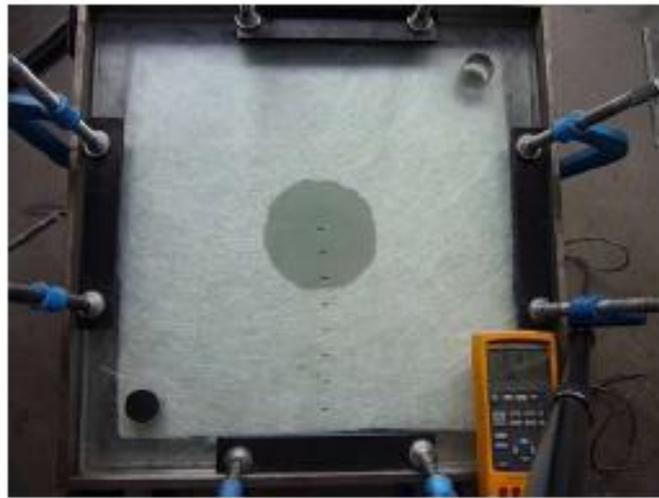


Figura 13. Montaje real para medición de permeabilidad (Mejía, 2013).

Tabla 4

Posición del frente de flujo con respecto al tiempo

Tiempo (s)	r_f (m)	r_o (m)	$r_f^2 \left[2 \cdot \ln \left(\frac{r_f}{r_o} \right) - 1 \right] + (r_o^2)$
2	0.06	0.018	0.01
6	0.12	0.018	0.04
11	0.18	0.018	0.12
15	0.21	0.018	0.17

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Mejía, 2013).

Tabla 5

Datos de Permeabilidad según Mejía

Refuerzos	Permeabilidad (x 10 ⁻⁹)	Porosidad	Presión (kPa)
Mat núcleo 1	7.50	0.94	53.77
Mat núcleo 2	5.27	0.91	75.84
Mat 1	3.46	0.84	87.98
Mat 2	0.62	0.67	207.60
Woven 1	0.65	0.67	48.1

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Mejía, 2013).

Lee et al. (2006) determinaron un método de predicción sobre la permeabilidad en el plano de las fibras tipo *Mat* y *Roving* en el moldeado de transferencia de resina asistida al vacío. Utilizando la experimentación lineal y la ecuación 8 calcularon la permeabilidad de los distintos refuerzos combinados con la malla de distribución y el *Peel Ply*. Concluyeron que al

no utilizar la malla de distribución conjuntamente con el *Peel Ply* la permeabilidad aumenta drásticamente para las fibras utilizadas como refuerzo. En la tabla 6 se indica el porcentaje del aumento de la permeabilidad al no utilizar la malla de distribución con el *Peel Ply*.

Tabla 6

Porcentaje de aumento de la Permeabilidad

	Número de capas					
	1	2	4	8	12	16
ΔK_M (%)	20.97	26.00	41.81	69.69	75.01	75.50
ΔK_R (%)	17.17	28.95	57.37	73.51	74.08	79.57

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Lee et al., 2006)

Compactación.

Para el proceso VARTM, las diferencias de presión entre el vacío, la presión ambiental y la bolsa de vacío, se utilizan para compactar la preforma de fibra (Hsiao y Heider, 2012). La compactación de la preforma de fibra tiene cierta influencia en el proceso de infusión de resina debido al cambio en el espesor de la preforma, la porosidad de la preforma y la permeabilidad de la preforma, sin embargo, no se la considera significativa si se da suficiente tiempo para que la presión se distribuya sobre la bolsa de vacío (Li et al., 2008). A medida que fluye la resina a través de la preforma, existe un gradiente de presión en la resina que ocasiona que la preforma cambie su espesor, esto se muestra en la figura 14 (Polowick, 2013).

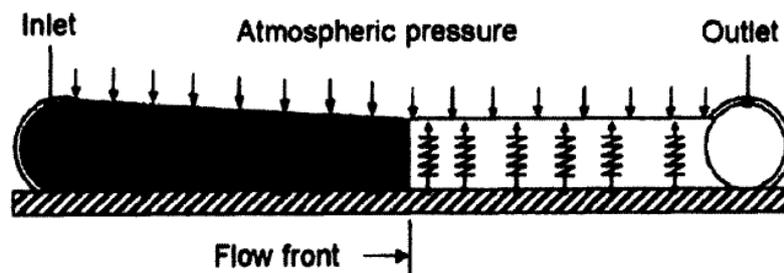


Figura 14. Gradiente de presión dentro de la bolsa de vacío (Polowick, 2013).

Viscosidad de la Resina.

La viscosidad de la resina es un factor importante para el llenado del molde, la compactación de la preforma de fibra y el proceso de curado durante un proceso VARTM. Durante la etapa de llenado del molde en el proceso VARTM, la resina tiene un cambio insignificante en su grado de curado, por lo que se la puede escribir como una función que depende de la temperatura del molde. Esta función se la indica en la ecuación 10.

$$u = u_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (10)$$

Donde:

E = Energía de activación del flujo

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura

u_0 = Constante de viscosidad.

Aplicaciones de los procesos de moldeo con compuestos líquidos (LCM)

Si bien es cierto, en el Ecuador el proceso VARTM no se encuentra en total desarrollo, ya que la variante *Hand Lay-Up* conjuntamente con el moldeo por compresión han sido utilizadas en numerosas aplicaciones para la fabricación de autopartes. Además, los estudios se centran en la caracterización de materiales compuestos basándose en las normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Estas normas sirven para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Las normas D3039-00 y D7264-07 determinan las propiedades cuando se someten los materiales compuestos de matriz polimérica a fuerzas de tracción y flexión respectivamente, mientras que la norma D5628-10 determina la resistencia al impacto de los materiales plásticos (ASTM INTERNATIONAL, 2017). Pachacama (2015) determinó una fracción volumétrica del material compuesto para la fabricación de un

prototipo de capot de la camioneta mazda BT-50. La fracción utilizada fue del 70 % de resina epoxi como matriz y 30 % de fibra de cabuya para el refuerzo. Mediante las normas ASTM se caracterizó las propiedades del material propuesto. La figura 15 indica los datos del ensayo a tracción de 5 probetas del material, donde se determinó un esfuerzo máximo promedio del 71,18 MPa. Mientras que para el esfuerzo maximo a la flexión, se realiza el ensayo a 5 probetas de las cuales se descartan 3 y se reportan 2. La figura 16 muestra los datos obtenidos, de los cuales se determina un esfuerzo promedio de 13,72 MPa para el material propuesto.



Figura 15. Esfuerzo máximo a la tracción (Pachacama, 2015).



Figura 16. Esfuerzo máximo a la flexión (Pachacama, 2015).

Para el proceso de fabricación, la resina se aplicó de forma manual sobre las fibras de cabuya y luego se aplicó una presión de compresión mediante un elemento estructural de concreto de 817 Kg para obtener la forma correcta del prototipo. La figura 17 y 18 muestra el capot obtenido mediante la técnica *Hand-Lay Up*, conjuntamente con el moldeo por compresión.



Figura 17. Prototipo de Capot fabricado mediante *Hand-Lay up* (Pachacama, 2015).



Figura 18. Moldeo por compresión para obtención del prototipo de Capot (Pachacama, 2015).

Paredes (2012), propone el uso de un material compuesto híbrido para fabricar un guardachoque de un bus mediante la variante *Hand Lay-up* y moldeo por compresión. Primero realizó la caracterización de los materiales utilizados en guardachoques de buses por parte de las carroceras Ibimco, Miral y Cepolfi y a su vez del material híbrido propuesto. Además, para llegar a determinar la fracción volumétrica óptima, se realizó un diseño de experimentos donde se varió el porcentaje del refuerzo entre 25 % y 40 % y el tipo de fibra de cabuya (corta, larga y tejido). La fracción volumétrica 70 % matriz y 30 % refuerzo, conjuntamente con la combinación de capas del refuerzo, 1 capa de fibra de vidrio + 1 capa de fibra larga de cabuya + 1 capa de fibra de vidrio, fue la que obtuvo mejores propiedades mecánicas para el compuesto híbrido. La figura 19 y la tabla 7 indican los datos que se obtuvieron para el esfuerzo a la tracción, que deriva en un aumento del 7,8 % para el material

híbrido, mientras que en la figura 20 y en la tabla 8 se muestran los datos con respecto a la resistencia al impacto, donde se determina que existe un aumento del 19 % para el material híbrido.

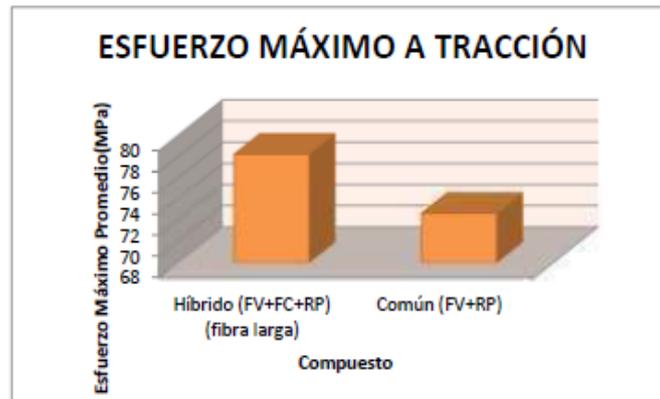


Figura 19. Comparación del esfuerzo máximo a la tracción entre un compuesto híbrido (FV+FC+RP) y el material común (FV+RP) utilizado en guardachoques de buses (Paredes, 2012).

Tabla 7

Esfuerzo máximo a Tracción

Compuesto	Configuración de las fibras	Esfuerzo máximo promedio (MPa)
Híbrido (FV + FC + RP)	Continua (fibra larga)	78.24
Común (FV+ RP)		72.64

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Paredes, 2012)

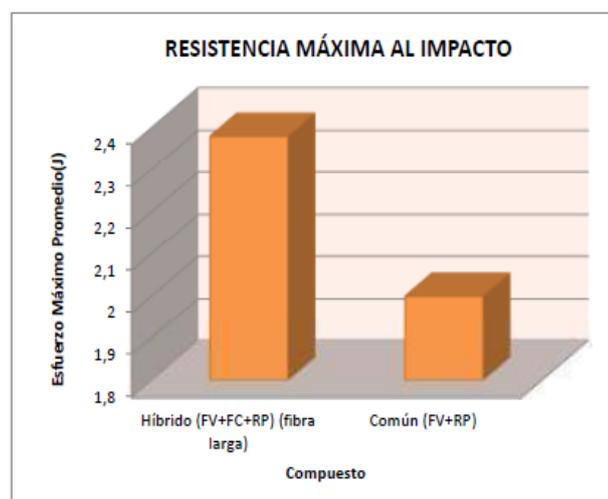


Figura 20. Comparación de la resistencia máxima al impacto entre un compuesto híbrido (FV+FC+RP) y el material común (FV+RP) utilizado en guardachoques de buses (Paredes, 2012).

Tabla 8

Resistencia máxima al impacto

Compuesto	Configuración de las fibras	Resistencia máxima promedio (J)
Híbrido (FV + FC + RP)	Continua (fibra larga)	2.38
Común (FV+ RP)		2.00

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Paredes, 2012)

En cambio, la figura 21 y la tabla 9 indican los datos del esfuerzo a la flexión, donde existe una disminución del 26 % de esta propiedad para el material híbrido.

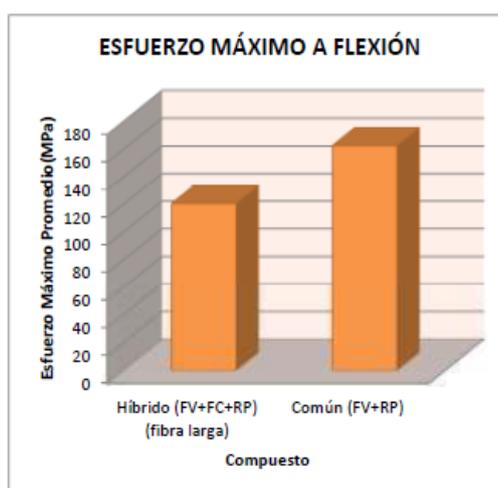


Figura 21. Comparación del esfuerzo máximo a la flexión entre un compuesto híbrido (FV+FC+RP) y el material común (FV+RP) utilizado en guardachoques de buses (Paredes, 2012).

Tabla 9

Esfuerzo máximo a flexión

Compuesto	Configuración de las fibras	Esfuerzo máximo promedio (MPa)
Híbrido (FV + FC + RP)	Continua (fibra larga)	120.52
Común (FV+ RP)		162.64

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Paredes, 2012)

Para la fabricación del guardachoque, la deposición de resina se la hizo de forma manual con brochas y rodillos, para luego aplicar un contramolde ejerciendo una presión de 300 psi con el fin de obtener el guardachoque con las características establecidas. La figura

22, indica el guardachoque obtenido mediante este estudio, mientras que en la figura 23 se muestra como en este proceso el molde y contramolde se sujetaron con vinchas para obtener una presión constante.



Figura 22. Guardachoque fabricado con un material compuesto híbrido mediante *Hand-Lay up* (Paredes, 2012).



Figura 23. Compresión del molde y contramolde del guardachoque (Paredes, 2012).

Anchatuña y Loachamín (2015) innovaron el proceso de moldeo con resinas líquidas al utilizar la variante de moldeo por transferencia de resina RTM para la fabricación de un cubreneumático. En primer lugar, realizaron la caracterización del material utilizado comúnmente en el cubreneumático (Polipropileno), para eso extrajeron probetas para someterlas a ensayos de flexión, tracción e impacto según dictan las normas ASTM. La tabla 10 indica las propiedades mecánicas obtenidas del polipropileno.

Tabla 10

Propiedades mecánicas del polipropileno utilizado en cubreneumáticos

Ensayo	Resistencia última (MPa)	Módulo (MPa)	Deformación última (%)	Resistencia al impacto (J)
Tracción	30.54	3434	0.69	-
Flexión	58.56	1938	5.84	-
Impacto	-	-	-	0.82

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Anchatuña y Loachamín, 2015)

Además, aplicaron el método de criterios ponderados para la elección de los materiales y equipos que se necesitan para el proceso RTM. En la figura 24 se detalla el equipo para generar el vacío en el molde y el compresor utilizado.

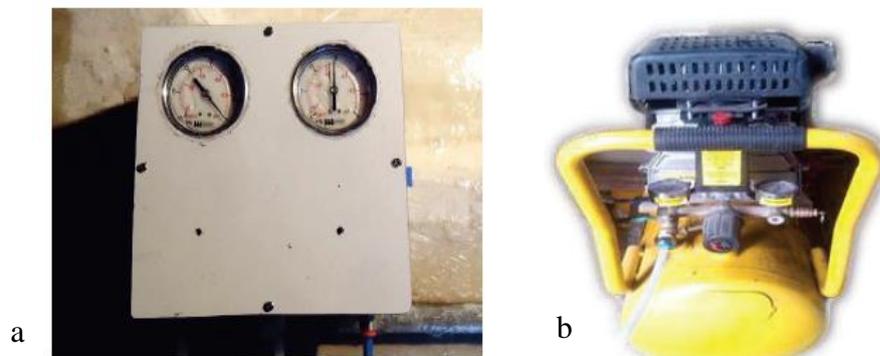


Figura 24. Equipo utilizado en el proceso RTM, a) Generador de vacío tipo venturi; b) Compresor (Anchatuña y Loachamín, 2015)

En el proceso de fabricación, utilizaron una resina poliéster como matriz y fibra vidrio como refuerzo con el 14 % de volumen (2 capas del tipo mats de fibra de vidrio). En la tabla 11 se indican los datos que se obtuvieron en esta investigación, donde con los materiales antes mencionados, el módulo elástico y el esfuerzo máximo en tracción aumentan un 185% y 97% respectivamente, el módulo elástico y el esfuerzo máximo en flexión aumentan un 127% y 172% respectivamente, mientras que en los ensayos de impacto la energía absorbida disminuye un 46 % con respecto al polipropileno, que es el material común con él que se fabrican los cubreneumáticos.

Tabla 11

Propiedades mecánicas del material compuesto (RP+2FV14)

Ensayo	Resistencia última (MPa)	Módulo (MPa)	Deformación última (%)	Resistencia al impacto (J)
Tracción	60.18	9776	0.65	-
Flexión	159.27	4396	4.45	-
Impacto	-	-	-	0.44

Nota: Los datos se obtuvieron del estudio realizado por (Anchatuña y Loachamín, 2015)

La obtención del producto final se dio luego de 3 ensayos fallidos en el proceso de fabricación. Se presentaron problemas como ingreso insuficiente de resina en ciertas partes del refuerzo debido a problemas en el diseño del molde y altas viscosidades de la mezcla de resina con aditivos. En la figura 25 se detalla el molde con el equipo de vacío para el proceso RTM y el producto final.

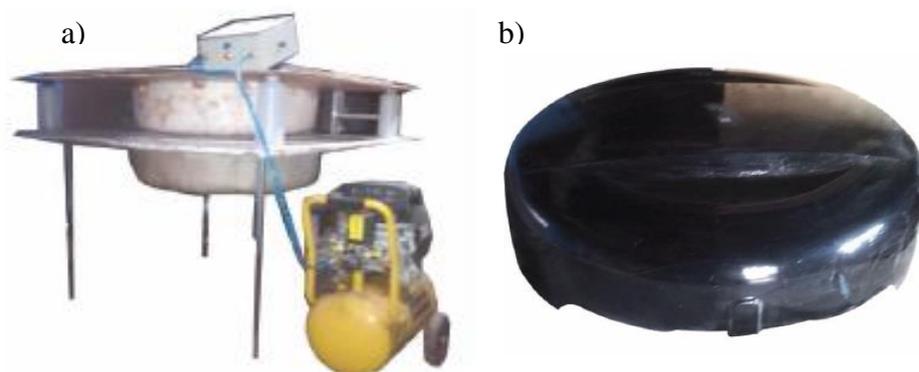


Figura 25. a) Molde y equipo de vacío, b) Producto obtenido (Anchatuña y Loachamín, 2015).

Fuera del Ecuador, el proceso VARTM es muy utilizado en la fabricación de partes exteriores de las carrocerías de automóviles. Laraib et al. (2014) fabricaron una carrocería para un automóvil, con el fin de participar en la Maratón ecológica de Shell en Malasya, utilizando este proceso. Utilizaron tejido de vidrio 92110 y tela de carbono sin rizo 260G como refuerzo conjuntamente con resina epóxica LY 5052/Aradur 5052 como matriz. Para el proceso de fabricación, emplearon una capa de filamentos de nylon orientada al azar como un medio de distribución para aumentar la velocidad de propagación de la resina, tubos espirales

de vinilo como líneas de vacío y alimentación y por último un detector de fugas *Accutrak* VPE-1000 para el monitoreo. El proceso de infusión se realizó desde la parte más profunda y céntrica del molde hasta el contorno del mismo. Como resultado de este proceso, se obtuvo una carrocería con un peso de 14, 5 Kg incluyendo estructura metálica. La figura 26 muestra el inicio de la infusión y el molde utilizado en la carrocería.



Figura 26. Infusión por Resina para la carrocería utilizada en la maratón ecológica de Malasya (Laraib et al., 2014).

Chávez y Ledesma (2016) analizaron la posibilidad de utilizar cera desmoldante como *Peel Ply* en el proceso VARTM para obtener la tapa de un filtro de aire de un vehículo a carburador. Se realizaron 6 pruebas antes de obtener el producto final, llegando a determinar que la cera desmoldante no se puede utilizar como medio de desmoldeo. En la figura 27 se observa el proceso VARTM terminado para la fabricación de la autoparte.



Figura 27. Proceso de infusión de resina terminado para la fabricación de una tapa de filtro de aire (Chávez y Ledesma, 2016).

Análisis numérico del proceso de moldeo por compuestos líquidos (LCM)

Existen estudios donde la simulación computacional del flujo de resina juega un papel importante para la optimización del proceso. En problemas con geometrías y condiciones de frontera complejas, la resolución de la ecuación 1 antes descrita se hace difícil, por lo que se recurre a métodos numéricos. Ribeiro, Souza, y Amico (2007) exponen que los métodos numéricos permiten la resolución de sistemas complejos de una forma simplificada. Los métodos numéricos aplicados para resolver problemas que se basen en la ecuación 1 son los métodos de Elemento Finito / Volumen de Control (FECV) y Volumen de Fluido (VOF). El método FE / CV, en combinación con la técnica FAN (*Flow Analysis Network*), se utiliza para determinar la localización del frente de flujo de problemas de dinámica de los fluidos con una superficie libre, donde se considera sólo una fase, mientras que el método de Volumen de Fluido (VOF) se utiliza para resolver problemas multifásicos de fluidos inmiscibles que para el caso del moldeo con resinas líquidas son el aire y la resina (Oliveira et al., 2012).

Según Oliveira et al. (2009) el *software* PAM-RTM, que se utiliza específicamente para simular el proceso de llenado de moldes en compuestos líquidos utiliza el método de Elementos Finitos/Volumen de Control, mientras que el módulo *Fluent* del *software* Ansys utiliza el método de Volumen de Fluido para resolver problemas de moldeo por compuestos líquidos. En el método VOF se utiliza el concepto de fracción volumétrica f_i para representar

varias fases de un volúmen de control determinado; si $f_i = 0$ la celda analizada se encuentra vacía, si $f_i = 1$ la celda se encuentra llena de resina (Oliveira et al., 2012). Por lo general en este método se resuelven la ecuación 11, 12 y 13 que son las de continuidad, fracción volumétrica y cantidad de movimiento respectivamente (Oliveira, Souza, Isoldi y Rocha, 2009).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f V_i) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V_i V_i) = -\nabla P + \nabla \cdot [u \tau_{ij}] + \rho g_i + F_i \quad (13)$$

Donde:

ρ = Densidad

t= tiempo

τ_{ij} = Tensor de tensión

g_i = Vector de aceleración gravitacional

F_i = Fuerza externa

La fuerza F_i modela el efecto resistivo que ejerce el medio poroso al paso de resina.

Esta se describe según la ecuación 14. Al combinar la ecuación 14 en la 13 y considerando que F_i es larga, la ecuación se simplifica en la Ley de Darcy mostrada en la ecuación 1.

$$F_i = \nabla p = -\frac{u}{K_{ij}} V_i \quad (14)$$

La aplicación del método de Volumén de fluido se la ha realizado en varias investigaciones sobre el moldeo por compuestos líquidos. Porto J et al. (2012) realizaron la simulación del proceso RTM utilizando el método VOF en el *software* Fluent, para observar el flujo de resina en un molde de una hélice para buques marinos. Realizaron dos

simulaciones con puntos de salida de resina diferentes, donde la geometría de la hélice fue discretizada con 938.606 elementos tetraédricos. En la figura 28 se observa la primera simulación con los puntos de salida de resina ubicados en la sección de simetría de cada pala de la hélice, donde el llenado total del molde se realiza después de 215 segundos.

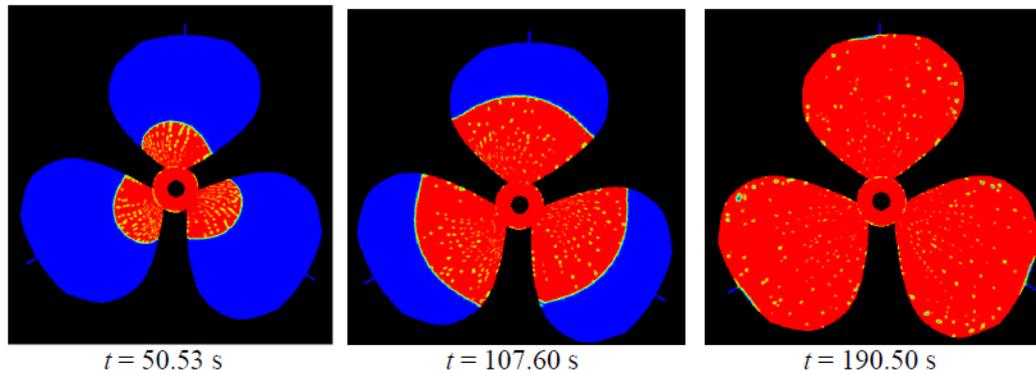


Figura 28. Simulación del llenado del molde de una hélice para buques marinos (Porto J. , Letzow, Santos, Souza, y Isoldi, 2012).

Por otro lado en la figura 29 se indica que la simulación con los puntos de salida de resina ubicados como en la figura 28, no permiten un buen llenado del molde, ya que la resina (rojo) ya ha alcanzado la boquilla desde un lado (parte inferior), pero todavía está lejos de la boquilla en el otro lado (parte superior).

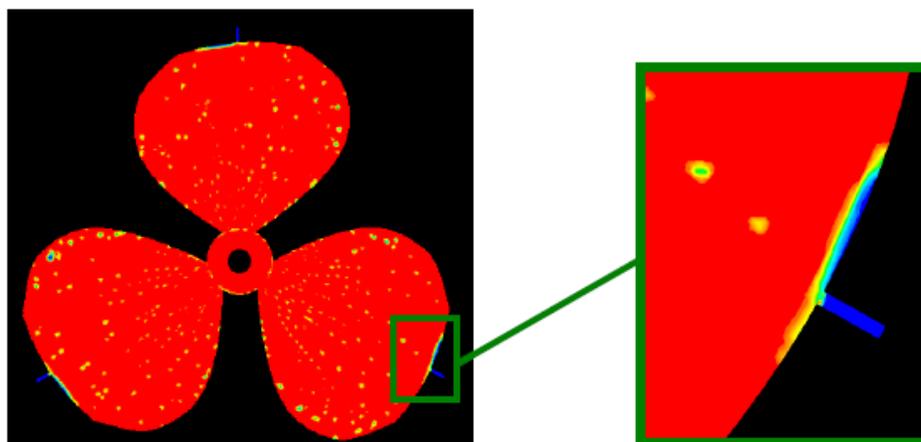


Figura 29. Problemas presentados en la primera simulación (Porto J et al., 2012).

Al desplazar 20 mm las boquillas del lugar adoptado en la simulación preliminar, el llenado del molde se produce antes de alcanzar las boquillas de salida. En la figura 30 se

observa el proceso de llenado con esta nueva disposición, donde se necesitó 193 segundos para el llenado del molde.

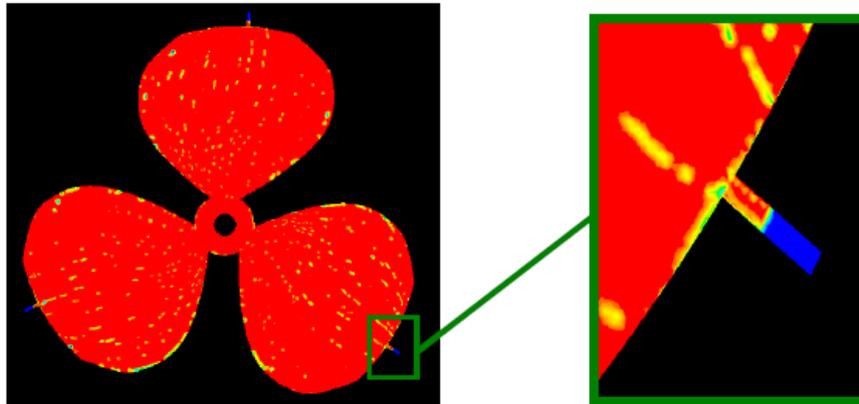


Figura 30. Simulación del llenado del molde con la disposición final (Porto J et al., 2012).

Letzow et al. 2012 realizaron del llenado del molde de dos geometrias esféricas complejas, mediante el *software* Ansys conjuntamente con el método VOF. Validaron el método VOF al compararlo con la simulación de una geometria plana tridimensional en el *software* PAM-RTM. La figura 31 indica la geometria que se utilizó para la validación, mientras que la figura 32 indica la posición del frente de flujo según avanza el tiempo entre los *software* Fluent y PAM-RTM de dos casos donde se varía la viscosidad, permeabilidad, presión de inyección y porosidad, ambos resultados presentan una buena aproximación.

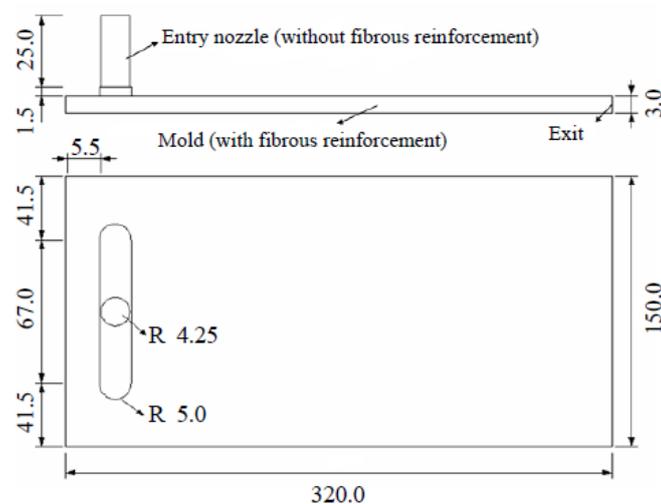


Figura 31. Molde tridimensional (Letzow et al. 2012).

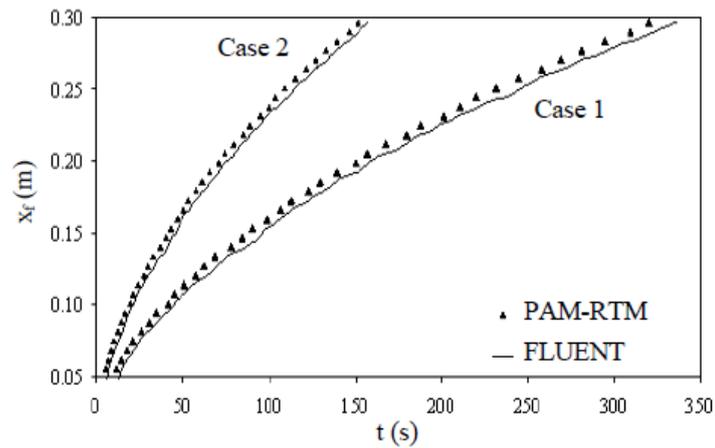


Figura 32. Avance de flujo entre *Fluent* y PAM-RTM (Letzow et al. 2012).

Luego realizaron la simulación del llenado del molde de la geometría esférica mediante el proceso RTM y LRTM. En la figura 33 se observa la simulación del proceso en *Fluent* como en PAM-RTM, determinando una similitud de tiempo para los dos procesos.

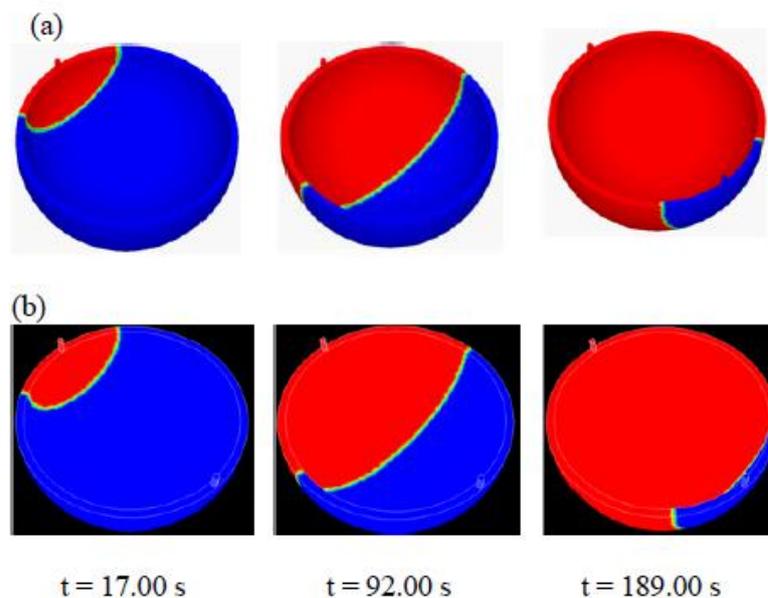


Figura 33. Simulación del llenado del molde por RTM a) *Fluent*, b) PAM-RTM (Letzow et al. 2012).

Para el caso de la simulación del proceso LRTM, la entrada de resina se la hace desde la periferia hasta el interior del molde. En la figura 34 se observa el proceso de simulación donde se necesita 6,80 segundos para llenar el molde, reduciendo considerablemente el tiempo en comparación a la técnica RTM.

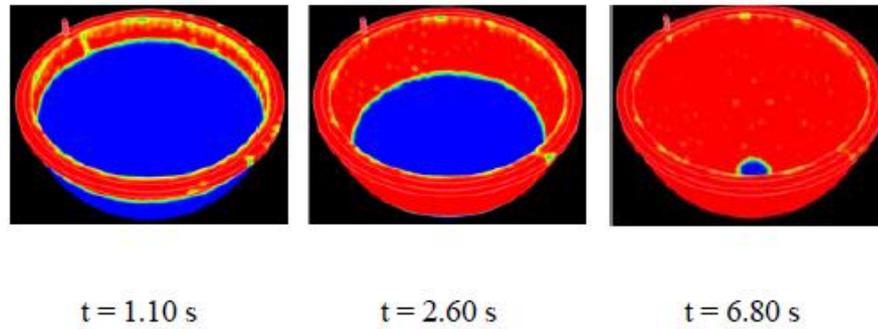


Figura 34. Simulación del llenado del molde por LRTM (Letzow et al. 2012).

