

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

**SIMULACIÓN MESOSCÓPICA POR ELEMENTOS FINITOS DE LLENADO DE
COMPUESTOS, FABRICADOS POR PROCESOS DE MOLDEO LÍQUIDO.**

Jhon Fredy Taborda Idárraga

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecatrónico

Asesores

Carlos Andrés Vargas Isaza

Iván David Patiño Arcila

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM

Facultad de Ingenierías

Departamento Mecatrónica

Medellín, Colombia

2021

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

RESUMEN

En procesos de moldeo líquido en composites (LCM), el principal defecto de fabricación, es la formación de vacíos o zonas, donde no hay una presencia adecuada de la resina de inyección, por ello, es importante que las universidades, desarrollen estudios encaminados a comprender el fenómeno de formación de vacíos, además de conocer su influencia en las propiedades mecánicas finales de las piezas, y a diseñar, implementar y evaluar estrategias de inyección que permitan reducir el nivel de los mismos en las piezas terminadas.

El propósito del presente proyecto, fue evaluar el llenado de moldeo líquido en composites a escala mesoscópica, mediante la ayuda del software ANSYS, se realizaron simulaciones para la saturación de una celda representativa unitaria, y de esta forma, determinar la formación de poros por atrapamiento mecánico.

Para dibujar la geometría en el ANSYS, se caracterizó la preforma mediante estereomicroscopía y SEM (Microscopía de Barrido electrónico), la cual, nos aportó varias imágenes que nos permitieron mediante el *Software ImageJ*, tomar todas las medidas que se necesitaban para construir dicha celda representativa unitaria.

Posteriormente, mediante simulaciones sucesivas, se obtuvieron las imágenes en función del tiempo, para cinco diferentes presiones de inyección en una celda representativa unitaria, y en dichas imágenes, se pudo observar la formación de poros por atrapamiento mecánico, cuyas formas varían en el tiempo, desde circulares, para luego volverse de forma elíptica, y finalmente tomar una forma de hilo. El tiempo para alcanzar el 90% de saturación de la preforma, fue inversamente proporcional a la presión de inyección aplicada.

Se pudo obtener además de las imágenes, los puntos de la tasa de saturación vs la saturación, para luego en posteriores estudios, obtener mediante regresión, las curvas para cada una de las cinco presiones de inyección, y crear una base para estudios posteriores a escala macroscópica.

Palabras clave: Escala mesoscópica, celda representativa unitaria, ANSYS, estereomicroscopía, viscosidad, inyección, saturación, presión, trama, urdimbre, poros, preforma, resina.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

RECONOCIMIENTOS

Quiero dar las gracias a mi familia por creer en mí siempre, y apoyarme en los momentos difíciles; también a mis asesores Carlos Vargas e Iván Patiño, que siempre estuvieron pendientes en todo momento, a cualquier inquietud que yo pudiera tener, para poder solucionarla, igualmente darles las gracias por conseguir los materiales y equipos vitales para la elaboración de este proyecto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

ACRÓNIMOS

- ANSYS Analysis System Software*
- LCM Liquid Composite Molding*
- RTM Resin Transfer Molding*
- SEM Scanning Electron Microscopy*
- VARTM Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*
- S-RIM Structural Reaction Injection Molding*
- CIRTM Co-Injection and Resin Transfer Molding*
- SCRIMP Seeman Composite Resin Infusion Molding Process*
- CRU Celda Representativa Unitaria*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO.....	7
3. METODOLOGÍA.....	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	68
REFERENCIAS	69
ANEXOS.....	70

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de moldeo líquido no han sido implementados con mucha fuerza en Colombia, lo que nos pone, en desventaja en cuanto a eficiencia y calidad productiva de piezas en materiales compuestos, respecto a otros países latinoamericanos, países asiáticos y europeos. Las empresas dedicadas a la transformación de materiales compuestos en nuestro país, se han visto en la necesidad de empezar a incursionar en estas tecnologías de moldeo cerrado, donde el principal inconveniente para obtener piezas de alta calidad son precisamente los puntos secos y las porosidades, por esta razón algunas empresas prefieren seguir con las técnicas tradicionales de moldeo manual, antes que incursionar en técnicas de moldeo cerrado, que además de tener un costo inicial muy alto, parecen difíciles de implementar debido a la gran cantidad de variables que se deben controlar para obtener piezas completamente llenas y con niveles aceptables de porosidad.

Por ello, resulta importante que las universidades, apoyadas por la industria, desarrollen estudios encaminados a comprender el fenómeno de formación de vacíos en procesos LCM, a conocer su influencia en las propiedades mecánicas finales de las piezas, y a diseñar, implementar y evaluar estrategias de inyección que permitan reducir el nivel de los mismos en las piezas terminadas, que es finalmente de lo que se quiere con este proyecto.

Se evaluó mediante simulación computacional, la formación de poros por atrapamiento de aire a escalas mesoscópicas, en procesos de moldeo líquido para diferentes presiones. Para tal propósito se requirió caracterizar la geometría de la preforma mediante estereomicroscopía y SEM (Microscopía de Barrido electrónico), así como ingresar los parámetros de entrada y de salida, para comenzar las simulaciones sucesivas que nos permitieron, analizar la formación de vacíos por atrapamiento mecánico de aire a escala mesoscópica, y la evolución de los mismos en el tiempo, en un *software* especializado de mecánica de fluidos, como lo es *ANSYS*.

También para futuras investigaciones, pero a escala macroscópica, se pudieron obtener los puntos de la tasa de saturación vs la saturación, para diferentes presiones de inyección, y mediante un lenguaje de programación, obtener las curvas que describen dichos puntos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

2. MARCO TEÓRICO

Hoy en día, los materiales compuestos (*composites*) son utilizados como componentes en la mayoría de los productos industriales de alto valor agregado; prácticamente todas las industrias, a saber, la industria aeronáutica, la naval, el sector de la energía o el transporte, utilizan o por lo menos tienen como objetivo a corto plazo la introducción de algún tipo de compuesto en sus productos.

De acuerdo con la revista *Composites Manufacturing* (Mazumdar, Karthikeyan, Pichler, Benevento, & Frassine, 2017), desde el año 1960 al 2016, la industria de plásticos reforzados a nivel mundial ha crecido 25 veces, mientras que la industria del acero y el aluminio sólo han crecido 1.5 y 3 veces, respectivamente, en el mismo período de tiempo. Esto evidencia la migración masiva de las industrias hacia los plásticos reforzados o composites. Según Grand Research View (Grand Research View, 2015), los campos de aplicación de los materiales compuestos se pueden desagregar en: transporte, producción de energía, construcción, marino o naval, aeroespacial y defensa, eléctrico y electrónico, tuberías y tanques, y otras aplicaciones industriales.

Los procesos tradicionales, como el moldeo por contacto o por proyección, están siendo cada vez menos utilizados para aplicaciones de altas prestaciones, y eso se debe a las limitaciones intrínsecas: bajas prestaciones, incertidumbres (mecánicas, dimensionales, etc.), acabados de mala calidad, pre impregnados, contacto a mano, enrollamiento filamentario, infusión.

En la fabricación de piezas en materiales compuestos por procesos LCM, la introducción de la matriz se realiza por vía líquida sobre los refuerzos fibrosos previamente secos, y uno de los principales motivos de rechazo de estas piezas son los vacíos, que incluyen los puntos secos y las porosidades. Este tipo de defectos son los que se presentan principalmente en piezas inyectadas y ocasionan una disminución en las propiedades mecánicas de las mismas.

El estudio de los vacíos en piezas fabricadas por procesos LCM se puede dividir en tres clases: el estudio del proceso de formación de vacíos y sus causas, el estudio de la influencia de los vacíos en las propiedades mecánicas de las piezas y el estudio de las estrategias de inyección para reducir la formación de esos vacíos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

A nivel mundial, los materiales compuestos han reemplazado a los materiales tradicionales en un número considerable de aplicaciones industriales, automotrices, aeroespaciales, navales, de artículos deportivos, militares, de construcción, de dispositivos médicos, entre otras. Dentro de la gran familia de los materiales compuestos, los de Plásticos Reforzados, son los de mayor uso, debido fundamentalmente a su fácil procesado y su excelente relación resistencia/peso respecto a los compuestos de matriz cerámica o metálica. Según un estudio reciente de la firma Lucintel, desde el año 2016 hasta el año 2022 se espera una tasa de crecimiento anual compuesta del mercado de Plásticos Reforzados del 4.9%, donde los sectores transporte, aeroespacial y construcción liderarán este crecimiento.

En los LCM, el principal defecto de fabricación es la formación de vacíos o zonas donde no hay una presencia adecuada de la resina de inyección. Existen muchas causas de formación de vacíos, tales como: frente de flujo global no homogéneo, llenado incompleto, purga inadecuada de algunas resinas antes de la inyección, falta de compatibilidad entre la fibra y la resina, entre otras. (<https://es.scribd.com/document/244372790/Procesos-LCM-docx>).

Es de aceptación general en todas las industrias dedicadas a la transformación de materiales compuestos, que tanto los puntos secos como las porosidades disminuyen las propiedades mecánicas de las piezas terminadas. Debido a la influencia que tienen los vacíos en las propiedades mecánicas finales de las piezas, una de las áreas más importantes en la actualidad del estudio de procesos LCM, es la que se dedica a establecer las causas de formación de estos vacíos, la relación entre los mismos y las propiedades mecánicas obtenidas y las posibles estrategias para reducir el contenido de éstos en las piezas fabricadas.

Las técnicas LCM más comunes son (Advani & Sozer, 2011): Moldeo por transferencia de resina (RTM), Moldeo por Transferencia de resina asistido por vacío (VARTM), Moldeo por reacción inyección estructural (S-RIM), moldeo por co-inyección y transferencia de resina (CIRTM), Moldeo por infusión Seeman (SCRIMP), RTM light, entre otros.

En los últimos años, el RTM ha ido ganando gran popularidad en la industria aeroespacial (Potter, 1997), automovilística, militar y de infraestructuras; claro que solo es rentable para un cierto número de piezas (Rudd, 2001), dependiendo de lo que se requiera en los distintos tipos de industria.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

El RTM, es un proceso de fabricación de moldeo cerrado a baja presión, de una resina termoestable de baja viscosidad, previamente catalizada, que permite obtener piezas de material compuesto en un amplio rango de complejidad, tamaño y alto rendimiento, se diferencia de otros procesos, ya que lo primero es el corte de la fibra, ésta se coloca dentro de la cavidad del molde, después el molde se cierra, luego un tubo conecta el molde cerrado con un depósito de resina, la cual es bombeada dentro del molde para impregnar la fibra, y finalmente producir el curado, el cual se desmolda y se realiza el acabado (ver figura 2.1).

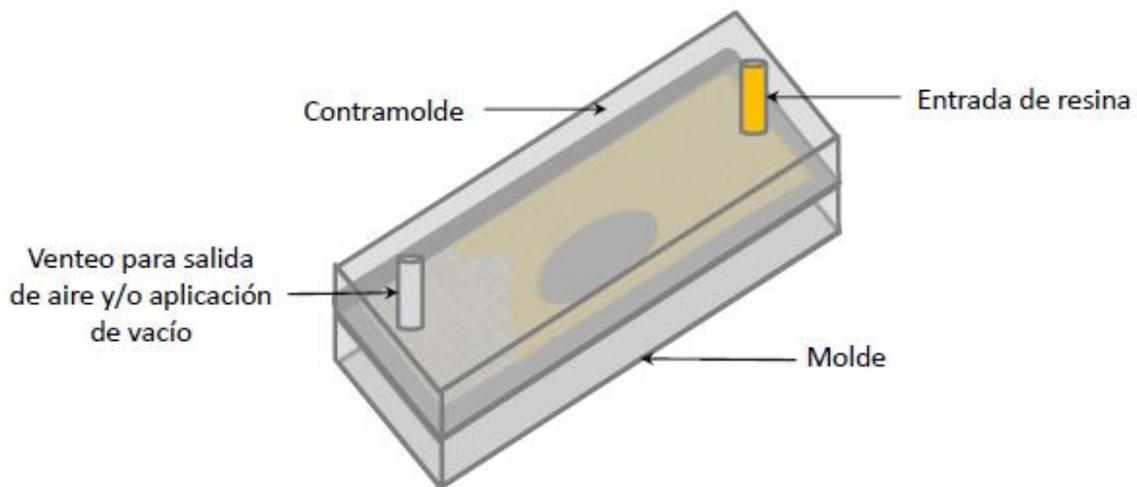


Fig. 2.1 Molde Proceso RTM

Existen grandes diferencias entre los procesos de moldeo, tanto en el cerrado como en el abierto (ver figura 2.2). Además una de las principales ventajas del RTM, es la relativa separación, entre el proceso de moldeo y el diseño de la arquitectura de las fibras, otras ventajas son: Buen acabado superficial, capacidad para producir piezas grandes y complejas, gran variedad de sistemas de resinas posibles, volumen de fibra perfectamente controlable, entre otras.

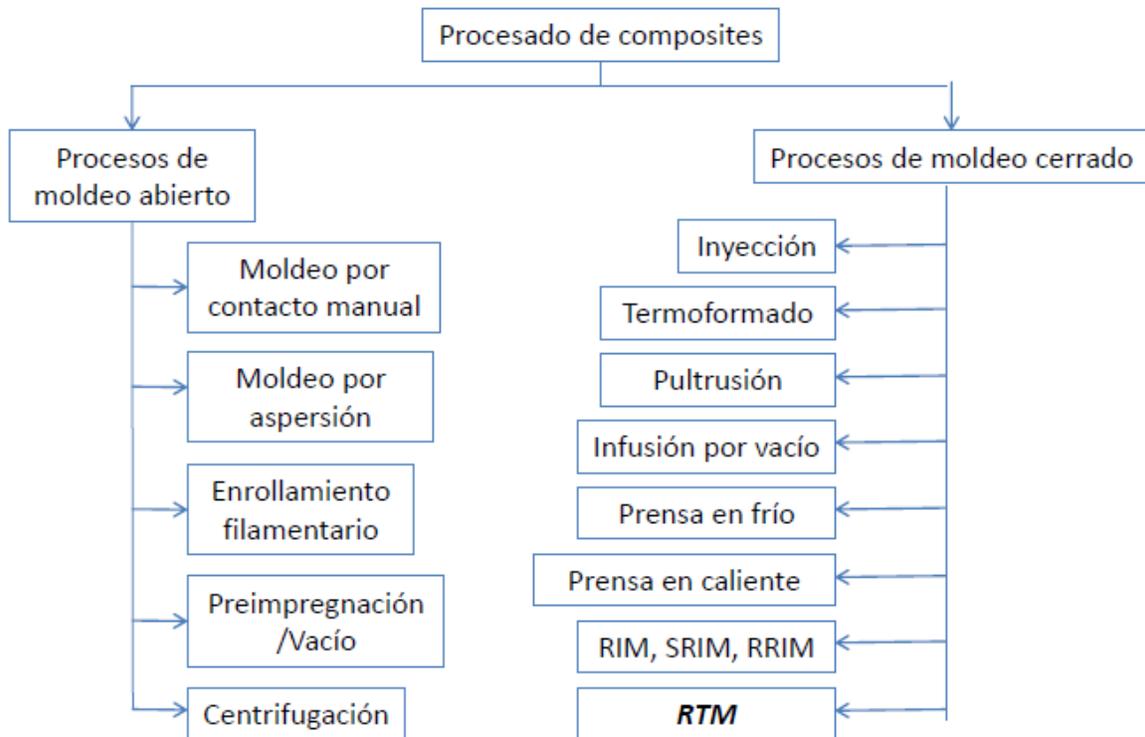


Fig. 2.2 Diferencias Procesos de Moldeo Abierto y Cerrado

Entre los requerimientos del RTM, se debe tener en cuenta la mano de obra calificada, alta inversión inicial respecto al proceso de moldeo abierto (Kruckenberg, 1998), una mayor demanda energética y una mayor cantidad de parámetros a controlar.

Las materias primas para el RTM, son las resinas y las fibras; para seleccionar la resina se debe tener un criterio de almacenamiento y procesabilidad, así como un criterio de desempeño de la pieza (ver figura 2.3); hay que tener en cuenta la viscosidad de resina, que es la propiedad que mide la facilidad para fluir de la resina, para viscosidades mayores de 500cps, puede ocurrir desplazamiento de la fibra (Miravete, 2000), problemas con el tiempo de llenado e impregnación incompleta al interior de las hebras; para viscosidades menores de 10cps, hay una alta posibilidad de que la resina, no impregne adecuadamente la preforma, así lo más recomendable es una viscosidad de la resina por debajo de 200cps. Así mismo, se debe conocer el comportamiento de la viscosidad durante la inyección, para moldear el flujo de la resina en la preforma.

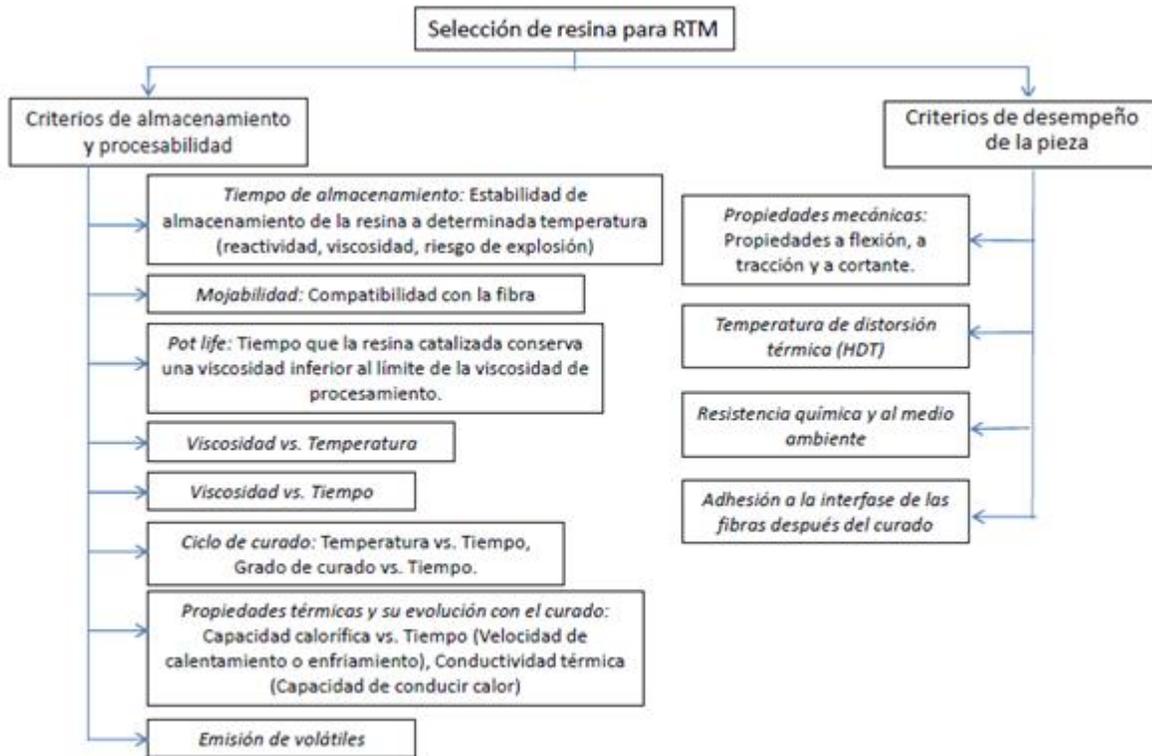


Fig. 2.3 Criterios Selección Resina

La selección de la fibra, no depende solamente de las prestaciones mecánicas, sino también de algunos parámetros relacionados con el proceso, al igual que para la resina, hay dos criterios de selección, uno el de procesabilidad y otro de desempeño de la pieza (ver figura 2.4). Existen gran cantidad de materiales de fibras (ver figura 2.5), que se pueden utilizar en el proceso, pero hay unos que son los más utilizados (ver figura 2.6).