Isoldi et al. (2012) realizaron la validación del método VOF con la solución analítica y con el análisis numérico del software PAM-RTM. La validación con la solución analítica se la hizo para el flujo unidimensional, donde las ecuaciones 6 y 7 según Shojaei, Ghaffarian, y Karimian (2002) determinan la posición del frente de flujo según el tiempo. La formulación de estas ecuaciones se detalla en la investigación realizada por Cai (1992), donde la ecuación 15 se utiliza para determinar el tiempo de llenado en cualquier geometría del molde, en cambio la ecuación 16 sirve para flujos unidimensionales a presión constante.

$$t_f = \frac{\phi V_c}{q_{inj}} \quad (15)$$

$$t_f = \frac{\phi u x_f^2}{2K p_{inj}} \quad (16)$$

Donde:

t_f = Tiempo de llenado; ϕ = Porosidad del medio fibroso; V_c = Volumen de la cavidad del molde; q_{inj} = Tasa de flujo de inyección; u = Viscosidad de la resina; x_f = Posición del frente de flujo; K = Permeabilidad; p_{inj} = Presión de inyección

En la figura 35, se muestra los resultados del método VOF aplicado a un problema de flujo unidimensional. Se observa que la solución por el método VOF es más sensible al número de nodos en la malla que en el método utilizado por PAM-RTM.

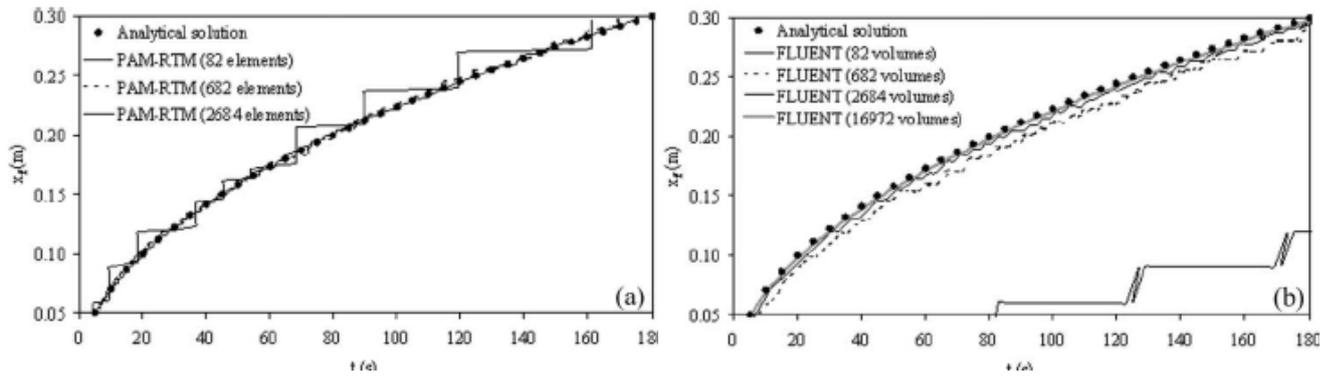


Figura 35. Solución para el flujo unidimensional a) Analítica vs PAM-RTM, b) Analítica vs Fluent (Isoldi et al., 2012).

Además mediante la solución analítica presentada por Rudd (2005), la misma que se encuentra formulada en la ecuación 17, realizan la validación del método VOF para flujos radiales. En la figura 36 se observan los resultados obtenidos tanto para el software PAM-RTM como para Fluent, donde se nota una vez más la dependencia del refinamiento de la malla para el software Fluent para obtener resultados afines a la solución analítica.

$$t_f = \frac{u \varepsilon}{2KP_0} \left[r^2 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) - \frac{1}{2} (r^2 - r_0^2) \right] \quad (17)$$

Donde:

r_0 = radio del puerto de inyección

ε = Porosidad del medio fibroso

u = Viscosidad de la resina

r = Posición radial del frente de flujo

K = Permeabilidad

P_0 = Presión de inyección

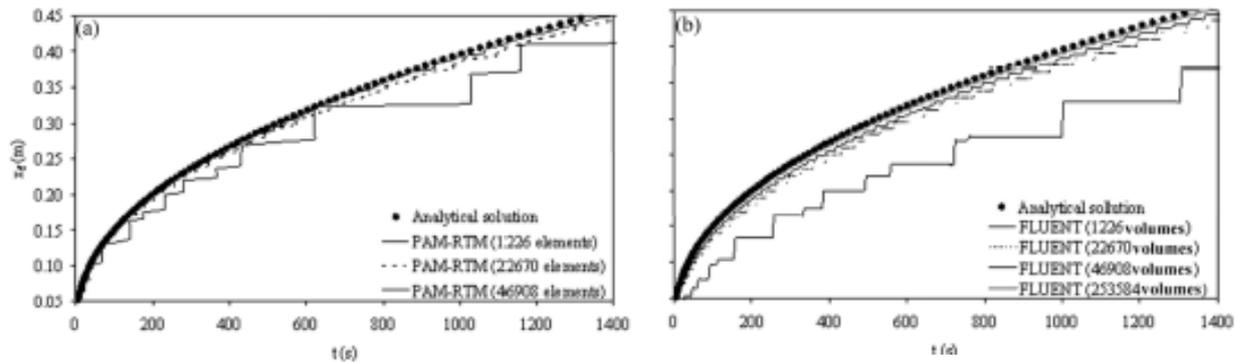


Figura 36. Solución para flujo radial a) Analítica vs PAM-RTM, b) Analítica vs Fluent (Isoldi et al., 2012)

Una vez realizada la validación del método VOF, simularon el llenado de un molde 3D, el mismo que fue comparado con el resultado del software PAM-RTM. En la figura 37 se indica que el frente de flujo para las dos simulaciones es el mismo, mientras que el tiempo de llenado del molde es de 377 segundos para PAM-RTM y 383 segundos para *Fluent*, lo que representa una diferencia inferior al 2 % entre las dos soluciones.

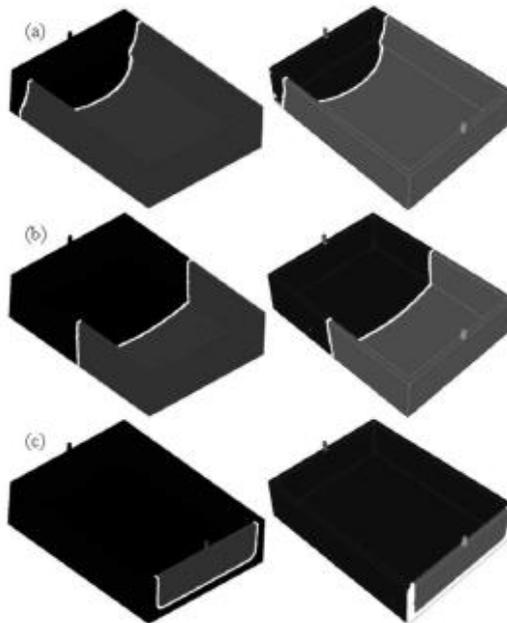


Figura 37. Simulación de llenado del molde en una geometría 3D (Isoldi et al., 2012).

Otras investigaciones se basan en la aplicación del método CV/FEM. Ruikui et al. (2013) determinaron la posición óptima de los puntos de entrada de resina y extracción de aire, con la ayuda del software RTM-Worx, el mismo que sirve para simular el proceso del flujo de resina. Basándose en los criterios de diseño para la posición de los puertos de entrada

y extracción en el proceso VARTM, establecieron que los puertos de entrada deben estar ubicados en la parte central como en las curvaturas, mientras que los puertos de extracción de aire deben estar en las esquinas del guardachoque, para obtener un tiempo de llenado corto.

En la figura 38 se indica la secuencia de simulación del llenado del molde del guardachoque mediante RTM-Worx. El tiempo de llenado del molde fue de 742 s.

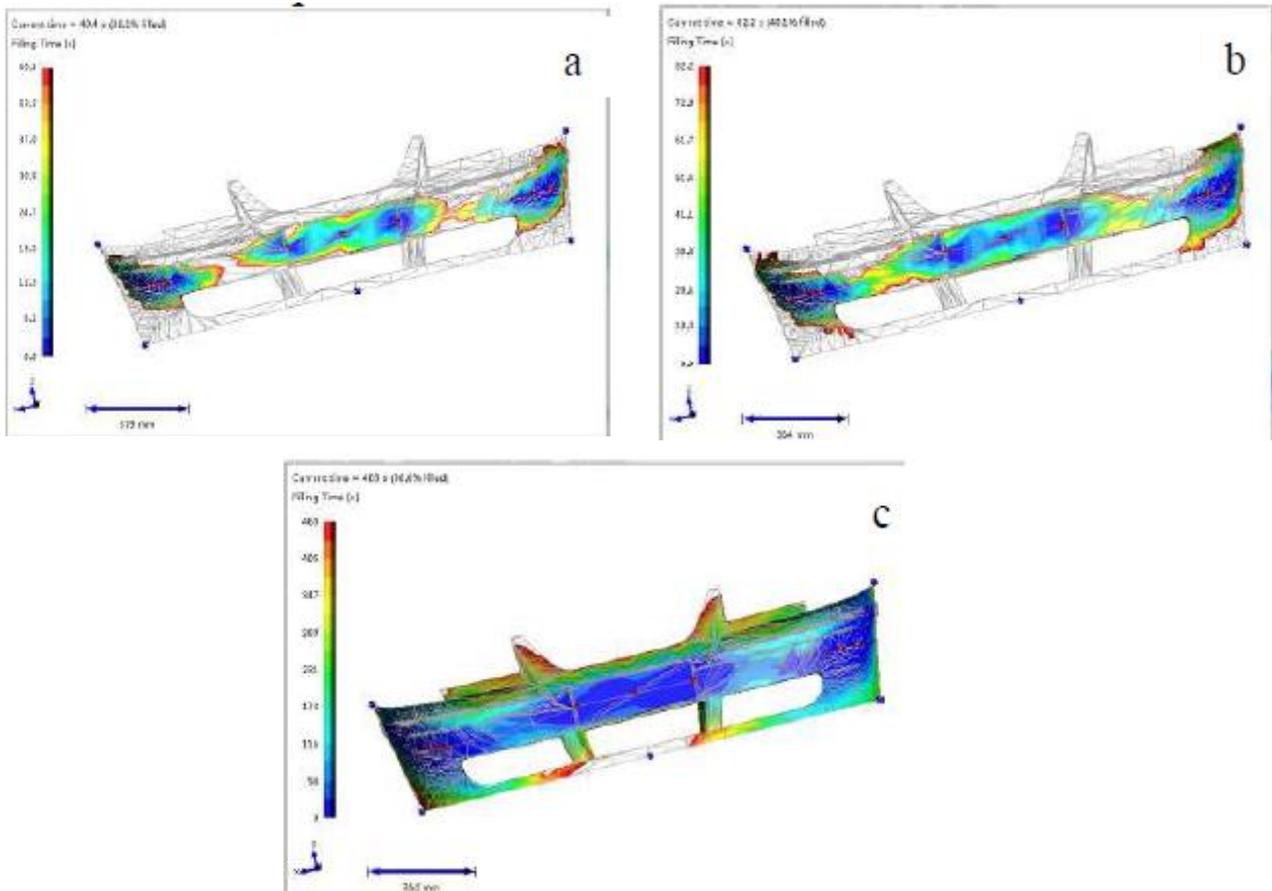


Figura 38. Secuencia de Simulación mediante el software RTM-Worx (Ruikui et al., 2013).

Poorzeinolabedina et al. (2014) utilizaron el software PAM-RTM para realizar varias simulaciones y encontrar la posición mas adecuada de puertos de entradas y ventilaciones en la fabricación de una parte exterior de la carrocería del vehículo Samand Sarir. Se definieron 8 casos de estudio con diferentes condiciones de entradas y ventilaciones para observar el patrón de flujo de la resina y tiempo de llenado. Colocando los puertos de entrada de resina en la parte derecha y las ventilaciones en la parte izquierda, se obtuvo un tiempo de llenado en

simulación de 1203 s. En la parte experimental se determinó que el tiempo de llenado fue de 1350 s, a criterio de los autores esta diferencia de tiempo se debe a que la simulación se realiza sin considerar la penetración de la resina en el espesor del refuerzo, es decir una simulación 2.5D. Mediante la figura 39 se puede observar la disposición de entradas y ventilaciones para el proceso de infusión de resina, mientras que en la figura 40 se muestra la simulación con estas condiciones de borde. Los resultados obtenidos muestran que este proceso permite trabajar con materiales compuestos reforzados con fibra tejida de vidrio obteniendo reducciones de peso significativo y una mejora considerable de las propiedades mecánicas.

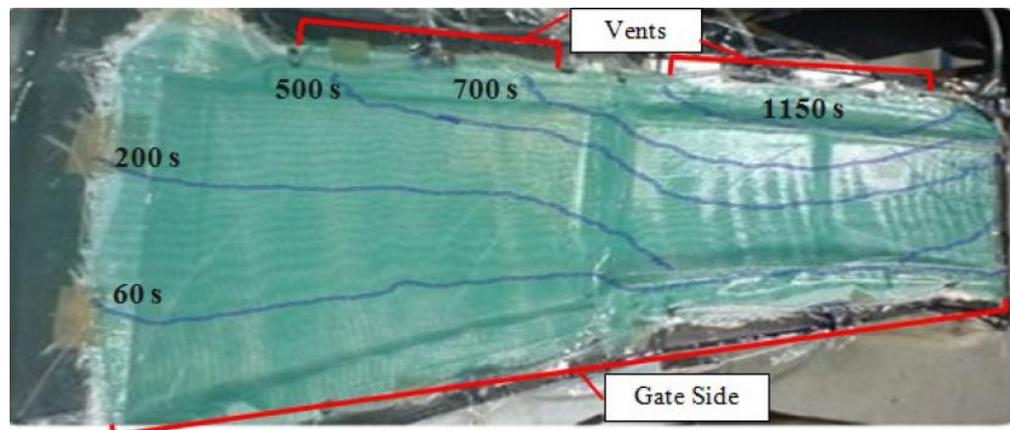


Figura 39. Disposición de entradas y ventilaciones para el proceso de infusión de resina (Poorzeinolabedina et al., 2014)

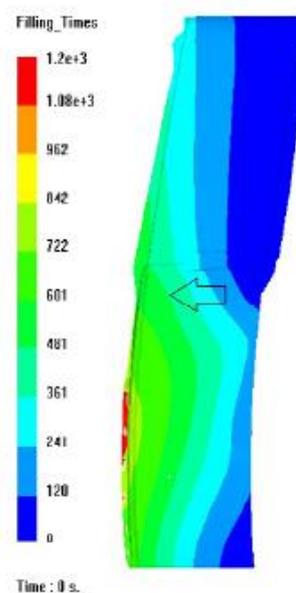


Figura 40. Simulación del proceso VARTM en el software PAM-RTM (Poorzeinolabedina et al., 2014)

Moldflow Insight.

Según Simacek y Advani (2017), los paquetes de simulación basados en modelos RTM son la única opción viable para la simulación práctica del proceso VARTM. Dentro de los software de simulación comerciales, *Autodesk Moldflow* es el que brinda licencias educacionales y el brinda la opción de simulación del proceso VARTM, a través del módulo *Insight*. A diferencia del software *Ansys Fluent*, *Moldflow Insight* permite simular procesos RTM específicos sin acoplar el software al método requerido para el análisis como es el caso de *Fluent*, reduciendo de esta forma el recurso computacional utilizado en las simulaciones. Otra diferencia entre los programas antes mencionados se encuentra en el modelo matemático que utilizan para resolver los problemas. *Ansys* utiliza la Ley de *Darcy*, mientras que *Moldflow* utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes.

Este paquete ha sido utilizado fuertemente en proyectos con materiales compuestos. Tal es el caso que Li et al. (2013), realizan la simulación del proceso RTM en la fabricación de una pala de turbina eólica mediante *Moldflow*. Obtienen diagramas de variación sobre el tiempo de llenado, la temperatura, la deformación por pandeo, la presión, entre otros, comparando procesos con y sin refrigeración. Determinaron que la formación de burbujas de aire se concentran en las raíces y el borde de la pala. Además observaron que el tiempo de llenado con el proceso de enfriamiento es más largo que sin proceso de enfriamiento. En la figura 41 se observa el análisis de formación de burbujas, mientras que en la 42 se tiene el análisis del pandeo entre los procesos con y sin enfriamiento.

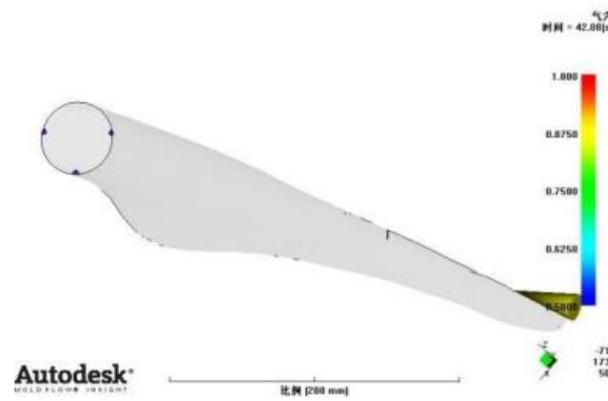


Figura 41. Análisis de formación de burbujas de aire para una pala de turbina eólica realizado en *Moldflow* (Li et al., 2013).

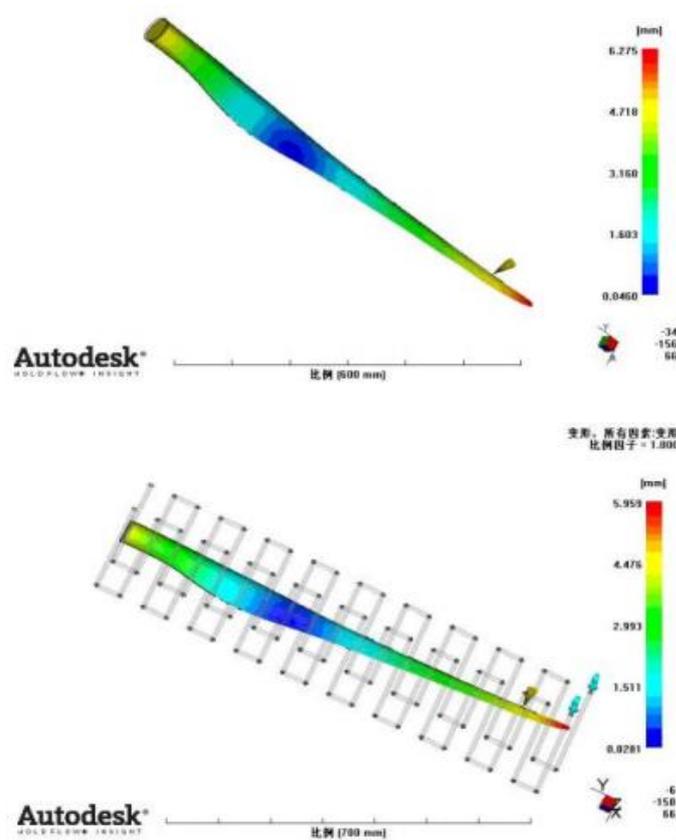


Figura 42. Análisis de pandeo en una pala de turbina eólica realizado en *Moldflow* (Li et al., 2013).

Por otro lado, Laurenzi et al. (2014) presentan el análisis del proceso numérico y la investigación experimental para la fabricación de una viga reforzada con fibra de carbono de una turbina aeronáutica mediante moldeo por transferencia de resina. La figura 43 muestra mas detalladamente la parte a simular y fabricar. En el estudio, primeramente caracterizaron

el valor de la permeabilidad de forma experimental ajustando los datos obtenidos a una curva lineal.

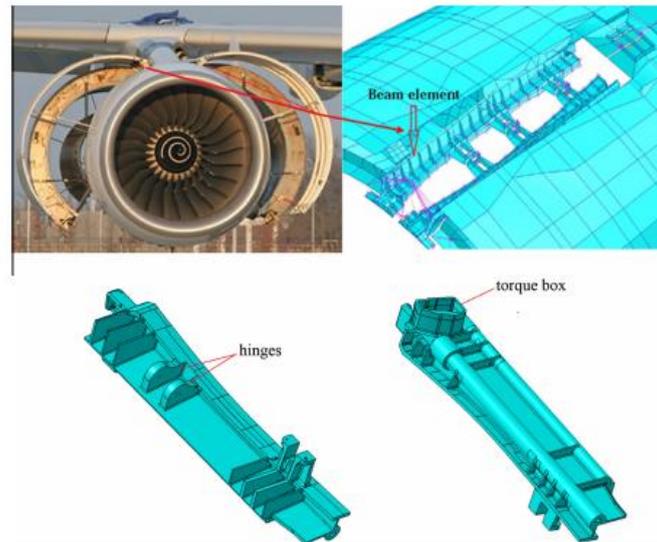


Figura 43. Geometría de la viga a fabricar mediante RTM (Laurenzi et al., 2014).

Realizaron simulaciones del proceso basadas en un volumen de control modificado por método de elementos finitos (FEM-CV) para investigar los patrones de frente de flujo de resina y encontrar el esquema de inyección que garantiza una buena impregnación de la preforma y un tiempo de llenado compatible con el tiempo de gelificación del endurecedor. Los diseños de inyección fueron: 1) canal de inyección lineal a lo largo de todo el borde de la viga transversal, 2) canal de inyección lineal a lo largo de la longitud de la viga, excepto en el área de la caja de torsión y 3) canal de inyección lineal reducido aún más con respecto al diseño 2. Los resultados de las simulaciones muestran que la variación de la longitud del canal lineal principal afecta fuertemente la posición frontal del flujo de resina y el tiempo de llenado del paso de impregnación. Para el diseño 1, la resina no logra impregnar en su totalidad el refuerzo de fibra de carbono. En el diseño 3, para obtener una impregnación total del refuerzo, es necesario un tiempo de 3 h 40 min, mientras que en el diseño 2 el tiempo requerido es de aproximadamente 2 h. Las simulaciones de los 3 diseños se muestran en las figuras 44, 45 y 46.

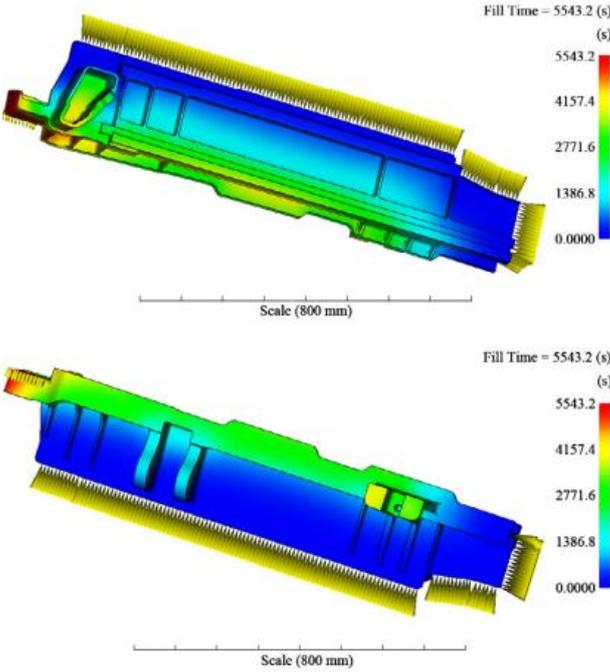


Figura 44. Simulación de tiempo de llenado diseño 1 (Laurenzi et al., 2014).

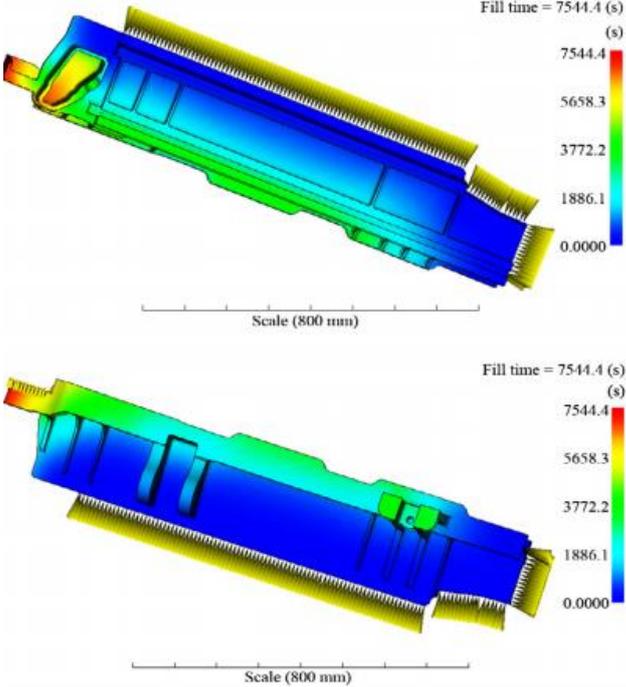


Figura 45. Simulación de tiempo de llenado diseño 2 (Laurenzi et al., 2014).

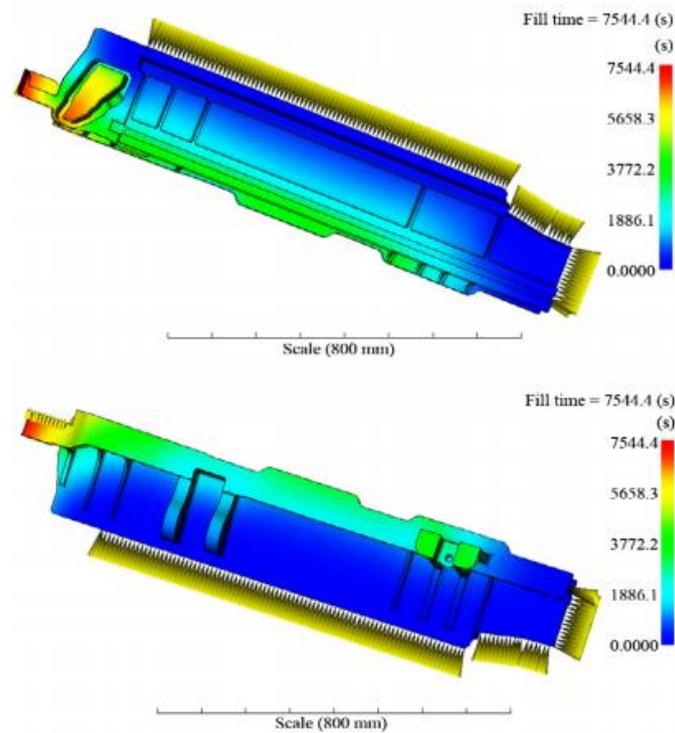


Figura 46. Simulación de tiempo de llenado diseño 3 (Laurenzi et al., 2014).

Otros estudios en simulación de procesos LCM

Montés (2009) señala que la simulación de los procesos LCM basada por elementos finitos requieren un tiempo de computo excesivo. Debido a esto, las investigaciones mas recientes se centran en buscar alternativas para la simulación de flujo en proceso LCM es así que en los estudios de Kessels et al. (2007), Montés y Sánchez (2010), Sánchez et al. (2015), Sas et al. (2015), se proponen algoritmos rápidos para predecir el llenado de moldes en los procesos LCM.

Método

En el siguiente proyecto de investigación, se utilizó un tipo de estudio descriptivo, experimental y analítico. Descriptivo, para analizar los procesos de moldeo por compuestos líquidos y poder determinar que parámetros, instrumentos etc, son necesarios para la optimización y diseño del proceso VARTM en la fabricación guardachoques. Esto se logró en base a revisiones bibliográficas sobre simulaciones y proyectos similares que aportaron con datos relevantes para la aplicación. Además, el estudio fue experimental, porque se caracterizó la permeabilidad del refuerzo híbrido y se pudo determinar qué factores influyen en la misma. Esto se pudo realizar a través de la experimentación del proceso VARTM en geometrías pequeñas sobre las fibras utilizadas como refuerzo. Por último, el proyecto tiene un enfoque analítico ya que los datos obtenidos en la experimentación se compararon mediante la simulación del proceso, para lo cual se utilizó el *software Autodesk Moldflow*.

La investigación tiene una modalidad de proyecto de desarrollo, debido a que se fabricó un prototipo de guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante la técnica VARTM, con el fin de brindar alternativas de manufactura en el Ecuador. La metodología a seguir se divide en 4 partes: 1) Caracterización de la permeabilidad de las fibras utilizadas como refuerzo, 2) Validación de datos mediante la simulación numérica, 3) Diseño y optimización del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque mediante la simulación, 4) Fabricación del prototipo de guardachoque mediante el proceso VARTM.

Caracterización de la permeabilidad

Para realizar la caracterización de la permeabilidad del material híbrido utilizado como refuerzo (Fibra de vidrio + Fibra de cabuya), se realizaron pruebas de infusión sobre cada una de las fibras, y se registró el movimiento radial del frente de flujo. Para el material híbrido se toma la combinación Vidrio + Cabuya + Vidrio ya que en el estudio propuesto por Paredes

(2012), fue la que obtuvo mejores propiedades mecánicas. Se utilizó fibra de cabuya tejida y fibra de vidrio tipo *Choped Strand Mat*. Además, se analiza la influencia de la malla de infusión y del *Peel Ply* como medios de optimización en el cálculo de la permeabilidad sobre el material híbrido propuesto. El anexo 1, indica las características técnicas del *peel ply*.

Las muestras utilizadas tienen una forma plana rectangular de 275mm x 230mm. Los datos de avance radial del frente de flujo se determinaron mediante la ayuda de una regla y el video del proceso, los mismos que permiten determinar el valor aproximado de la permeabilidad utilizando la ecuación 9 y el procedimiento utilizado por Mejía (2013), donde se realiza un ajuste de curva para determinar la pendiente de la curva y así obtener el dato requerido. Además, al no existir un método estandarizado para la caracterización de la permeabilidad, se opta por realizar 20 réplicas del experimento de infusión, ya que según Endruweit et al. (2006), con éste numero de réplicas la incertidumbre experimental es del 3 % y el 23.7 % de la variación de la permeabilidad es causada por la uniformidad de las fibras. La configuración de las muestras de fibras utilizadas, su orientación y número de capas se indican en la tabla 12. En la figura 47 se muestran las fibras utilizadas en los experimentos de infusión.

Tabla 12

Fibras utilizadas en la medición radial de la permeabilidad.

Material	Tipo	Numero de capas	Orientación
Fibra de vidrio	<i>Choped Strand Mat</i>	1	Normal
Fibra de Cabuya	Tejida	1	0°
Vidrio + Cabuya + Vidrio	Híbrido	3	Normal, 0°, Normal
Malla de infusión+ Peel Ply+ Vidrio+ Cabuya+Vidrio	Hibrido	5	Normal, 0°, Normal



Figura 47. Tipos de fibras utilizadas: a) Fibra de vidrio Choped Strand Mat y b) Fibra de cabuya tejida

Selección de resina para la caracterización de permeabilidad.

Para el proyecto se utiliza resina epóxica IN2 con su respectivo endurecedor AT 30 *SLOW*. La figura 48 muestra la presentación de esta resina y en las tablas 13 y 14 se muestran las características de la misma, así como de su endurecedor. En el anexo 2 se detallan las características técnicas de la resina IN2.



Figura 48. Resina epóxica y endurecedor

Tabla 13

Propiedades de la resina epóxica IN2 y endurecedor

Propiedad	Unidad	Resina	Endurecedor	Combinados
Apariencia	-	Líquido claro	Líquido claro	Líquido claro
Viscosidad (25 ⁰)	mPa.s	500-800	10-20	200-450
Densidad	g/cm ³	1.08-1.18	1.07-1.13	1.12-1.18

Nota: Los datos de las propiedades se tomaron desde: www.easycomposites.co.uk

Tabla 14

Propiedades de curado del endurecedor

Nombre Comercial	Tiempo de conserva a 25 °C	Tiempo de Gelificación a 25 °C	Tiempo de desmoldeo	Tiempo de curado a 25 °C
AT 30 SLOW	80-100 min	8-11 horas	18-24 horas	24 horas

Nota: Los datos se tomaron desde: www.easycomposites.co.uk

Equipo y montaje requerido para la caracterización de permeabilidad mediante el proceso VARTM.

Basándose en la metodología presentada por Mejía (2013); Verrey et al. (2006) para la caracterización de la permeabilidad, se utilizaron los siguientes materiales y equipos en la caracterización: Bomba de vacío de 1.5 cfm, estructura del molde, bolsa de vacío Aerofilm® VB200 de 50 um de espesor, cinta sellante, regla, filmadora, recipiente de resina, manguera transparente de 6mm de diámetro, conectores de silicón, manguera espiral de 3mm de diámetro interior, reservorio con manómetro.

La bolsa de vacío Aerofilm® VB200 ofrece una resistencia a la tracción muy alta, por lo que es ideal para aplicaciones exigentes de curado a alta temperatura y presión, como los productos preimpregnados aeroespaciales. En el anexo 3 se especifican las características de la bolsa.

El molde consiste en una placa de vidrio con forma rectangular de 323mm x 295 mm lo que permite un montaje óptimo de las muestras de fibra y mangueras de extracción de vacío. En la figura 49 se indica la disposición de la cinta sellante, conectores de silicón, manguera espiral y la fibra de vidrio sobre el molde. El montaje de todos los equipos para la caracterización de la permeabilidad en forma experimental se indica en la figura 50, donde a) Bomba de vacío, b) reservorio con manómetro, c) estructura del molde, d) filmadora, e) recipiente de resina.



Figura 49. Disposición de la cinta sellante, conectores de silicón, manguera espiral y fibra de vidrio sobre el molde



Figura 50. Montaje del equipo para la caracterización de la permeabilidad.

Proceso de infusión.

En primer lugar, se determinó la cantidad de resina a utilizar en la experimentación, basándose en la fracción del volumen de la fibra para el proceso VARTM, la misma que se encuentra entre el 50 % y 60 % según Polowick (2013). Para este proyecto se utiliza una fracción del volumen de fibra del 60%. Inmediatamente se monta la cinta sellante con las muestras de fibra en el molde, seguidamente de los puertos de entrada y salida de resina, así como también de las respectivas cañerías. Luego se monta la bolsa de vacío con el fin de sellar el molde.

En la figura 51 se muestra la disposición de los materiales utilizados en la experimentación. Seguidamente se acciona la bomba de vacío con el fin de extraer el aire y lograr la compactación de las fibras. Se cierran los puntos de entrada y salida de resina y se apaga la bomba para comprobar que no existan fugas de aire. Finalmente se realiza la infusión de resina y se recogen los datos mediante la grabación del proceso para la determinación de la permeabilidad.



Figura 51. Disposición de materiales para la caracterización de permeabilidad según VARTM

Para analizar la influencia del *peel ply* y de la malla de distribución en el avance de la resina sobre el material híbrido, se debe colocar sobre éste la capa del *peel ply* y luego la malla de distribución como se muestra en la figura 52. El procedimiento para la aplicación de VARTM, se detalla mediante un diagrama de procesos en la figura 53.

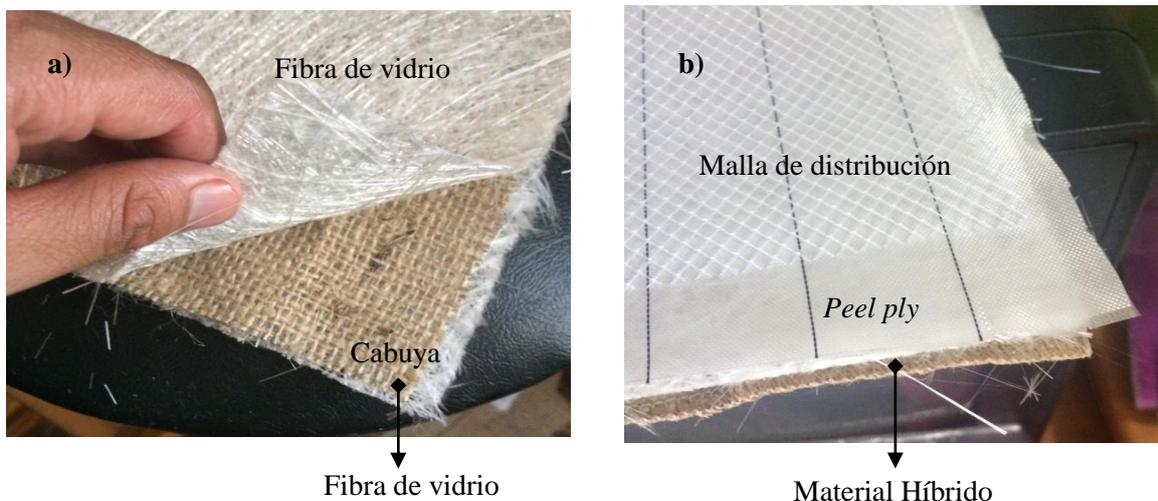


Figura 52. Disposición de capas para el análisis de la influencia de la malla de distribución y *peel ply*. a) Configuración Material Híbrido, b) Disposición de la malla de distribución y *peel ply* sobre el material híbrido

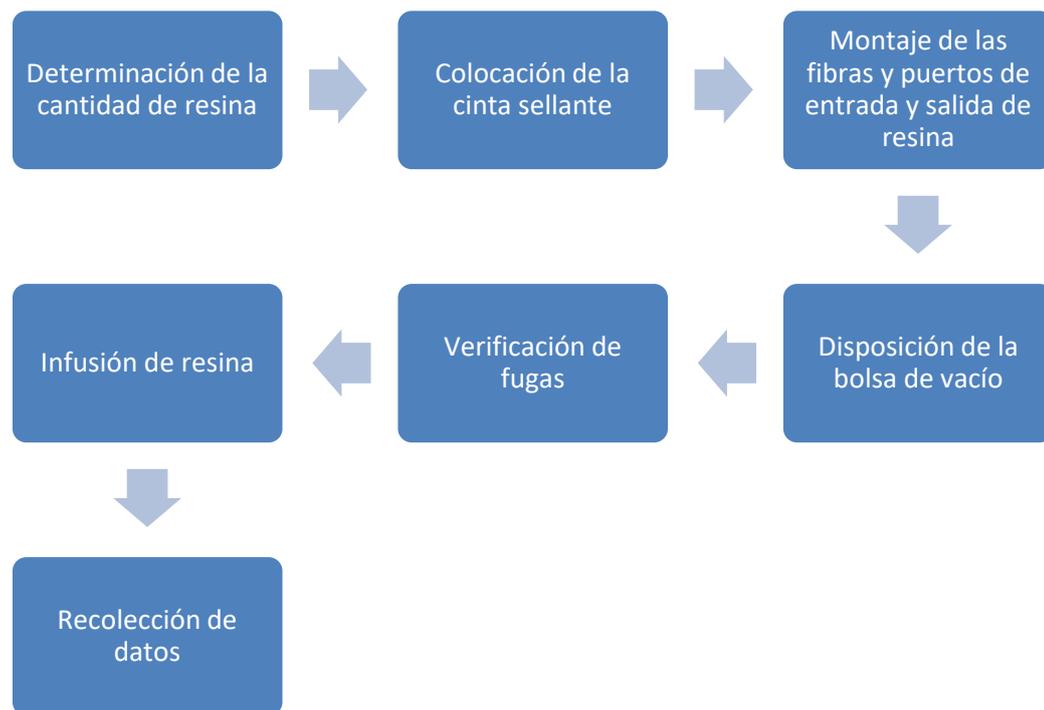


Figura 53. Procedimiento a seguir para la experimentación del proceso VARTM

En la tabla 15 se indican las condiciones de presión de inyección, temperatura y viscosidad de resina utilizados para la caracterización de permeabilidad, mientras que en la tabla 16 se indica la cantidad de resina utilizada de acuerdo al peso del refuerzo utilizado en los distintos experimentos.

Tabla 15

Condiciones utilizadas para la caracterización de permeabilidad

Presión de Inyección (Pa)	Temperatura (°C)	Viscosidad de resina (Pa.s)
88 000	20-25	0.65

Tabla 16

Cantidad de resina utilizada para cada muestra de fibra

Muestra	Peso del refuerzo (Kg)	Cantidad de resina (Kg)
1	0.023	0.015
2	0.017	0.011
3	0.063	0.042
4	0.076	0.051

Recolección de datos

Una vez realizada la experimentación para los distintos tipos de fibra y el material híbrido se procede a la recolección de datos mediante la ayuda de la grabación del proceso. Se extrae el dato del avance del frente flujo para los tiempos de 20 s, 40 s, 80 s, 160 s, 320 s, 640 s, 840 s en los tres experimentos y se determina el promedio del mismo. Con el valor promedio del avance del frente de flujo y el tiempo se realiza su respectiva gráfica utilizando el software de análisis *Wolfram Mathematica*. Luego aplicando el procedimiento de Mejía (2013) se grafica el término $A = r_f^2 \left[2 \cdot \ln \left(\frac{r_f}{r_0} \right) - 1 \right] + (r_0^2)$ de la ecuación 9 con respecto a los tiempos antes señalados. Se realiza un ajuste de curva aproximado a una recta, donde su pendiente permite hallar el valor de la permeabilidad de las fibras utilizadas como refuerzo. En el anexo 4 se indica un ejemplo del código utilizado en *Wolfram Mathematica* para los ajustes de curvas. Por otro lado, en la figura 54 se indica el inicio del experimento del proceso VARTM.



Figura 54. Inicio del experimento VARTM

Validación del método experimental aplicado en la caracterización de la permeabilidad

Para validar los datos de permeabilidad obtenidos experimentalmente, se realiza la simulación del proceso VARTM, para cada una de las fibras utilizadas mediante el *software Autodesk Moldflow*. En ésta simulación se utiliza las mismas condiciones de presión de

inyección, temperatura, viscosidad y densidad de la resina aplicadas en la experimentación del proceso VARTM para la caracterización de la permeabilidad. Además se utiliza el dato de permeabilidad calculado para realizar la simulación y de esta forma poder validar estos datos. A continuación se detalla los pasos realizados en la simulación del proceso.

Modelado de las muestras de fibra utilizadas en la simulación.

Para realizar el modelado de las muestras de fibra se utilizó el software *Siemens NX*, donde se procedió a realizar una figura rectangular con medidas de 275 mm x 230 mm que corresponden a las medidas de las muestras utilizadas en la caracterización de la permeabilidad tal como se observa en la figura 55.

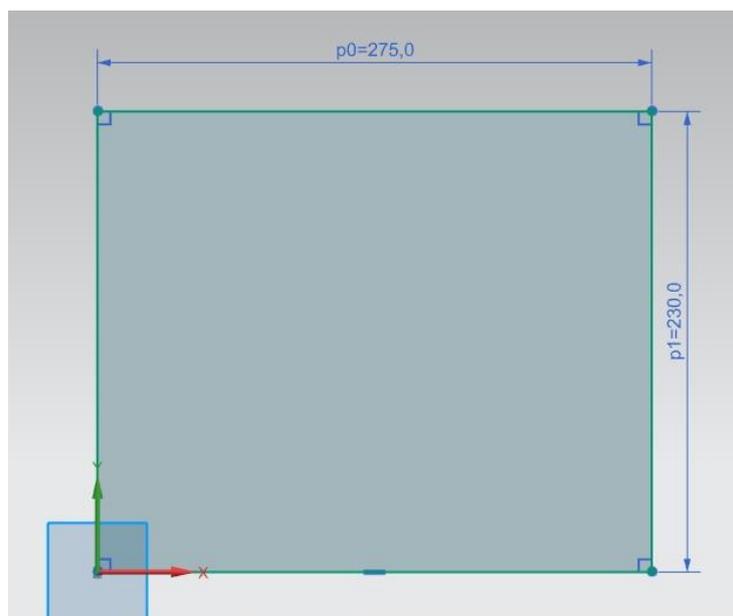


Figura 55. Modelado de muestras de fibras para la simulación del proceso VARTM

Una vez realizado el modelo, se exporta el archivo a un formato tipo .stp con el fin de poder modificarlo en el software *Autodesk Moldflow*. En la interfaz de *Autodesk Moldflow* se importa el archivo .stp y se escoge el tipo de proceso a realizar. Para este proyecto, corresponde un proceso RTM/SRIM ya que según Simacek y Advani (2017), los paquetes de

simulación basados en modelos RTM son la única opción viable para la simulación práctica del proceso VARTM.

Mallado del modelo CAD utilizado para la simulación del proceso VARTM

Para realizar el mallado del modelo CAD se utiliza un tipo de malla 3D, la misma que permite realizar las simulaciones basados en un volumen de control modificado por elementos finitos (FEM-CV) según Laurenzi et al. (2014). En la figura 56 se indica la malla tetraédrica obtenida, la misma que se la diagnostica con el fin de obtener datos confiables de la simulación. Los datos de la malla obtenida se indican en la tabla 17.

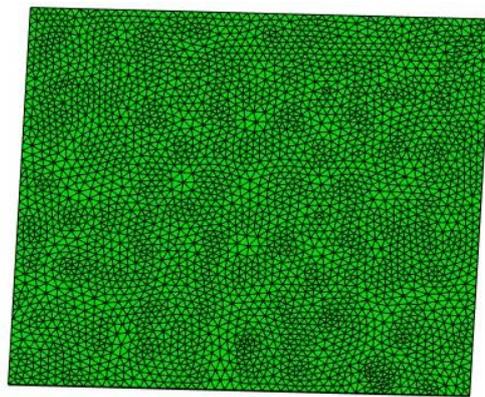


Figura 56. Malla tetraédrica 3D utilizada para el proceso VARTM

Tabla 17

Datos de la malla generada para la muestra rectangular

Malla	Número de tetraedros	Número de nodos	Relación de aspecto		
			Máxima	Media	Mínima
Tetraédrica 3D	189 124	34 759	136.60	46.16	1.46

Nota: Los datos de malla se obtuvieron a partir de la herramienta que dispone el software *Moldflow* "Información de malla"

Según la guía de *Autodesk Moldflow* (2017) la relación de aspecto máxima para una malla 3D debe ser de 50 o menos con la finalidad de que los datos obtenidos sean confiables. Por tal razón se repara la malla utilizando el asistente de reparación de mallas del mismo

software para obtener una relación de aspecto máxima de 49.89. Los datos de la malla reparada se indican en la tabla 18.

Tabla 18

Datos de la malla reparada para la muestra rectangular

Malla	Número de tetraedros	Número de nodos	Relación de aspecto		
			Máxima	Media	Mínima
Tetraédrica 3D	344 187	63 223	49.89	33.88	1.56

Nota: Los datos de malla se obtuvieron a partir de la herramienta que dispone el software *Moldflow* "Información de malla"

Asignación de propiedades de las fibras utilizadas como refuerzo.

Luego de haber realizado el mallado, se procede a asignar las propiedades de las fibras utilizadas. Esto se realiza seleccionando la malla y asignando las propiedades de la misma. Dentro de las propiedades, se debe establecer la porosidad, permeabilidad, material y fracción del volumen de las fibras. En el software, el parámetro phi corresponde a la porosidad de las fibras; mientras que los parámetros K11, K22, K33, corresponde a la permeabilidad en dirección x, y, z respectivamente (Autodesk Moldflow, 2017). Los datos de porosidad y permeabilidad utilizadas para la simulación de cada muestra se indican en la tabla 19. En el anexo 5 se indica el cuadro de diálogo del software para ubicar éstas propiedades

Tabla 19

Porosidad y Permeabilidad utilizada para las simulaciones.

Muestra	phi	K11 (m ²)	K22 (m ²)	K33 (m ²)
1	0.4	7.3628 x 10 ⁻¹¹	7.3628 x 10 ⁻¹¹	7.3628 x 10 ⁻¹¹
2	0.4	8.5765 x 10 ⁻¹¹	8.5765 x 10 ⁻¹¹	8.5765 x 10 ⁻¹¹
3	0.4	1.0065 x 10 ⁻¹⁰	1.0065 x 10 ⁻¹⁰	1.0065 x 10 ⁻¹⁰
4	0.4	3.7327 x 10 ⁻¹⁰	2.6026 x 10 ⁻¹⁰	1.0065 x 10 ⁻¹⁰

Nota: Los datos de permeabilidad pertenecen a los calculados mediante el método indicado en la parte de caracterización de la permeabilidad.

Seguidamente, se escoge el material de la preforma y la fracción volumétrica del mismo. En la tabla 20 se señalan los materiales y la fracción volumétrica utilizada para cada simulación.

Tabla 20

Tipo de material y fracción volumétrica utilizada para las simulaciones.

Muestra	Material	Fracción volumétrica (%)
1	<i>Chopped Glass</i>	60
2	Mat	60
3	Chopped Glass, Mat	40, 20
4	Chopped Glass, Mat	40, 20

Selección de resina

Para la selección de la resina a utilizar en las simulaciones, se debe buscar dentro de la base de datos del *software*, materiales termoestables que concuerden con las propiedades de la resina utilizada en la experimentación para la caracterización de permeabilidad. En caso de no existir la resina, el software permite modificar los valores de las propiedades de las resinas predeterminadas en la base de datos.

Para este proyecto se modificó una resina epóxica de la base de datos, cambiando los datos de densidad, temperatura y viscosidad. En la tabla 13 se indica las propiedades de la resina epóxica IN2, donde la densidad tiene un valor entre 1.08 g/cm³ y 1.18 g/cm³ y la viscosidad entre 0.5 Pa.s y 0.8 Pa.s. En el caso de la simulación se utilizó un valor intermedio para los valores de densidad y viscosidad, los mismos que se indican en la tabla 21.

Tabla 21

Datos de densidad y viscosidad utilizadas para la simulación

Densidad (g/cm ³)	1.13
Viscosidad (Pa.s)	0.65

Selección punto de inyección

Como la experimentación para la caracterización de la permeabilidad se la hizo mediante flujo radial, el punto de inyección se lo coloca en el centro del molde. Además, se debe realizar un canal de entrada con el fin de simular la manguera de ingreso de resina de 6mm de diámetro. En la figura 57 se indica el canal realizado para la respectiva simulación.

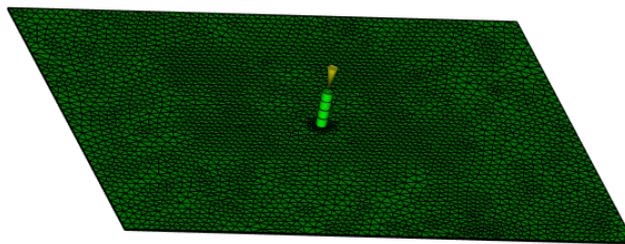


Figura 57. Canal y punto de inyección para el ingreso de la resina

Condiciones establecidas para la simulación

Para la configuración del proceso se debe establecer la temperatura a la que se realiza la simulación. En la experimentación del proceso la temperatura se encontraba entre 20 °C y 23 °C por lo tanto se establece un promedio de la misma. Además, se establece la presión máxima de inyección de resina para impregnar las fibras. Las condiciones establecidas se indican en la tabla 22.

Seguidamente se debe configurar el efecto de la gravedad, estableciendo la dirección de la misma. Finalmente se da inicio a la simulación del proceso y se analizan los datos de la misma, comparando con los datos experimentales.

Tabla 22

Temperatura y Presión de inyección utilizados en la simulación

Presión de Inyección (Pa)	Temperatura (°C)
88 000	21.67

Nota: Los datos utilizados en la simulación son los mismos que se establecieron para la experimentación del proceso en la caracterización de la permeabilidad

Para evaluar el error del avance del frente de flujo en la simulación se utiliza la ecuación 18, la misma que se presenta en el estudio de Ferreira (2011) y Yalcinkaya, Caglar, y Sozer (2017). Esta ecuación se la aplica para cada tiempo de medición del avance del frente de resina.

$$\mathbf{error} = \frac{|\Gamma_{\text{exp}} - \Gamma_{\text{sim}}|}{\Gamma_{\text{exp}}} \times 100 \quad (18)$$

Diseño y optimización del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque mediante la simulación.

Con los datos obtenidos de las simulaciones anteriores, se debe diseñar y optimizar el proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo. El modelado del guardachoque se lo hizo en el *software Siemens NX* a escala real, para luego importarlo al *software Autodesk Moldflow*. Primero, se realiza el mallado del modelo del guardachoque y su respectivo análisis, observando la relación de aspecto de la misma. En la figura 58 se indica la malla obtenida y en la tabla 23 se indican los datos de la malla con la que se trabaja en la simulación.



Figura 58. Mallado del modelo CAD del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.

Tabla 23

Datos de la malla del Guardachoque del Chevrolet Aveo.

Malla	Número de tetraedros	Número de nodos	Relación de aspecto		
			Máxima	Media	Mínima
Tetraédrica 3D	972 333	178 003	29.97	11.73	1.62

Nota: Los datos de malla se obtuvieron a partir de la herramienta que dispone el software *Moldflow* "Información de malla"

Se determinaron 6 diseños para los puntos de ingreso de resina y puntos de vacío, tal como lo realizó Ruikui, y otros (2013) en el estudio realizado para la optimización del llenado del molde de un guardachoque mediante VARTM. Para cada diseño se realizó la respectiva simulación con el fin de identificar la que menor tiempo ocupa en el llenado del molde del guardachoque. En la simulación del llenado del molde del guardachoque se utilizaron las condiciones indicadas en las tablas 13, 15 y 24, a excepción del dato de viscosidad de la resina, la misma que es de 0.325 Pa.s

Tabla 24

Propiedades del material híbrido utilizado en la simulación

Material	Fracción Volumétrica	Porosidad	Permeabilidad		
			K11	K22	K33
Chopped Glass, Mat	40,20	0.4	3.7327×10^{-10}	2.6026×10^{-10}	3.7327×10^{-10}

En la figura 59 se indica el primer diseño, donde se tiene un punto de entrada de resina ubicado en la parte central del guardachoque y 7 puntos de vacío ubicados al contorno del molde.

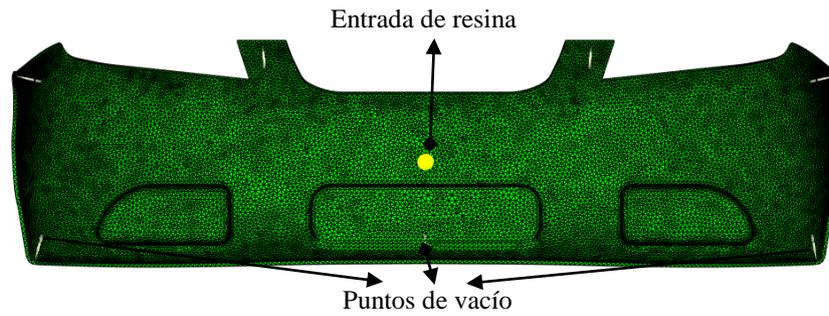


Figura 59. Diseño 1 para la disposición de los puntos de entrada de resina y de vacío en el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante VARTM.

En las figuras 60, 61, 62, 63; se indican los diseños 2,3,4,5 para la disposición de los puntos de entrada de resina y de vacío basándose en el estudio presentado por Ruikui et al. (2013).

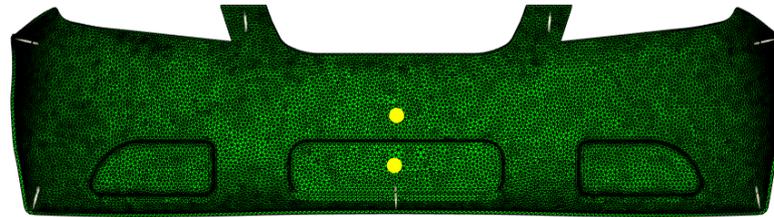


Figura 60. Diseño 2 para la disposición de los puntos de entrada de resina y de vacío en el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante VARTM.

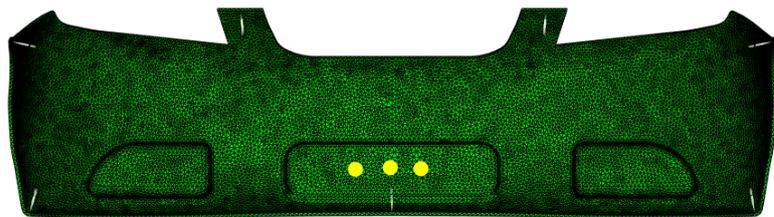


Figura 61. Diseño 3 para la disposición de los puntos de entrada de resina y de vacío en el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante VARTM.

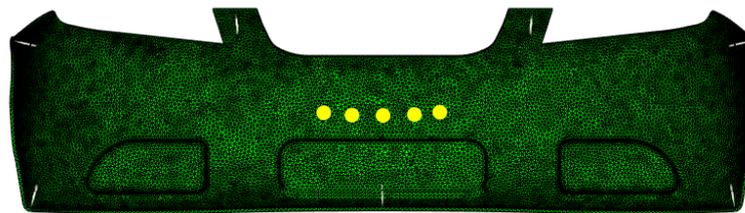


Figura 62. Diseño 4 para la disposición de los puntos de entrada de resina y de vacío en el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante VARTM.

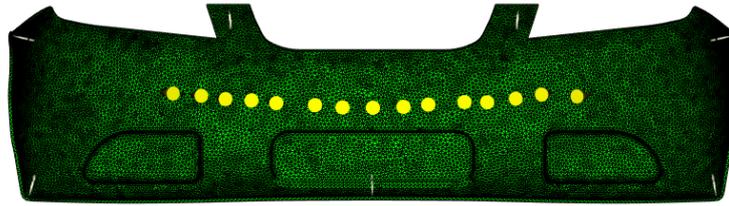


Figura 63. Diseño 5 para la disposición de los puntos de entrada de resina y de vacío en el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante VARTM.

En la figura 64 se plantea el diseño 6, tomando en cuenta la optimización de recursos y del tiempo de infusión para la aplicación del proceso. En esta opción se plantea varios puntos de entrada de resina ubicados en el borde superior del guardachoque y un punto de vacío ubicado en la parte inferior central, con el fin de obtener un flujo lineal desde el borde superior hasta el inferior del molde. Según Ruiz y Trochu (2011), con la técnica de inyección lineal, el tiempo de llenado es menor en comparación con la técnica de inyección radial convergente que se utilizó en la caracterización de permeabilidad.

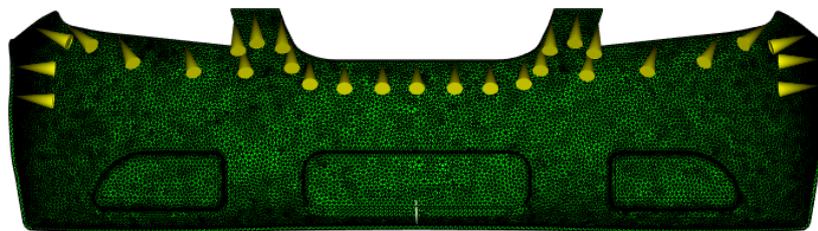


Figura 64. Opción 6 para la disposición de los puntos de entrada de resina y de vacío en el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante VARTM.

Finalmente, la validación del método de simulación presentado, se lo realiza mediante la experimentación del proceso para la fabricación del prototipo del guardachoque.

Fabricación del prototipo de guardachoque mediante el proceso VARTM.

Con la información de las simulaciones anteriores se procede a fabricar el prototipo de guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo, donde la disposición de los puntos de entrada de

resina y de vacío concuerdan con la opción de simulación que menos tiempo se demora en el llenado del molde y la que optimiza recursos.

Fabricación del Molde del Guardachoque

Primeramente, se procede a fabricar el molde del guardachoque mediante la variante *Hand Lay up*. Aquí se utiliza el guardachoque original y se moldea la parte externa de este tapando los agujeros de los faros y rejillas como se indica en la figura 65. En la tabla 25 se enlistan los materiales a utilizar en el proceso de moldeo del molde.



Figura 65. Disposición del guardachoque original para la fabricación del molde.

Tabla 25

Materiales a utilizar en la fabricación del molde

Materiales	Cantidad
Fibra de vidrio	375 g/m ²
Resina Poliester	50 200 ml
Cera desmoldante	-
Gelcoat	-
Estireno	6 200 ml
Octoato de Cobalto	110 ml
MEK	110 ml

Fabricación del prototipo del Guardachoque

Una vez obtenido el molde del guardachoque se procede a la fabricación del prototipo mediante el proceso VARTM. En primer lugar, se coloca sobre el molde un agente químico compatible con la resina epoxi IN2, el mismo que permite el desmoldeo de la autoparte.

Luego, en la figura 66 se muestra la disposición de la cinta sellante por alrededor del molde, la misma que permite sellar la bolsa de vacío con el molde con el fin de lograr la compactación de las fibras. Seguidamente se colocan las fibras de vidrio y cabuya sobre el molde de la misma manera como se hizo en la caracterización de la permeabilidad (Vidrio + Cabuya + Vidrio). En este paso, se debe tomar en cuenta que las fibras deben ocupar toda la superficie del molde, para lo cual se debe colocar capas pequeñas de fibra debido a la forma compleja del molde. En la figura 67 se indican las fibras colocadas sobre el molde.



Figura 66. Colocación de la cinta sellante sobre el molde.



Figura 67. Disposición de las fibras de vidrio y cabuya sobre el molde.

Inmediatamente se coloca el *peel ply* con la malla de distribución sobre las fibras. Tanto el *peel ply* como la malla de distribución funcionan como un medio de optimización, ya que aceleran el flujo de resina sobre las fibras. En la figura 68 se observa la disposición de estos medios de optimización.



Figura 68. Peel Ply y malla de distribución sobre las fibras utilizadas como refuerzo.

A continuación, se coloca los puntos de entrada de resina y de vacío tomando en cuenta la información de la simulación del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque, donde se opta por la opción 6. Para obtener varios puntos de entrada de resina y optimizar recursos, se utiliza una manguera espiral mostrada en la figura 69. Esta manguera se la coloca por el contorno del molde como se indica en la simulación de la opción 6, mientras que el punto de vacío se coloca en la parte inferior central. En la figura 70 se detalla la ubicación de la manguera espiral y el punto de vacío.



Figura 69. Manguera espiral, utilizada para distribuir la resina.



Figura 70. Ubicación de la manguera espiral y el punto de vacío utilizados para VARTM

Luego de haber ubicado la manguera espiral y el punto de vacío, se coloca la bolsa de vacío sobre el molde. Para esto, se quita la protección de la cinta sellante y presiona la bolsa sobre ésta con fin de garantizar un sellado completo y evitar fugas de aire. En la figura 71 se muestra la ubicación de la bolsa de vacío sobre el molde.



Figura 71. Bolsa de vacío utilizada para el proceso VARTM

Seguidamente se colocan las mangueras de conexión hacia los puntos de entrada de resina y la bomba de vacío. Se debe realizar una prueba de fugas de aire, la misma que consiste en generar vacío dentro de la bolsa y estrangular las mangueras conectadas en los puntos entrada de resina y de vacío. Se debe observar en el manómetro, que la presión de vacío no disminuya. La presión de vacío generada fue de 0.088 MPa, la misma que permaneció constante durante los 15 minutos que duró la prueba de fugas. Luego de esto, se procede a calcular la cantidad de resina y endurecedor a utilizar para la impregnación de las fibras. La cantidad de resina epoxy IN2 a utilizar se determina a partir de la ecuación 19, la misma que especifica una fracción del volumen de fibra del 60 %. En la tabla 26 se especifican el peso de las fibras, con la cantidad de resina utilizados en la fabricación. Se debe tomar en cuenta que, en la cantidad de resina utilizada se considera la cantidad de endurecedor utilizado. La cantidad de endurecedor AT 30 *Slow* utilizado en la fabricación del prototipo se determina en una relación 100:30, es decir por 100 partes de resina se utiliza 30 partes de endurecedor (Easy Composites, 2016). En la tabla 27 se especifican las cantidades correctas de resina con endurecedor utilizados.

$$Resina\ a\ utilizar = \left(\frac{Peso\ de\ Fibra\ por\ m^2}{1.5} + 700 \right) + 100 \quad (19)$$

Tabla 26

Peso de fibras y cantidades de resina y endurecedor a utilizar

Material	Peso (Kg)	Cantidad (Kg)
Fibras (Vidrio-Cabuya-Vidrio)	1.075	-
Resina Epoxi IN2	-	1.517

Tabla 27

Cantidad de endurecedor AT 30 Slow y resina epoxi a utilizar en la mezcla

Material	Cantidad (Kg)
Resina Epoxi IN2	1.062
Endurecedor AT 30 Slow	0.455

Luego de haber determinado la cantidad de resina a utilizar, se realiza el proceso de infusión y se graba el proceso. El equipo de infusión, es el mismo que se utilizó para la caracterización de la permeabilidad. Para el ingreso de la resina, se coloca la manguera correspondiente en el reservorio de resina epoxy mezclada con el endurecedor AT SLOW. Inmediatamente se deja de estrangular la manguera, para que la resina comience a circular por la manguera espiral. Una vez que la manguera este llena, la resina comienza a fluir por los espacios dejados por la espiral, permitiendo la impregnación de las fibras. Las condiciones en que se realizó la infusión para la fabricación del prototipo, son las mismas que se utilizaron en la caracterización de la permeabilidad, con excepción de la viscosidad de la resina, ya que al mezclarse con el endurecedor la viscosidad es de 0.325 Pa.s. Finalmente se deja curar la pieza durante 24 horas y se realiza el desmoldeo para obtener el prototipo del guardachoque. En la figura 72 se indica el inicio del proceso de infusión.