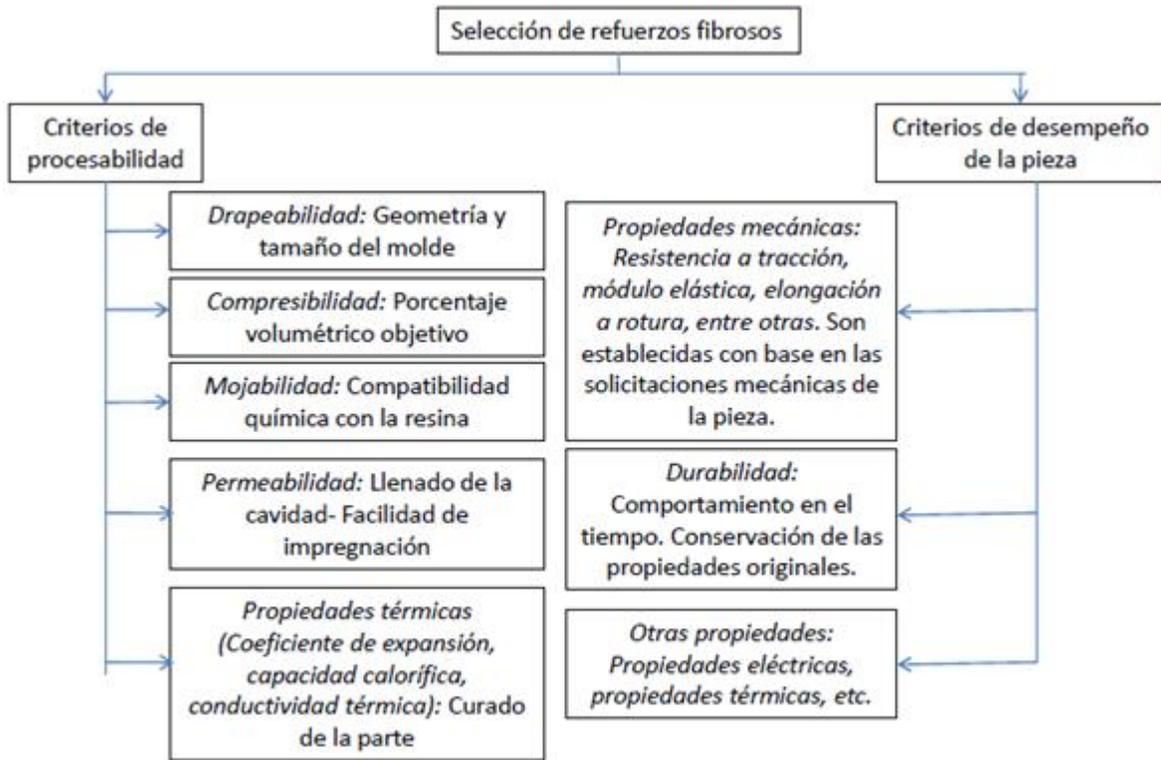


Fig. 2.4 Criterios Selección Fibra

FAMILIA DE FIBRA	Nombre comercial
Orgánicas	PBO, Kevlar, Nómex, Spectra, Vetran, PBI
Inorgánicas	Vidrio, Boro, Nicalón, Nextel, Carburo de silicio, Alúmina, Asbesto
Carbono a partir de alquitrán	Amoco, Nippon
Carbono a partir de PAN	Tipo T, GY, AS4, M60J
Alambres metálicos	Acero inoxidable, tungsteno, berilio
Fibras textiles	Poliéster, Nylon

Fig. 2.5 Materiales Fibrosos

Material	Tipo	Densidad (Kg/m ³)	Módulo a tensión (Gpa)	Resistencia a tracción (Gpa)	Elongación a rotura (%)	Coef. De expansión térmica (1/K.10 ⁻⁶)
Vidrio	E	2600	72	2.6	3-4	4.8
	R	2530	85	3.4	3-4	4.8
Carbono a partir de PAN	HS	1800	235	3.5	1.48	-0.40
	HM	1860	370	2.7	0.75	-0.5
	IM	1760	300	3.4	1.10	-0.45
Aramida (Kevlar)	29	1440	83	3.6	4.0	-5.2
	49	1440	124	3.6	2.9	-5.2

Fig. 2.6 Materiales Fibrosos Más Usados

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Al hablar de refuerzos fibroso, es necesario comprender algunos términos, entre ellos están:

Gramaje: Peso del refuerzo por unidad de área de un tejido.

Título: Peso por unidad de longitud de una hebra.

Espesor Natural: Espesor de una tela sin compactar.

Urdimbres: En una manta tejida, son los hilos que van en la dirección del rollo.

Tramas: En una manta tejida, son los hilos que van perpendicular al rollo.

Factor de tamaño: Es la relación entre el espesor de un refuerzo sin impregnar, y su espesor después de ser impregnado y curado.

Porcentaje Volumétrico de Fibra: Indica el volumen de fibra presente, respecto al volumen total.

Presión de Compactación: Es la presión que se debe ejercer, para alcanzar porcentajes volumétricos de fibra por encima del natural.

Permeabilidad: Es la propiedad, que mide la facilidad con la que una resina impregna un refuerzo fibroso.

Existen muchos tipos de refuerzos, donde la más utilizada en procesos RTM, son las preformas para mejoramiento de flujo, cuyo objetivo es aumentar la permeabilidad del tejido, cuando se presentan altos porcentajes volumétricos de fibra.

Los métodos de medición de la permeabilidad, se clasifican según consideración de efectos capilares, según la dirección del flujo inyectado, y según el parámetro de inyección que permanece constante, (ver figura 2.7).

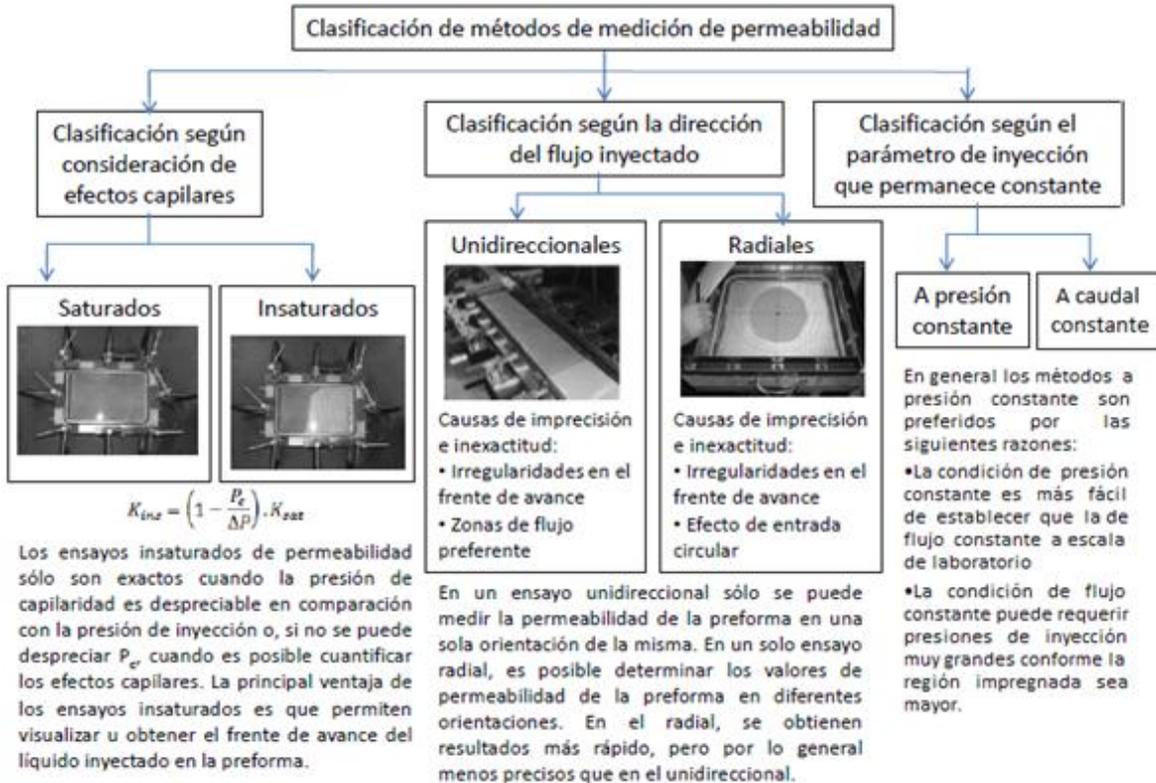


Fig. 2.7 Medición de la permeabilidad

En el proceso de inyección, se debe proporcionar un equilibrio, evitando el movimiento inducido a las fibras, e impregnando completamente la fibra y eliminando el aire.

Para el diseño durante el proceso de fabricación de piezas en RTM, existen tres tipos de variables: Geométricas, de procesamiento y del material (ver figura 2.8). Es conveniente tener en cuenta algunas sugerencias:

- Es conveniente realizar prototipos de moldes en materiales económicos, para llevar a cabo inyecciones de prueba.
- No se deben modificar variables, ni en la etapa de ensayos previos, ni en la de producción, sin dejar un registro detallado de dicha modificación y de su influencia en la calidad de la pieza final.

- Es preferible que preformas muy complejas sean divididas en preformas más simples, pues esto reduce riesgos relacionados con el posicionamiento de las mismas.
- Garantizar que las preformas permitan el cierre completo y uniforme del molde y que no sobrepasen nunca el sistema de sellos.

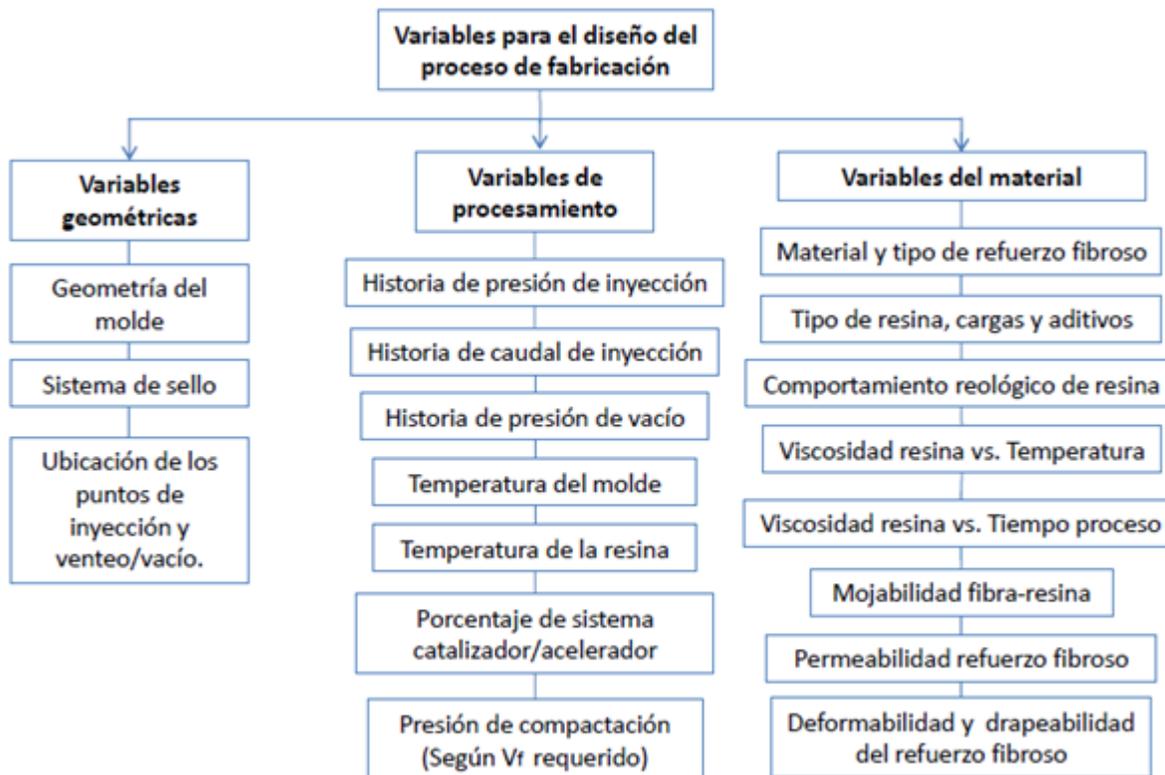


Fig. 2.8 Variables en el diseño del proceso de fabricación

Al finalizar el proceso de fabricación de piezas en RTM, se pueden dar ciertos defectos en el acabado final de la pieza, tales como: Dimensiones imprecisas de las piezas, pobre acabado superficial, lavado de fibras, curado no homogéneo, delaminación, entre otros; pero uno de los defectos más importantes, son las porosidades o puntos secos, y dependiendo de cuál sea la causa, es posible solucionarlo (ver figura 2.9).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Causas	Qué porosidades o puntos secos forma?	Soluciones
<i>Flujos no homogéneos originados por:</i> -Puntos de inyección y vacío incorrectamente ubicados. -Historia de presión de entrada y de vacío no es la correcta. - Caminos de libre flujo entre preformas y molde (racetracking)	Puntos secos por efecto de borde libre. Puntos secos por llenado incompleto Porosidades por frentes de flujo encontrados	-Diseño de preformas bien ajustadas a la cavidad. - Simulación de llenado.
<i>Aire que entra con la resina por:</i> -Purga inadecuada de la resina. - Aire que entra por fugas en los instrumentos de inyección	Porosidades por entrada de aire en la resina	-Purga adecuada de la resina - Sellado correcto de los instrumentos de inyección
<i>Cambio abrupto de Vf o preforma muy deformada o cizallada</i>	Puntos secos por cambio de permeabilidad	-Control del Vf. - Control de la drapeabilidad y compactación de la preforma.
<i>Incompatibilidad entre la resina y la fibra</i>	Porosidades y puntos secos por incompatibilidad química	- Escoger un sistema Resina/Fibra de buena mojabilidad.
<i>Especies volátiles que no alcanzan a ser evacuadas</i>	Porosidades por atrapamiento de volátiles	-Reubicación de puntos de venteo/vacío. - Aumento de la presión o el tiempo de vacío.
<i>Presencia de agua por:</i> -Absorción de agua del refuerzo fibroso (almacenamiento condiciones de humedad). - Absorción de agua del binder.	Porosidades por presencia de agua	- Secar las preformas antes de ser usadas .
<i>Contracción de la resina en zonas ricas en resina</i>	Porosidades por contracción	- Aumentar Vf en esa zona. - Usar resinas <i>Low Profile</i> .

Fig. 2.9 Causas y soluciones de formación de poros

(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 más recientes se centran en buscar alternativas para la simulación de flujo en proceso LCM, a la vez que proponen algoritmos rápidos para predecir el llenado de moldes en los procesos LCM.

Una herramienta de gran ayuda para estudiar cada uno de estos aspectos, es la simulación computacional, pues ha permitido la implementación de modelos desarrollados para predecir la formación de puntos secos y de porosidades, por ejemplo, el software ANSYS, permite hacer la simulación, a partir del análisis de llenado de la Celda Representativa Unitaria (CRU), y permite predecir la formación de poros por atrapamiento de aire (mesoscópicas) (Patiño, 2017). Bajo esta metodología, se puede mediante simulación establecer lo siguiente:

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

- 1) Predecir la formación de vacíos por atrapamiento mecánico de aire a escala mesoscópica, usando simulación por elementos finitos.

- 2) Predecir la evolución dinámica de las burbujas formadas a escala mesoscópica, esto es, compresión y desplazamiento en las mechas.

- 3) Construir las curvas de saturación de la celda representativa unitaria a diferentes presiones de inyección.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

3. METODOLOGÍA

Lo primero es caracterizar la preforma, para ello en el laboratorio de materiales poliméricos ubicado en el ITM sede fraternidad, se toman imágenes de estereomicroscopía y SEM (Microscopia de Barrido electrónico), luego con estas imágenes y con la ayuda del software ImageJ, se obtienen todas las medidas necesarias para construir la CRU.

Los parámetros geométricos de la CRU son los anchos de las tramas y urdimbres, que corresponden a los ejes mayores y menores respectivamente. Adicionalmente, los espacios entre las tramas y urdimbres son necesarios medir. Con base en las imágenes de SEM y empleando el software de procesamiento de imágenes Image J, fue posible obtener varias medidas de diferentes CRU y obtener valores promedio. Con esta información base, fue posible crear un modelo 3D de la CRU que posteriormente fue analizado en el software ANSYS. El procedimiento para calcular las medidas en el software Image J es el siguiente: Se abre el ImageJ (ver figura 3.1), luego se selecciona *File*, luego *Open* y seleccionamos la imagen de la que se requiere medir (ver figura 3.2), luego de obtener la imagen (ver figura 3.3) se debe escalar la imagen, para ello seleccionamos la herramienta de línea (ver figura 3.1) y se crea una línea en el rectángulo blanco de la parte inferior de la imagen (ver figura 3.4), posteriormente se selecciona *Analyze* (ver figura 3.1), y la opción *Set Scale* (ver figura 3.4), ingreso una medida para que sirva de base en la imagen para hallar otras medidas, por ejemplo 10um, entonces se coloca 10 en *Know distance*, um en *Unit of lenght*, activamos *Global* y por último *OK* (ver figura 3.5). Después de realizar lo anterior, ya podemos realizar cualquier medida de la imagen que necesitemos, solo es seleccionar la herramienta línea (ver figura 3.1), posicionarse en el inicio y final de la medida, luego seleccionar *Analyze* (ver figura 3.1), opción *Measure* (ver figura 3.4) y se obtiene la medida en la variable *Lenght* (ver figura 3.6).