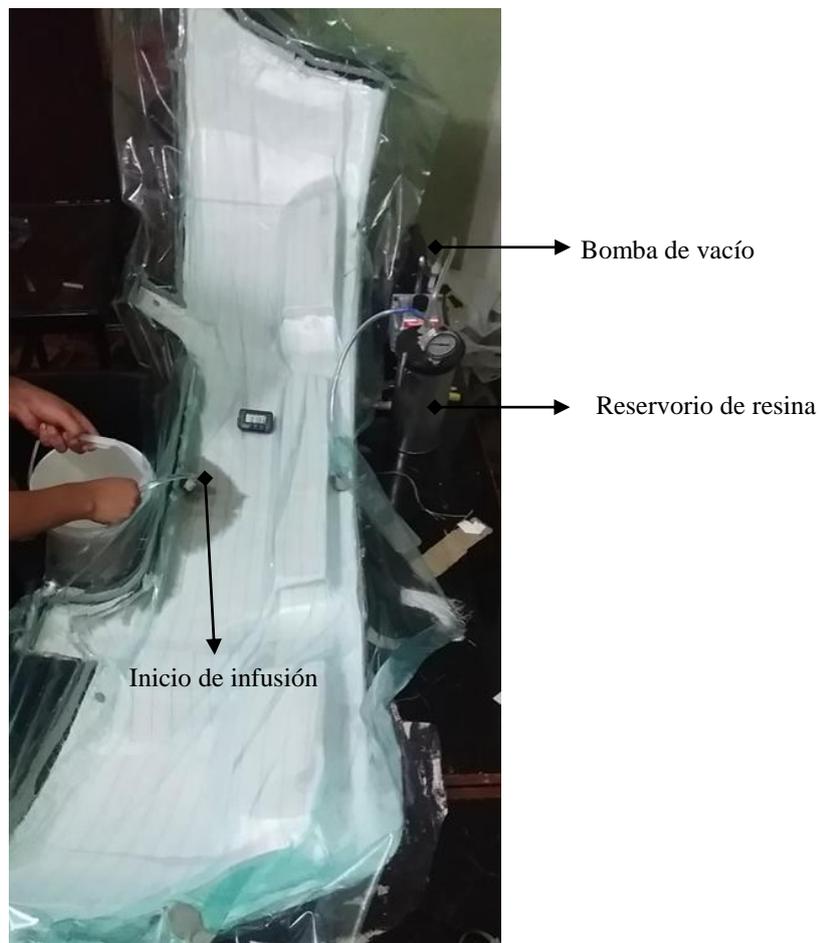


Figura 72. Inicio del proceso de infusión para la fabricación del prototipo.

En la figura 73 se resume el procedimiento a realizar para la fabricación del prototipo del guardachoque mediante VARTM.

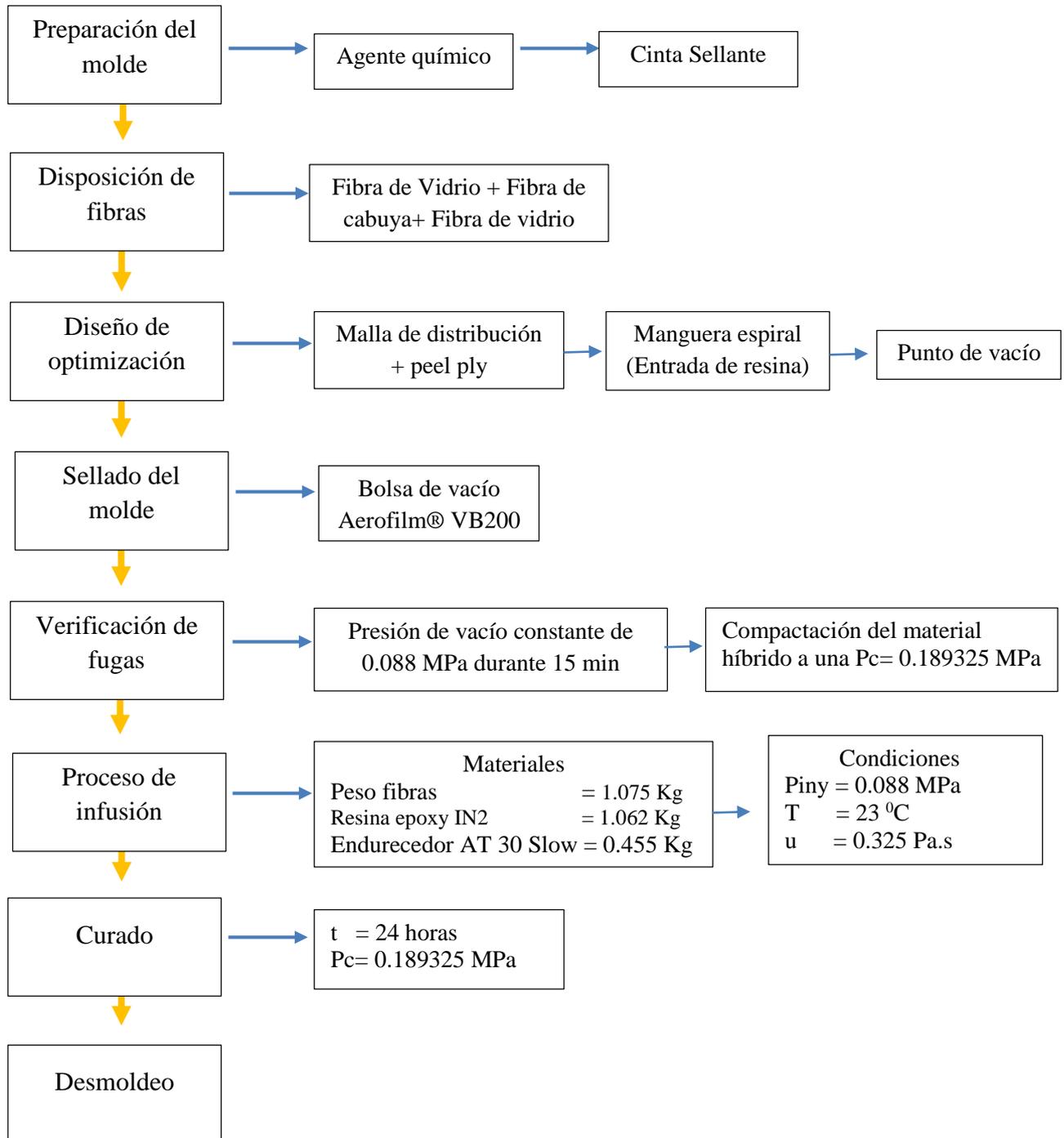


Figura 73. Proceso para la fabricación del prototipo de guardachoque mediante VARTM

Resultados

Caracterización de la Permeabilidad

En la tabla 28 se indica la posición promedio del avance del frente de flujo de resina r_f , obtenida mediante la experimentación del proceso VARTM, en distintos tiempos de medición sobre las muestras de fibras de vidrio *Choped Strand Mat*, cabuya y el material híbrido empleado. El tipo de inyección utilizado fue el radial, y se observó un avance del frente de flujo de resina circular por lo cual, la posición del frente de resina en dirección “x” es la misma que en la dirección “y”. En la fibra de vidrio *Choped Strand Mat*, fue complicado obtener frentes de flujo de resina circulares, razón por la cual se tuvo gran dispersión en las mediciones de la posición del frente de flujo de resina, influyendo en el cálculo de la permeabilidad.

Tabla 28

Posición del Frente de Flujo para la Fibra de Vidrio tipo Choped Strand Mat, Cabuya y Material Híbrido

Tiempo (s)	N experimentos	r_f (mm) Promedio		
		Vidrio <i>Choped Strand Mat</i>	Cabuya	Híbrido
20	20	39.67	34	34
40	20	50	43.67	46
80	20	63.67	57.33	60.67
160	20	78.33	76.33	79
320	20	95	97.33	103.33
640	20	121	127	134
840	20	127.33	135	145

En la figura 74 se puede observar las gráficas de las posiciones del avance del frente de resina según el tiempo, en las diferentes fibras utilizadas como refuerzo. Los puntos marcados de rojo, son las posiciones determinadas de forma experimental, mientras que las líneas azules, son los ajustes de curva que se realizaron mediante el software *Wolfram Mathematica*.

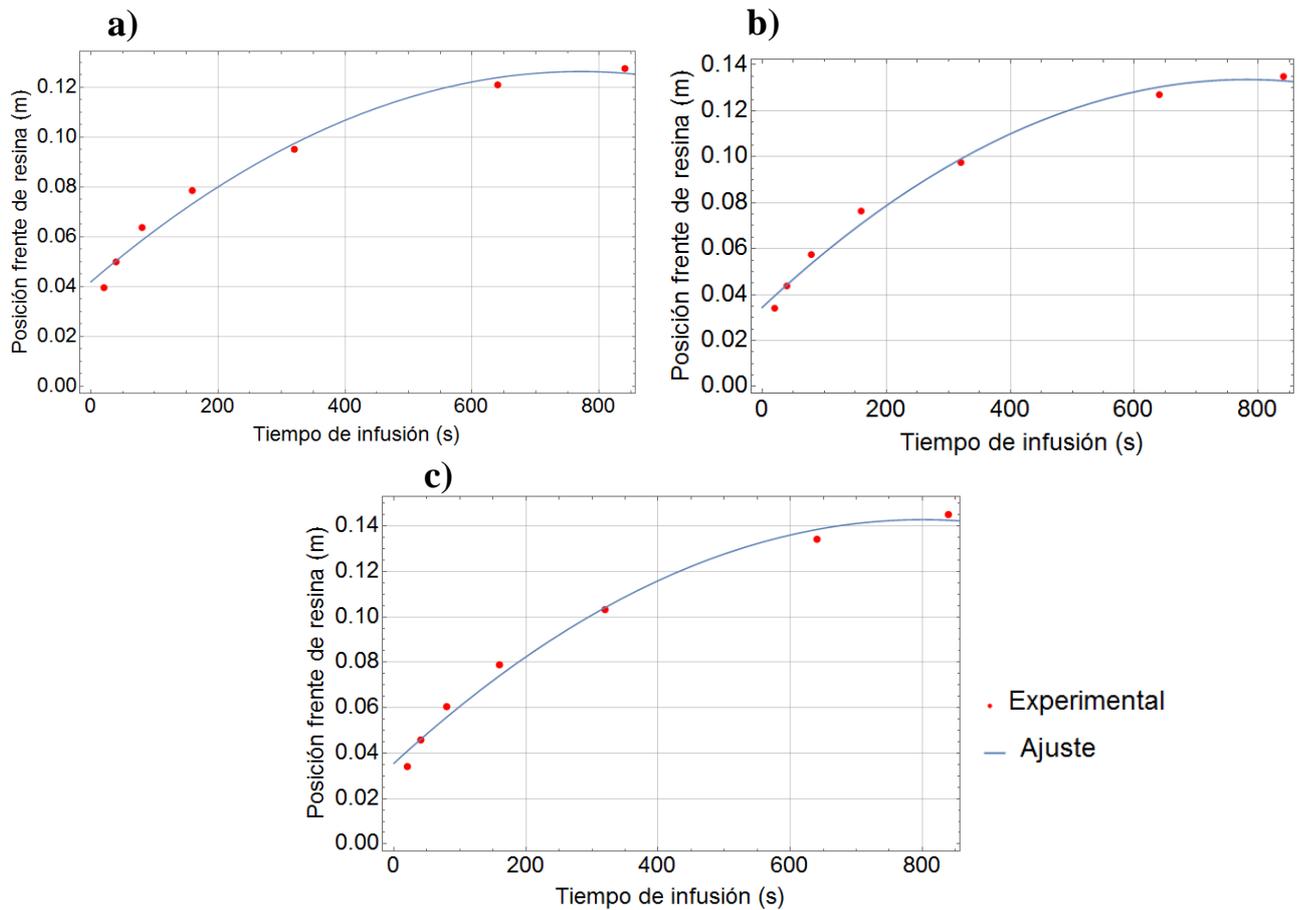


Figura 74. Posición del frente de flujo de resina según el tiempo para las fibras: a) Vidrio Choped Strand Mat, b) Cabuya, c) Híbrido

En la tabla 29 se muestran los valores del término $A = r_f^2 \left[2 \cdot \ln \left(\frac{r_f}{r_0} \right) - 1 \right] + (r_0^2)$ de la ecuación 9, según los tiempos utilizados en la medición del avance del frente de resina, para las fibras utilizadas como refuerzo.

Tabla 29

Constante utilizada en la caracterización de la Permeabilidad de la fibra de vidrio, cabuya y material híbrido.

Tiempo (s)	r_0 (m)	Vidrio Choped Strand Mat		Cabuya		Híbrido	
		r_f (m)	A	r_f (m)	A	r_f (m)	A
20	0.006	0.0397	0.0044	0.034	0.00289	0.034	0.00289
40	0.006	0.050	0,0081	0.04367	0.00570	0.046	0.00654
80	0.006	0.0637	0,0151	0.0573	0.01158	0.06067	0.0134
160	0.006	0.0783	0,0254	0.07633	0.0238	0.079	0.0259
320	0.006	0.095	0,0408	0.09733	0.0434	0.1033	0.0501
640	0.006	0.1210	0,0733	0.127	0.0824	0.134	0.0936
840	0.006	0.1293	0,0860	0.135	0.0953	0.145	0.1129

Nota: El término r_0 hace referencia al radio de la manguera utilizada para la infusión de resina.

El término A de la ecuación 9, sirve para realizar un ajuste lineal y de esta manera obtener las ecuaciones de las líneas rectas para cada una de las fibras utilizadas como refuerzo. En la figura 75 se muestran con color rojo, los valores del término A obtenidos mediante la experimentación según los tiempos de infusión para cada fibra, mientras que en color azul se indican los ajustes lineales determinados con sus respectivas ecuaciones.

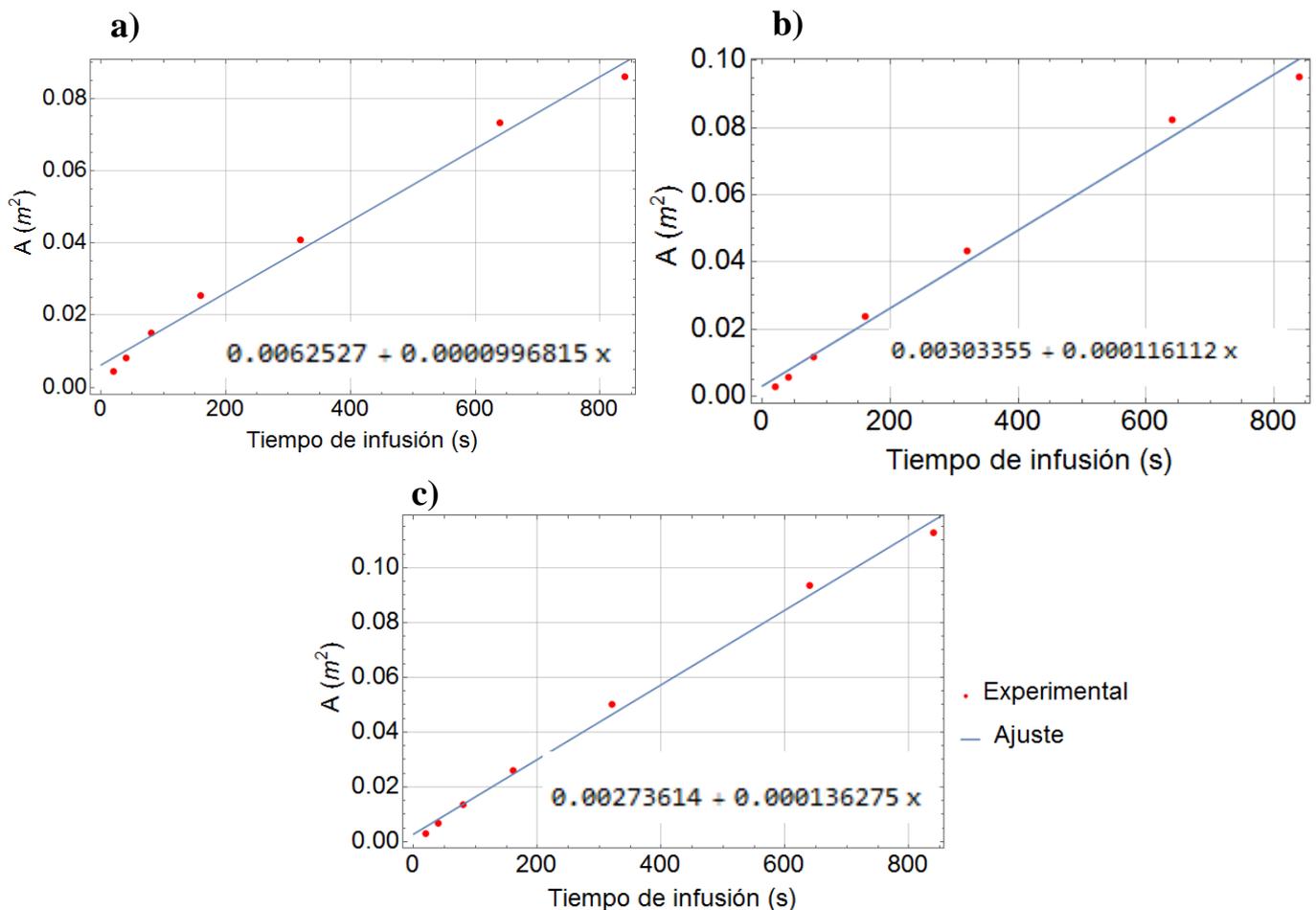


Figura 75. Ajuste lineal para la determinación de la pendiente de la recta en las fibras de: a) Vidrio Chopped Strand Mat, b) Cabuya, c) Híbrido

En la tabla 30 se indican los valores de las pendientes determinadas, para cada ajuste lineal realizado de las fibras utilizadas como refuerzo. Además, se detallan los valores de permeabilidad (K) calculados mediante la ecuación 9. De los tres tipos de fibras analizadas en la caracterización de la permeabilidad, el material híbrido es la que presenta el valor más elevado de K, por ende, la resina fluye con más facilidad.

Tabla 30

Permeabilidad calculada para la Fibra de Vidrio, Cabuya y Material Híbrido.

Material	Pendiente Recta	u (Pa.s)	ϵ	ΔP (Pa)	K (m ²)
Fibra de Vidrio <i>Choped Strand Mat</i>	0.0000996815	0.65	0.4	88000	7.3628×10^{-11}
Fibra de Cabuya tejida	0.000116112	0.65	0.4	88000	8.5765×10^{-11}
Material Híbrido	0.000136275	0.65	0.4	88000	1.0065×10^{-10}

Dentro del análisis de la optimización del proceso VARTM, se realizó el análisis del avance del frente de flujo de resina al utilizar una malla de distribución de resina y el *peel ply*. Estas mallas se utilizan con frecuencia para acelerar la impregnación de resina sobre las fibras utilizadas como refuerzo. Se observó que la forma del avance del frente de flujo de resina, tiene forma elíptica, orientada 45° desde el eje “y”. En la tabla 31 se indica la posición promedio del avance del frente de flujo de resina medida en un ángulo de 45° desde el eje “y” y “x”.

Tabla 31

Posición del Frente de Flujo en las direcciones “y” y “x” para el Material Híbrido con peel ply y malla de distribución

Tiempo (s)	N experimentos	r_{fx} (mm) Promedio	r_{fy} (mm) Promedio
20	20	35.67	46.33
40	20	48.33	65.33
80	20	76	88.67
160	20	104.33	123.67

Nota: Los valores de r_{fx} y r_{fy} son medidos en un ángulo de 45° desde los ejes coordenados correspondientes.

En la figura 76, se muestran las posiciones del frente de flujo de resina en las posiciones “y” y “x” determinadas en forma experimental, así como también los ajustes de curva realizados.

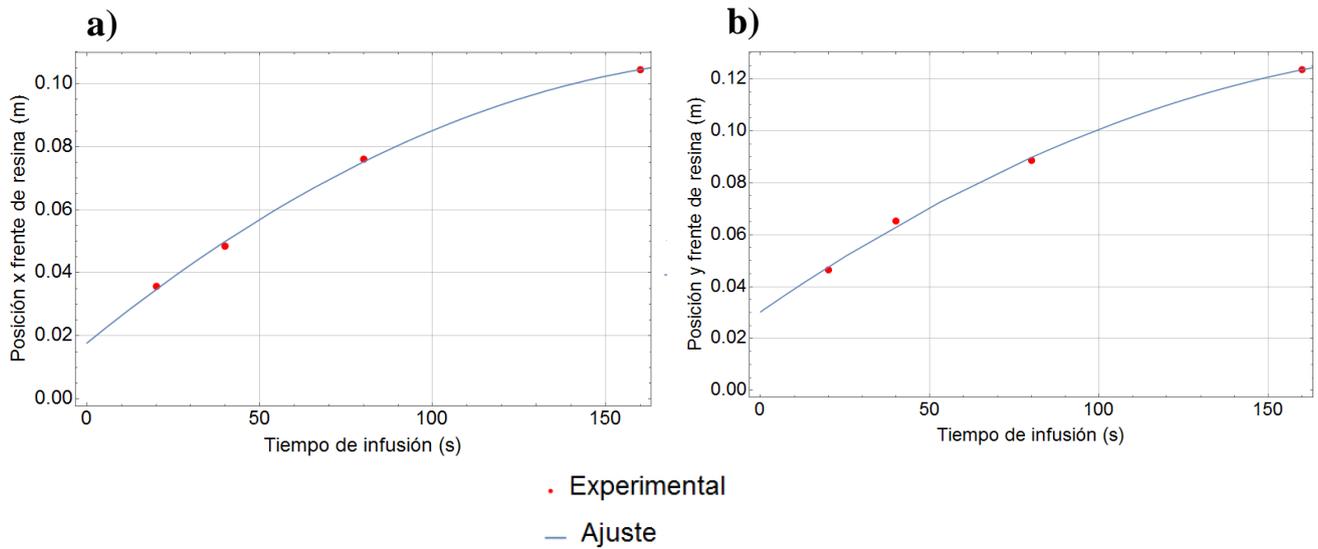


Figura 76. Posición del frente de flujo de resina para el material híbrido con malla de distribución y peel ply según el tiempo. a) Posición x + 45°, b) Posición y +45°.

La tabla 32 indica los valores de la constante A de la ecuación 9 para las direcciones “x” y “y”. Al ser diferentes las posiciones del avance del frente de flujo de resina, los valores de las constantes también varían.

Tabla 32

Constante utilizada en la caracterización de la Permeabilidad del Material Híbrido con malla de distribución y peel ply.

Tiempo (s)	r _o (m)	Dirección x + 45°		Dirección y +45°	
		r _{fx} (m)	A	r _{fy} (m)	A
20	0.006	0.03567	0.0033	0.04633	0.0067
40	0.006	0.04733	0.0070	0.06533	0.0161
80	0.006	0.076	0.0236	0.08876	0.0346
160	0.006	0.1043	0.0513	0.1237	0.0773

En la figura 77 se observa las curvas de ajuste lineales en las posiciones “y” y “x” con sus respectivas ecuaciones. De las ecuaciones de las curvas lineales se extraen las pendientes de las rectas, las mismas que sirven para determinar las permeabilidades en las direcciones antes descritas. Los valores de las permeabilidades se detallan en la tabla 33.

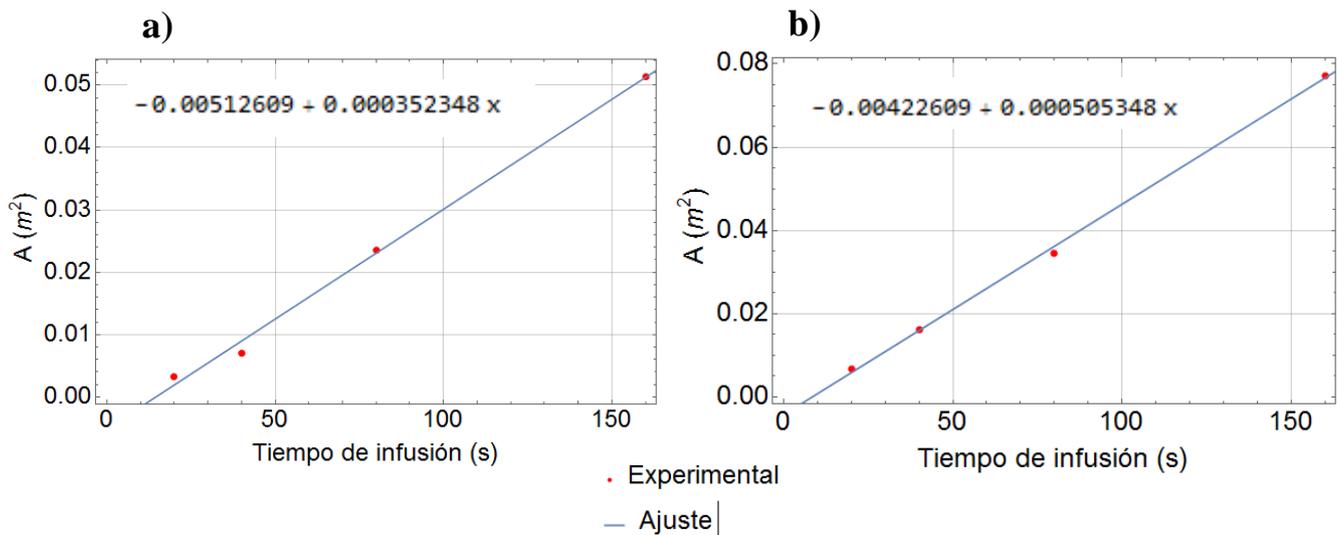


Figura 77. Ajuste lineal para la determinación de la pendiente de la recta en el material híbrido con malla de distribución y peel ply. a) Posición $x + 45^\circ$, b) Posición $y + 45^\circ$.

Tabla 33

Permeabilidad del Material Híbrido con malla de distribución y peel ply.

Dirección	Pendiente Recta	u (Pa.s)	ϵ	ΔP (Pa)	K ($\times 10^{-10}$)
x	0.000352348	0.65	0.4	88000	2.6026
Y	0.000505348	0.65	0.4	88000	3.7327

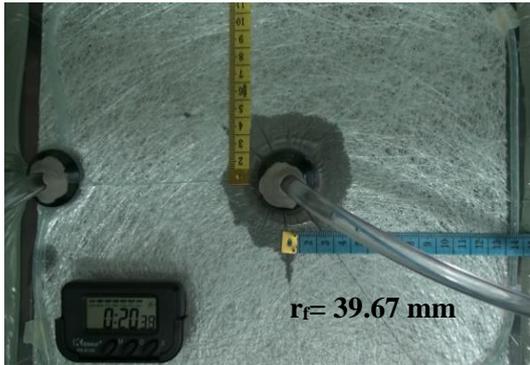
Nota: Los valores de permeabilidad determinados son medidos desde los ejes coordenados $+ 45^\circ$

Validación del método experimental aplicado en la caracterización de la permeabilidad

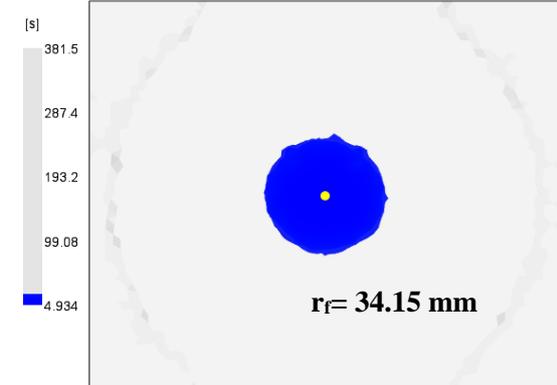
Los datos de permeabilidad determinados de forma experimental y analítica en la sección anterior, sirven para realizar la simulación del proceso VARTM en el llenado del molde del guardachoque. Razón por la cual, estos datos deben ser validados mediante la simulación del proceso VARTM en el *software Autodesk Moldflow*. En la figura 78 se comparan los datos obtenidos mediante la experimentación del proceso VARTM y la simulación para la muestra de fibra de Vidrio *Chopped Strand Mat*. Las figuras 78a, 78b y 78c, muestran regiones donde la resina fluye con más velocidad durante la experimentación, cuando el tiempo de infusión es de 20 s, 80 s y 320 s respectivamente. Mientras que, en la figura 78d, cuando el tiempo de infusión es de 640 s, las regiones antes descritas son menos visibles.

Las irregularidades que se presentan en la experimentación afectan la forma y la medición de la posición del frente de flujo de resina. Sin embargo, en la simulación del proceso para todos los tiempos de análisis, estas irregularidades no se toman en cuenta y se obtienen frentes de flujos circulares, ya que el tipo de inyección utilizado en la simulación, es la radial.

a)



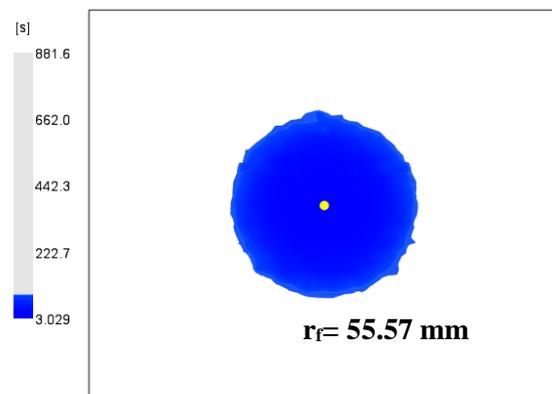
Tiempo de llenado = 20.62[s]



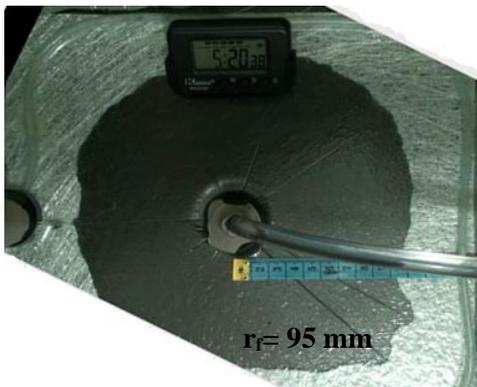
b)



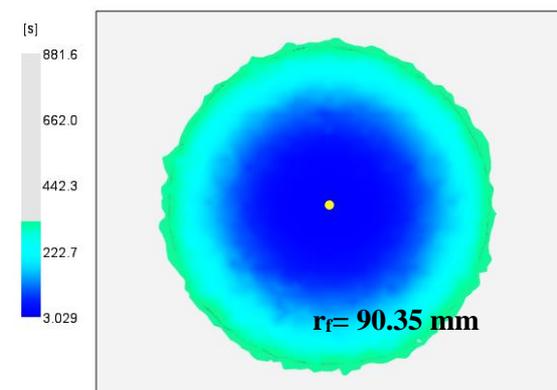
Tiempo de llenado = 80.34[s]



c)



Tiempo de llenado = 320.7[s]



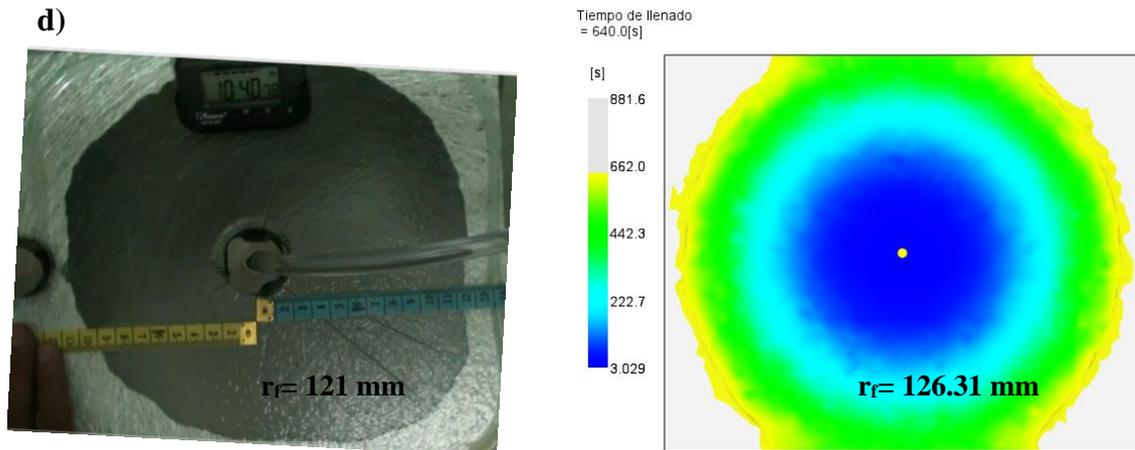
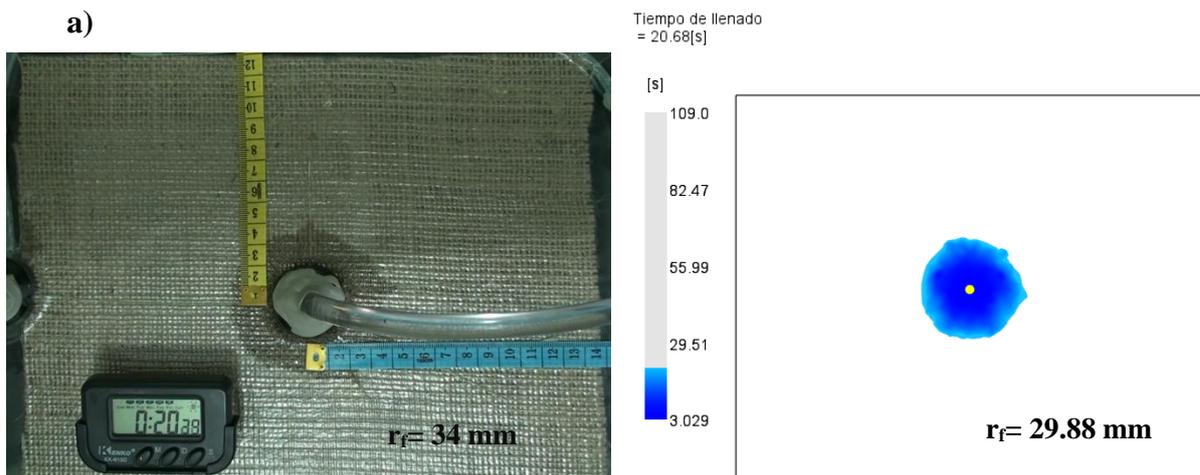


Figura 78. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para la Fibra de Vidrio. a) $t=20 \text{ s}$, b) $t=80 \text{ s}$, c) $t=320 \text{ s}$, d) $t=640 \text{ s}$.