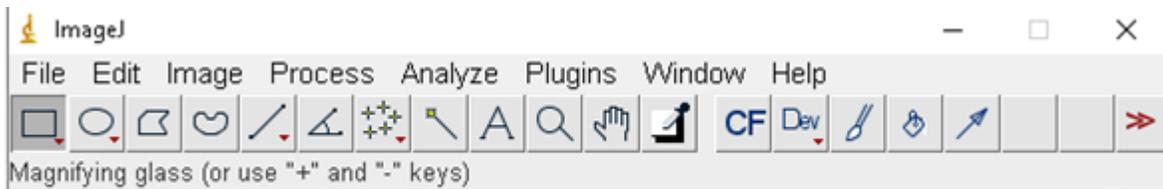


Fig. 3.1 Software ImageJ

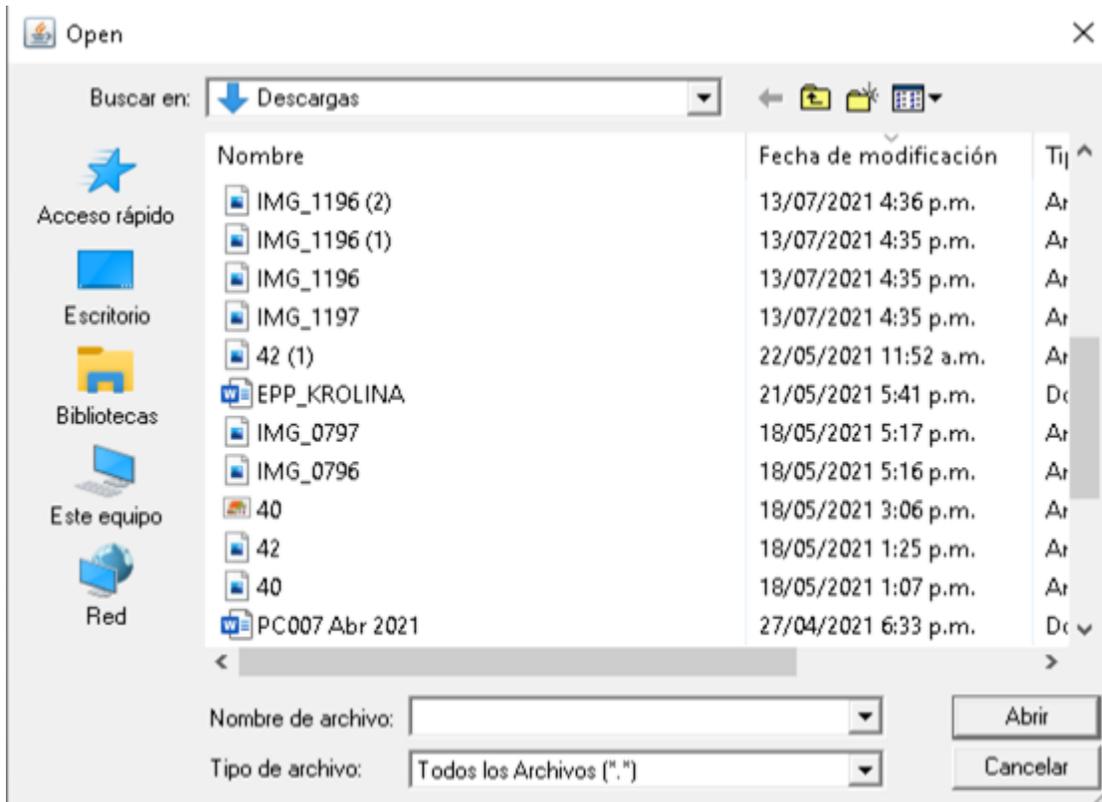


Fig. 3.2 Seleccionar la imagen a medir

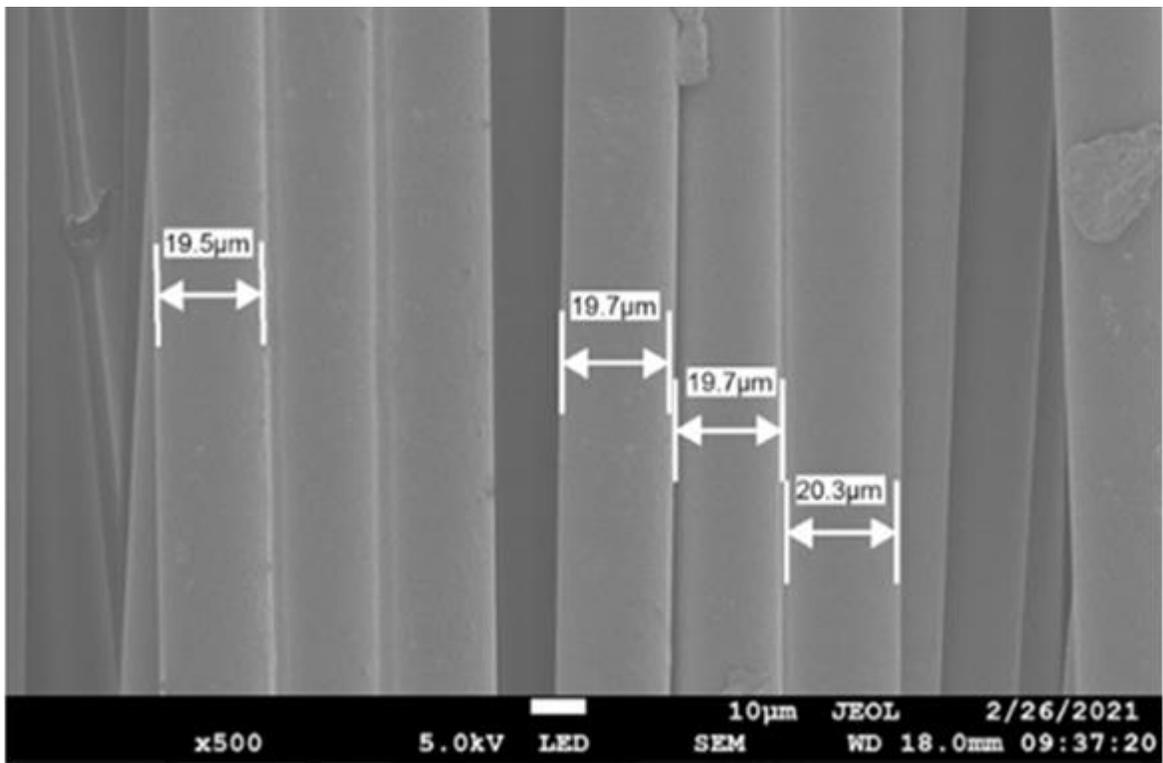


Fig. 3.3 Imagen para calcular el eje mayor

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

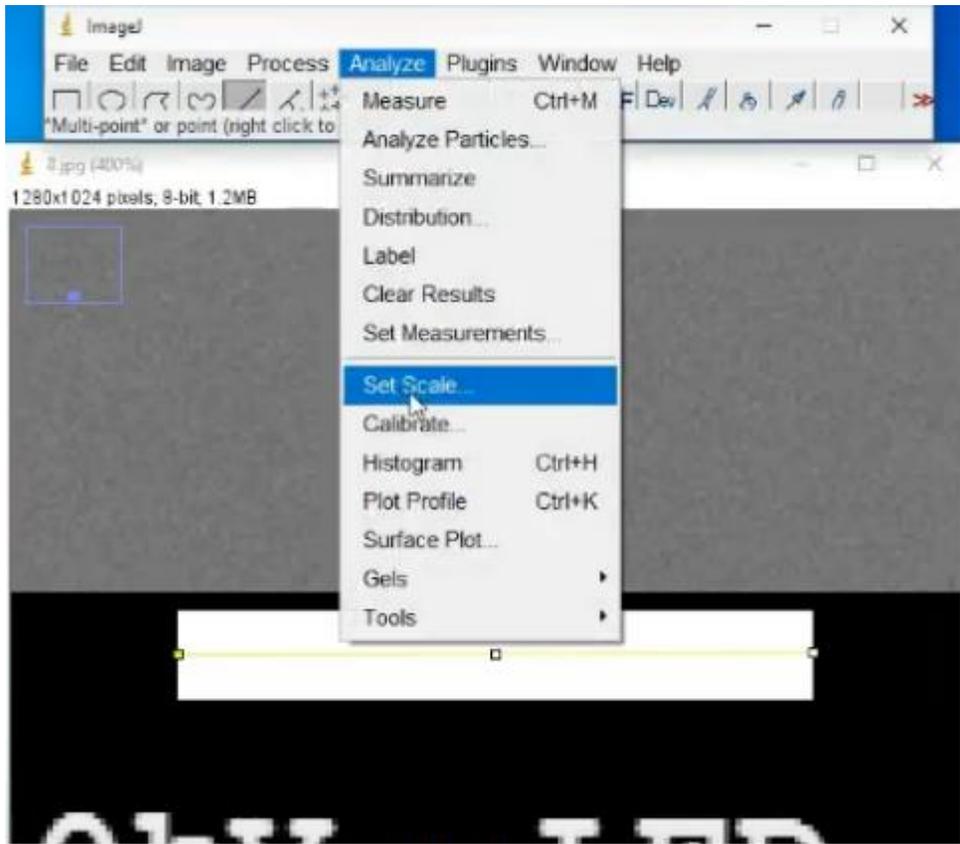


Fig. 3.4 Escalar imagen

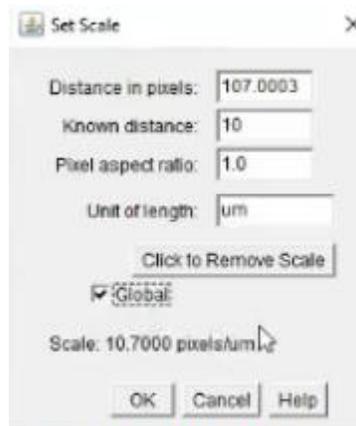
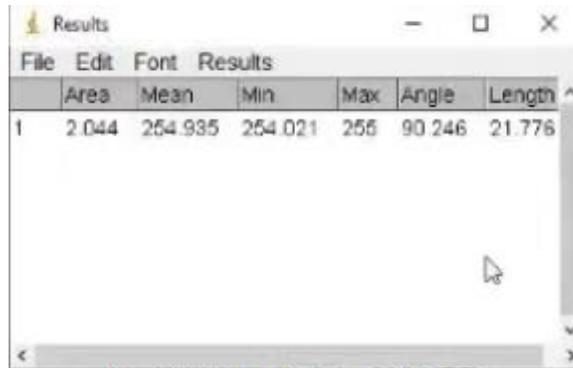


Fig. 3.5 Escalar medida



	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	2.044	254.935	254.021	255	90.246	21.776

Fig. 3.6 Valor de la medida

De igual forma, se obtienen las distancias entre las tramas y las urdimbres (ver figura 3.7), el alto de la preforma que para la elipse será el eje menor (ver figura 3.8), en resumen las medidas para caracterizar la CRU son (ver figura 3.9):

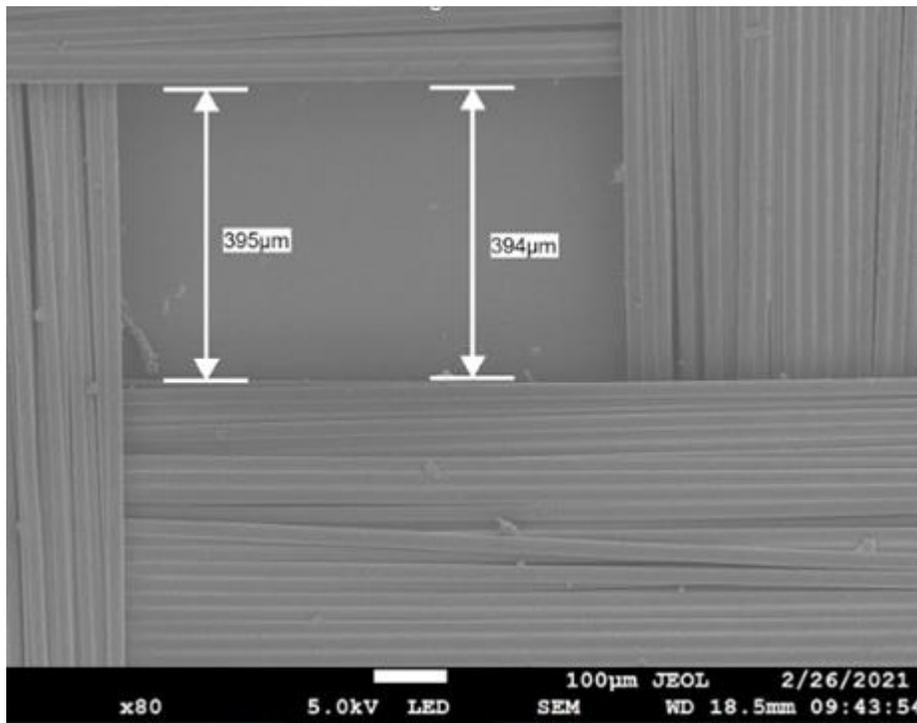


Fig. 3.7 Imagen distancia entre tramas y urdimbres

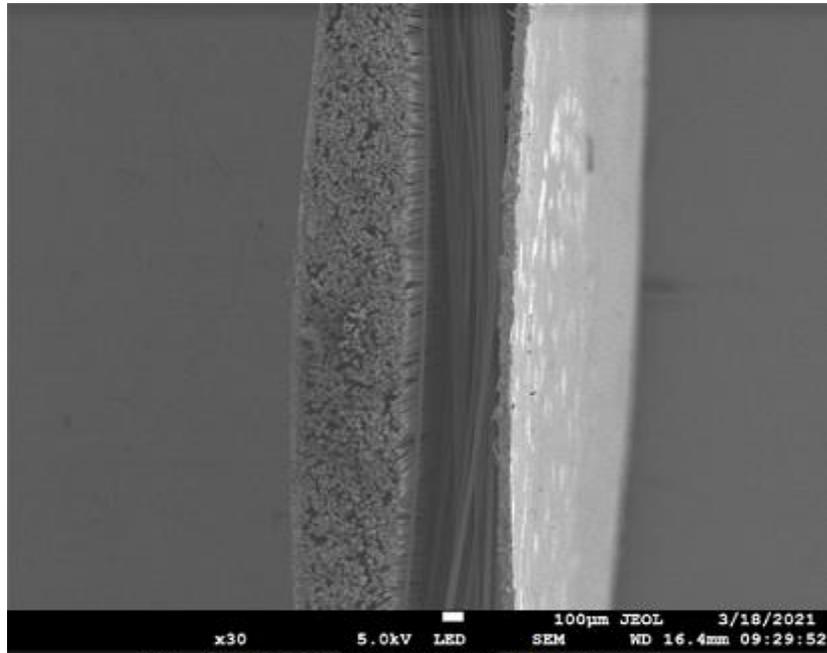


Fig. 3.8 Imagen para calcular el eje menor

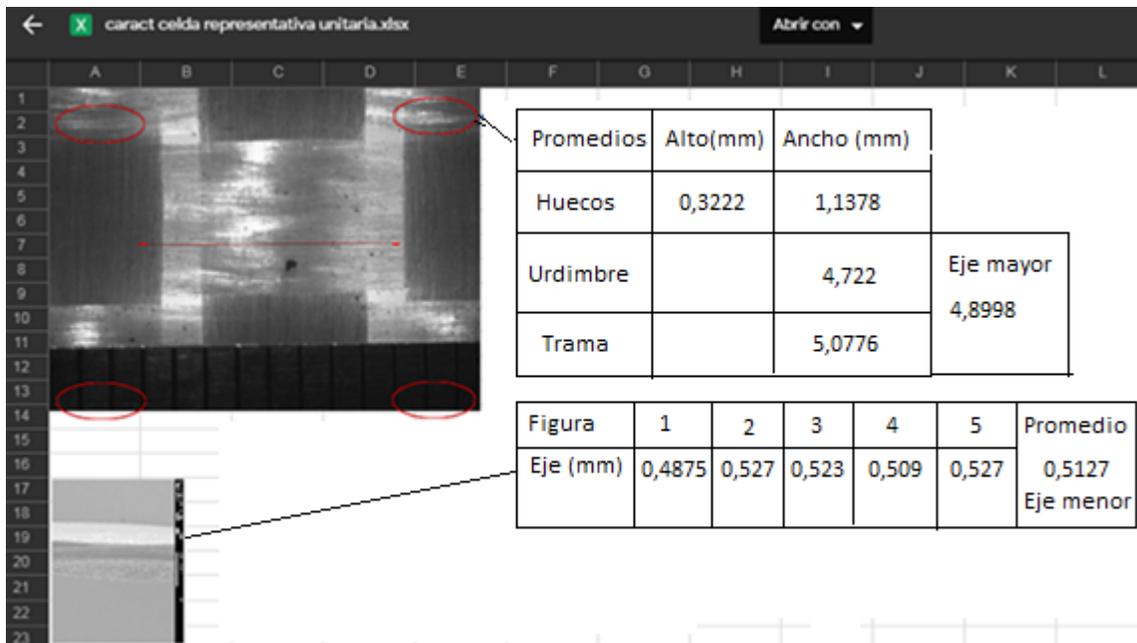


Fig. 3.9 Medidas para caracterizar la CRU

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Para realizar la evaluación computacional para procesos de moldeo líquido, mediante la simulación por elementos finitos de llenado de compuestos a escala mesoscópica, se utiliza el software computacional *ANSYS*, se ingresa y al lado derecho aparece un menú (ver figura 3.10), se selecciona la opción *Component Systems*, la cual despliega otra ventana (ver figura 3.11), en la cual arrastramos la opción *Geometry*, para soltarla al lado derecho (ver figura 3.12), luego clic derecho y seleccionamos *New SpaceClaim Geometry*, en este sistema de coordenadas (ver figura 3.13), y con la preforma caracterizada, se puede dibujar la CRU.

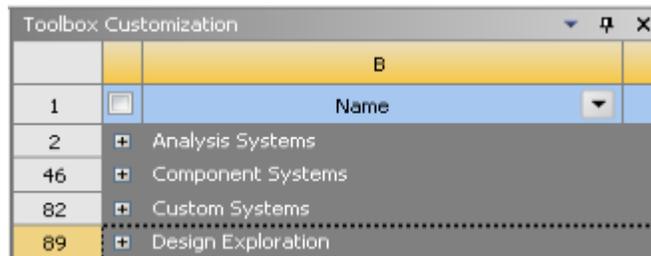


Fig. 3.10 Toolbox ANSYS

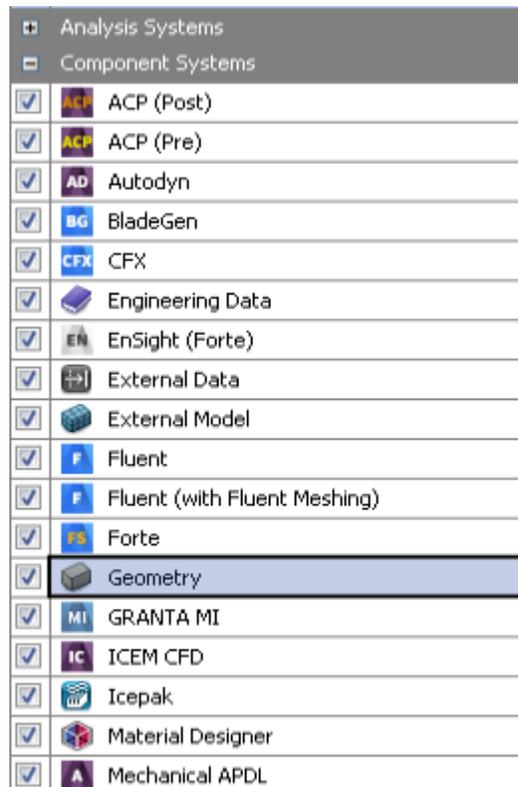


Fig. 3.11 Módulos de Componentes

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

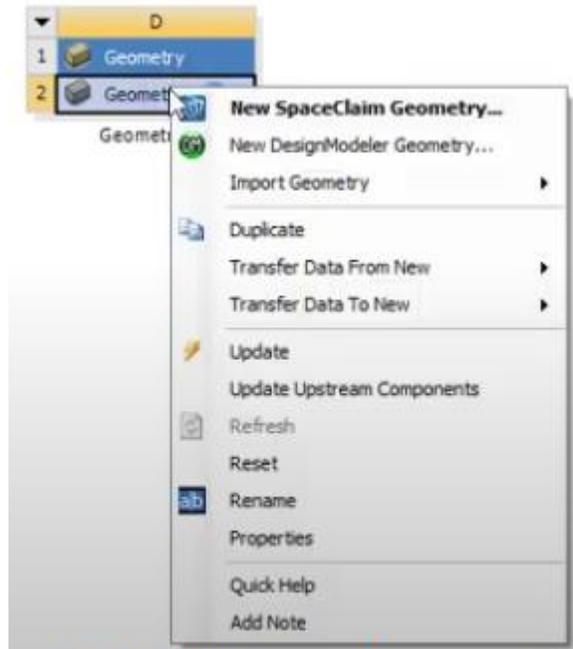


Fig. 3.12 Ventana para crear la geometría

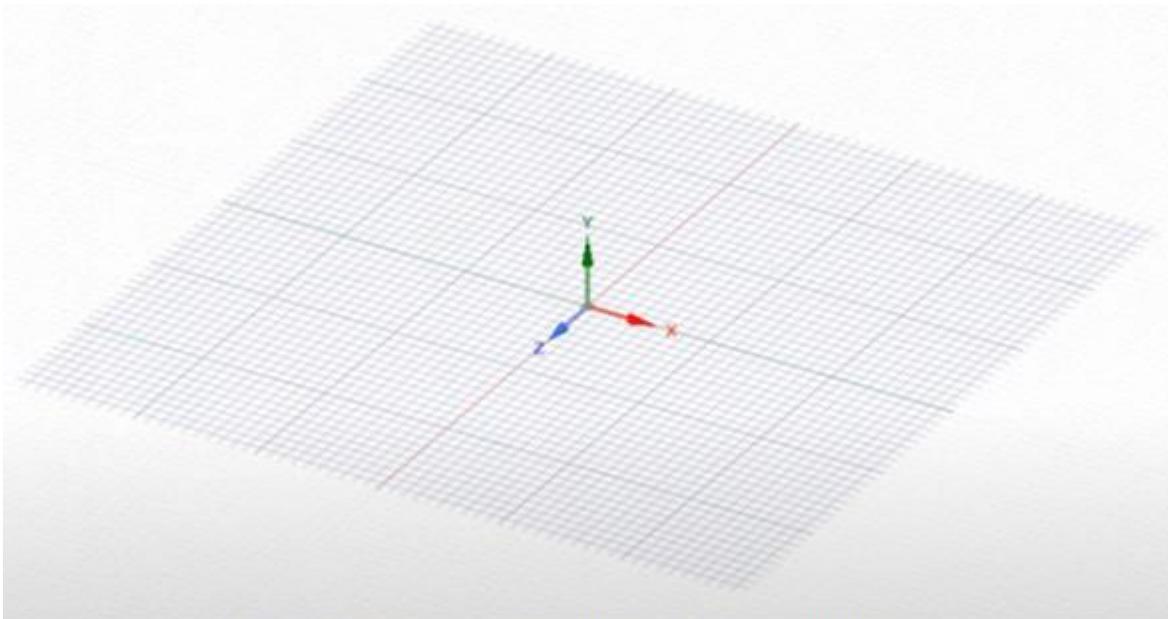


Fig. 3.13 Sistema de coordenadas para dibujar la geometría

Una vez se tenga la CRU bien dibujada (ver figura 3.14), se guarda y se regresa al menú principal.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

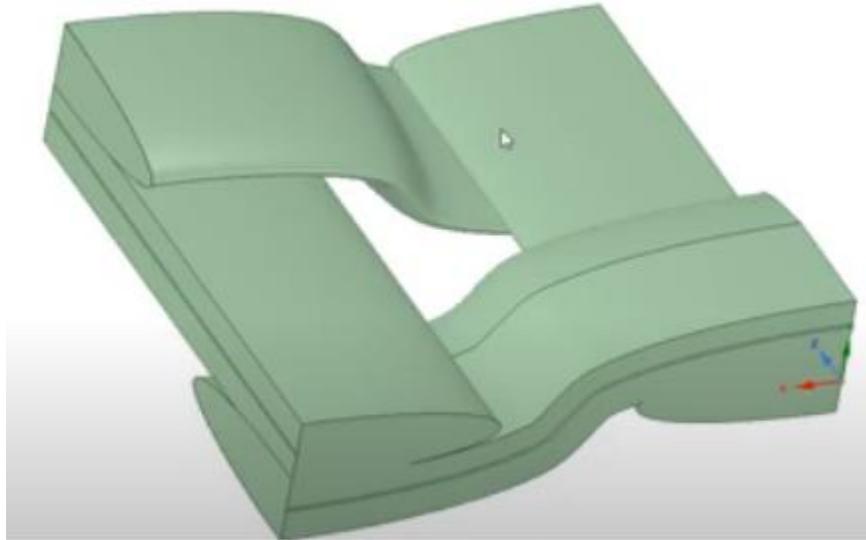


Fig. 3.14 CRU finalizada

Luego se realiza el mallado, este mallado permite convertir una geometría compleja en elementos simples, esta malla influye en la precisión, la convergencia y la velocidad de la simulación, para ello se regresa a la página principal y en *Component Systems* se arrastra la opción *Mesh* (ver figura 3.15), y se suelta en el cuadro derecho *Geometry* (ver figura 3.15), luego podemos hacer el mallado, dando doble clic en *Mesh* (ver figura 3.15).

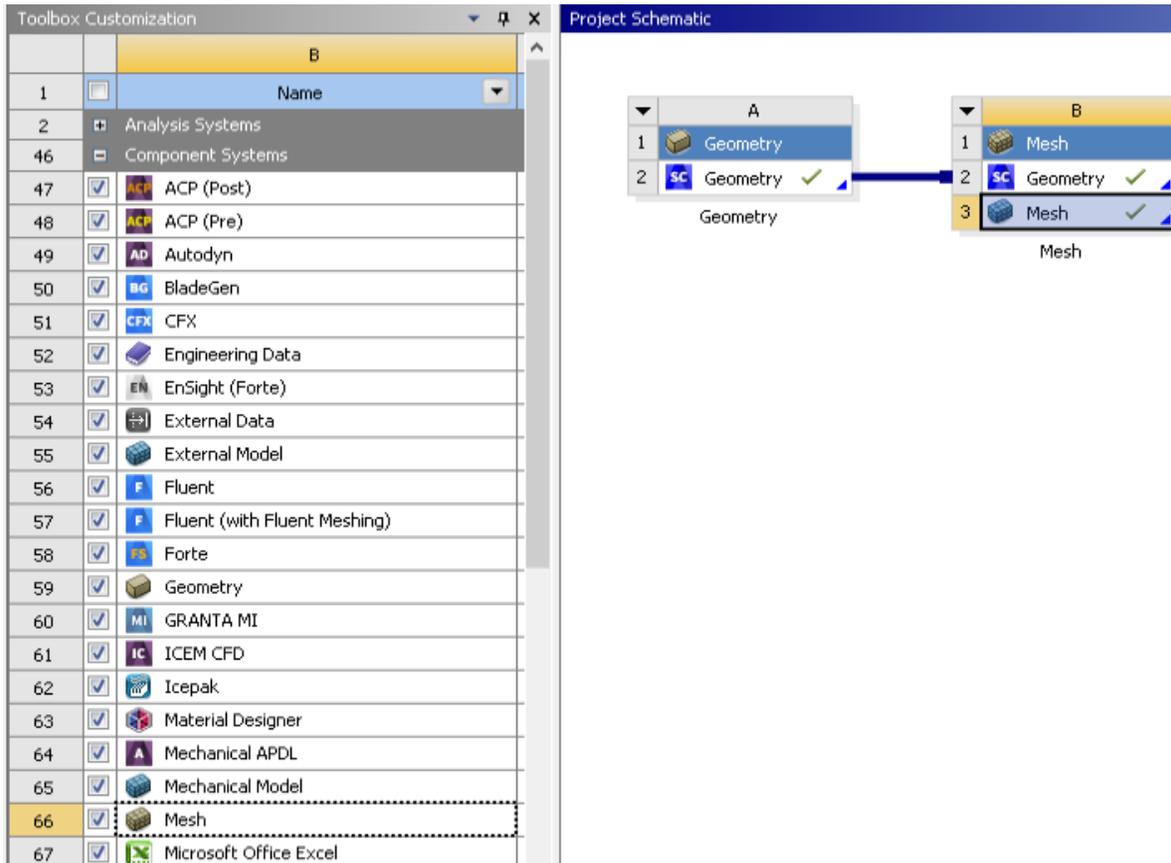


Fig. 3.15 Módulos de Componentes

Al lado izquierdo aparece el menú con las diferentes opciones para el mallado (ver figura 3.16), y al lado derecho aparece el dibujo de la CRU, donde se puede mirar todo el progreso del mallado, lo primero es agregar los controles de malla, entonces se da clic en *Mesh*, luego en la parte inferior en la opción *Physics Preference* que por defecto está *Mechanical*, lo cambiamos por *CFD* (ver figura 3.17), que es el mallado más común, y asegurarse que en la opción *Solver Preference* esté *Fluent* y en *Export Format* esté *Standard* (ver figura 3.17), y así ya se tiene el primer control de malla.

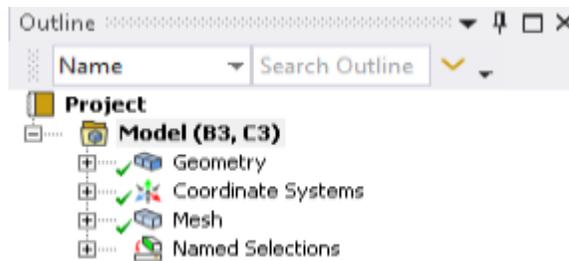


Fig. 3.16 Menù para el Mallado

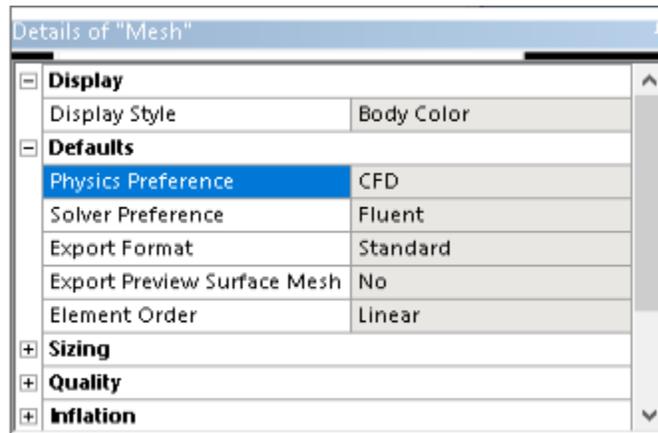


Fig. 3.17 Opciones de Mallado

Se continua con un control de método, para ello se da clic derecho en *Mesh*, *Insert* y *Method* (ver figura 3.18), el cual despliega una ventana, se le da clic en *Geometry*, y al lado derecho se selecciona toda la CRU, y luego clic en *Apply* (ver figura 3.19).

Posteriormente, creamos unos controles de tamaño, el primero de cuerpo, para ello, se da clic derecho en *Mesh*, *Insert* y *Sizing* (ver figura 3.18), la cual despliega una ventana y se selecciona todo el cuerpo de la CRU y clic en *Apply*, luego en *Element Size* se coloca 5×10^{-5} y clic en *Apply* (ver figura 3.20). Ahora se crea otro control de tamaño de caras, se da clic derecho en *Mesh*, *Insert* y *Sizing* (ver figura 3.18), luego en la parte superior hay varias herramientas, las cuales son utilizadas para seleccionar cuerpo, caras, aristas y puntos (ver figura 3.21); luego se selecciona la herramienta caras y con *control* sostenido se seleccionan las caras (ver figura 3.21), luego clic en *Apply*, al lado izquierdo despliega una ventana, donde se ve que se seleccionaron 4 caras y en la opción *Element Size* se coloca 1×10^{-5} (ver figura 3.22). Se crea otro control de tamaño de aristas, donde éstas son las transiciones entre las tramas y las urdimbres, se da clic derecho en *Mesh*, *Insert* y *Sizing* (ver figura 3.18); luego se selecciona la herramienta aristas y con *control* sostenido se seleccionan las aristas (ver figura 3.23), luego clic en *Apply*, al lado izquierdo despliega una ventana, y en la opción *Element Size* se coloca 2×10^{-5} (ver figura 3.24).

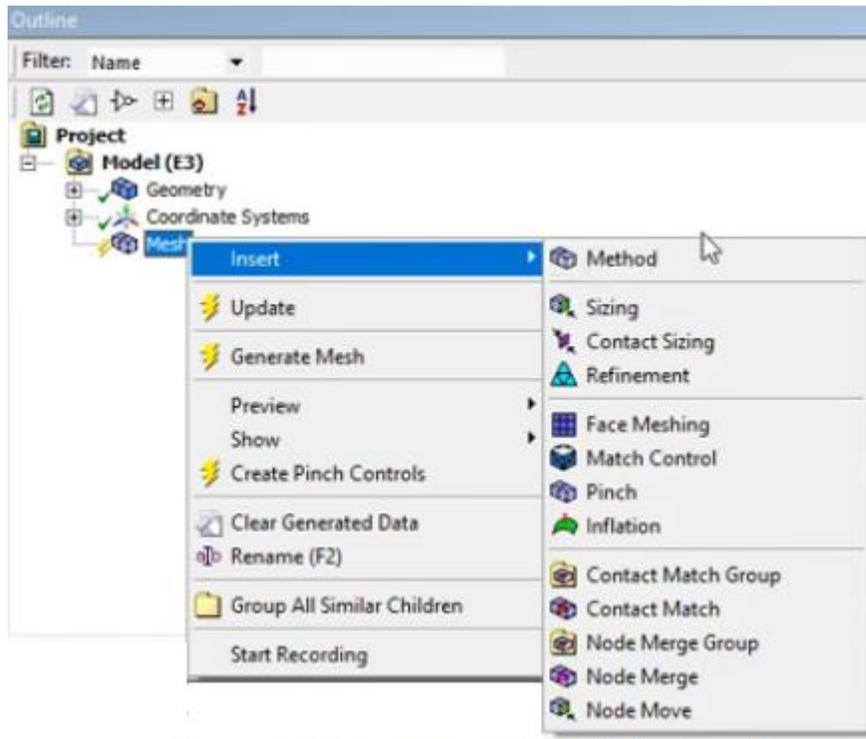


Fig. 3.18 Opciones para control método y tamaño

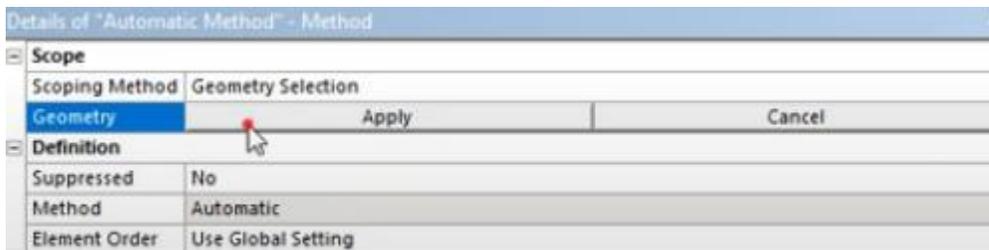


Fig. 3.19 Ventana para control método

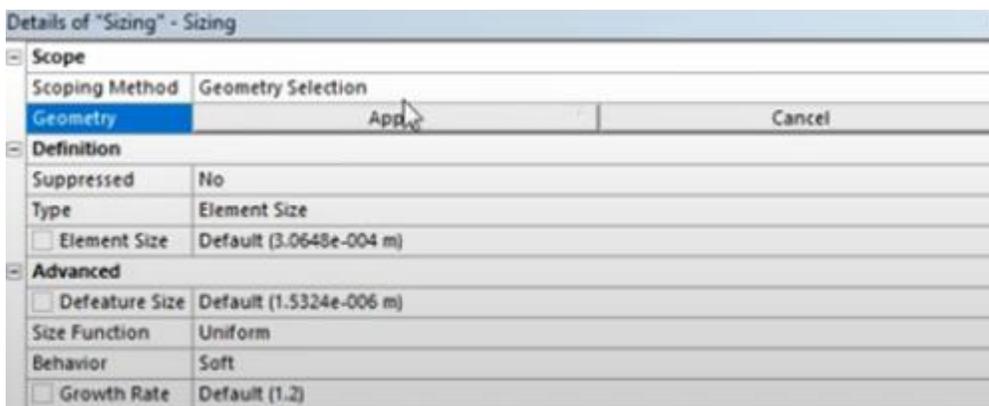


Fig. 3.20 Ventana para el control de tamaño

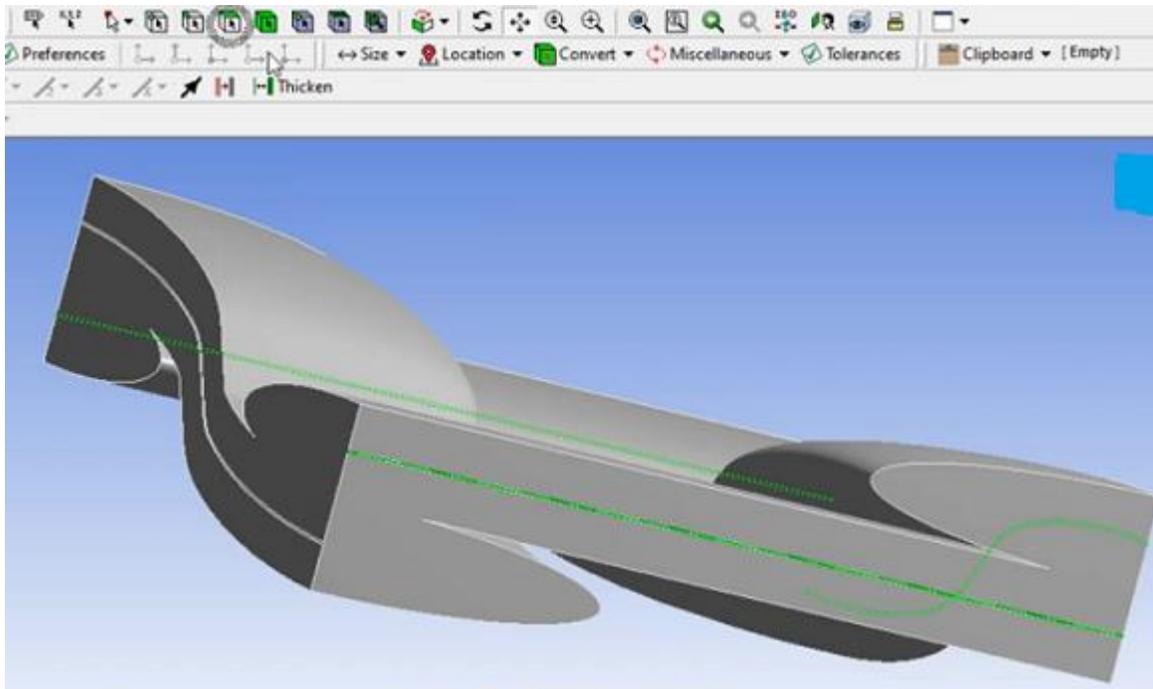


Fig. 3.21 Selección de caras

Details of "Face Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input checked="" type="checkbox"/> Element Size	1.e-005 m
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (1.5324e-006 m)
Size Function	Uniform
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)