Para la fibra de cabuya, la forma del frente de flujo en los distintos tiempos de infusión y su respectiva simulación, se observa en la figura 79. En la experimentación, la forma del frente de flujo es más homogénea en comparación con la fibra de vidrio. Las figuras 79a y 79b indican que para los tiempos de 20 s y 80 s, la simulación del proceso es aceptable, ya que en la experimentación del proceso existen ciertas regiones donde la resina fluye con más velocidad. Además, en la figura 79d, se observa que la resina fluye con más velocidad para el lado derecho, razón por la cual la forma del frente de flujo es irregular.



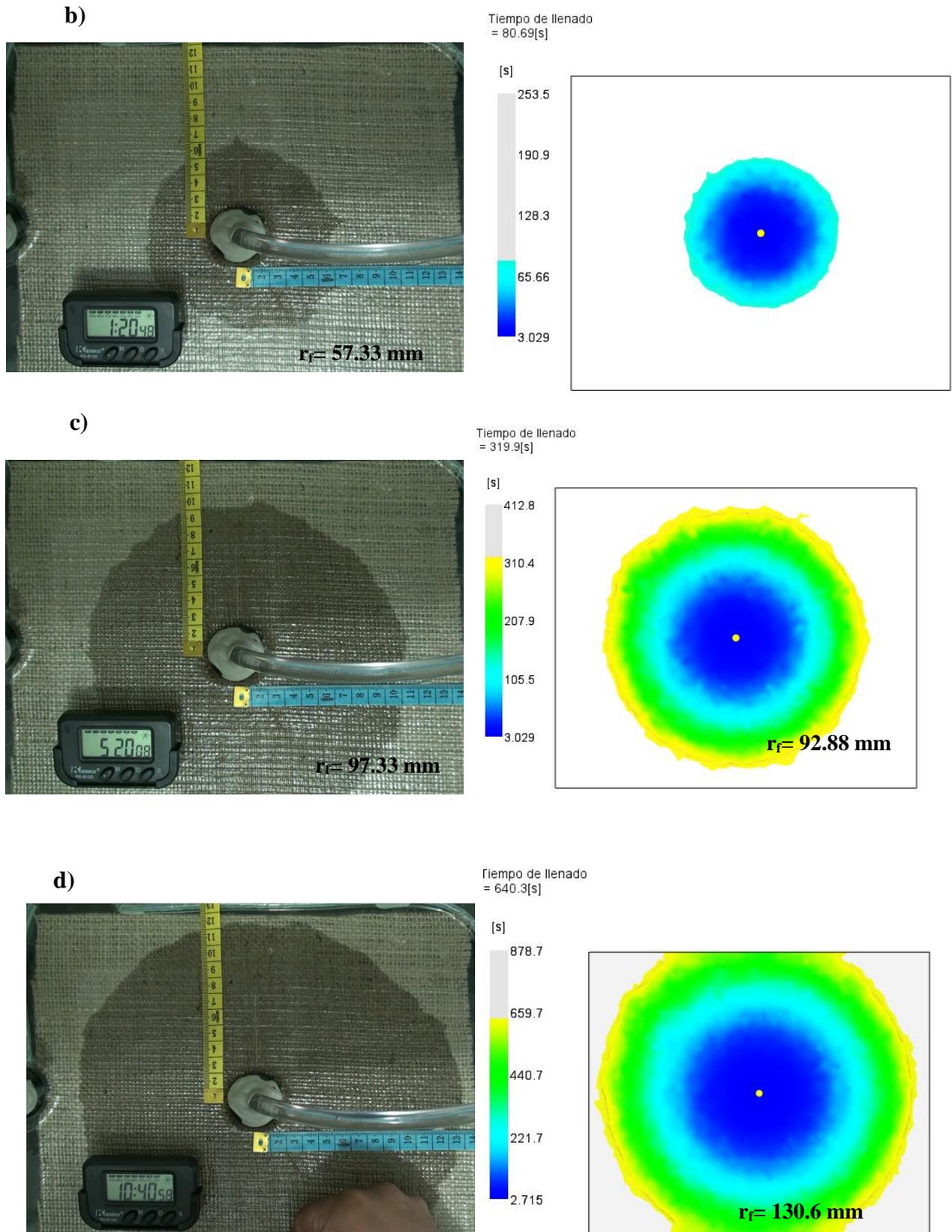
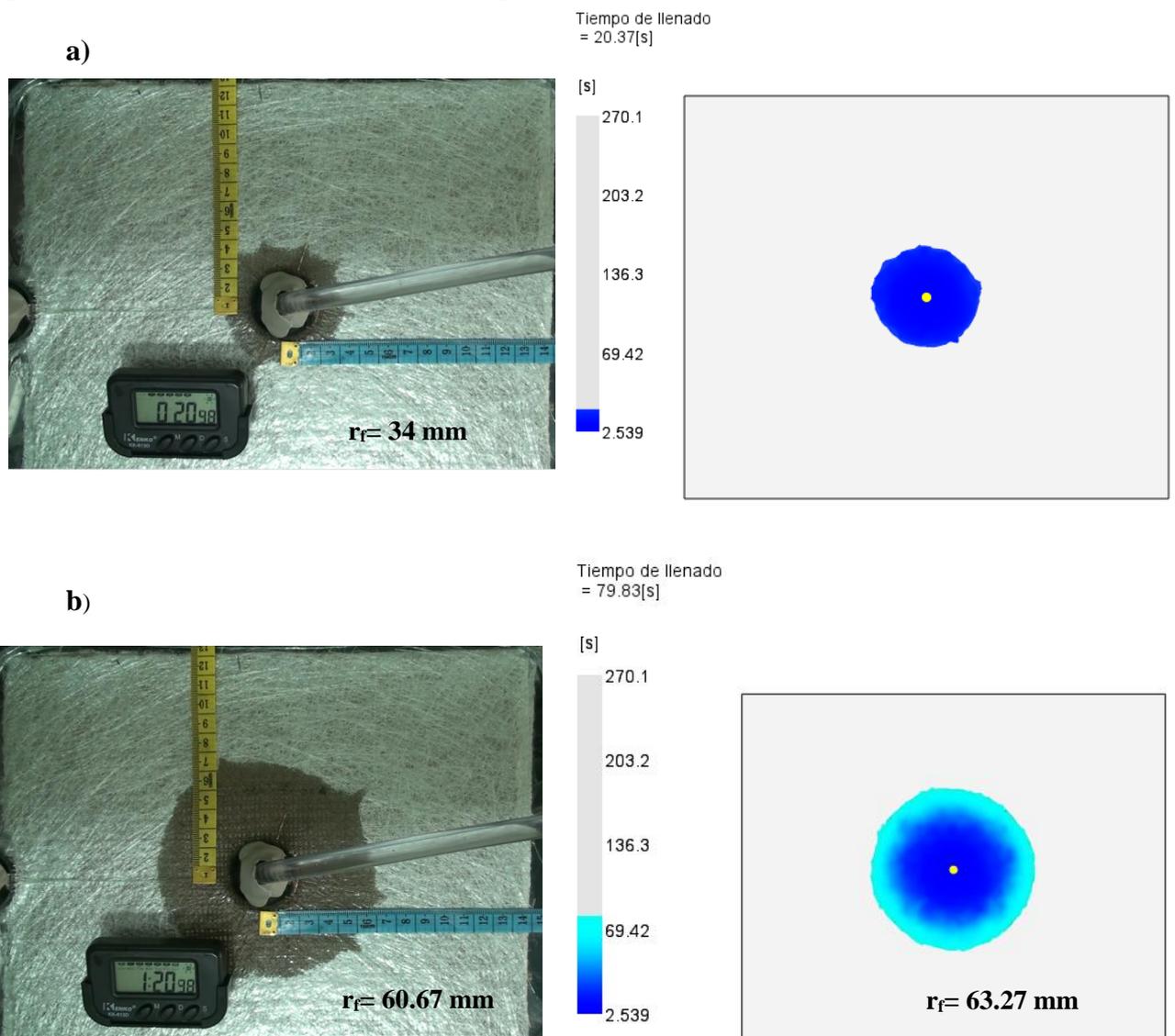


Figura 79. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para la Fibra de Cabuya. a) t=20 s, b) t= 80 s, c) t= 320 s, d) t=640 s.

Al inicio de la experimentación del proceso VARTM para el material híbrido, se observan ciertas irregularidades en la forma del frente de flujo de resina que se indican en la figura 80a. Estas irregularidades difieren de los datos obtenidos en la simulación afectando la medición de la posición del frente de flujo de resina. Sin embargo, conforme avanza el tiempo de infusión, la simulación del proceso guarda bastante concordancia con la experimentación del proceso. En la figura 80c, cuando el tiempo de infusión es de 320 s; la medición de la posición del frente de flujo es de 103.33 mm en la experimentación, mientras que, en la simulación la medición es de 105.41 mm. Además en la figura 80d, se observa que el flujo de resina llega al borde superior e inferior cuando el tiempo es de 640 s tanto en la experimentación como en la simulación del proceso.



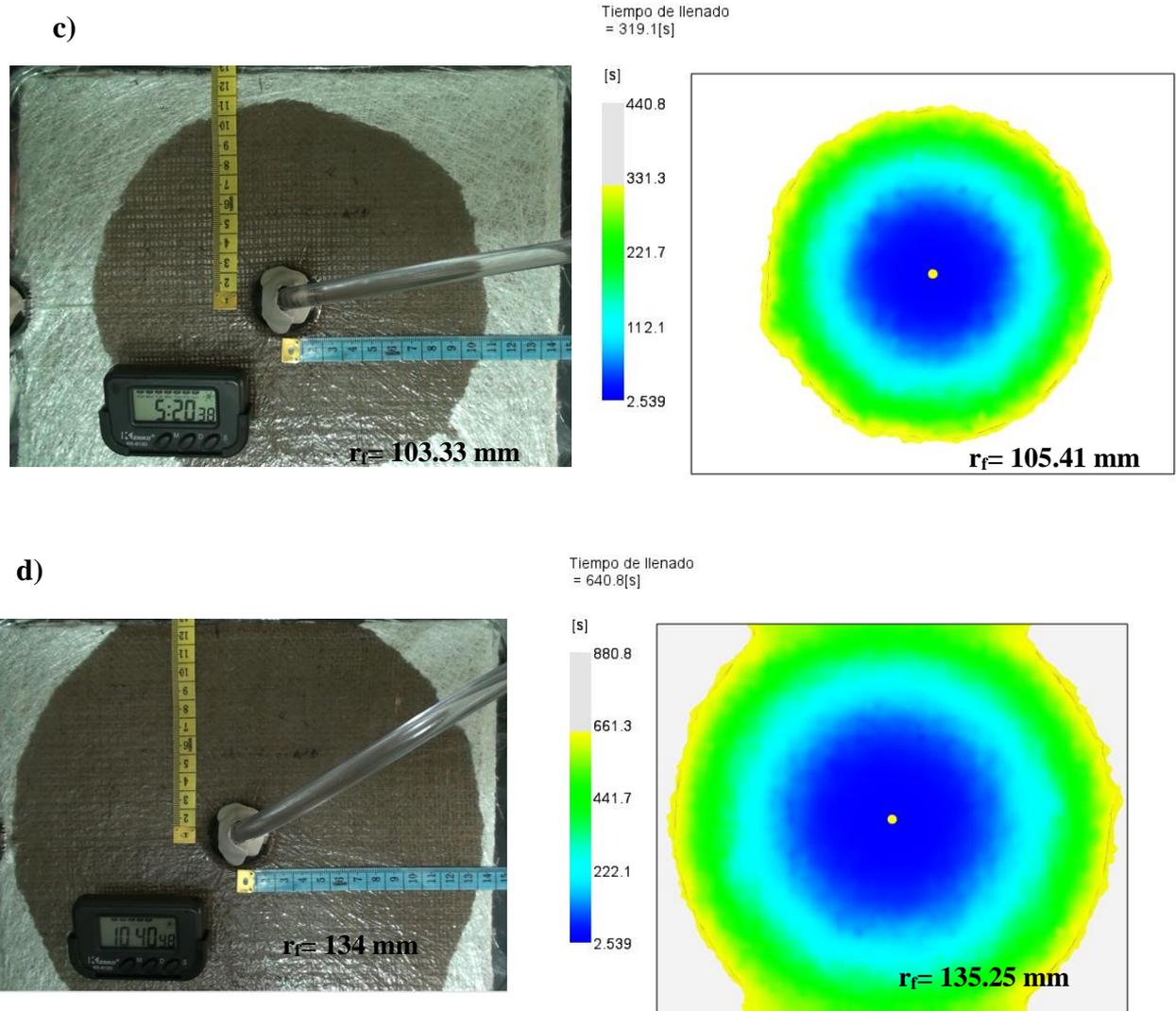


Figura 80. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para el material híbrido. a) $t=20 \text{ s}$, b) $t=80 \text{ s}$, c) $t=320 \text{ s}$, d) $t=640 \text{ s}$.

La tabla 34 indica el cálculo de error obtenido, en cada tiempo de análisis para cada una de las fibras utilizadas durante la simulación y experimentación del proceso. En el material híbrido se puede observar que el error entre la simulación y la experimentación es menor que en las fibras de vidrio y cabuya.

Tabla 34

Error entre la simulación y experimentación del proceso VARTM en la fibra de Vidrio Chopped Strand Mat, Cabuya Tejida y el Material Híbrido

Tiempo (s)	Vidrio Choped Strand Mat			Cabuya tejida			Material Híbrido		
	r_{exp} (mm)	r_{sim} (mm)	Error (%)	r_{exp} (mm)	r_{sim} (mm)	Error (%)	r_{exp} (mm)	r_{sim} (mm)	Error (%)
20	39.67	34.15	13.91	34	29.88	12.12	34	37.45	10.15
80	63.67	55.57	12.72	57.33	52.62	8.22	60.67	63.80	5.16
320	95	90.35	4.89	97.33	92.88	4.57	103.33	105.41	2.01
640	121	126.31	4.39	127	130.6	2.83	134	135.25	0.93

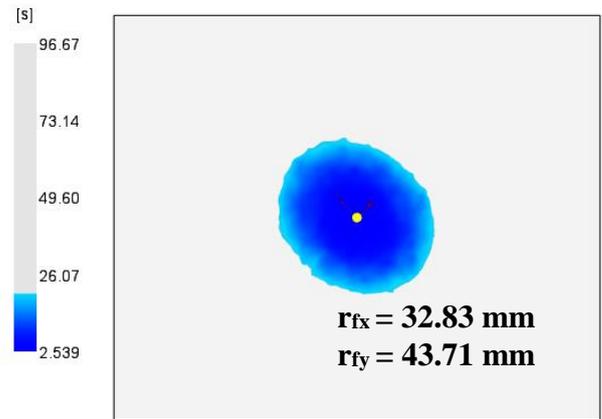
Cuando se utiliza la malla de distribución y el *peel ply* sobre el material híbrido, el avance del frente de flujo de resina se vuelve elíptico. En la figura 81 se observa la comparación entre la experimentación del proceso y la simulación del proceso. Los datos obtenidos de la simulación son aceptables al compararlos con la experimentación del proceso. Además, se identifican 2 direcciones de avance de resina. La dirección principal es la que permite que la resina fluya a una mayor velocidad. En la experimentación del proceso, esta dirección está ubicada a 45° medidos desde el eje “y”. Por otro lado, en la dirección secundaria, la resina fluye a una menor velocidad en comparación a la principal. Esta dirección se ubica a 45° medidos desde el eje “x”.

Al inicio del proceso, en la figura 81a, el avance de la resina en la dirección principal es mayor durante la experimentación que en la simulación. Este comportamiento se mantiene conforme avanza el tiempo de infusión. En la figura 81d, se puede notar que, durante la experimentación, el frente de flujo de resina ha impregnado gran parte del material híbrido con malla de distribución, mientras que en la simulación la impregnación es un poco más lenta. Además, la forma del frente del flujo se mantiene elíptica tanto para la experimentación como para la simulación del proceso.

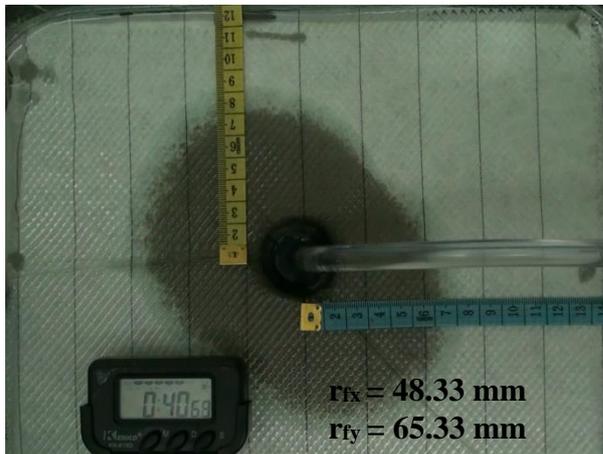
a)



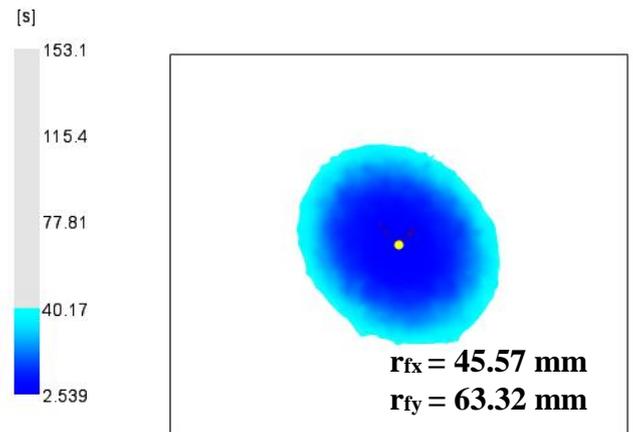
Tiempo de llenado = 20.19[s]



b)



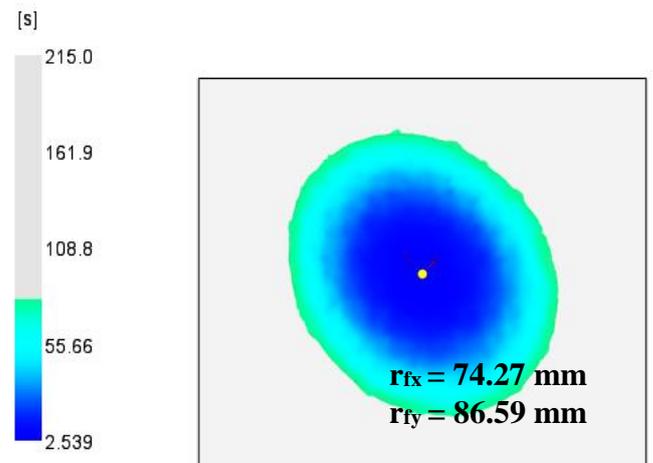
Tiempo de llenado = 40.17[s]



c)



Tiempo de llenado = 80.45[s]



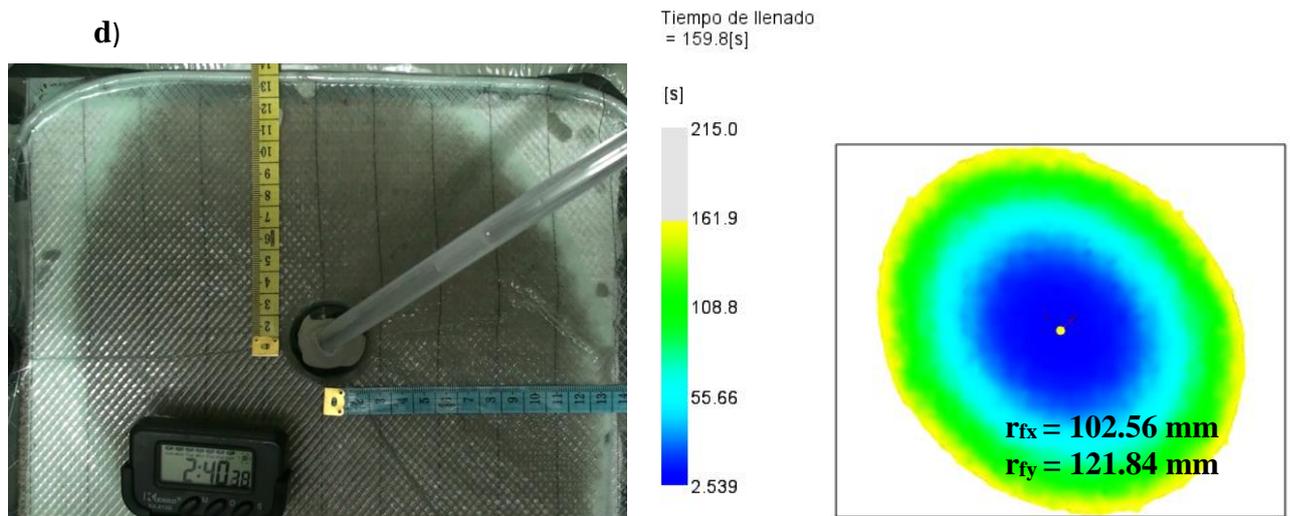


Figura 81. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para el material híbrido con peel ply y malla de distribución. a) $t=20$ s, b) $t=40$ s, c) $t=80$ s, d) $t=160$ s.

En la tabla 35 se detalla el cálculo del error para las dos direcciones de medición entre la simulación y la experimentación del proceso VARTM. Los errores entre la simulación y experimentación del proceso son elevados al inicio del proceso. Al avanzar el tiempo de infusión el error va disminuyendo, obteniendo una gran aceptación de los datos registrados durante la simulación del proceso.

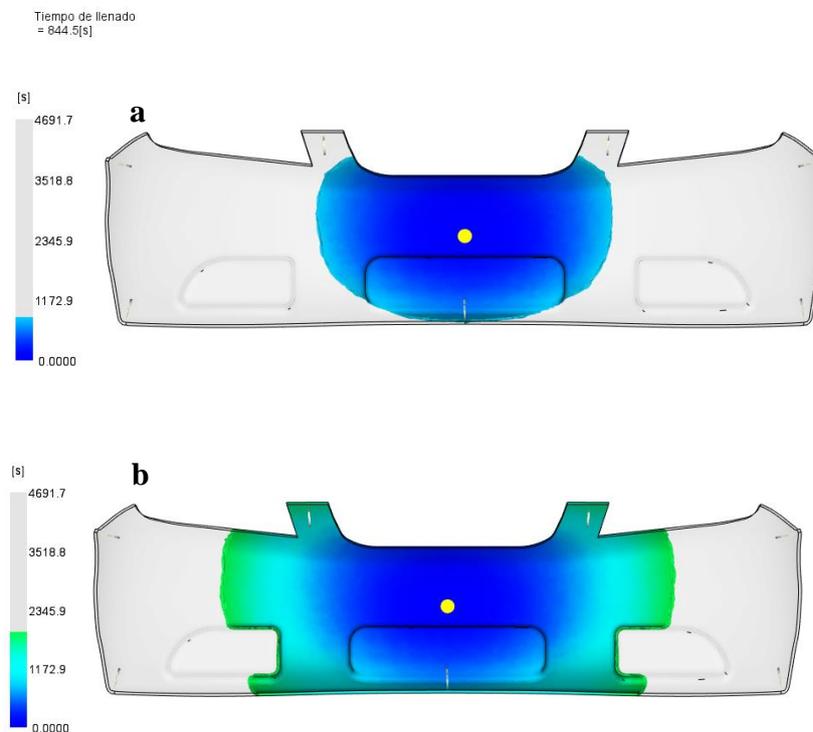
Tabla 35

Error entre la simulación y experimentación del proceso VARTM en el material híbrido con Peel Ply y malla de distribución.

Tiempo	Distancia secundaria			Distancia principal		
	r_{exp} (mm)	r_{sim} (mm)	Error (%)	r_{exp} (mm)	r_{sim} (mm)	Error (%)
20	35.67	32.83	7.96	46.33	43.71	5.65
40	48.33	45.57	5.71	65.33	63.32	3.08
80	76	74.27	2.27	88.67	86.59	2.35
160	104.33	102.56	1.70	123.67	121.84	1.48

Diseño y optimización del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque mediante la simulación.

Los datos de permeabilidad calculados y validados anteriormente, sirven para realizar la simulación del proceso VARTM en el llenado del molde del guardachoque. Siguiendo con el análisis de optimización se realizó la simulación del proceso VARTM para los 6 diseños propuestos. En la figura 82 se observa la evolución del avance del frente de flujo de resina para el diseño 1 en distintos porcentajes de llenado del molde. Para este diseño, el avance de flujo permanece uniforme a lo largo del tiempo que dura la infusión. Cuando el molde del guardachoque se ha llenado en un 25 %, como se indica en la figura 82a, la forma del frente de flujo de resina es elíptico. Sin embargo, cuando la resina alcanza los bordes superior e inferior del guardachoque, el avance del frente de flujo de resina se vuelve bidireccional. Este comportamiento se observa a partir del 50 % del llenado del molde, que corresponde a las figuras 82b, 82c y 82d.



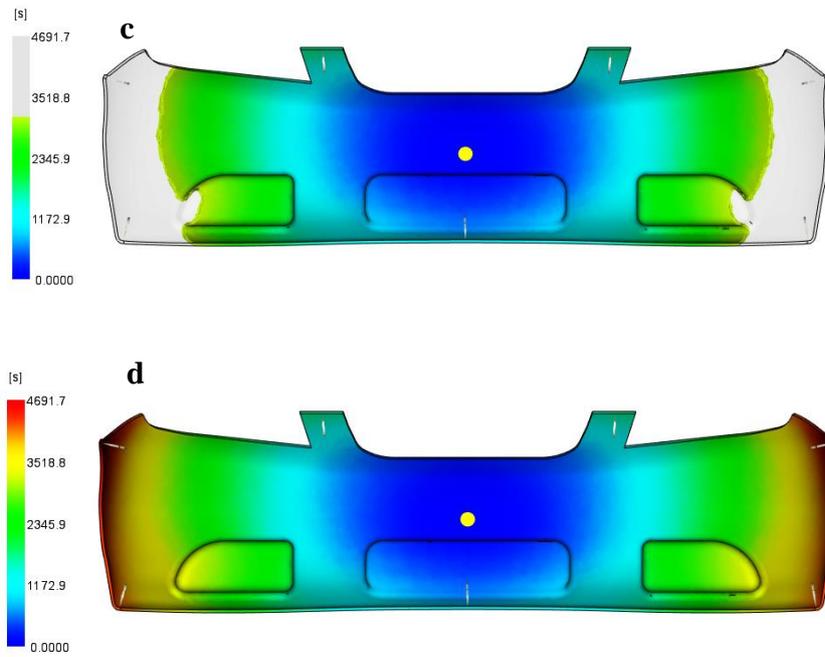
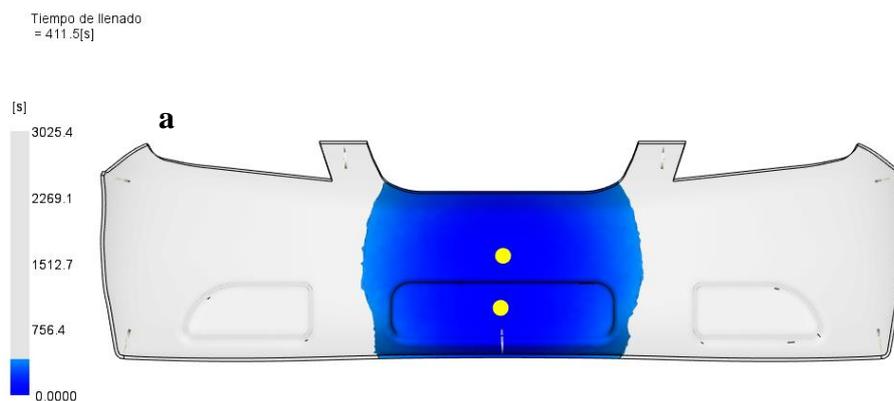


Figura 82. Simulación del avance del frente de flujo y tiempo de llenado para la opción 1 del diseño del proceso VARTM. a) 25 %, b) 50 %, c) 75 %, d) 100 %

Para el segundo diseño, la resina alcanza los bordes superior e inferior del molde rápidamente. La figura 83a indica que, a partir del 25 % del llenado del molde, la evolución del avance de resina es bidireccional. Además, en la figura 83b se observa que, el avance del flujo de resina se vuelve lento en la parte donde se ubican los faros en el molde del guardachoque.



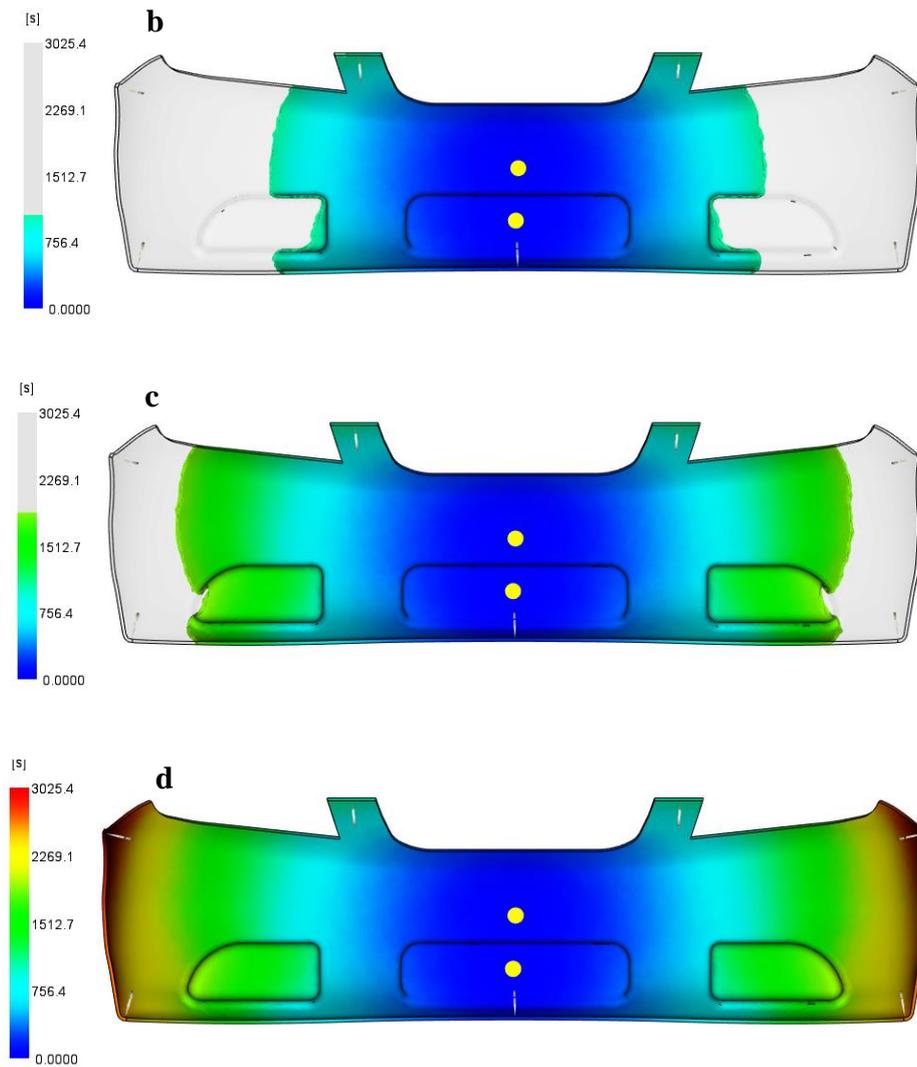


Figura 83. Simulación del avance del frente de flujo y tiempo de llenado para la opción 2 del diseño del proceso VARTM. a) 25 %, b) 50 %, c) 75 %, d) 100 %

En el tercer diseño, la figura 84a indica que, cuando se ha llenado el 25 % del molde del guardachoque, la resina no alcanza a impregnar el borde superior del mismo. Como los puntos de resina se ubican en la parte inferior del molde, la forma del frente de flujo de resina es una semicircunferencia. Cuando se llena el 50 % del molde del guardachoque, la resina no ha logrado impregnar los bordes superiores, esto se puede observar en la figura 84b. En los diseños anteriores, para el 50% del llenado del molde estos bordes son impregnados en su totalidad.

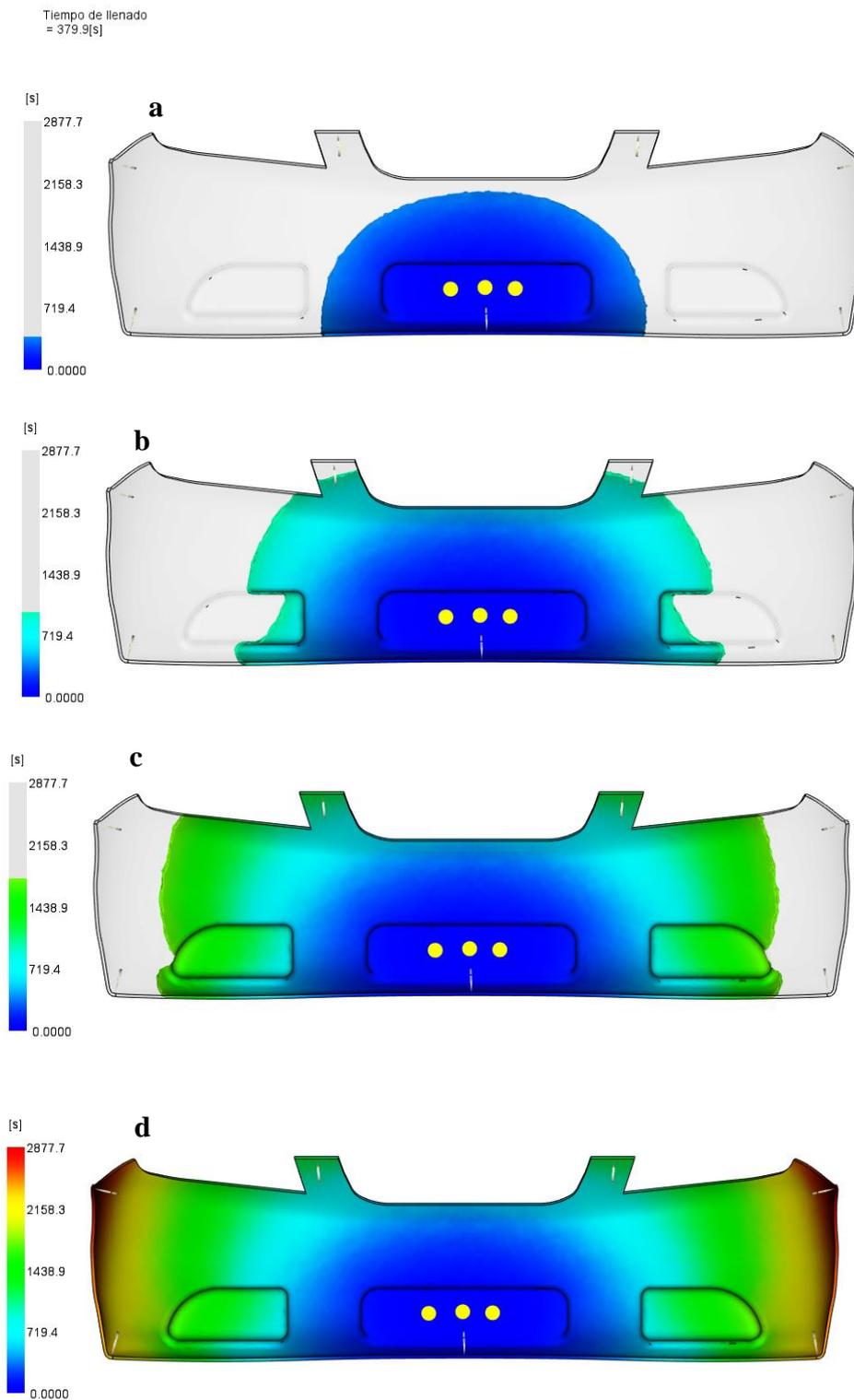


Figura 84. Simulación del avance del frente de flujo y tiempo de llenado para la opción 3 del diseño del proceso VARTM. a) 25 %, b) 50 %, c) 75 %, d) 100 %

Para el diseño 4, el mismo que se indica en la figura 85; el tiempo de llenado es inferior a los diseños anteriores. La forma del frente de flujo es elíptica como en la figura 85a.

Por el contrario, cuando la resina alcanza los bordes superior e inferior, la evolución del frente de flujo es bidireccional. Este comportamiento se indica en las figuras 85b, 85c y 85d.

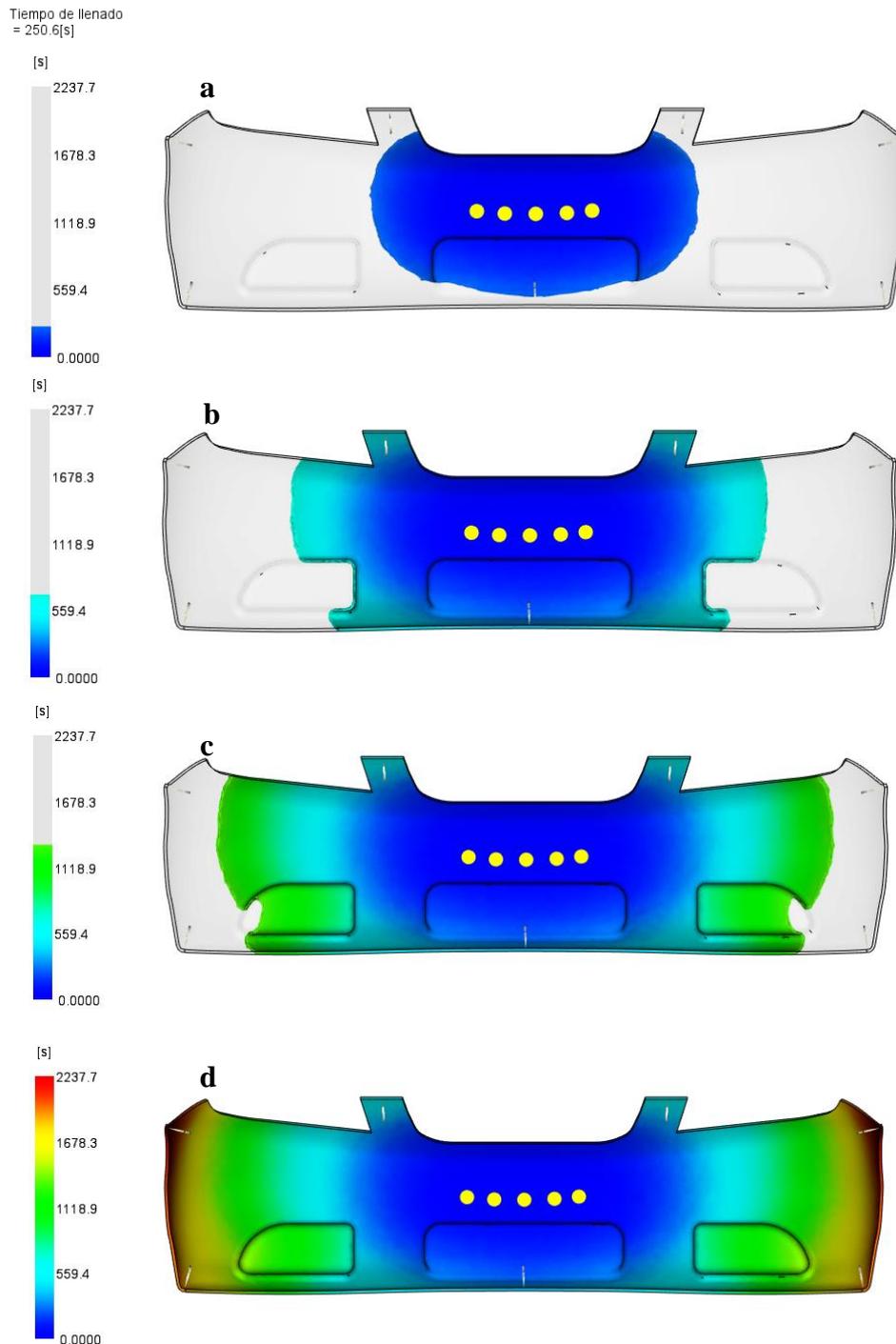


Figura 85. Simulación del avance del frente de flujo y tiempo de llenado para la opción 4 del diseño del proceso VARTM. a) 25 %, b) 50 %, c) 75 %, d) 100 %

En el diseño 4, el avance del frente de flujo de resina se indica en la figura 86. Los puntos de resina se ubican a lo largo del eje central del molde. El 25 % del llenado del molde del guardachoque se da como en la figura 86a, el mismo que difiere de los diseños anteriores.

Conforme avanza el tiempo de infusión la evolución del frente de flujo de resina difiere de los diseños anteriores, ya que la resina avanza rápidamente por el eje central del molde. Este comportamiento se indica en las figuras 86b, 86c y 86d.

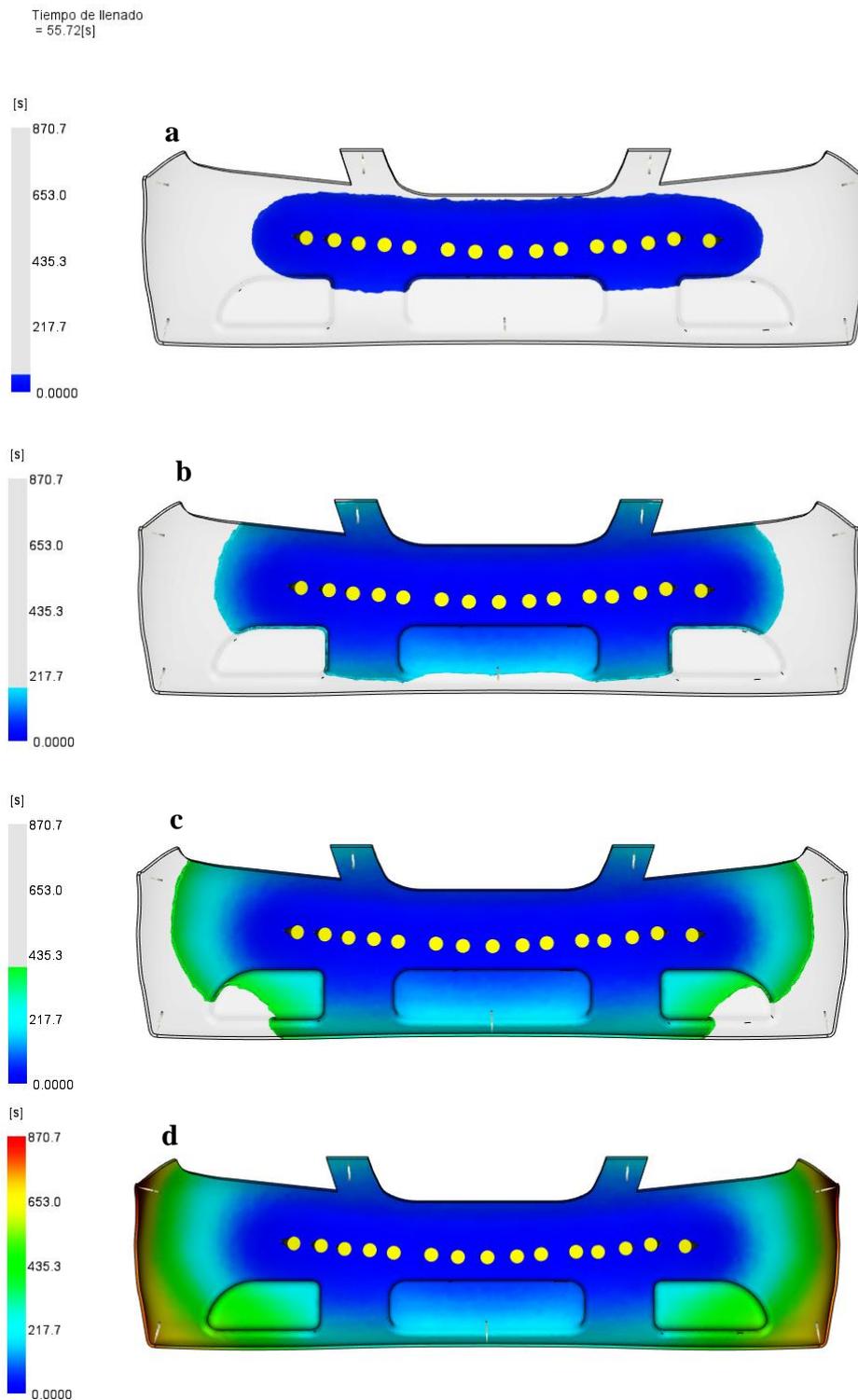
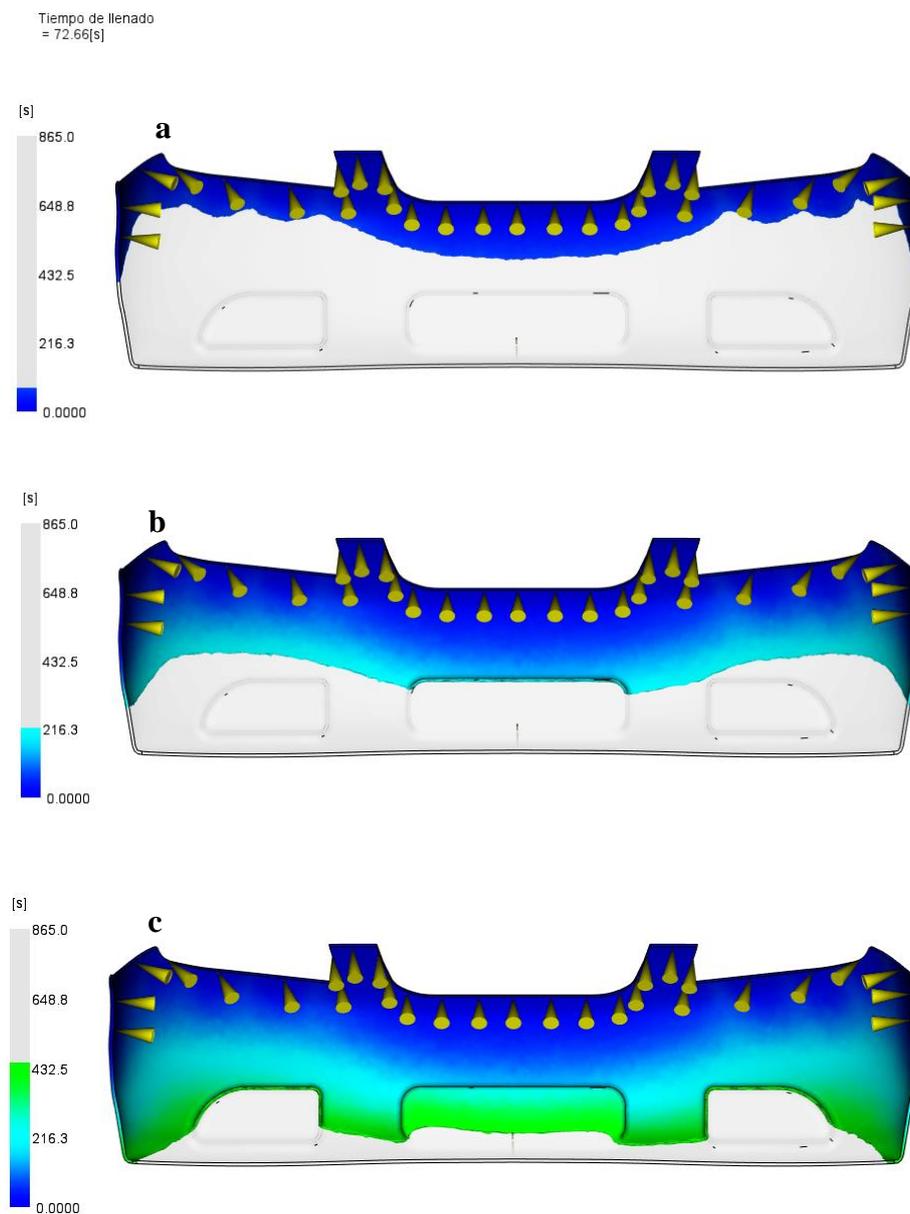


Figura 86. Simulación del avance del frente de flujo y tiempo de llenado para la opción 5 del diseño del proceso VARTM. a) 25 %, b) 50 %, c) 75 %, d) 100 %

El diseño 6, se propone con el fin de obtener un flujo de resina unidireccional, desde la parte superior hacia la inferior del molde; como se indica en la figura 87. La forma del frente de flujo de resina, para el llenado del 25 % del molde se indica en la figura 87a. Esta evolución difiere de los anteriores diseños, debido a la disposición de los puntos de entrada de resina. En las figuras 87c y 87d se observa que, las regiones donde se ubican los faros en el guardachoque, son las últimas en impregnarse de resina.



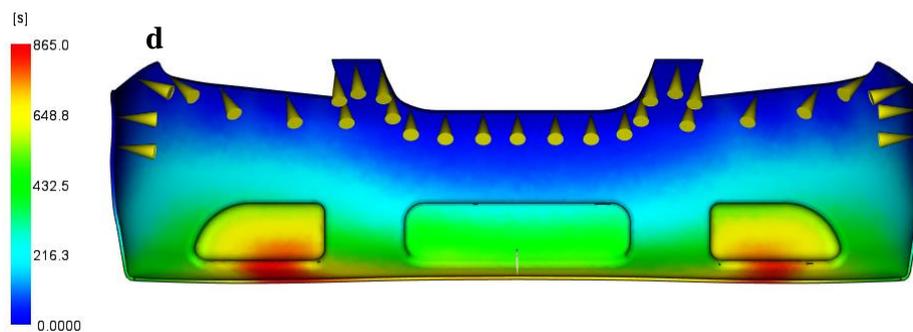


Figura 87. Simulación del avance del frente de flujo y tiempo de llenado para la opción 6 del diseño del proceso VARTM. a) 25 %, b) 50 %, c) 75 %, d) 100 %

Los tiempos de llenado para cada una de las opciones antes descritas se detallan en la tabla 36, los mismos que se obtuvieron directamente de las simulaciones del proceso y sirven como referencia para escoger la posición de puntos de entrada de resina y extracción de vacío óptimos en la fabricación del prototipo de guardachoque. De la tabla, se determina que, los diseños 5 y 6 son los que menor tiempo emplean para el llenado del molde del guardachoque. En el diseño 5, con varios puntos de entrada de resina ubicados en el eje central del molde y 7 puntos de vacío dispuestos en los extremos del molde, se necesitan 870.7 s para el llenado total del molde del guardachoque; mientras que el diseño 6, el mismo que consiste en varios puntos de entrada de resina ubicados a lo largo del borde superior del molde y un punto de vacío ubicado en la parte inferior del molde, se necesitan 865 s para el llenado total.

Tabla 36

Análisis del tiempo de llenado y frente de flujo

Diseño	Tiempo de llenado (s)	Sector crítico	Tipo de frente de flujo
1	4691.7	Extremos laterales	Elíptico
2	3025.4	Extremos laterales	Elíptico
3	2877	Extremos laterales	Semicircunferencia
4	2237.7	Extremos laterales	Elíptico
5	870.7	Extremos laterales	Elíptico
6	865	Inferior faros	Unidireccional

Validación de la simulación del llenado y Fabricación del prototipo del Guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.

Fabricación del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.

Para la fabricación del prototipo del guardachoque mediante el proceso VARTM, primeramente, se fabrica el molde del mismo. En la figura 88 se indica el molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo fabricado mediante *Hand Lay up*.



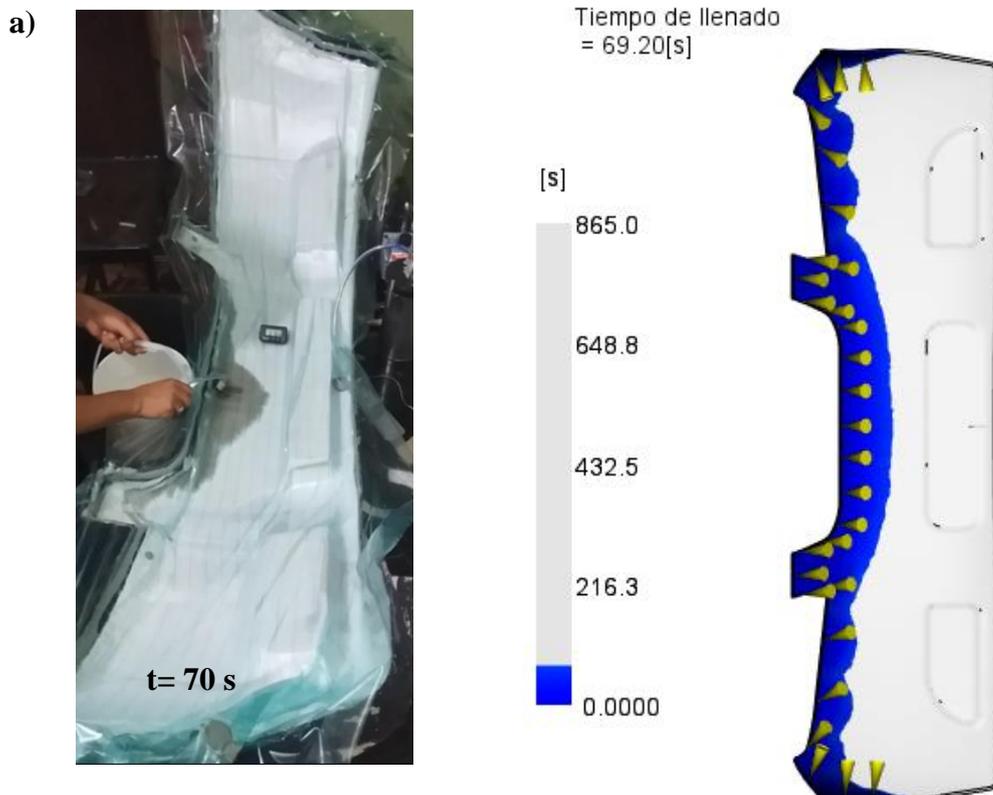
Figura 88. Molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo. a) Vista superficial externa, b) Vista superficial interna.

Validación de la simulación del llenado del molde del guardachoque con la experimentación del proceso VARTM.

De las simulaciones del proceso VARTM para los diseños antes determinados, se escoge el diseño 6, el mismo que posee el tiempo de llenado menor (865 s). En la figura 89 se compara la experimentación del proceso VARTM según el diseño 6, para la fabricación del prototipo y su respectiva simulación. El inicio del proceso se indica en la figura 89a, donde para la experimentación del proceso, se observa un avance rápido de la resina en el punto

donde se realiza la inyección, mientras que en la simulación esto no sucede. Cabe recordar que, en la experimentación del proceso se utilizó una manguera espiral conectada al punto donde se realiza la inyección. Esta manguera sirve para representar los múltiples puntos de inyección dispuestos en la simulación. Conforme avanza el tiempo de infusión, como en la figura 89b, los datos de la simulación son aceptables al compararlos con la experimentación del proceso. En la figura 89c, se observa que la impregnación de la resina se vuelve lenta en la región donde se ubican los faros tanto para la experimentación como en la simulación del proceso.

El final del proceso se indica en la figura 89d. En la simulación, se necesitan 865 s para el llenado total del molde, mientras que en la experimentación se requieren 1180 s. Por tal razón existe un aumento del 36.42 % en el tiempo de llenado del molde para la experimentación del proceso. En conclusión, la evolución del avance del frente de flujo de resina en la experimentación es aceptable al compararlo con la simulación del proceso.



b)



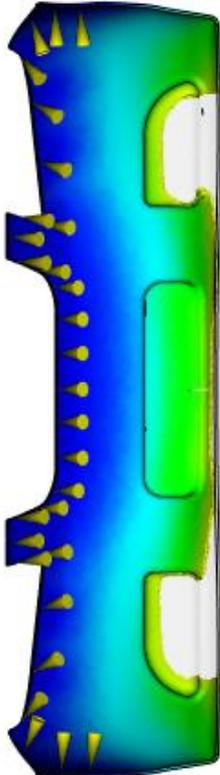
Tiempo de llenado = 159.2[s]



c)



Tiempo de llenado = 599.8[s]



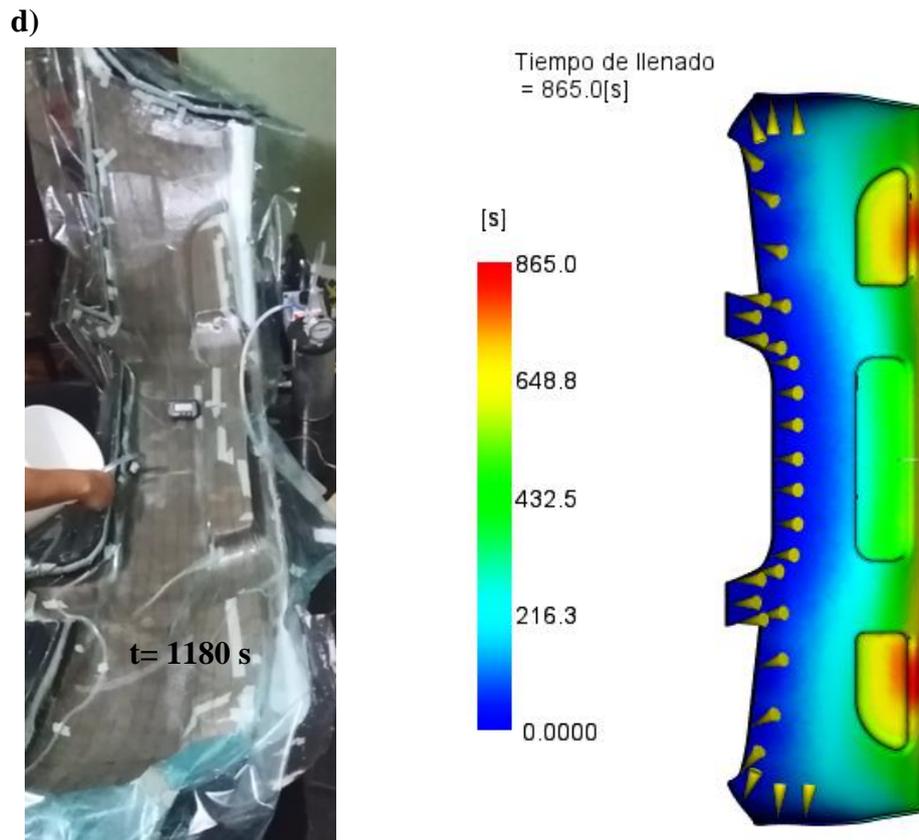


Figura 89. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo.

Desmoldeo del prototipo del Guardachoque obtenido mediante VARTM

Para realizar el desmoldeo de la pieza, se deja curar la pieza 24 horas. El agente químico colocado inicialmente, ayuda al desmoldeo de la pieza. En la figura 90 se indica la vista frontal del prototipo del guardachoque obtenido mediante VARTM. Al realizar un análisis visual de la pieza, se destaca que existen zonas ricas en resinas debido a una disposición no adecuada de las fibras en el molde. Además, existen burbujas de aire ubicados a lo largo de la superficie del guardachoque. La resina epóxica permite un brillo y una transparencia aceptable para el prototipo.



Figura 90. Vista frontal del prototipo de guardachoque obtenido mediante VARTM

En la figura 91, se observan las vistas laterales del prototipo. Al analizarlas de forma visual, se determina que las curvaturas obtenidas para el prototipo son aceptables. Además, se logró reproducir de forma aceptable los detalles de los faros, rejillas y extremos del guardachoque, por ende, la presión de compactación de las fibras fue correcta en el proceso.



Figura 91. Vistas laterales del prototipo de guardachoque obtenido mediante VARTM. a) Izquierda, b) Derecha

Análisis y Discusión de Resultados

Caracterización de la permeabilidad.

En la caracterización de la permeabilidad, se observa que, para todos los tipos de fibras, el avance del frente de flujo de resina calculado, guarda relación con las gráficas presentadas por otros autores citados en este proyecto. En la figura 92 se observa que, al inicio de la infusión, la posición del frente de flujo de resina es mayor en la fibra de vidrio. Por otro lado, al final de la infusión, es decir cuando $t=800$ s, la posición del frente de flujo de resina es mayor en el material híbrido, lo que determina que, la velocidad de flujo de la resina y la permeabilidad sea mayor en éste material, que en las fibras de vidrio y cabuya analizadas individualmente.

Puede parecer contradictorio que la resina fluya con mayor rapidez sobre el material híbrido, ya que posee mayor número de capas y debería existir mayor resistencia al flujo. En la investigación presentada por Li et al., (2015) manifiestan que la adición de tela de yute (fibra vegetal), en un material híbrido combinado con tela de ramio, reduce los tiempos de infusión entre un 13 % y 30%. En esta investigación al combinar la fibra de cabuya con la fibra de vidrio, en una relación del 20 % y 40 % respectivamente, se logra una reducción del tiempo de infusión del 20.48 % con respecto a la fibra de vidrio y del 10.4 % con respecto a la fibra de cabuya.

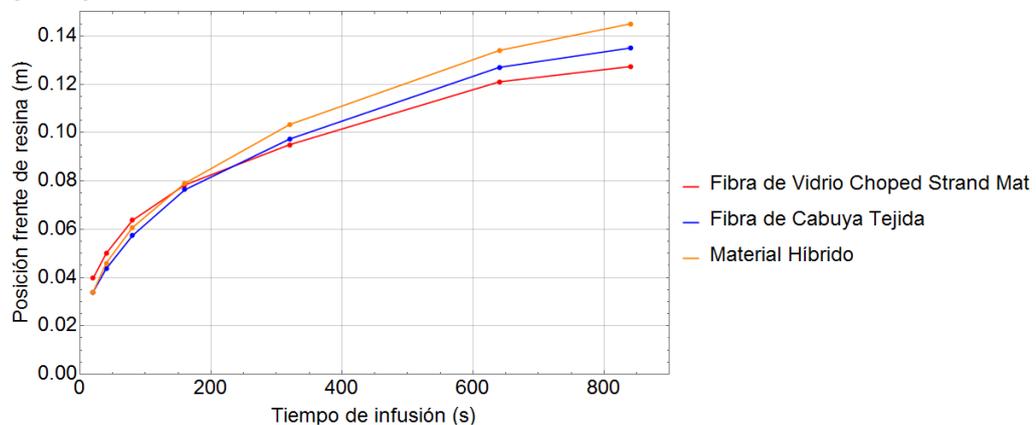


Figura 92. Comparación de las posiciones del frente de flujo de resina, determinadas de forma experimental, para las fibras de vidrio, cabuya y material híbrido.

Además, en la figura 92 se observa que el avance del frente de flujo de resina es mayor para la fibra de cabuya que para la de vidrio. Por tal razón la permeabilidad también es mayor, donde $K = 8.5765 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ para la fibra de cabuya tejida y $K = 7.3628 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ para la fibra de vidrio *Choped Strand Mat*. Este dato concuerda también, con el estudio de Li et al., (2015), que manifiestan una elevada permeabilidad de las fibras vegetales sobre las fibras de vidrio, debido a la estructura de múltiples escalas de la fibra vegetal y a una elevada porosidad proporcionando más canales de flujo de resina.

Otro fenómeno que se presentó al momento de la caracterización de la permeabilidad, son las formas irregulares del frente de flujo de resina para 1 capa de fibra de vidrio *Choped Strand Mat*, mientras que, para el material híbrido, las formas fueron más simétricas. En la investigación presentada por Comas-Cardona et al. (2011) se explica que, éste fenómeno se da por una distribución inconsistente de la masa de fibra en 1 capa de fibra de vidrio *Choped Strand Mat*, dando como lugar a frentes de flujo irregulares y asimetría, que pueden afectar la medición de la posición del frente de flujo de resina y por ende la permeabilidad. Al aumentar el número de capas los frentes de flujo se suavizan, logrando una mayor isotropía de las fibras (Comas-Cardona y otros, 2011). Éste comportamiento explicado por los autores antes citados, concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación. En la figura 93 se muestran las formas del frente de flujo que se obtuvieron en el estudio de Comas-Cardona et al. (2011). Mientras que, en la figura 94a se observa el frente de flujo irregular que se obtuvo en esta investigación, al utilizar 1 capa de fibra de vidrio, por otro lado, en la figura 94b se observa un frente de flujo de resina más homogéneo y circular para el material híbrido (3 capas).