Fig. 3.22 Control tamaño caras

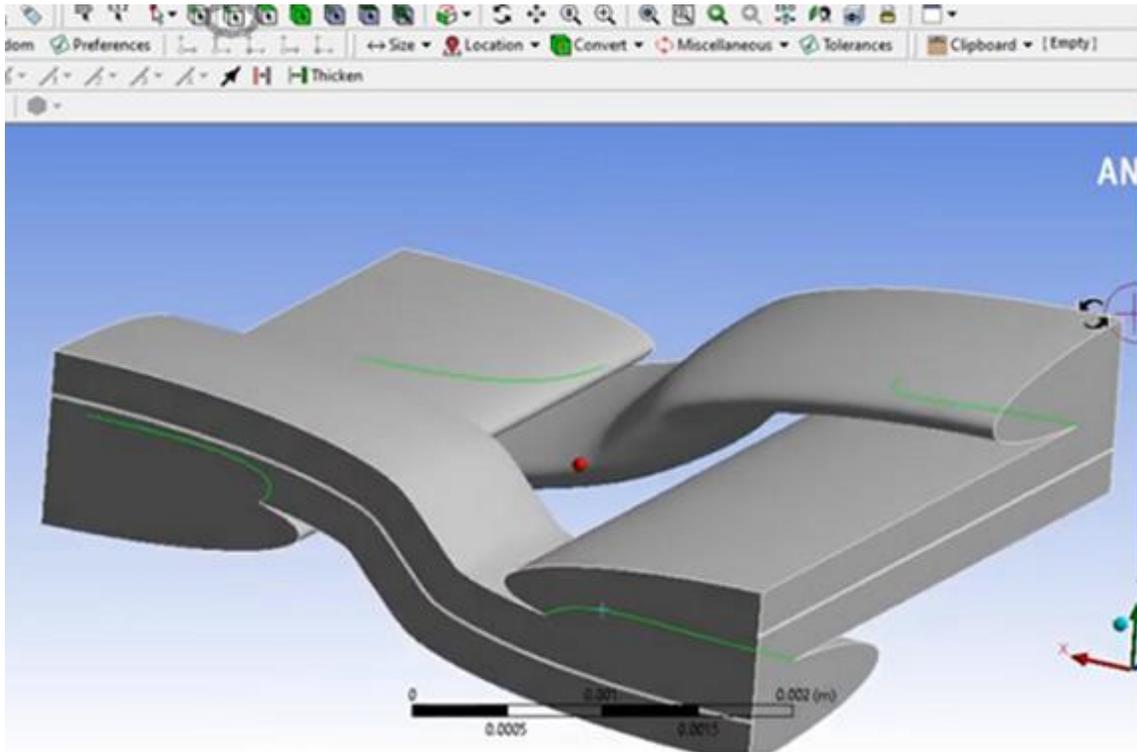


Fig. 3.23 Selección de aristas

Details of "Edge Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Edges
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input checked="" type="checkbox"/> Element Size	2e-5
Advanced	
Size Function	Uniform
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
Bias Type	No Bias

Fig. 3.24 Control Tamaño Aristas

Después de realizar todo lo anterior, se obtiene el mallado final (ver figura 3.25), sólo es clic derecho en *Mesh* y seleccionar la opción *Update* (ver figura 3.26).

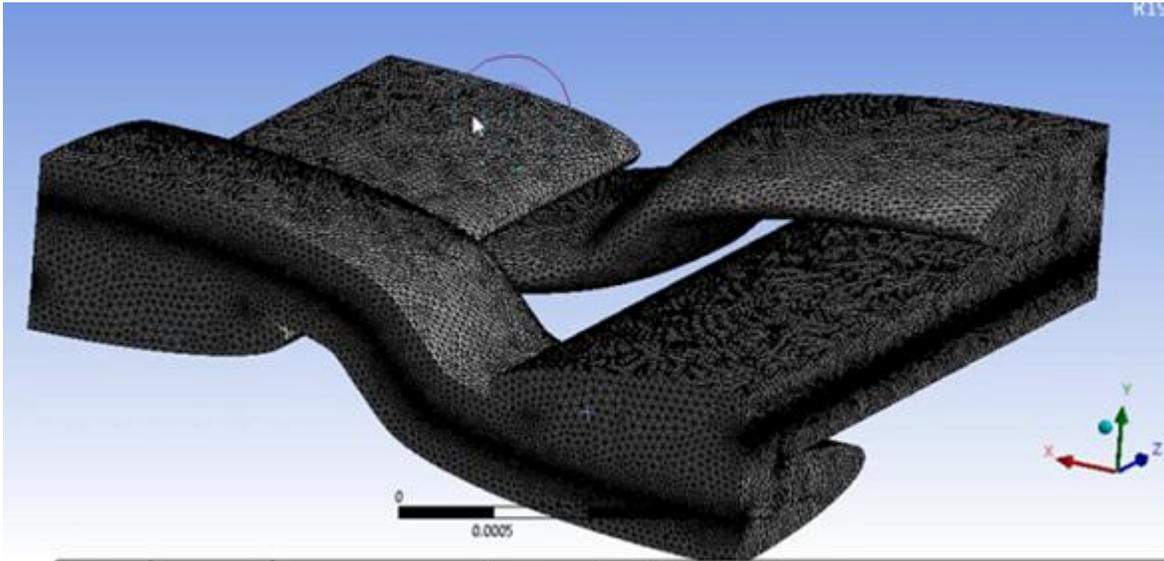


Fig. 3.25 Imágen con el mallado final

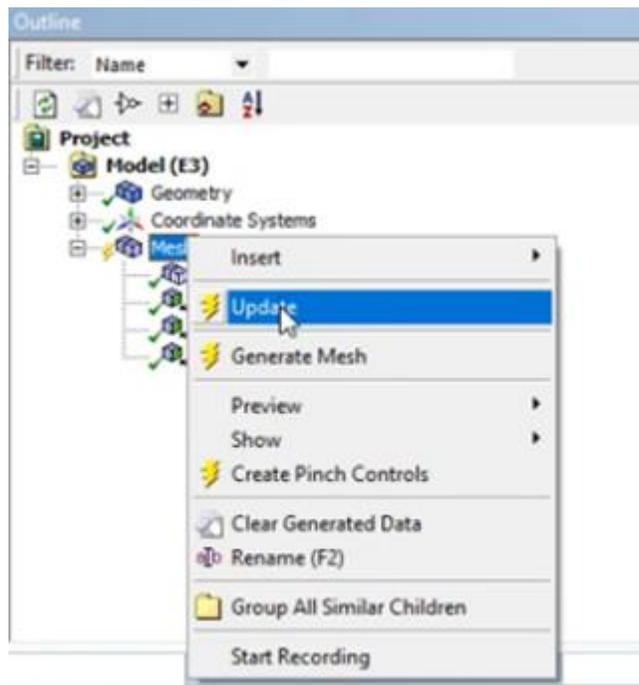


Fig. 3.26 Ver mallado final

Antes de salir del *Mesh*, es necesario colocar los nombres de las superficies, donde se van a aplicar presiones o alguna condición de frontera determinada, para ello, al lado derecho superior con la herramienta cara y con control sostenido, seleccionamos las cuatro caras

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

(ver figura 3.27), luego clic derecho opción *Create Named Selection* (ver figura 3.28), y se le da cualquier nombre, por ejemplo *Outlet* (ver figura 3.29).

Igualmente seleccionamos las caras donde quedan cortadas las celdas (ver figura 3.30), y se repite lo mismo del párrafo anterior, pero se le asigna otro nombre, por ejemplo *Simmetry*.

Finalmente seleccionamos todas las caras que faltan, en las cuales se aplica la presión de la resina, areas verdes (ver figura 3.31), al igual que las anteriores le colocamos un nombre, por ejemplo *Inlet*.

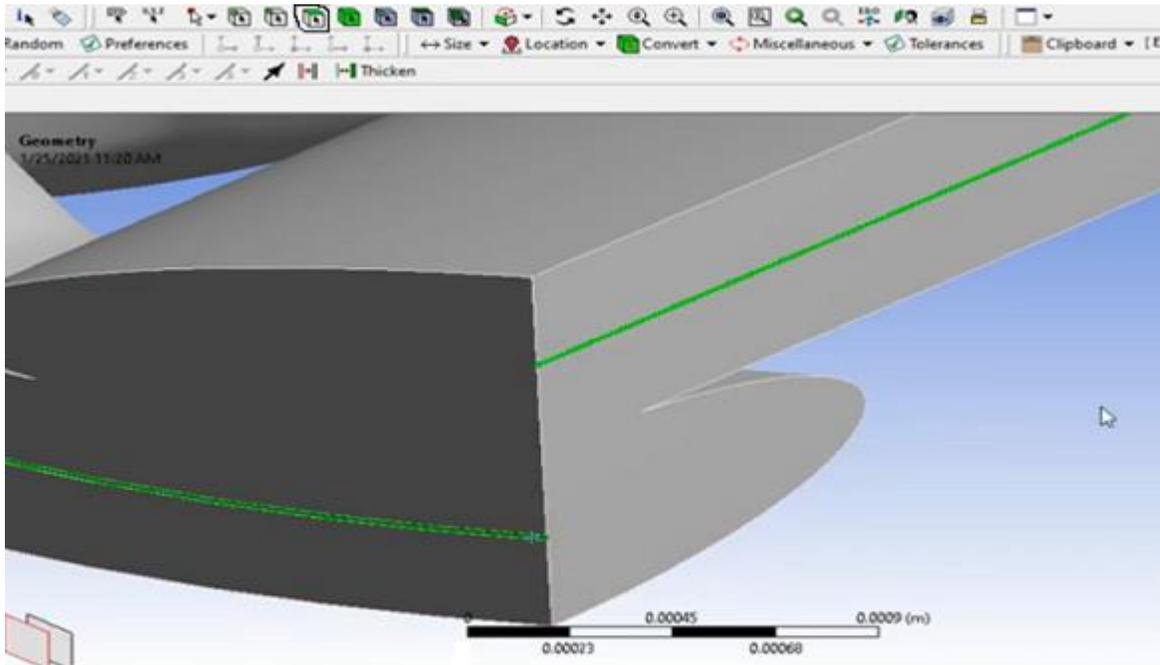


Fig. 3.27 Selección de caras



Fig. 3.28 Menu para crear nombre

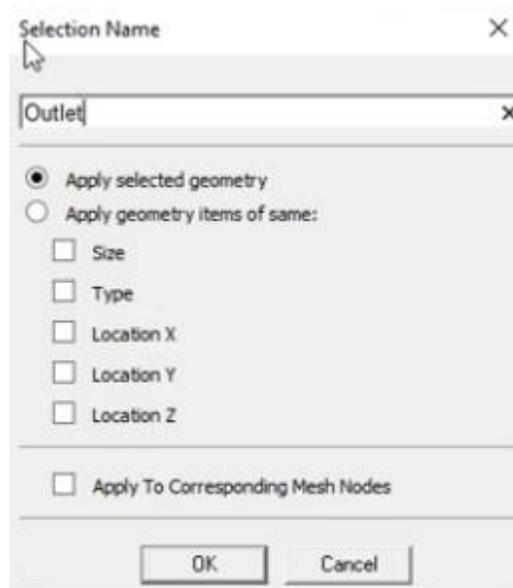


Fig. 3.29 Nombrar caras

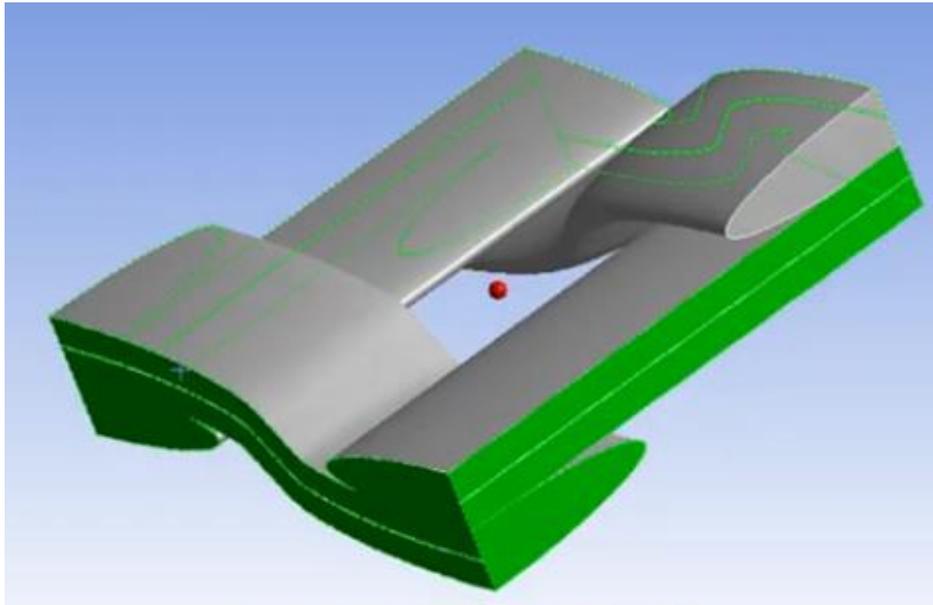


Fig. 3.30 Caras donde se cortan las celdas

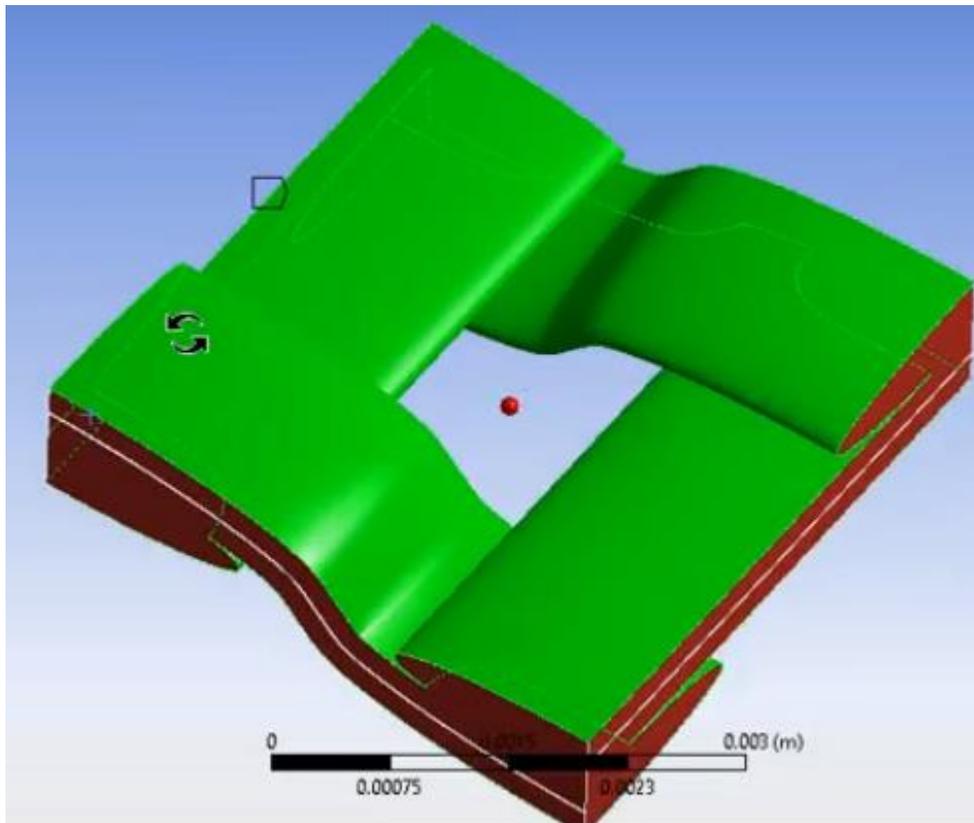
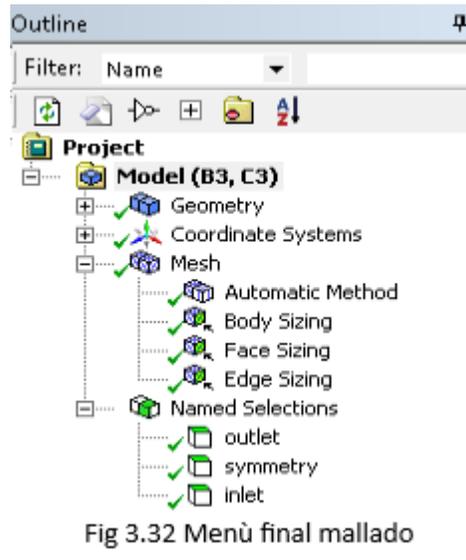


Fig. 3.31 Caras donde se aplica presión de la resina

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Después de realizar todo lo anterior, al lado izquierdo tenemos todos los controles y los nombres que se le dieron a las diferentes caras (ver figura 3.32), se le da guardar y volvemos a la página principal del ANSYS.



Antes de continuar, es necesario consultar en la literatura las propiedades de la resina, ya que las propiedades del aire, están por defecto, estas propiedades son el calor específico, tensión superficial, conductividad térmica, peso molecular.

También es necesario calcular la porosidad, para ello se utiliza una imagen de las mechas (ver figura 3.33), y con la ayuda del *software ImageJ*, se selecciona *File* y se abre la imagen (ver figura 3.34), luego con la herramienta de línea, se traza una línea en el rectángulo blanco de la parte inferior (ver figura 3.34), se selecciona *Analyze* y *Set Scale*, y en la opción *Pixel aspect ratio* se coloca 100, luego en *Unit of lenght* se coloca *um*, y *OK* (ver figura 3.34); después de estar escalada, se selecciona *Process*, luego *Binary* y *Make Binary* (ver figura 3.35), y así obtenemos una imagen en blanco y negro (ver figura 3.36), donde el porcentaje de color blanco es la porosidad, y porcentaje de fibra 1 menos la porosidad.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

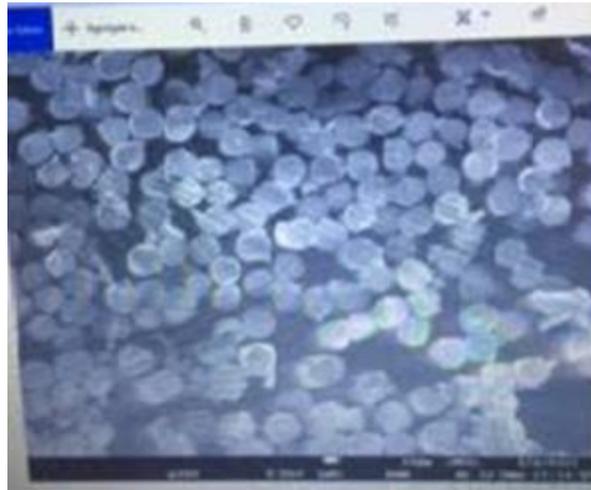


Fig. 3.33 Imágen de las mechas

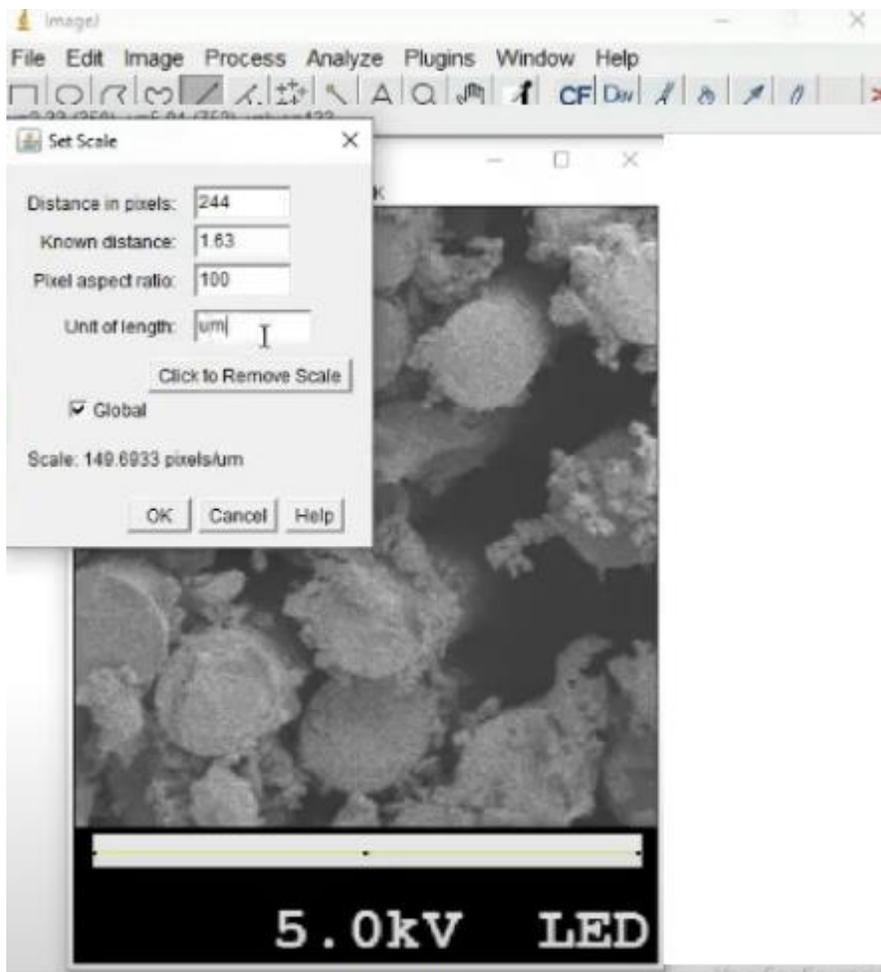


Fig. 3.34 Escalar Imágen

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

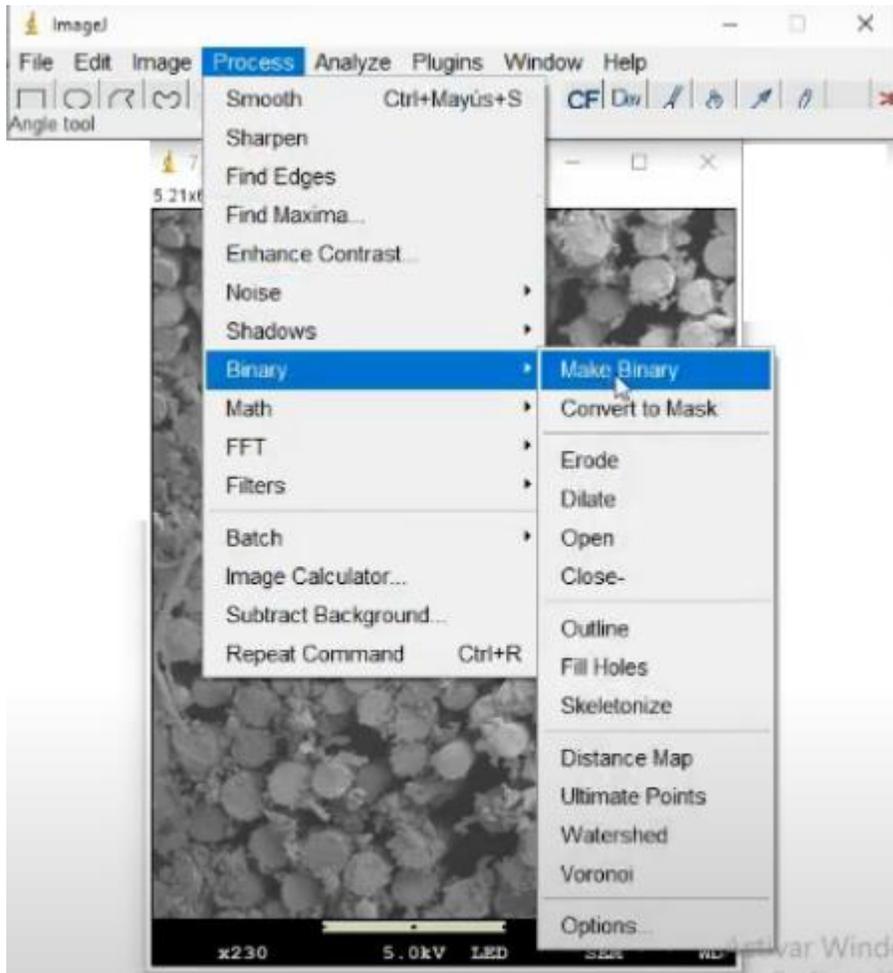


Fig. 3.35 Opciones imagen Binario

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

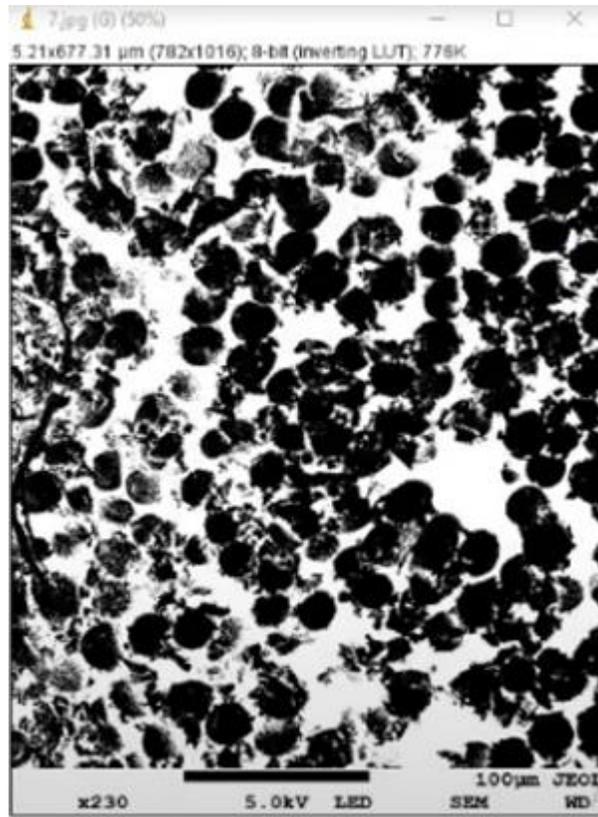


Fig. 3.36 Imágen mechas en binario

Para calcular la porosidad de la fibra, se selecciona la opción *Analyze* y luego *Analyze Particles* (ver figura 3.37), la cual despliega una ventana (ver figura 3.38), en donde se puede dividir la imagen en áreas, preferiblemente pequeñas, en la opción *Size* se coloca 1, en la opción *Show* se elige *Outlines* y *OK*, se despliega una ventana con los resultados (ver figura 3.39), se selecciona *File* y *Save*, para obtener el área total de la imagen, se debe recortar utilizando la herramienta rectángulo, seleccionamos la imagen, luego en *Image* se elige la opción *Crop* (ver figura 3.40), y así se obtiene la imagen final (ver figura 3.41), donde en la parte superior se encuentra el área de la imagen.

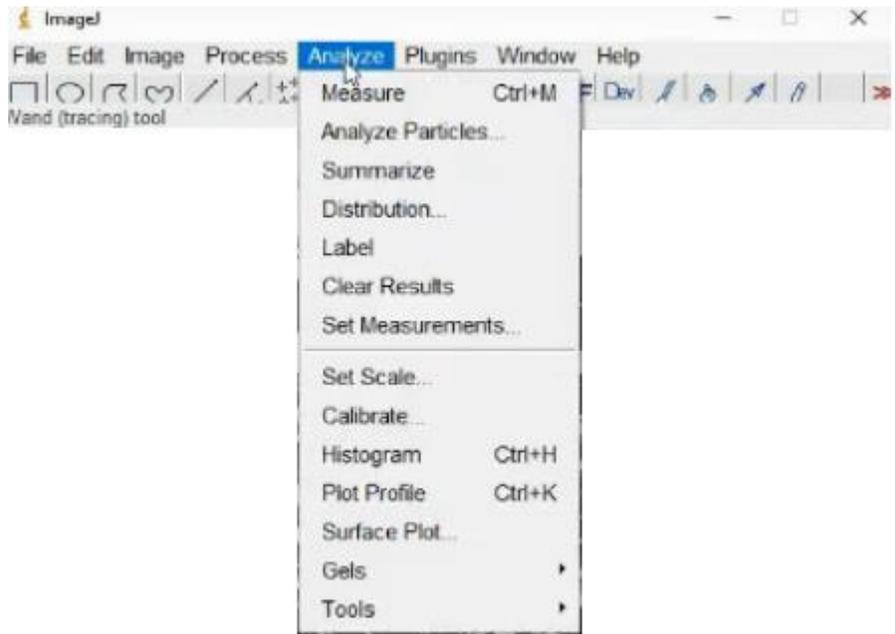


Fig. 3.37 Análisis de partículas

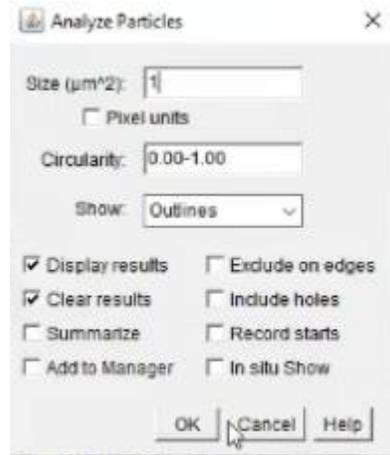


Fig. 3.38 Tamaño áreas



	Area	Mean	Min	Max
20	1.164	255	255	255
21	9.471	255	255	255
22	1.302	255	255	255
23	9.022	255	255	255
24	3.946	255	255	255
25	29.816	255	255	255
26	13.599	255	255	255
27	8.257	255	255	255

Fig. 3.39 Tabla de resultados

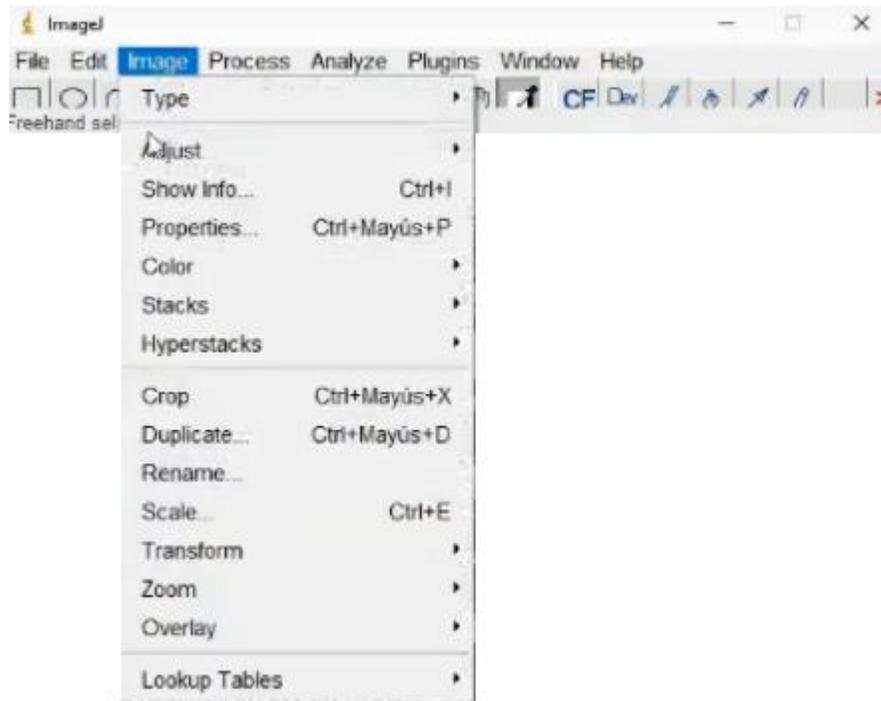


Fig. 3.40 Opción para recortar

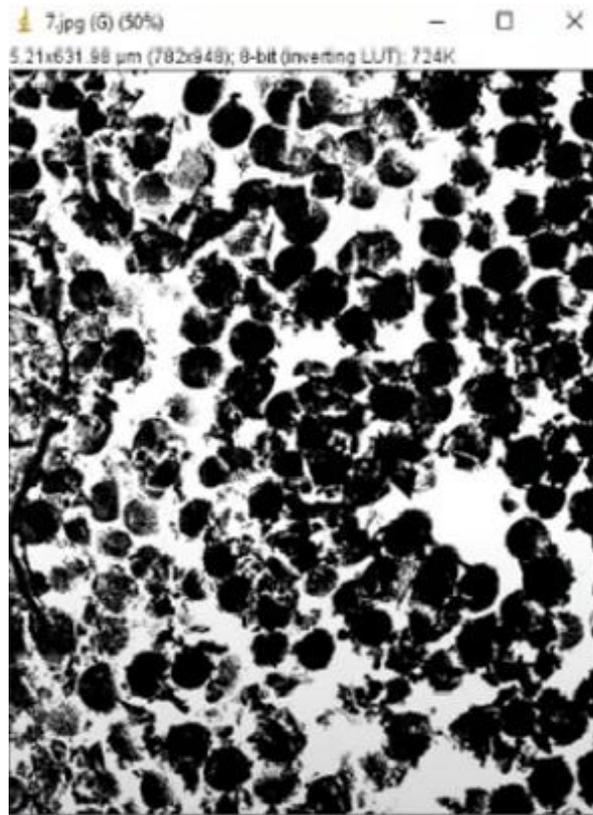


Fig. 3.41 Imágen final binaria

Luego de los pasos anteriores, se abre en el *EXCEL* el archivo que se guardó previamente, la suma de la columna B nos entrega el area de porosidad (ver figura 3.42), con este dato se calcula la porosidad (ver anexo A), y luego se calcula el inverso de la porosidad (ver anexo A).

	A	B	C	D	E	F	G	H
106	105	800	255	255	255			
107	106	2800	255	255	255			
108	107	100	255	255	255			
109	108	300	255	255	255			
110								
111								
112		8147900					area total	34610400
113								
114								0,23541768

Fig. 3.42 Cálculo de la porosidad

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Después de realizar el mallado, se realiza el módulo *Fluent*, para ello en *Analysis Systems*, se arrastra la opción *Fluid Flow (Fluent)* y se suelta en el cuadro derecho sobre *Mesh* (ver figura 3.43), doble clic en *Setup* y se despliega una ventana (ver figura 3.44), siempre se activa *Double Precision*, y en *Processes* se coloca 4 o el número de procesadores con que trabaja el computador, se da *OK* y nos abre el módulo *Fluent*, al lado derecho nos carga la geometría, y al lado izquierdo está el menú.

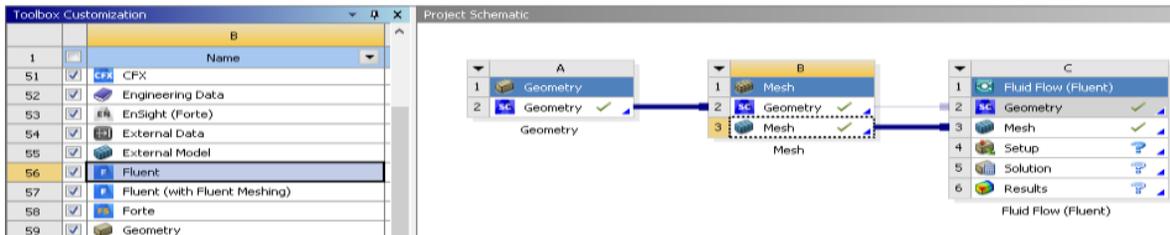


Fig. 3.43 Módulo Fluent

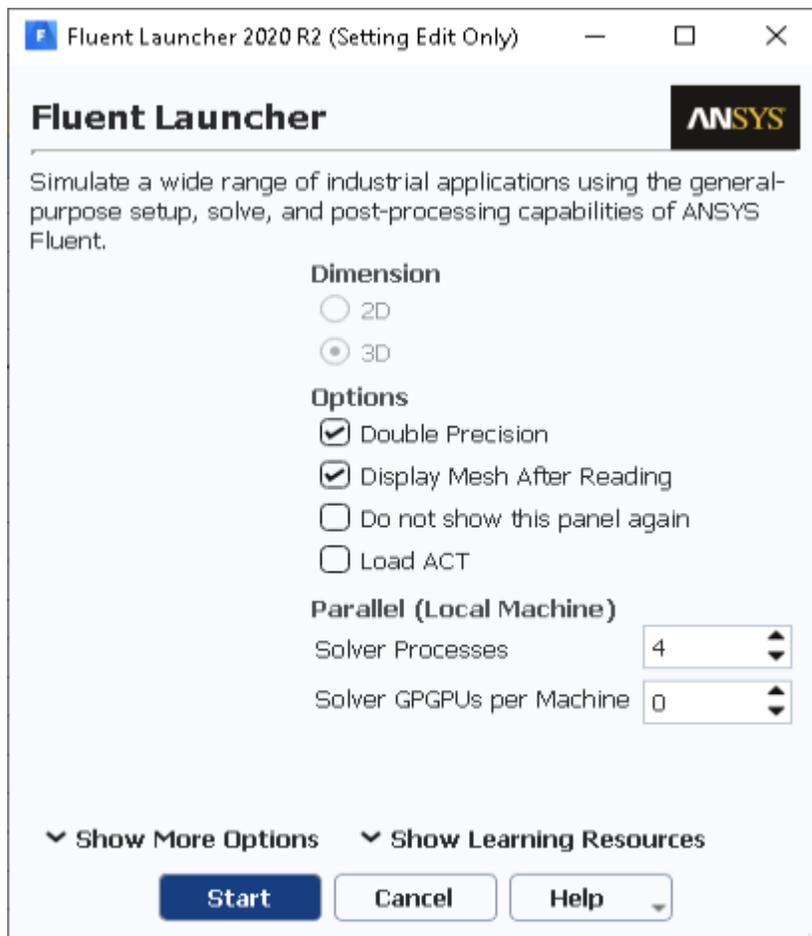


Fig. 3.44 Ventana de Opciones

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Se selecciona *General*, se despliega una ventana, donde *Type* debe estar en *Pressure-Based*, porque está basada en un solver de presión; en *Velocity Formulation* se selecciona *Absolute*; y en *Time* es *Transient*, porque hay un fluido moviéndose dentro de la malla (ver figura 3.45).