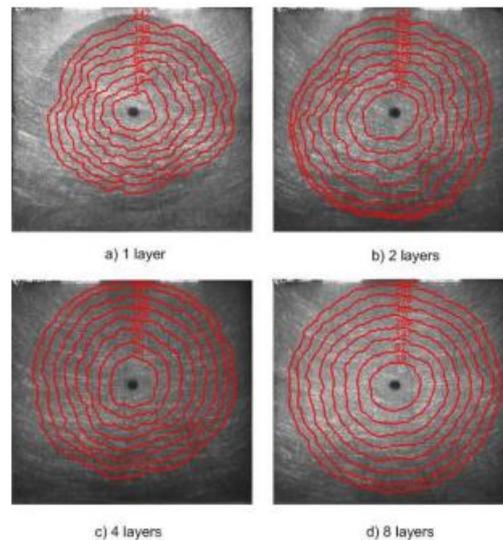


Figura 93. Caracterización de la permeabilidad sobre la fibra de vidrio *Choped Strand Mat* para distinto número de capas. a) 1, b) 2, c) 3, d) 4 (Comas-Cardona, y otros, 2011).

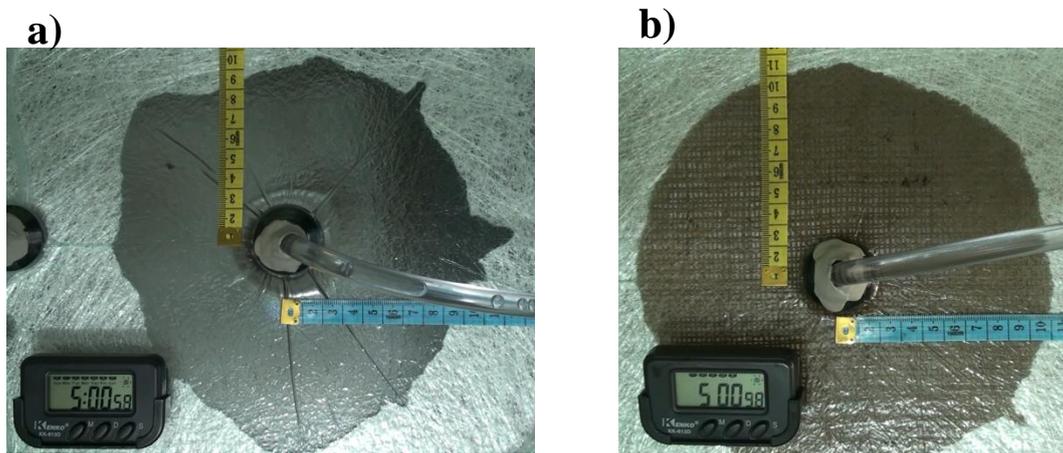


Figura 94. Efecto del número de capas sobre la forma del frente de flujo de resina. a) 1 Capa de fibra de vidrio *Choped Strand Mat*, b) Material híbrido (3 capas).

Al analizar la forma de los frentes de flujo de resina, para las fibras utilizadas en esta investigación, se determina que las fibras utilizadas, son materiales isotrópicos ya que la forma del frente de flujo es circular. Por el contrario, al utilizar la malla de distribución y el *peel ply* sobre el material híbrido, la forma del frente de flujo cambia y se vuelve elíptica a 45° del eje “y”. Esto quiere decir que, con la inclusión de las mallas antes descritas, el material se vuelve anisotrópico. En el estudio presentado por Sharma y Siginer (2010), se detalla la forma del frente de flujo de resina para materiales anisotrópicos cuando se utiliza el método de inyección radial. En la figura 94a se indica la forma elíptica analizada en el estudio anterior,

mientras que en la 95b se indica la que se obtuvo en este estudio. La permeabilidad mayor se denota con K11 y la menor con K22.

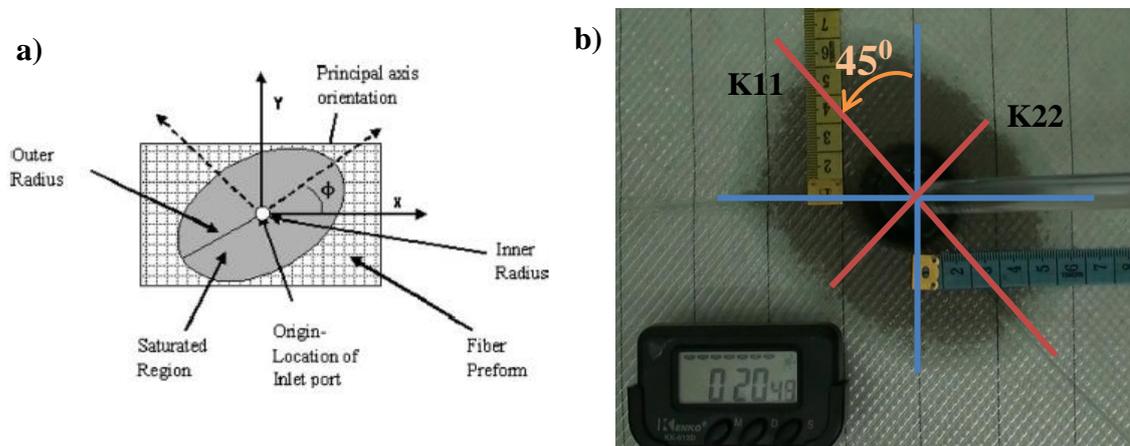


Figura 95. Forma del frente de flujo para materiales anisotrópicos. a) Sharma y Siginer (2010); b) Jiménez, D (2017)

Para la impregnación total de la muestra del material híbrido de 275 mm x 230 mm se necesitó un tiempo promedio de 1320 s, mientras que al utilizar la malla de distribución con el *peel ply* se necesitan 470 s. Por tal razón, la malla de distribución y el *peel ply*, permiten una disminución del tiempo de infusión del 64,4 %. Este dato guarda relación con el estudio realizado por Sun et al., (1998) donde, para 2 capas de fibra de vidrio tipo mat, realizan la infusión a una muestra de 810 mm x 110 mm en un tiempo de 750 s utilizando inyección lineal, mientras que, al utilizar *peel ply* y la malla de distribución, necesitan 105 s, es decir logran disminuir el tiempo de infusión en un 86 %.

Ésta disminución del tiempo de llenado para la muestra del material híbrido, se ve reflejada en los valores de la posición del frente de flujo de resina y en el cálculo de la permeabilidad. En la figura 96 se observa que al utilizar la malla de distribución y el *peel ply*, la posición del frente de resina es mayor para un tiempo determinado, lo que se traduce en un valor alto de permeabilidad.

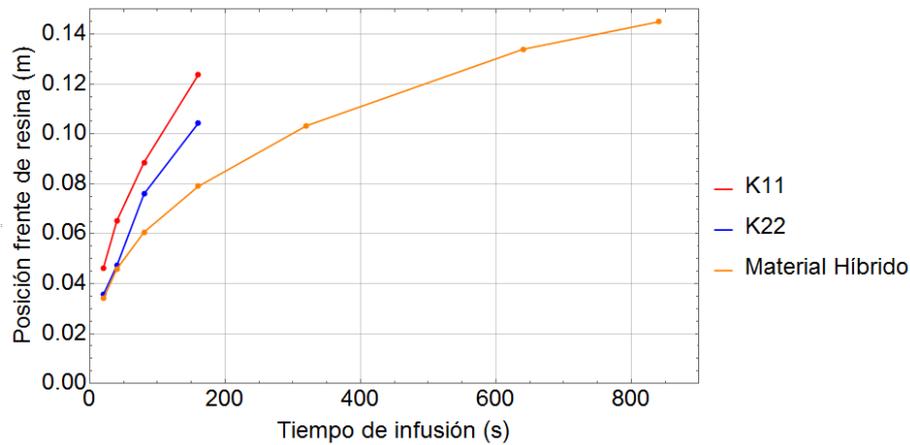


Figura 96. Comparación del avance del frente de flujo de resina con y sin malla de distribución conjuntamente con *peel ply*.

Cabe recalcar que, en este estudio, el valor de permeabilidad determinado para la fibra de vidrio ($K= 7.3628 \times 10^{-11} \text{ m}^2$), difiere del de otras investigaciones, como por ejemplo Comas-Cardona et al. (2011) donde $K= 2.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Esto se da porque, según Mejía (2013), los tipos de resina que se utilizan para la experimentación difieren entre sí, Comas-Cardona et al. (2011) utiliza resina Vinyl éster, mientras que en esta investigación se utilizó resina epoxy IN2. Además, se debe tomar en cuenta las condiciones en las que se realiza la experimentación, como: presión de inyección y porosidad, ya que según la ecuación 9, éstas influyen en el cálculo de la permeabilidad.

Validación del método experimental aplicado en la caracterización de la permeabilidad

Para los 4 tipos de muestras, se analizan los errores entre el análisis numérico realizado mediante el *software Autodesk Moldflow* y la experimentación del proceso, así como también la forma del frente de flujo. La figura 97 indica un buen acorde entre los datos de simulación y experimentación. En la simulación del proceso VARTM, para 1 capa de fibra de vidrio, los errores son mayores en comparación con la experimentación. Esto se da, por las irregularidades de la forma del frente de flujo de resina durante la experimentación, que causan gran dispersión en las mediciones de la posición de resina. Al inicio del proceso, los

errores de la simulación para la fibra de vidrio, cabuya y el material híbrido, proceso son del 13.91 %, 12.12 % y 10.15 % respectivamente. Por otro lado, conforme avanza el tiempo de infusión, el error disminuye. Para este estudio, cuando el tiempo de infusión es de 640 s, los errores en la simulación para la fibra de vidrio, cabuya y material híbrido son de 4.39 %, 2.83% y 0.93% respectivamente.

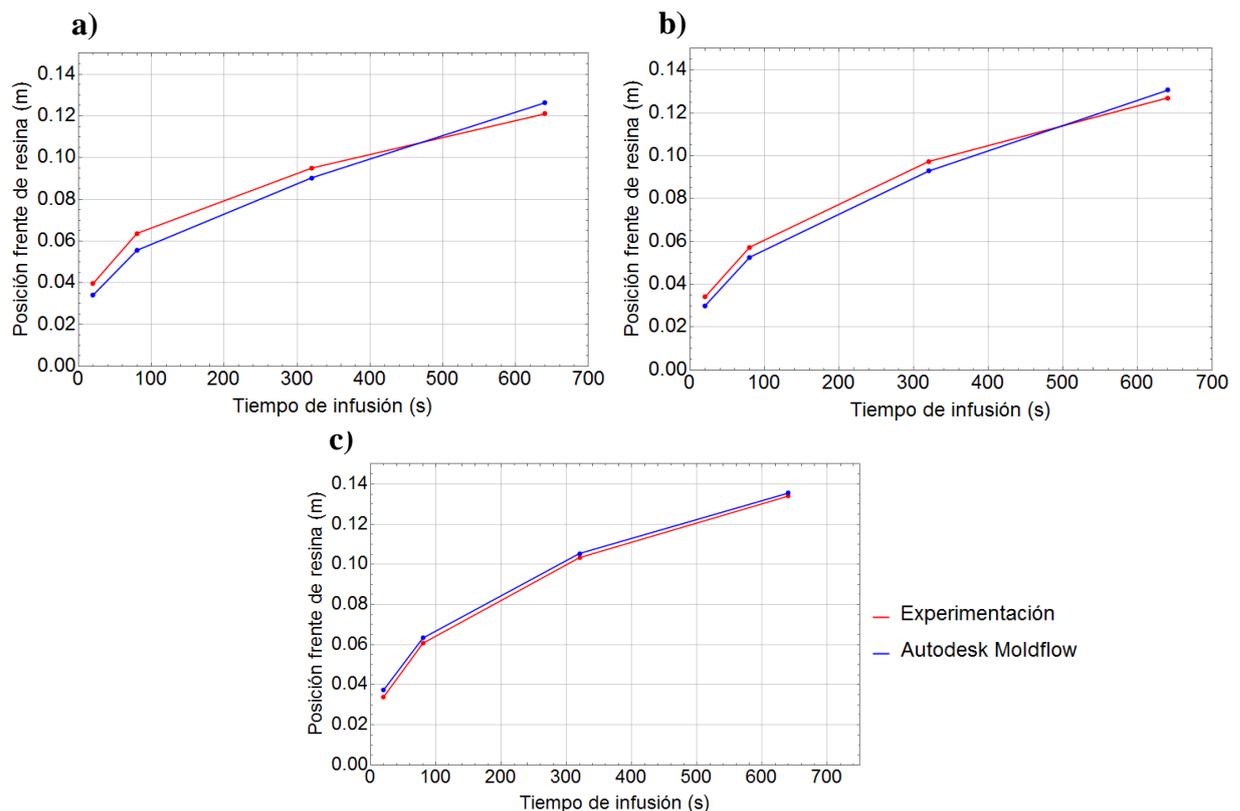


Figura 97. Comparación del avance del frente de flujo de resina entre la experimentación y la simulación numérica. a) Fibra de Vidrio *Choped Strand Mat*, b) Fibra de Cabuya, c) Material Híbrido.

Los datos de la simulación del proceso VARTM para el material híbrido con la malla de distribución y el *peel ply*, se muestran en la figura 98 y están acorde a la experimentación del proceso. Aquí los errores que se obtuvieron al inicio del proceso fueron del 5.65 % para la dirección en principal y del 7.96 % para la dirección secundaria; por otro lado, al final del proceso, los errores son del 1.48 % y del 1.70 % respectivamente.

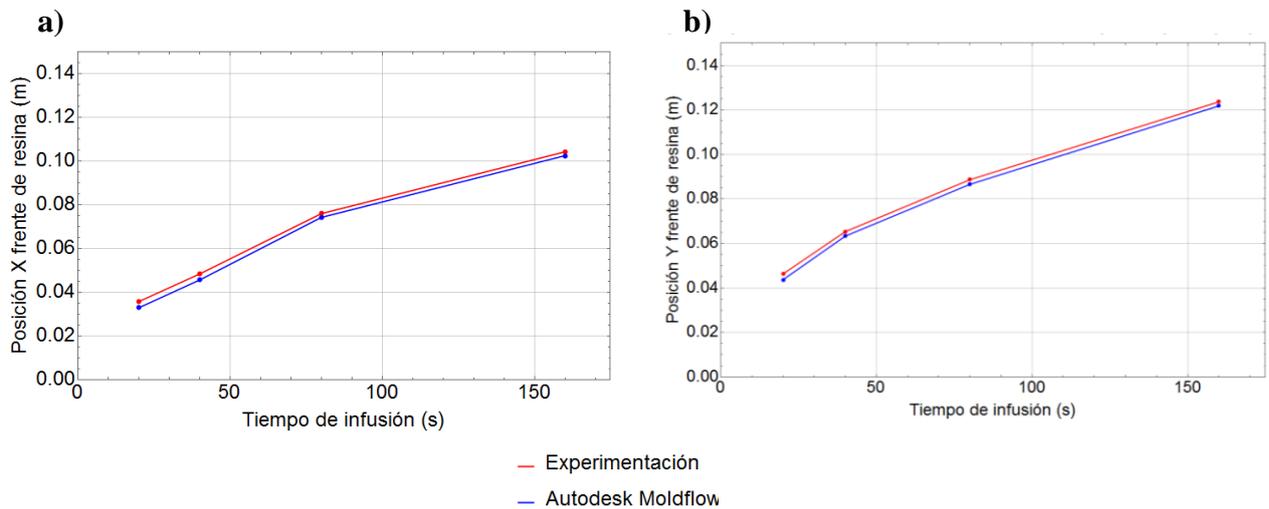


Figura 98. Comparación del avance del frente de resina entre la experimentación y la simulación numérica para el Material Híbrido con malla de distribución y *peel ply*. a) Dirección x, b) Dirección y

En el estudio realizado por Oliveira et al. (2012) realizan la comparación entre la experimentación del proceso RTM, con la simulación en *Fluent* y *PAM-RTM*. Los resultados de éstos se indican en la figura 99 y guardan relación con los obtenidos en esta investigación. Se puede observar que al inicio del proceso, el error entre la experimentación y los datos de la simulaciones son elevados, pero al final del proceso el error va disminuyendo.

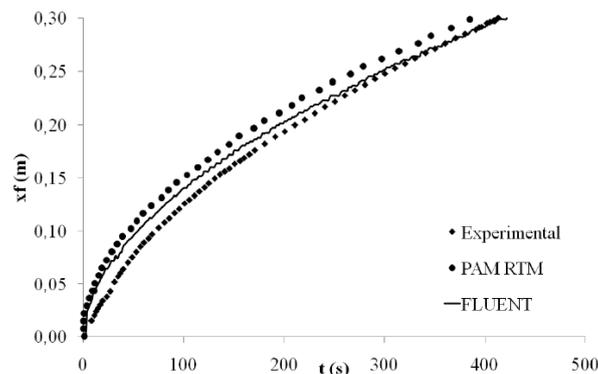


Figura 99. Comparación del avance del frente de resina entre la experimentación y las simulaciones numéricas (Oliveira et al., 2012).

Además los autores resaltan que, la concordancia exitosa de los resultados experimentales con las simulaciones numéricas, se debe a la consideración de la variación de presión al inicio del flujo por parte de los *software's* encargados de la simulación. El software *Autodesk Moldflow* también toma ésta consideración, razón por la cual los datos determinados

son aceptables. En la figura 100 se observa la variación de la presión al inicio de la inyección por parte de Oliveira et al. (2012) y el resultado obtenido en esta investigación mediante *Autodesk Moldflow*.

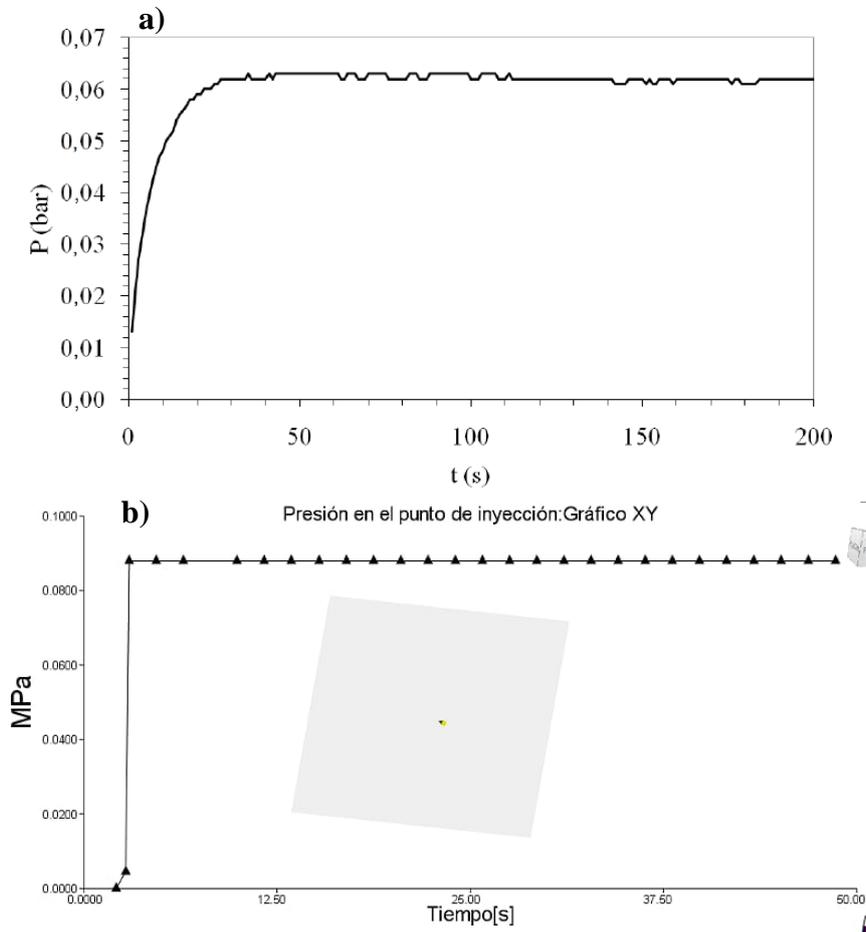


Figura 100. Variación de presión al inicio de la inyección. a) Oliveira et al. (2012), b) *Autodesk Moldflow*.

Diseño y optimización del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque mediante la simulación

Con los datos que se obtuvieron mediante las simulaciones de las distintas opciones, se determina que, para optimizar el tiempo de llenado se debe disponer de varios de puntos de entrada de resina. En la figura 101 se observa que, para el diseño 1; donde su único punto de entrada de resina se ubica en la parte central del molde del guardachoque, el tiempo de infusión es de 4691.7 s. Al ir aumentando los puntos de entrada de resina, como en el diseño

5, los mismos que se encuentran a lo largo del eje central del guardachoque, el tiempo de infusión es de 870 s, lo que se traduce en una reducción del 81.4 % en el tiempo de infusión con respecto al diseño 1. En el estudio de Ruikui et al. (2013), donde se realiza la simulación de flujo y optimización del proceso VARTM para la fabricación de un guardachoque, se obtiene una reducción del 79.8 % en el tiempo de infusión, al aumentar los puntos de entrada de resina a lo largo del eje central del guardachoque.

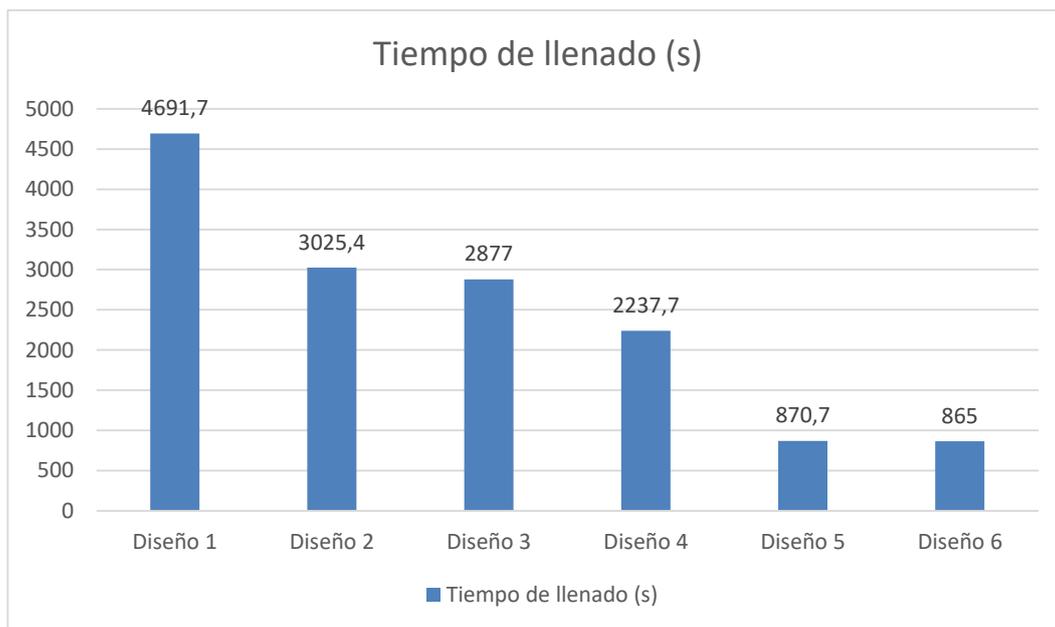


Figura 101. Comparación del tiempo de llenado para los diseños propuestos

Con el fin de optimizar recursos y tiempo para el proceso de llenado del molde del guardachoque, se plantea la opción 6. En esta opción, existe un único punto de vacío ubicado en la parte inferior central; mientras que, los puntos de entrada de resina se ubican en el borde superior del guardachoque del molde. Con ésta disposición, la resina fluye una menor distancia, desde la parte superior a la inferior del molde del guardachoque. El tiempo requerido para un llenado total del molde es de 865 s y la forma del frente de flujo de resina es unidireccional y uniforme. Por otro lado, en el estudio de optimización presentado por Ruikui et al. (2013) se dispusieron distintos frentes de flujo de resina, los mismos que al encontrarse, ocasionan la formación de burbujas y puntos secos. Para evitar esto, los autores

disponen de más puntos de vacío, en los lugares donde se dan las intersecciones de los flujos de resina.

En este estudio, al disponer de un único punto de vacío, se optimizan los recursos para la aplicación del proceso. El hecho de disponer varios puntos de vacío como en las opciones 1-2-3-4-5, se traduce en tener que utilizar varias bombas de vacío o de disponer de un generador vacío eficiente para satisfacer la demanda de vacío. Finalmente la opción 6 permite una reducción del 81.56 % en el tiempo de infusión con respecto a la opción 1.

Validación de la simulación numérica con la experimentación del proceso.

La figura 102 compara el tiempo de infusión entre la experimentación y simulación del proceso VARTM en la fabricación del prototipo para diferentes porcentajes de llenado del molde. El tiempo de llenado del molde del guardachoque determinado por la simulación es de 865 s, sin embargo, en la experimentación del proceso, el tiempo fue de 1180 s, lo que se traduce en un error del 36. 41%.

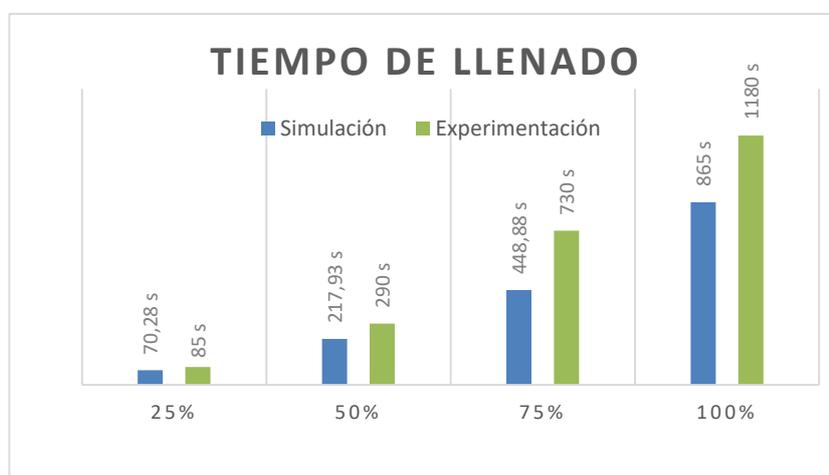


Figura 102. Comparación del tiempo de llenado entre la simulación y experimentación

Por otro lado, en la figura 88 se observó que, al inicio de la infusión, la forma del frente de flujo de resina en la experimentación difiere de la simulación, principalmente por el uso de la manguera espiral. Para la simulación, la inyección de resina es simultánea por los

distintos puntos de entrada, mientras que en la experimentación, la inyección en los bordes se hace conforme la resina fluye por el canal interno de la manguera espiral. Esto ocasiona que, en el punto central donde se realiza la experimentación la resina fluya con mayor rapidez, modificando la forma del frente de flujo de resina.

Después de haber empezado la infusión, el frente de flujo se estabiliza, y los datos de la simulación numérica guardan concordancia con los experimentales. Cuando el frente de flujo de resina central, alcanza el punto de vacío; se elimina una cierta cantidad de resina que no impregna las fibras colocadas en el molde. Esta es la principal razón, para que en la experimentación se necesite más tiempo de infusión que el determinado en la simulación numérica. Este análisis concuerda con el estudio realizado por Polowick (2013), donde compara la simulación realizada en el software LIMS con la experimentación del proceso VARTM para la fabricación de una escotilla de avión. El tiempo determinado en la simulación fue de 3385 s y en la experimentación fue de 5940 s.

En el proyecto presentado por Escriche et al. (2012) para realizar una base de un triciclo mediante VARTM, se establecieron algunas variaciones entre la simulación del proceso y la experimentación, debido a irregularidades que ocasiona la deformación de la bolsa de vacío. Ante todas las dificultades antes descritas, los autores citados destacan y reconocen la importancia de las simulaciones numéricas para los procesos de optimización.

Al momento de realizar el desmoldeo de la pieza, se observó un aumento del 15 % en la presión dentro de la bolsa de vacío, razón por la cual, el proceso de curado no se realizó a la presión correcta. Éste aumento de presión se dio debido a pequeñas fugas después del proceso de infusión, afectando la calidad de la superficie del guardachoque y la existencia de zonas ricas en resina. La presencia de fugas luego de la infusión se debe tomar en cuenta en proyectos futuros con el fin de obtener piezas de excelente calidad.

Conclusiones

Se realizó el prototipado del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo, mediante la optimización del proceso VARTM utilizando materiales híbridos. El proceso de optimización se lo realizó en el software Autodesk Moldflow y fue validado mediante la experimentación del proceso.

En primer lugar, se tuvo que determinar la permeabilidad del material utilizado en la experimentación. Del análisis efectuado, se destaca que el uso de fibras vegetales en combinación con fibras sintéticas (material híbrido), disminuyen los tiempos de infusión entre un 10.4 % y 20.48 %. Además, en los materiales híbridos, el avance de flujo de resina es más regular en comparación con la utilización de fibras de forma individual.

La utilización de mallas de distribución y *peel ply* en los procesos de moldeo por compuestos líquidos, son los principales medios para la optimización, ya que disminuyen hasta un 64.4 % los tiempos de infusión.

La permeabilidad de las distintas fibras dependen de varios aspectos como: presión de inyección, porosidad del material, tipo y viscosidad de la resina, razón por la cual existen una diferencia de los valores determinados entre distintos autores.

Los datos de permeabilidad que se obtuvieron de forma experimental, se compararon mediante la simulación numérica del proceso con el *software Autodesk Moldflow*. Se determinó que, los resultados obtenidos con este software son satisfactorios para la simulación del proceso VARTM, sin ser esta su especialidad. Cabe recalcar que *Autodesk Moldflow* permite la simulación de procesos RTM Y SRIM.

Para la optimización del proceso, se simularon 6 diseños de puntos de entrada de resina y de vacío con *Autodesk Moldflow*. Los resultados del tiempo de llenado permitieron elegir la propuesta de optimización. La propuesta consistió en múltiples puntos de entrada de resina en el borde superior del molde y un solo punto de vacío. Mediante la simulación, se

observa la evolución del avance del frente de flujo y sirve como referencia para evitar zonas secas en las fibras. Esta propuesta toma en consideración la optimización de recursos, con la utilización de recursos prácticos para la experimentación del proceso. La herramienta de simulación es de gran ayuda para evitar múltiples pruebas de ensayo y error, con el fin de obtener una pieza de excelente calidad.

El proceso VARTM se lo aplica en múltiples aplicaciones automotrices, aeroespaciales, militares y comerciales. En el Ecuador, existe un desconocimiento de éste proceso, pudiendo ser útil para múltiples industrias. Éste proceso, presenta muchos aspectos críticos, entre los cuales destaca el de procurar que no existan fugas de aire durante la infusión de resina para evitar defectos en la pieza y el de lograr que la resina impregne en su totalidad las fibras utilizadas como refuerzo. Los recursos materiales y económicos utilizados para aplicación de VARTM en la fabricación de guardachoques son accesibles, en comparación a otras tecnologías dedicadas a la fabricación de autopartes.

Recomendaciones

Para la experimentación del proceso VARTM, se debe revisar la existencia de fugas, para lo cual se recomienda revisar el estado de la cinta sellante y el de la bolsa de vacío. Además en los puntos de entrada de resina y de vacío utilizar cinta sellante para lograr un sello hermético.

Se debe conocer las propiedades del acelerante utilizado para la resina. Esto evita que la resina se solidifique antes de tiempo y evitar el número de errores para la obtención de la pieza final.

Utilizar materiales de protección como: guantes, gafas y mascarillas, ya que al trabajar con materiales compuestos, estos pueden ser tóxicos y perjudicar la salud. El lugar de trabajo debe ser amplio y libre de suciedad, ya que la mínima astilla de fibra de vidrio puede ocasionar que la bolsa de vacío tenga fugas.

Al momento del proceso de extracción del aire, revisar como se deforma la bolsa de vacío y expandirla por todo el molde para evitar obstrucciones de flujo.

En la simulación, se recomienda contar el material tecnológico apropiado. La memoria RAM del computador debe ser por lo mínimo de 8GB, procesador Core i5 y tener una tarjeta de video.

Finalmente, se recomienda realizar distintos ensayos mediante las normas ASTM para determinar las propiedades mecánicas del material obtenido mediante el proceso VARTM.

Referencias Bibliográficas

- ASTM INTERNATIONAL. (2017). Obtenido de www.astm.org
- Anchatuña, J., & Loachamín, V. (2015). Construcción de un prototipo de cubreneumático mediante moldeo ligero por transferencia de resina de compuestos. Quito, Ecuador.
- Arias, G. (Octubre de 2015). El sector automotriz: evaluación del componente nacional en el periodo 2002-2013. Quito, Ecuador.
- Autodesk Moldflow. (2017). <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-95434AE1-8BB1-435B-849D-A563F4B350F2-htm.html>.
- BCE. (2017). *Banco Central del Ecuador*. Obtenido de <https://www.bce.fin.ec/index.php/c-exterior>
- Bejan, A. (1995). *Convection heat transfer*.
- Bhattacharyya, D., & Fakirov, S. (2007). *Handbook of Engineering Biopolymers, Blends and Composites*. Munich: Carl Hanser Verlag.
- Brouwer, W., van Herpt, E., & Labordus, M. (2003). Vacuum injection moulding for large structural applications. *Composites: Part A*, 551–558.
- Bubna, P., Humbert, M., Wiseman, M., & Manes, E. (2016). Barriers to Entry in Automotive Production and Opportunities with Emerging Additive Manufacturing Techniques. *SAE INTERNATIONAL*.
- Cai, Z. (1992). Simplified mold filling simulation in resin transfer molding. *Journal of composite materials*, 2606-2630.
- Cairns, D., Skramstad, T., & Mandell, J. (2001). EVALUATION OF HAND LAY-UP AND RESIN TRANSFER MOLDING IN COMPOSITE WIND TURBINE BLADE STRUCTURES. *American Institute of Aeronautics & Astronautics*.
- Chávez, D., & Ledesma, E. (2016). Fabricación en fibra de carbon de un accesorio automotriz utilizando el método de transferencia de resina. *Jóvenes en la ciencia*, 1838-1842.
- Comas-Cardona, S., Zhang, F., Bickerton, S., Tournier, L., Gan, J., & Binetruy, C. (2011). Fiber reinforcements: correlating permeability and local spatial fibrous features. *18th international conference on composite materials*.
- de Oliveira, I. R., Amico, S. C., Souza, J. A., & de Lima, A. G. (2014). Resin transfer molding process: a numerical analysis. *Defect and Diffusion Forum*.
- Easy Composites. (2016). *Guide to Resin Infusion*.

- Endruweit, A., McGregor, P., Long, A. C., & Johnson, M. S. (2006). Influence of the fabric architecture on the variations in experimentally determined in-plane permeability values. . *Composites Science and Technology*, 1778-1792.
- Escriche, E. D., Manrique, J. A., & Box, C. S. (2012). *Simulación y control de los procesos de transferencia de resina en moldes flexibles mediante modelos de permeabilidad equivalente*. Valencia.
- Ferreira, F. (2011). *Análise Comparativa do Escoamento de Fluido em Experimentos RTM Utilizando Aplicativos Comerciais*. Porto Alegre.
- Hsiao, K. T., & Heider, D. (2012). Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites. Woodhead, Cambridge.
- INEC. (2015). *Instituto nacional de estadística y censos* . Obtenido de http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2015/2015_AnuarioTransportesMetodologia.pdf
- Isoldi, L., Oliveira, C., Rocha, L., Souza, J., & Amico, S. (2012). Three-Dimensional Numerical Modeling of RTM and LRTM Processes. *ABCM*.
- Jinlian, H., Yi, L., & Xueming, S. (2004). Study on void formation in multi-layer woven fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 595-603.
- Kessels, J., Jonker, A., & Akkerman, R. (2007). Optimising the flow pipe arrangement for resin infusion under flexible tooling. *Composites: Part A*, 2076–2085.
- Khan, L. (2016). Cost-effective composites manufacturing processes for automotive. En J. Njuguna, *Lightweight Composite Structures in Transport* (págs. 93-119).
- Laraib, A., Mahmood, A., Hassan, B., Sharif, T., Khushnod, S., & Khan, Z. (2014). Cost-Effective Manufacturing Process for the Development of Automotive From Energy Efficient Composite Materials and Sandwich Structures. *POLYMER COMPOSITES*, 97-104.
- Cedeño, E. A. L., Alvear, P. S., Zurita, D. P., Yáñez, Y., & Gutiérrez, R. (2017). Estudio y evaluación de factibilidad del uso de energías alternativas para la estación SEK Limoncocha en Ecuador. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(3), 83-91.
- Laurenzi, S., Grilli, A., Pinna, M., Nicola, F., Cattaneo, G., & Marchetti, M. (2014). Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding. *Composites Part B: Engineering*, 47-55.
- Lee, Y., Wu, J., Hsu, Y., & Chung, C. (2006). A prediction method on in-plane permeability of mat/roving fibers laminates in vacuum assisted resin transfer molding. *Polymer composites*, 665-670.

- Letzow, M., Porto, J., Santos, E., Amico, S., Souza, J., & Isoldi, L. (2012). Computational Modeling of RTM Y LRTM Processes Applied to complex Geometries. *Thermal Engineering*, 93-99.
- Li, C., Xu, M., & Tie, Y. (2013). SIMULATION ANALYSIS OF WIND TURBINE BLADE DURING RESIN TRANSFER MOLDING PROCESS. *Materials Physics and Mechanics*, 127-134.
- Li, J., Zhang, C., Liang, R., Wang, B., & Walsh, S. (2008). Modeling and analysis of thickness gradient and variations in vacuum-assisted resin transfer molding process. *Polymer Composites*, 473-482.
- Li, Y., Xie, L., & Ma, H. (2015). Permeability and mechanical properties of plant fiber reinforced hybrid composites. *Materials & Design*, 313-320.
- Loendersloot, R. (2011). Permeability of non-crimp fabric preforms. En *Non-crimp fabric composites: manufacturing, properties and applications* (págs. 166-214).
- Loza, R., & Pila, G. (2017). *Fabricación de un retrovisor para el vehículo susuki forsa con material compuesto de matriz polimérica de poliéster y refuerzo natural de cabuya*. Riobamba.
- Mejía, J. L. (2013). *Estudio de la permeabilidad y la fabricación de materiales compuestos tipo sandwich por RTM*. Master's thesis, Universidad EAFIT.
- Michaud, V. (2011). Permeability properties of reinforcements in composites. *Composite reinforcements for optimum performance*, 431-458.
- Mitschang, P., & Hildebrandt, K. (2012). Polymer and composite moulding. En J. Njuguna, *Lightweight composite structures in transport, design, manufacturing, analysis and performance* (págs. 210-229).
- Mohd Yuhazri, Y., Phongsakorn, P., & Sihombing, H. (2010). A Comparison Process Between Vacuum Infusión and Hand Lay-Up Method Toward Kenaf/Polyster Composites. *International Journal of Basic & Applied Sciences*.
- Montés, N. (2009). *Marco Computacional para el Diseño, Optimización y Control de Procesos de Moldeo con Resinas Líquida (LCM)*. Valencia: Universidad CEU-Cardenal Herrera.
- Montés, N., & Sánchez, F. (2010). A new computational tool for liquid composite moulding process design based. *Composites: Part A*, 58-77.
- Naik, N. K., Sirisha, M., & Inani, A. (2014). Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. . *Progress in aerospace sciences*, 22-40.
- Nomura, M. (2000). Automobile Bumpers. *Comprehensive Composite Materials*, 365-373.

- Oliveira, C., Souza, J., Amico, S., Isoldi, L., & Silva, R. (2012). COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS VOF E FE/CV APLICADOS À SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE RTM. 22-33.
- Oliveira, C., Souza, J., Isoldi, L., & Rocha, L. (2009). Computational Modelling of the Resin Transfer Molding Process. *20th International Congress of Mechanical*.
- Pachacama, V. (2015). Diseño caracterización y aplicación de un material compuesto con base de resina epoxi y refuerzo de fibras orgánicas para la aplicación en un prototipo de capot de la camioneta mazda BT 50. (Tesis de Maestría). Escuela Politécnica Nacional, Latacunga, Ecuador
- Paredes, J. (2012). Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses. (Tesis de Maestría). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Park, C. (2015). Numerical simulation of flow processes in composites manufacturing. En *Advances in Composites Manufacturing and Process Design* (págs. 317-378). Woodhead Publishing.
- Pierce, R. S. (2014). *Improving the process modelling capability for manufacturing large composite structures used on passenger aircraft*.
- Polowick, C. (2013). *Optimizing Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) Processing Parameters to Improve Part Quality*. Ottawa: Carleton University.
- Poorzeinolabedina, M., Parnasa, L., & Dashatanb, S. H. (2014). Resin infusion under flexible tooling process and structural design optimization of the complex composite part. *Materials & Design*.
- Porto, J., Letzow, M., Santos, E., Souza, J., & Isoldi, L. (2012). Application of the Computational Modeling in the Resin Transfer Molding (RTM) Process: A Case study of a Marine Propeller. *14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*.
- Porto, J., Letzow, M., Santos, E., Souza, J., Isoldi, L., & Amico, S. (2012). Computational Modeling of RTM and LRTM Processes Applied to Complex Geometries. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, 93-99.
- Renliang, C., Chensong, D., Zhiyong, L., Chuck, Z., & Ben, W. (2004). Flow Modeling and Simulation for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process With the Equivalent Permeability Method. *Polymer Composites Vol. 25, No. 2*, 146-164.
- Ribeiro, G., Souza, J., & Amico, S. (2007). Modelagem Numérica do Transporte de Resinas no Interior de Moldes Através do Aplicativo Fluent. *XIV CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA*.

- Rudd, C. (2005). *Liquid Moulding Technologies: Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding, and Related Processing Techniques*. SAE INTERNATIONAL.
- Ruikui, D., Fangfang, W., Xianhui, C., Yanfei, Z., Guizhe, Z., & Yaqing, L. (2013). Flow Simulation and Optimization of the Car Bumper Beam by VARTM Process. *Advanced Materials Research Vols 753-755*, 236-240.
- Ruiz, E., & Trochu, F. (2011). Flow modeling in composite reinforcements. En *Composite reinforcements for optimum performance*. Woodhead Publishing Limited.
- Sánchez, F., Domenech, L., García, V., Montés, N., Falcó, A., Cueto, E., . . . Fideu, P. (2015). Fast and reliable gate arrangement pre-design of resin infusion processes. *Composites: Part A*.
- Santoso, A. W. (2010). *Project Overview 20 m Fiber Composite Vessel Shipyard*. Jakarta.
- Sas, H., Šimáček, P., & Advani, S. (2015). A methodology to reduce variability during vacuum infusion with optimized design of distribution media. *Composites: Part A*, 223-233.
- Schmidt, T. M., Goss, T. M., Amico, S. C., & Lekakou, C. (2009). Permeability of hybrid reinforcements and mechanical properties of their composites molded by resin transfer molding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2839-2850.
- Sharma, S., & Siginer, D. A. (2010). Permeability measurement methods in porous media of fiber reinforced composites. *Applied Mechanics Reviews*.
- Shin, K., Song, Y., & Youn, J. (2006). Radial Flow Advancement in Multi-Layered Preform. *Rheology Journal*, 217-224.
- Shojaei, A., Ghaffarian, S., & Karimian, S. (2002). Numerical simulation of three-dimensional mold filling process in resin transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulations. *Composites Science and Technology*, 861-879.
- Simacek, P., & Advani, S. (2017). Resin flow modeling in compliant porous media: an efficient approach for liquid composite molding. *International Journal of Material Forming*, 1-13.
- Sirtautas, J., Pickett, A. K., & George, A. (2015). Materials characterisation and analysis for flow simulation of liquid resin infusion. *Applied Composite Materials*, 323-341.
- Summerscales, J. (2012). Resin Infusión Under Flexible (RIFT). En *Wiley Encyclopedia of Composites*.
- Sun, X., Li, S., & Lee, L. J. (1998). Mold filling analysis in vacuum-assisted resin transfer molding. Part I: SCRIMP based on a high-permeable medium. *Polymer Composites*, 807-817.

- Sunaryo, S., Liston, G., & Maharani, S. (2013). Thickness and Fiber Content Optimization in VARTM Method for High Speed Craft. *Advanced Materials Research*, 412-416.
- Taub, A., & Luo, A. (2015). Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive applications. *MRS Bulletin*.
- Trochu, F., Ruiz, E., Achim, V., & Soukane, S. (2005). Advanced numerical simulation of liquid composite molding for process analysis and optimization. *Composites: Part A*.
- Universo, E. (Junio de 2014). Desarrollar autopartes es el reto de Muebles León.
- Verleye, B., Croce, R., Griebel, M., Klitz, M., Lomov, S. V., Morren, G., . . . Roose, D. (2008). Permeability of textile reinforcements: Simulation, influence of shear and validation. *Composites Science and Technology*, 2804-2810.
- Verleye, B., Lomov, S., & Roose, D. (2011). Modelling of the permeability of non-crimp fabrics for composites. En *Non-Crimp Fabric Composites: Manufacturing, Properties and Applications*.
- Verrey, J., Michaud, V., & Månson, J. A. (2006). Dynamic capillary effects in liquid composite moulding with non-crimp fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 92-102.
- Wang, C., Yue, G., Bai, G., Pan, L., & Zhang, B. (2016). Compaction behavior and permeability property tests of preforms in vacuum-assisted resin transfer molding using a combined device. *Measurement*, 357-364.
- Wasik, T. (2005). *Effect of fiber volume fraction on fracture mechanics in continuously reinforced fiber composite materials*. University of South Florida.
- Yalcinkaya, M. A., Caglar, B., & Sozer, E. M. (2017). Effect of permeability characterization at different boundary and flow conditions on vacuum infusion process modeling. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 491-504.

Anexos

Anexo 1. Características técnicas del *peel ply*





share the knowledge

Economy Polyester Peel Ply

AeroFilm® PP180

Key Features

- Very cost-effective
- Good tear strength for removal
- Black tracers for identification

Product Description

AeroFilm® PP180 is an economical polyester peel ply suitable for vacuum bagging of wet-lay laminates, resin infusion and hand-layup applications. It is compatible with a wide range of resin systems including epoxy, polyester and vinylester.

PP180 is a tightly woven white fabric with black "tracer" lines to identify it as polyester peel-ply within the AeroFilm® range.

Recommended Uses

- Resin infusion (epoxy, polyester or vinylester)
- Vacuum bagged wet-lay
- Hand-layup, where secondary bonding is required

Typical Use

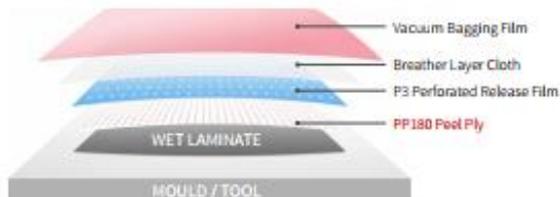
Peel ply is most commonly used to create a textured surface on a laminate ideal for secondary laminating/bonding or to act as a porous, removable barrier between the laminate and other bagging consumables for processes such as resin infusion.

Being a porous layer, peel ply allows the vacuum to bleed trapped air and volatiles out of the laminate and so finds applications in wet-lay vacuum bagging, resin infusion and some prepreg laminating.

Example Stack: Resin Infusion



Example Stack: Vacuum Bagged Wet Layup



Specification

Property	Units	Value
Material	-	Polyester
Width	mm	1520 (-0 +2%)
Format	-	Single Sheet
Areal Weight	g/cm ²	85 ± 5%
Maximum Use Temperature	°C	180
Appearance	-	White with black tracer

Alternative Widths & Formats

PP180 is held in stock at the 1.52m width. Special widths (and formats) may be available for large orders, subject to a minimum order quantity.

Handling & Storage

PP180 is a stable polyester material with no special handling or storage requirements.

Disclaimer

This data is not to be used for specifications. Values listed are for typical properties and should not be considered minimum or maximum.

Our technical advice, whether verbal or in writing, is given in good faith but Easy Composites Ltd gives no warranty, express or implied, and all products are sold upon condition that purchasers will make their own tests to determine the quality and suitability of the product for their particular application and circumstances.

Easy Composites Ltd shall be in no way responsible for the proper use and service of the product, nor for the safeguarding of personnel or property, all of which is the duty of the user. Any information or suggestions are without warranty of any kind and purchasers are solely responsible for any loss arising from the use of such information or suggestions. No information or suggestions given by us shall be deemed to be a recommendation to use any product in conflict with any existing patent rights. Before using any of our products, users should familiarise themselves with the relevant technical and safety datasheets provided by Easy Composites Ltd.

AeroFilm® is a registered trademark of Easy Composites Ltd.

Anexo 2. Características técnicas de la resina IN2



Key Features

- Ideal For Resin Infusion
- Ultra Low Viscosity Resin
- Outstanding Wetting Abilities
- Good Mechanical Properties
- Choice of Hardener Speed

Product Description

Our IN2 is a high performance epoxy resin that has been specifically formulated for use in resin infusion composites production.

As an infusion resin it is ultra-low viscosity ensuring that it is able to quickly infuse through a range of reinforcements. Its excellent mechanical strength makes it ideally suited for use with high performance reinforcements such as carbon fibre and aramids like Kevlar.

The resin also exhibits excellent cured mechanical properties far in excess of many more traditional epoxy resin brands (as can be seen from the technical data sheets). Improved mechanical properties mean stronger, lighter, higher performance parts.

Recommended Uses

This is a high performance low viscosity epoxy resin formulated specifically for use in resin infusion composites production. The resin cures to a clear finish.

This is the same epoxy infusion resin that is included with our Resin Infusion Complete Starter Kit.

When cured the epoxy exhibits good flexural strength making it well suited to the lamination of structural parts. The resin also exhibits very good clarity making it also suitable for use when laminating unpainted carbon fibre composites. Properties

The table below shows the typical uncured properties:

Property	Units	Resin	Hardener	Combined
Material	-	Epoxy Resin	Formulated Amine	Epoxy
Appearance	-	Clear Liquid	Amber Liquid	Clear Liquid
Viscosity @20 °C	mPa.s.	500 – 800	10 - 20	200 – 450
Density @20 °C	g/cm ³	1.08 – 1.18	1.07 – 1.13	1.12 – 1.18

How to Use

IN2 is a chemical product for professional use. It is essential to read and understand the safety and technical information before use.

Follow the guidelines for safe use outlined in the SDS which include the use of appropriate hand and eye protection during mixing and use.

Mix Ratio

Mix Ratio 100:30 by Weight

IN2 Epoxy Laminating Resin should be mixed with AT30 FAST or AT30 SLOW

Hardener at a ratio of 100 parts of resin to 30 parts of hardener, by weight. FAST and SLOW hardeners can be blended to achieve pot-life and demould times anywhere between those stated. However, you must still maintain the correct overall ratio of resin to hardener to ensure a proper cure.

Failure to do so will result in a poor or only partial cure of the resin, greatly reduced mechanical properties and possibly other adverse effects. Under no circumstances add 'extra hardener' in an attempt to speed up the cure time; epoxies do not work in this way.

Our IN2 Infusion Resin is available with a choice of two hardener speeds; 'FAST' which has a pot-life of 9-14mins and 'SLOW' which provides a pot-life of 80-100mins. As standard we recommend using IN2 Infusion Resin with the SLOW hardener, especially for larger infusion projects. For small projects where you are confident of the infusion time, use of the FAST hardener greatly reduces the demould time.

Mixing Instructions

IN2 is a highly reactive (fast curing) resin system. Only weigh out and mix as much resin as you can use within the pot life.

Weigh or measure the exact correct ratio of resin and hardener into a straight sided container. Using a suitable mixing stick begin to mix the resin and hardener together to combine them completely.

Spend at least one minute mixing the resin and hardener together, paying particular attention to the sides and base of the container. Remember: Any resin that has not been thoroughly combined with hardener will not cure.

Once you have finished mixing in one container, it is good practice to transfer the mixed resin into a second container and undertake further mixing of the resin using a new mixing stick. Doing so will eliminate the risk of accidentally using unmixed resin from the bottom or sides of the container.

Pot-Life / Working Time / Cure Time

IN2 is a highly reactive resin system and once the resin has been mixed with the hardener, the reaction will start to give off heat (exotherm) which will further accelerate the cure of the resin, especially when the resin is in the mixing pot.

Transfer the resin from the mixing pot onto the part as soon as possible to extend the working time and avoid the risk of uncontrollable rapid cure in the mixing pot.

As with all epoxies, the pot-life/working time will vary significantly depending on the ambient temperature, the starting temperature of the resin and hardener and the amount of resin mixed.

IN2 can be used in ambient temperatures between 15°C (59°F) and 30°C (86°F). For best results, an ambient temperature of at least 20°C (68°F) is recommended. Ensure that both resin and hardener containers are within this temperature range before use.

During an infusion, you can reduce the chance of the resin 'gelling' in the pot by mixing small quantities at a time and topping up the resin jug as the resin is drawn into the laminate. Once the resin is in the laminate, it is much less likely to exotherm and gel before you want it to.

The table below gives an indication of pot-life and cure times:

	Pot-Life @ 25 °C	Gelation @ 25 °C	Demould Time @ 25 °C
AT30 SLOW*	80 - 100mins	8 - 11hrs	18 - 24hrs
AT30 FAST*	9 - 14mins	2 - 4hrs	6 - 8hrs

*Fast and slow hardeners can be blended to achieve pot-life and demould times anywhere between those stated above.

	25 °C	60 °C	100 °C	Full Cure at 25°C
Cure Time	24hrs	6hrs	3hrs	7 Days

Full Cure / Post-Cure

As with most epoxy systems, where parts cure in normal ambient temperatures, full cure is not reached for several days. Although parts will be handleable after the listed demould time (at 25°C), full mechanical properties will take at least 14 days to develop in (at 25°C). Where possible, avoid exposing the cured resin to full service rigours for at least this time.

As with many post-cure cycles for resins, the post-cure cycle for our IN2 Epoxy Resin is not too sensitive and a range of different post-cure cycles will produce good results, specifically improved mechanical performance and elevated HDT/operating temperature. Post-curing parts that will be used at or exposed to elevated operating temperatures (such as vehicle bonnets/hoods in direct sunlight, engine-bay parts, car interior parts etc.) is strongly recommended to prevent distortion of the parts when they are put into service and experience these higher temperatures.

Where possible, parts should be post-cured still inside the mould to reduce distortion and improve surface finish (i.e. reduce 'print-through'). When post-curing parts in the mould, it is important to post-cure them without demoulding at all (i.e. don't demould and then put them back into the mould) otherwise you can get some strange patterns on the surface where some areas are post cured in direct contact with the mould surface and others are not.

A simple and very effective post-cure cycle with the IN2 Epoxy Infusion Resin is as follows:

CYCLE #1 SUITABLE FOR MOST SITUATIONS

- 24hrs at room temperature
- 6hrs at 60°C

If you're encountering any surface finish issues (faint print-through) then you can experiment with a slower 'ramp rate' which sometimes improves things:

CYCLE #2 SUGGESTED FOR SUBTLE IMPROVEMENTS TO SURFACE FINISH

- 24hrs at room temperature
- 2hrs at 40°C
- 2hrs at 50°C
- 5hrs at 60°C

If you need to push the HDT of the finished part higher then you could increase post-cure up to a maximum of 80°C as follows:

CYCLE #3 SUGGESTED FOR HIGHEST POSSIBLE HDT/OPERATING TEMPERATURE

- 24hrs at room temperature
- 2hrs at 40°C
- 2hrs at 50°C
- 2hrs at 60°C
- 2hrs at 70°C

- 4hrs at 80°C

These are all just suggestions. Most situations just call for option #1; 6hrs at 60°C. Many customers also find that they can dispense with the 24hrs cure at ambient and simply load newly infused parts into the oven to begin the cure however this is something that you would need to experiment with yourself. A cure at ambient temperature before post-cure is generally favoured with most resin systems.

Mechanical Properties

Cured Resin Properties

	Units	AT30 SLOW	AT30 FAST
Colour		Pale yellow	Pale yellow
Machinability		Excellent	Excellent
Density 25°C	g/ml	1.08 - 1.12	1.08 - 1.12
Hardness 25°C	Shore D/15	84.5 - 88.5	86 - 90
Maximum Tg	°C	92 - 98	75 - 81
Water absorption (24h RT)	%	0.12 - 0.20	0.22 - 0.27
Water absorption (2hr 100°C)	%	0.58 - 0.70	0.95 - 1.00
Flexural strength	MN/m ²	112 - 124	95 - 109
Maximum strain	%	5 - 7	4 - 6
Strain at break	%	6 - 8	7 - 9
Flexural modulus	MN/m ²	3150 - 3550	2500 - 3100
Tensile strength	MN/m ²	65.5 - 73.5	67.0 - 75.0
Elongation at break	%	6 - 8	5 - 7

Transport and Storage

Resin and hardener should be kept in tightly seal containers during transport and storage. Both the resin and hardener should be stored in ambient conditions of between 10°C (50°F) and 25°C (77°F).

When stored correctly, the resin and hardener will have a shelf-life of 12 months. Although it may be possible to use the resin after a longer period, a deterioration in the performance of the resin will occur, especially in relation to clarity and cure profile.

Pay particular attention to ensuring that containers are kept tightly sealed. Epoxy hardeners especially will deteriorate quickly when exposed to air.

Disclaimer

This data is not to be used for specifications. Values listed are for typical properties and should not be considered minimum or maximum.

Our technical advice, whether verbal or in writing, is given in good faith but Easy Composites Ltd gives no warranty; express or implied, and all products are sold upon condition that purchasers will make their own tests to determine the quality and suitability of the product for their particular application and circumstances.

Easy Composites Ltd shall be in no way responsible for the proper use and service of the product, nor for the safeguarding of personnel or property, all of which is the duty of the user. Any information or suggestions are without warranty of any kind and purchasers are solely responsible for any loss arising from the use of such information or suggestions. No information or suggestions given by us shall be deemed to be a recommendation to use any product in conflict with any existing patent rights. Before using any of our products, users should familiarise themselves with the relevant technical and safety datasheets provided by Easy Composites Ltd.

Anexo 3. Características técnicas de la bolsa de vacío



204°C High Strength Vacuum Bagging Film

AeroFilm® VB200

Key Features

- 204°C service temperature
- Very high strength
- 100% nylon construction
- Multi-layer reliability

Product Description

AeroFilm® VB200 is an aerospace-grade, multilayer mono-nylon vacuum bagging film suitable for cure temperatures up to 204°C/400°F. VB200 offers very high tensile strength making it ideally suited to demanding high temperature/pressure curing applications such as aerospace prepregs.

Recommended Uses

- Autoclave-cured prepreg laminating
- High temperature applications (up to 204°C/400°F)
- High pressure applications

Multi-layer Reliability

VB200 uses multiple 100% PA (nylon) layers for maximum reliability. Multi-layer technology eliminates problems caused by imperfections, pin-holes or weaknesses in the film by combining layer after layer into a single, ultra-reliable film.

Lay Flat Tube Format

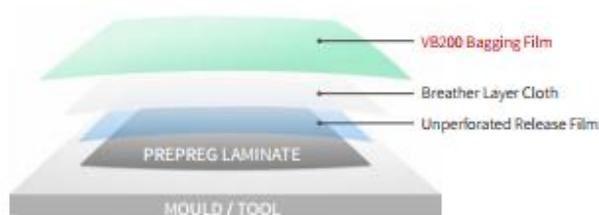
AeroFilm® VB200 is supplied at 1.52m wide in a lay-flat tube (LFT) format meaning that off the roll it is two layers of film with either edge already sealed. This means that each linear metre supplied equals 3.04sqm.

Working with film in a lay flat tube format means that it's often possible to make use of one or both of the existing seams, reducing the amount of bagging tape required to seal your bags and speeding-up the bagging process. It also makes it possible to slit the bag down just one side and open it up to a very wide 3m width - ideal for large bagging projects.

Typical Use

VB200 is most typically used as a specialist bagging film when working with high cure temperature prepregs, applications at high pressures or those requiring a particularly high strength/high reliability bagging film (such as tool leak-testing).

Example Stack : Prepreg Laminating



Specification

Property	Units	Method	Value
Material	-	-	100% Nylon
Width	mm	Internal	1524 (-0 +2%)
Format	-	-	Lay Flat Tube
Thickness	µm	ISO 4593	50 ± 10%
Maximum Use Temperature	°C	Internal	204
Density	g/cm ³	Internal	1.13
Tensile Strength at Break MD	N/mm ²	ASTM D882	90 ±10%
Tensile Strength at Break TD	N/mm ²	ASTM D882	85±10%
Elongation at Break MD	%	ASTM D882	440 ±10%
Elongation at Break TD	%	ASTM D882	450 ±10%
Appearance	-	-	Green. Translucent.

Handling & Storage

Nylon bagging films are hygroscopic and their behaviour and mechanical properties are affected by their moisture content; particularly the elasticity and softness of the film. Moisture content acts as a plasticiser - a low moisture content will result in a stiffer, less elastic film.

To preserve the performance of the film and ensure consistent behaviour, store unused film in a sealed bag and away from particularly dry conditions.

Recommended storage and use conditions are 65% relative humidity and 20°C/68°F workshop temperature.

Disclaimer

This data is not to be used for specifications. Values listed are for typical properties and should not be considered minimum or maximum.

Our technical advice, whether verbal or in writing, is given in good faith but Easy Composites Ltd gives no warranty, express or implied, and all products are sold upon condition that purchasers will make their own tests to determine the quality and suitability of the product for their particular application and circumstances.

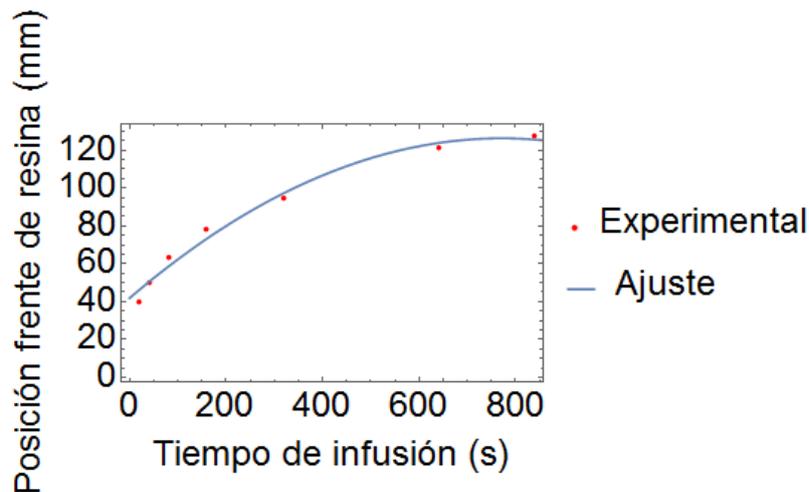
Easy Composites Ltd shall be in no way responsible for the proper use and service of the product, nor for the safeguarding of personnel or property, all of which is the duty of the user. Any information or suggestions are without warranty of any kind and purchasers are solely responsible for any loss arising from the use of such information or suggestions. No information or suggestions given by us shall be deemed to be a recommendation to use any product in conflict with any existing patent rights. Before using any of our products, users should familiarise themselves with the relevant technical and safety datasheets provided by Easy Composites Ltd.

AeroFilm® is a trademark of Easy Composites Ltd.

Anexo 4. Código utilizado en *Wolfram Mathematica* para el ajuste de curvas de la fibra de vidrio

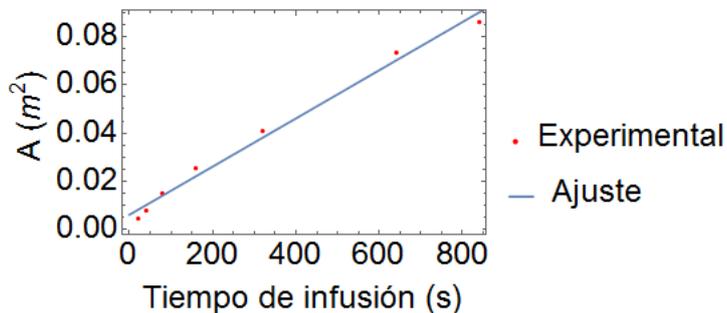
```
data = {{20, 39.7}, {40, 50}, {80, 63.67}, {160, 78.33}, {320, 95}, {640, 121}, {840, 127.33}};
parabola = Fit[data, {1, x, x^2}, x]
```

```
Show[ListPlot[data, PlotStyle -> Red, PlotLegends -> {"Experimental"}, LabelStyle -> Directive [Black, Large]],
[mue... |representación de - |estilo de repr... |rojo |leyendas de representación |estilo de etiqueta |directiva |negro |grande
Plot[{ parabola}, {x, 0, 1300}, PlotLegends -> {"Ajuste"}, LabelStyle -> Directive [Black, Large]], Frame -> True,
|representación gráfica |leyendas de representación |estilo de etiqueta |directiva |negro |grande |marco |verdadero
FrameLabel -> {"Tiempo de infusión (s)", "Posición frente de resina (mm)"}, LabelStyle -> Directive [Black, Large]]
|etiqueta de marco |estilo de etiqueta |directiva |negro |grande
41.8664 + 0.218789 x - 0.000141811 x^2
```



```
datajus = {{20, 0.0044}, {40, 0.0081}, {80, 0.0151}, {160, 0.0254}, {320, 0.0408}, {640, 0.0733}, {840, 0.0860}};
line = Fit[datajus, {1, x}, x]
```

```
Show[ListPlot[datajus, PlotStyle -> Red, PlotLegends -> {"Experimental"}, LabelStyle -> Directive [Black, Large]],
[mue... |representación de lista |estilo de repr... |rojo |leyendas de representación |estilo de etiqueta |directiva |negro |grande
Plot[{ line}, {x, 0, 1300}, PlotLabel -> {0.00734498 + 0.0000999453 x}, PlotLegends -> {"Ajuste"}, LabelStyle -> Directive [Black, Large]], Frame -> True,
|representación gráfica |etiqueta de representación |leyendas de representación |estilo de etiqueta |directiva |negro |grande |marco |verdad
FrameLabel -> {"Tiempo de infusión (s)", "A (m²)"}, LabelStyle -> Directive [Black, Large]]
|etiqueta de marco |estilo de etiqueta |directiva |negro |grande
0.0062527 + 0.0000996815 x
```



Anexo 5. Cuadro de diálogo para ubicar las propiedades de la preforma