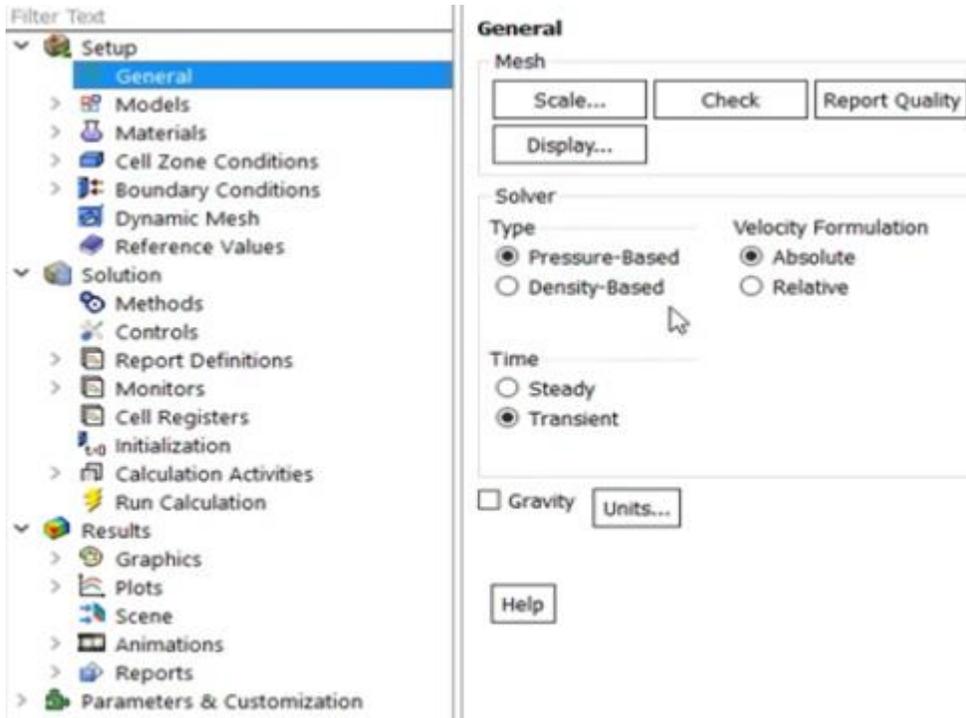


Fig. 3.45 Configurar general

Para continuar, debemos primero crear las fases, para nuestro caso sólo son dos, una fase de aire y otra de resina; la fase de aire ya está creada por defecto, entonces para crear la fase de resina, se selecciona *Materials*, luego *Fluid* y doble clic en *air* (ver figura 3.46), en la opción *Name* se coloca el nombre de la otra fase, en nuestro caso *Resin*,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

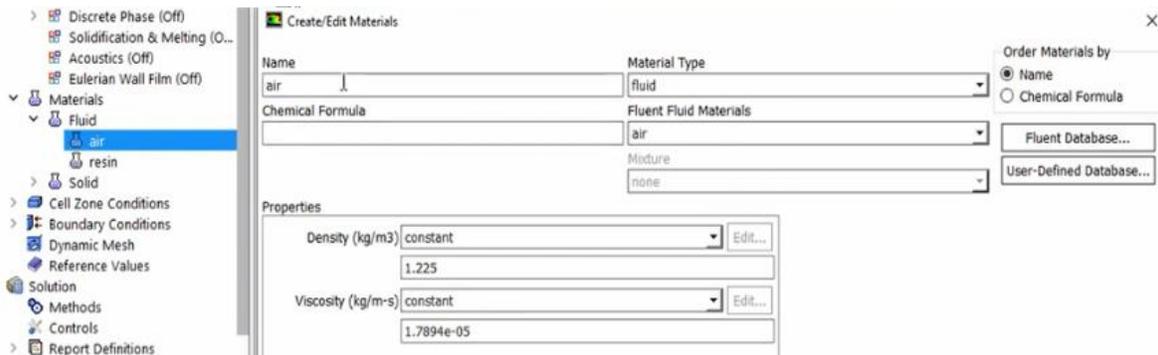


Fig. 3.46 Crear Fases

Se deben configurar las multifases, para ello se selecciona *Models*, luego doble clic en *Multiphase* (ver figura 3.47), al lado derecho en *Model* se selecciona *Volume of Fluid*, en *Volume Fraction Parameters* que esté en *Implicit*, y en *Number of Eulerian Phases* colocarlo en 2 (ver figura 3.47); se da doble clic en *Phases* al lado izquierdo (ver figura 3.48) y se selecciona cada una de las dos fases que aparecen, donde la una es primaria y la otra secundaria (ver figura 3.48), se selecciona *Edit* y en la opción *Phase Material* (ver figura 3.49), busco air y repito el paso anterior, y busco resin, luego *OK*.

Doble clic en *Phase Interactions* (ver figura 3.48), se selecciona *Surface Tension* (ver figura 3.50), se chulea *Surface Tension Force Modeling* (ver figura 3.51), en *Model* se selecciona *Continuum Surface Force* (ver figura 3.51), en *Surface Tension Coefficients* se coloca 0.017 (ver figura 3.51), y por último *OK*.

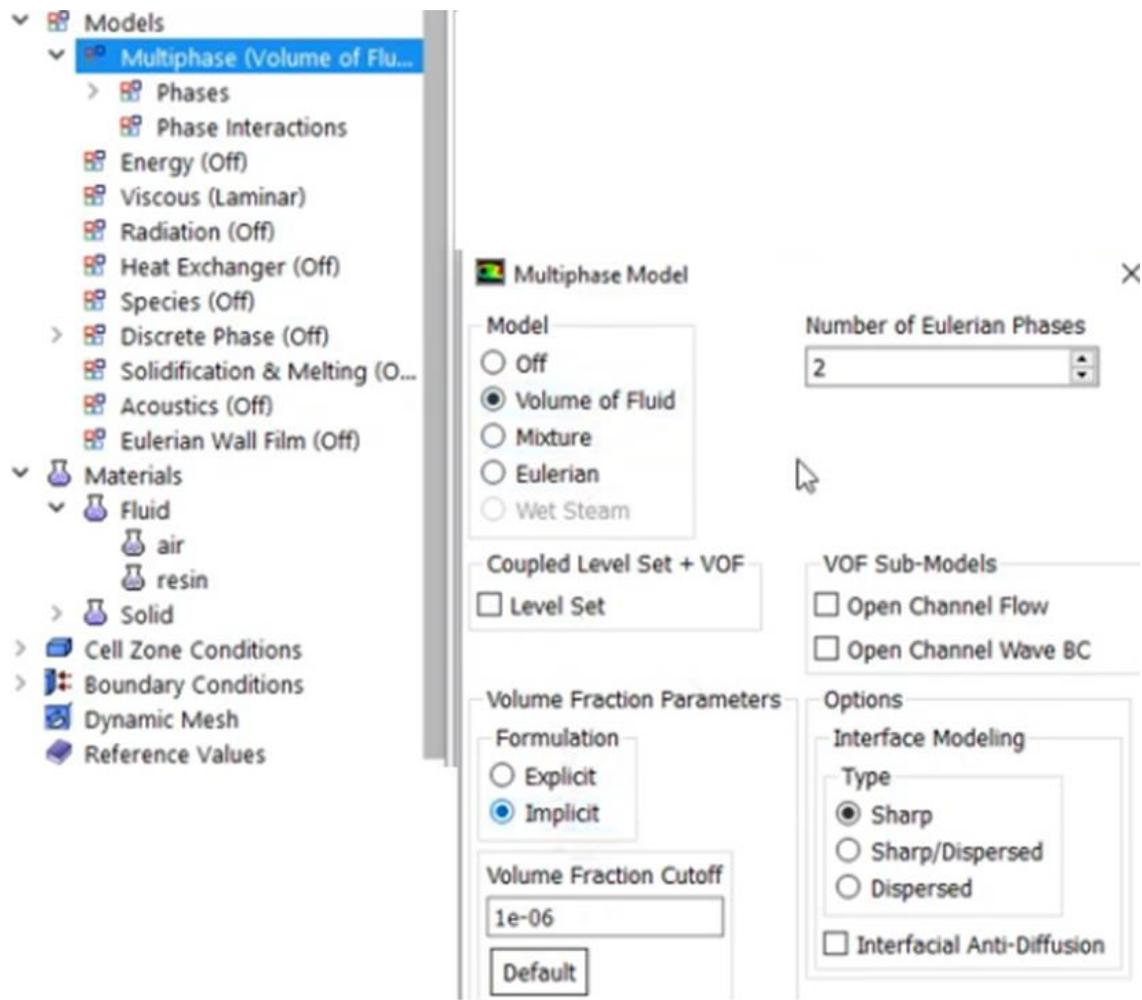


Fig. 4.37 configurar multifases

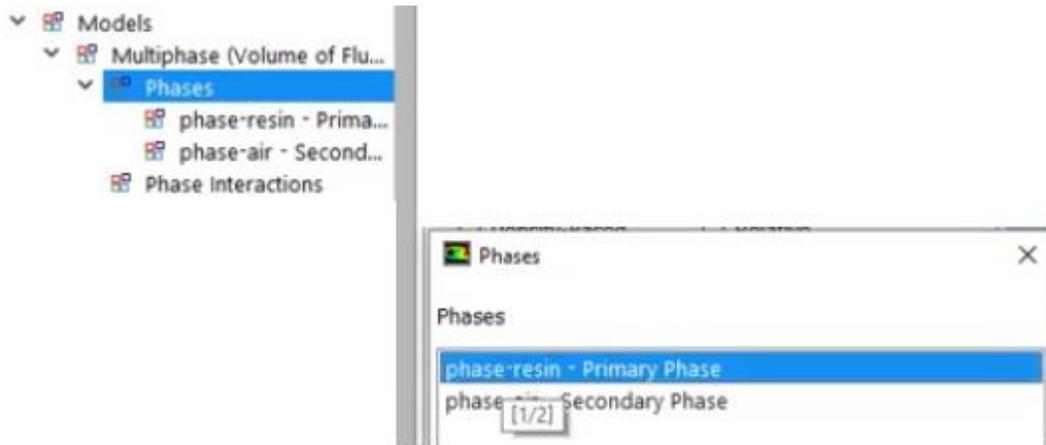


Fig. 3.48 Configurar Fases

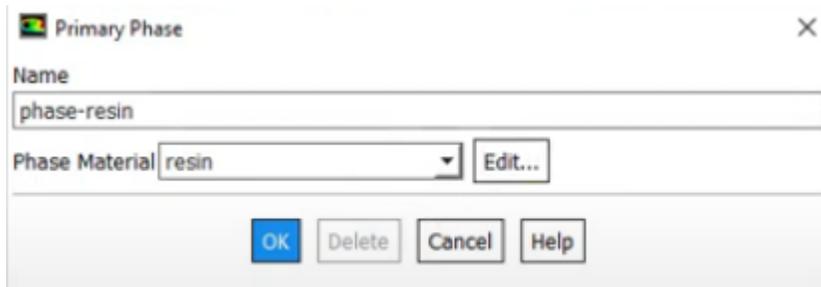


Fig. 3.49 Nombrar fases

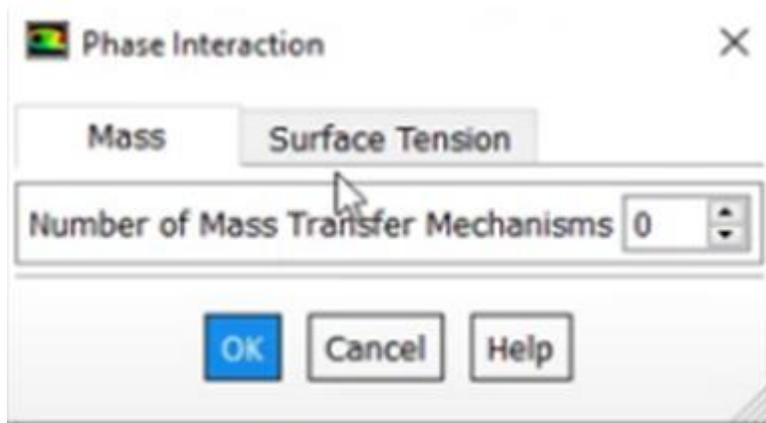


Fig. 3.50 Interacción Fase

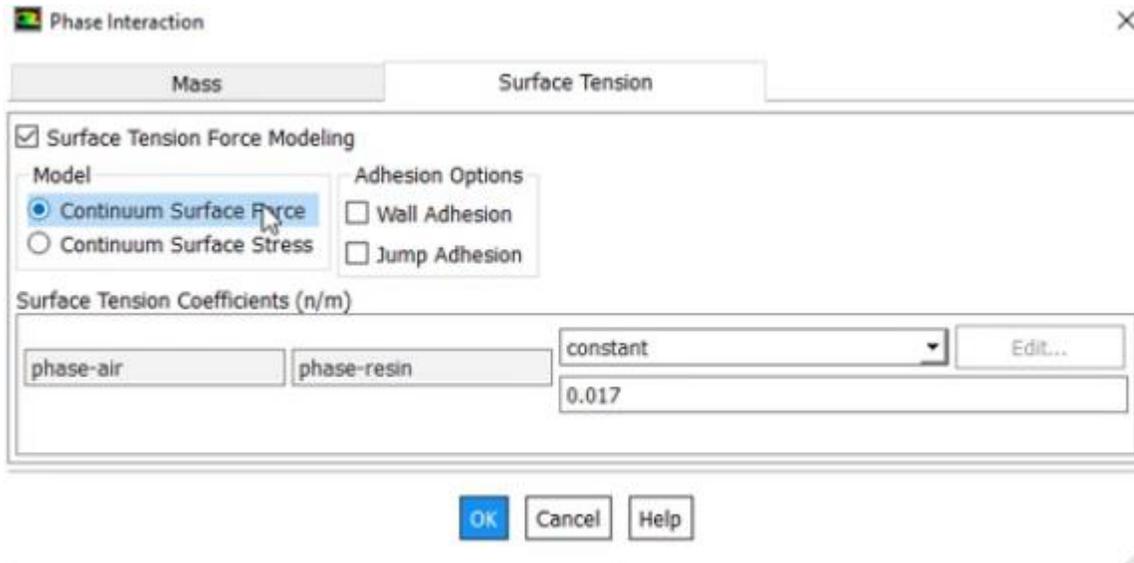


Fig. 3.51 Tensión superficial

De todas estas opciones solo se configura *Viscous (Laminar)* (ver figura 3.52), y se selecciona *Laminar* y *OK* (ver figura 3.52).

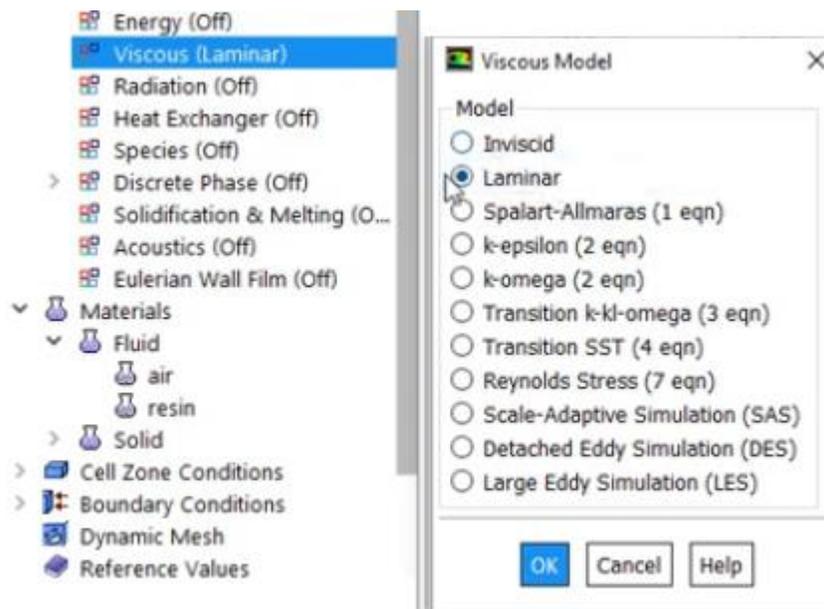


Fig. 3.52 Medio Viscoso

Se selecciona *Cell Zone Conditions* y doble clic en *geom* (ver figura 3.53), se debe activar *Porous Zone* (ver figura 3.53), ya que el medio es poroso, luego se selecciona *Porous Zone* en el renglon que sigue (ver figura 3.53), y se despliega una ventana donde se coloca la porosidad (ver figura 3.54), y OK.

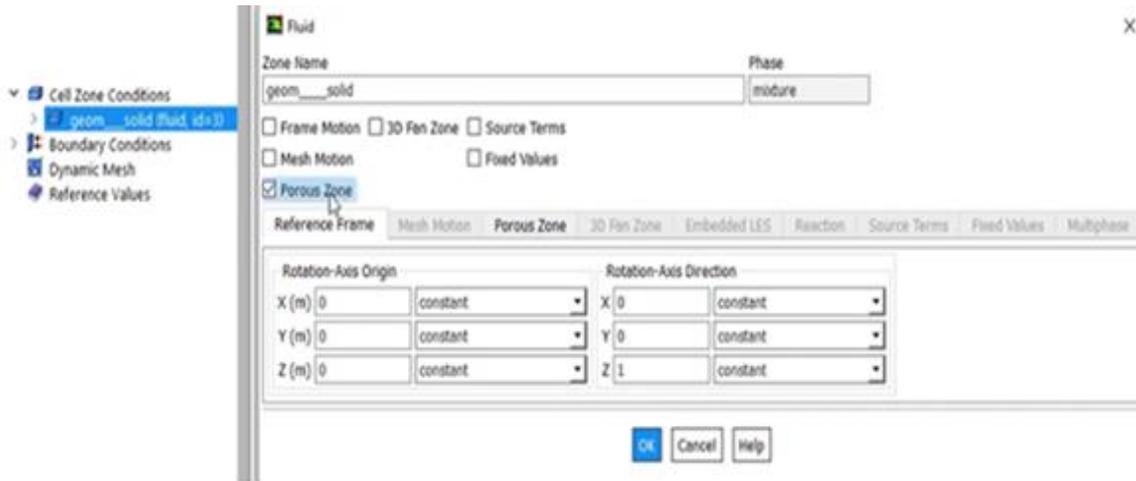


Fig. 3.53 Condiciones del medio

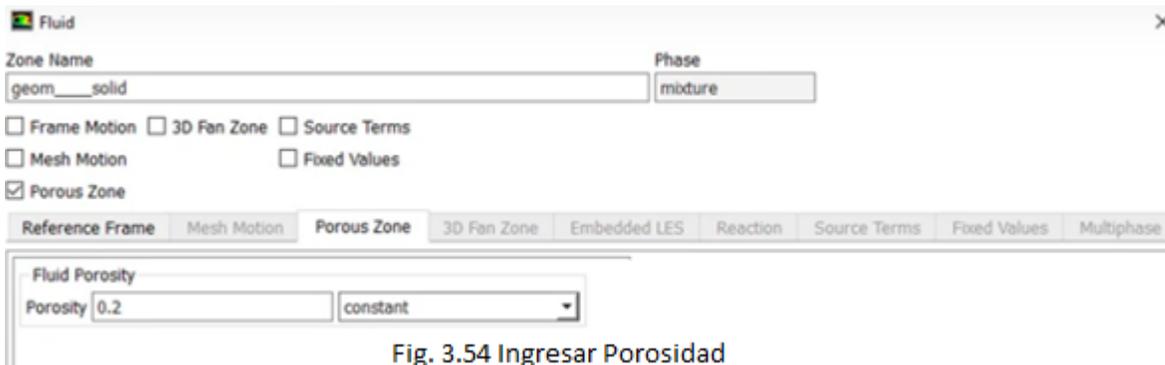


Fig. 3.54 Ingresar Porosidad

Se selecciona primero *geom__solid* y luego *Phase resin* (ver figura 3.55), la cual despliega una ventana (ver figura 3.56), donde se chulea *Relative Velocity Resistance Formulation* y en las tres filas de la opción *Viscous Resistance* (ver figura 3.56), se coloca la permeabilidad inversa, es decir, $1/\text{Permeabilidad}$, y más abajo en la opción *Relative Viscosity*, se selecciona *Brinkman* y OK (ver figura 3.57). Se realiza lo anterior para la opción *Phase air* (ver figura 3.55).

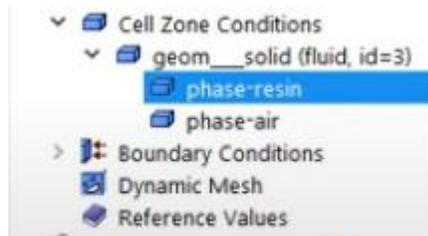


Fig 3.55 Menú permeabilidad

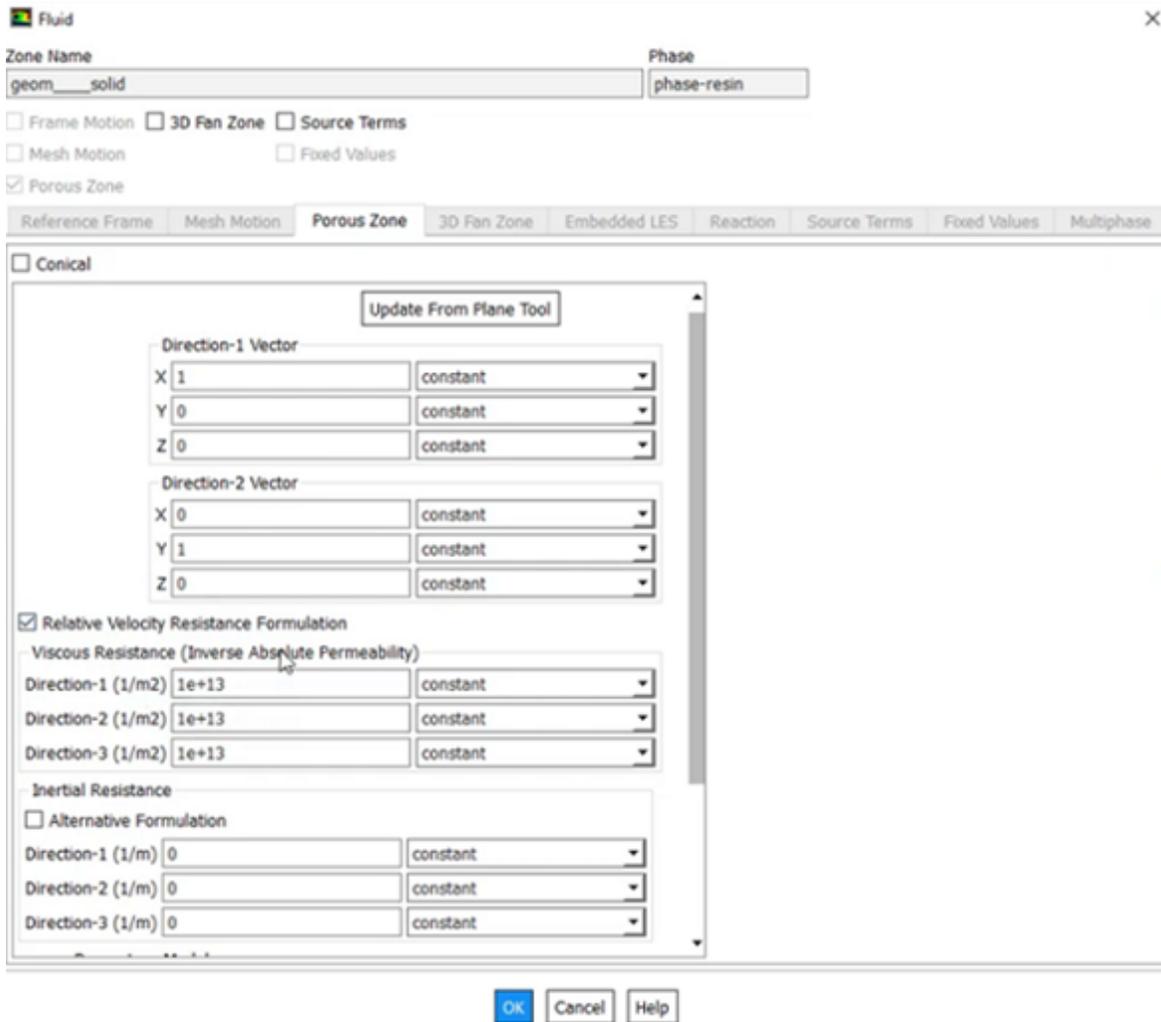


Fig. 3.56 Ingresar permeabilidad

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

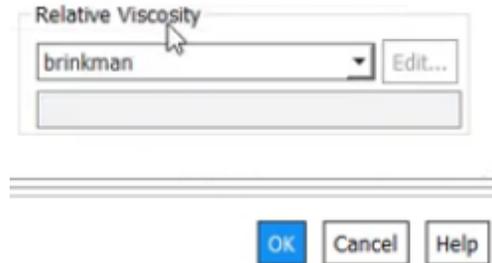


Fig. 3.57 Viscosidad Relativa

Ahora se ingresan las condiciones de frontera, es decir, en que caras está la presión de la resina, en que caras está la presión del aire y en que caras está la simetría, el software automáticamente detecta los nombres que se le colocaron en el mallado, en *Boundary Conditions* se da doble clic en *Inlet* (ver figura 3.58), en *Gauge Total Pressure* se coloca algún valor en este caso 100.000 y en *Initial Gauge Pressure* 0, pero estos dos valores, son los que van a variar en la simulación, y se le da OK (ver figura 3.58).

Al seleccionar *geom__solid* (ver figura 3.59), aparecen las dos fases, la *Phase resin* se deja igual, y doble clic en *Phase air*, en la opción *Volume Fraction* se ingresa 0, porque es la cantidad de aire inicial, es decir, todo es líquido, y OK (ver figura 3.59).

Se da doble clic en *Outlet* (ver figura 3.58), despliega una ventana (ver figura 3.60), y en la opción *Gauge Pressure* se coloca 0, que es la presión del aire, y OK (ver figura 3.60).

Al seleccionar *Outlet* aparecen las dos fases, la *Phase resin* se deja igual, y doble clic en *Phase air* (ver figura 3.61), y se despliega una ventana, en la opción *Volume Fraction Specification Method* (ver figura 3.61), se elige la opción *From Neighboring Cell* y OK (ver figura 3.61).

Finalmente, doble clic en *Simmetry* (ver figura 3.58), y la única condición es que en la opción *Zone Name* (ver figura 3.62), se coloque *Simmetry* y OK (ver figura 3.62).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA



Fig. 3.58 Presión Inlet

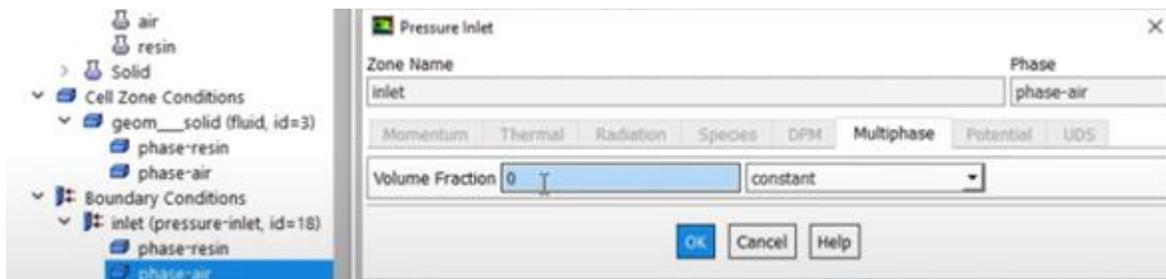


Fig. 3.59 Cantidad Aire Inicial

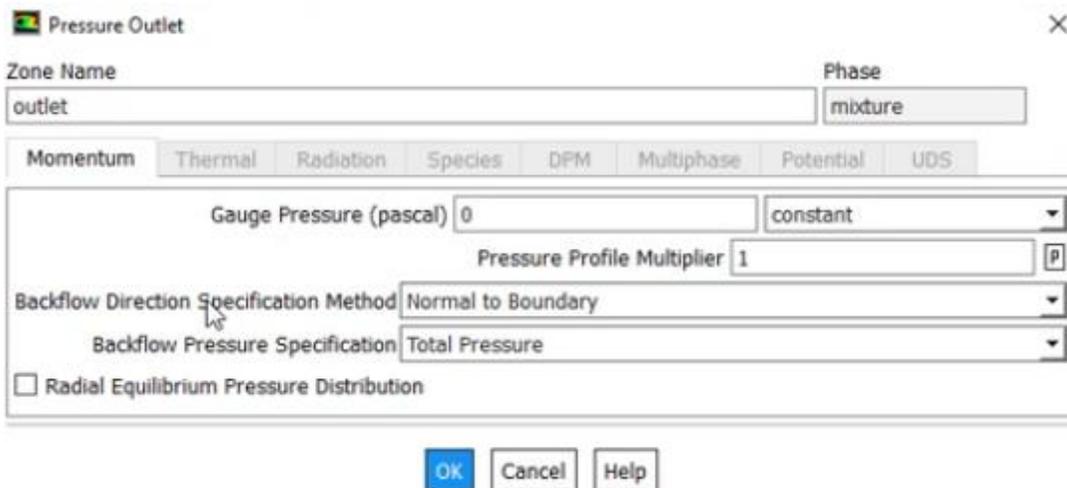


Fig. 3.60 Presión manométrica del aire

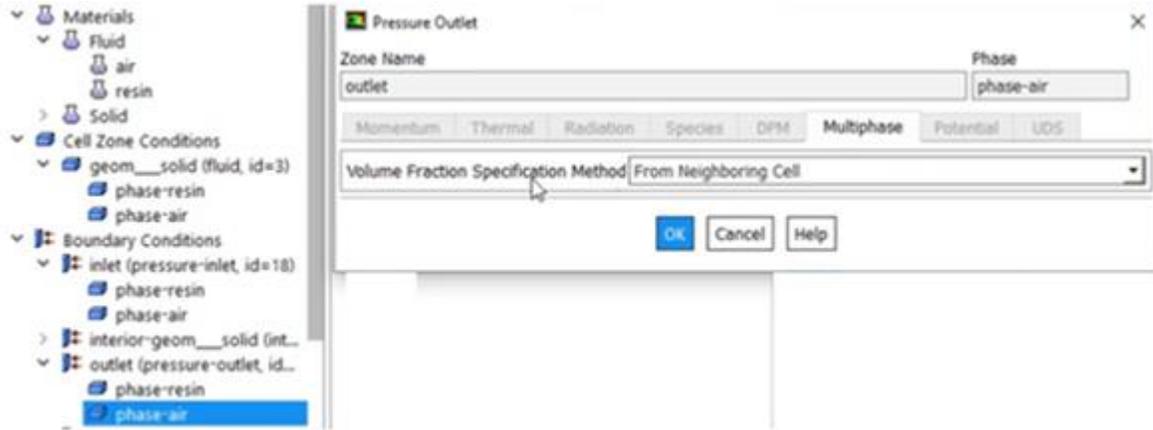


Fig. 3.61 Fracción Volumétrica de Aire

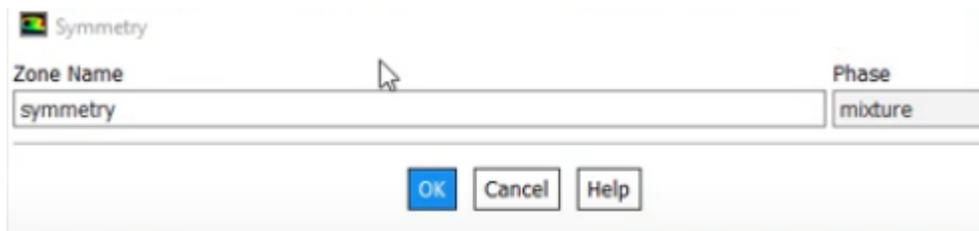


Fig. 3.62 Condición de simetría

De esta manera, queda configurado lo más básico para comenzar las simulaciones, éstas requieren gran capacidad de computo, y un tiempo aproximado entre 10 y 12 días, los resultados de estas simulaciones, son guardados en unos archivos por el mismo software.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Finalmente, el software ANSYS después de ejecutar toda la información suministrada, entrega para una CRU, imágenes sobre el comportamiento de varias variables como la saturación, presión, flujo másico, densidad, (ver figura 4.1), en función del tiempo de inyección, para cinco regímenes de presión 10Pa, 100Pa, 1KPa, 10KPa, y 100KPa; para un nivel de saturación de la CRU del 90%.

```

Pressure
Air Phase.Density
Air Phase.Volume Fraction
Air Phaseair Phase.Volume Fraction
Density
Mass Flow
Pressure
Resin Phase.Density
Resin Phase.Volume Fraction
Resin Phasesresin Phase.Volume Fraction
Velocity
  
```

Fig. 4.1 Variables de la solución

A continuación se analizan los resultados del porcentaje de saturación (*Resin Phase, Volume Fraction*), y la presión (*Pressure*) en función del tiempo, para las diferentes presiones de inyección. Pero si se requiere, se pueden analizar otras variables:

Presión de inyección 10Pa		
Tiempo de Inyección	Saturación	Presión
70,9 Segundos	La saturación es muy lenta y superficial (ver figura 4.2).	La presión es uniforme de 1Pa aproximadamente, pero en las zonas circulares aumenta a 3Pa (ver figura 4.5).
30 Minutos	Está saturado en la superficie completamente (zona roja), pero existe una zona con aire (zona azul), (ver figura 4.3).	La presión es muy uniforme de unos 5Pa aproximadamente (ver figura 4.6)
5 Horas	Se completa el 90% de la saturación, pero hay unas zonas circulares con un 70% de saturación (ver figura 4.4).	La presión es igual de uniforme que en la anterior (ver figura 4.7).

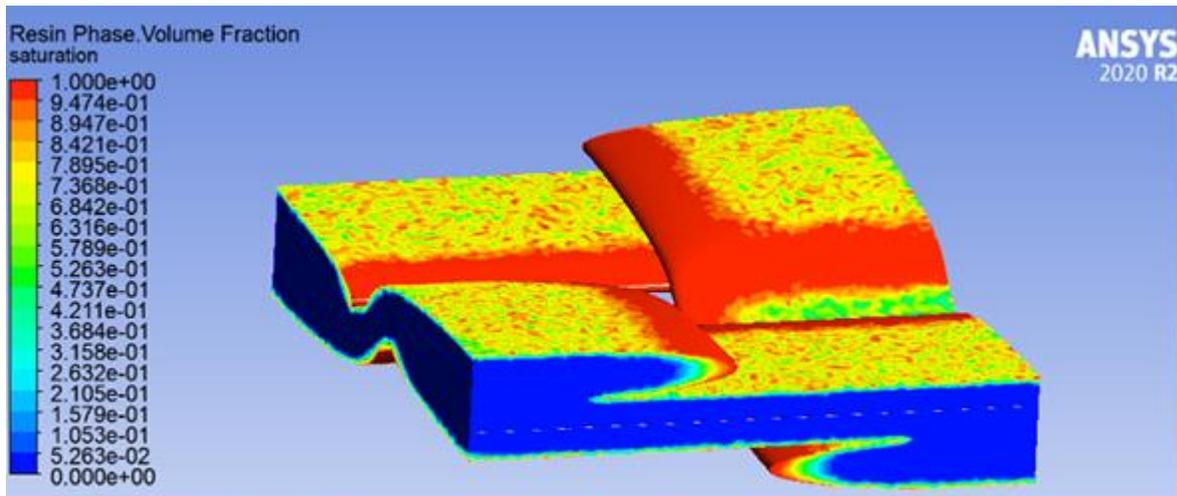


Fig. 4.2 Saturación para un tiempo de 70,9 seg a 10Pa en la presión de inyección

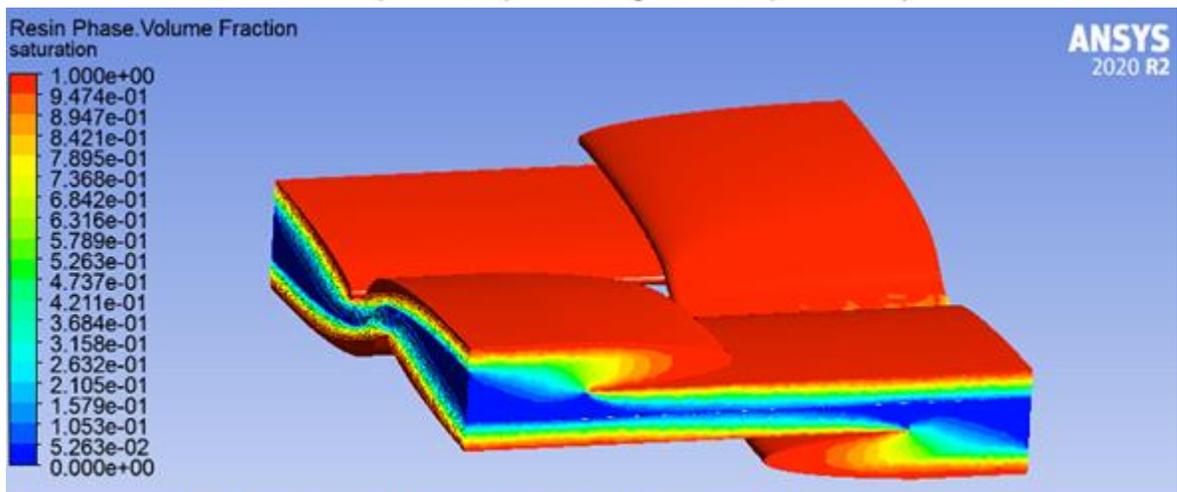


Fig. 4.3 saturación para un tiempo de 30 minutos a 10Pa en la presión de inyección

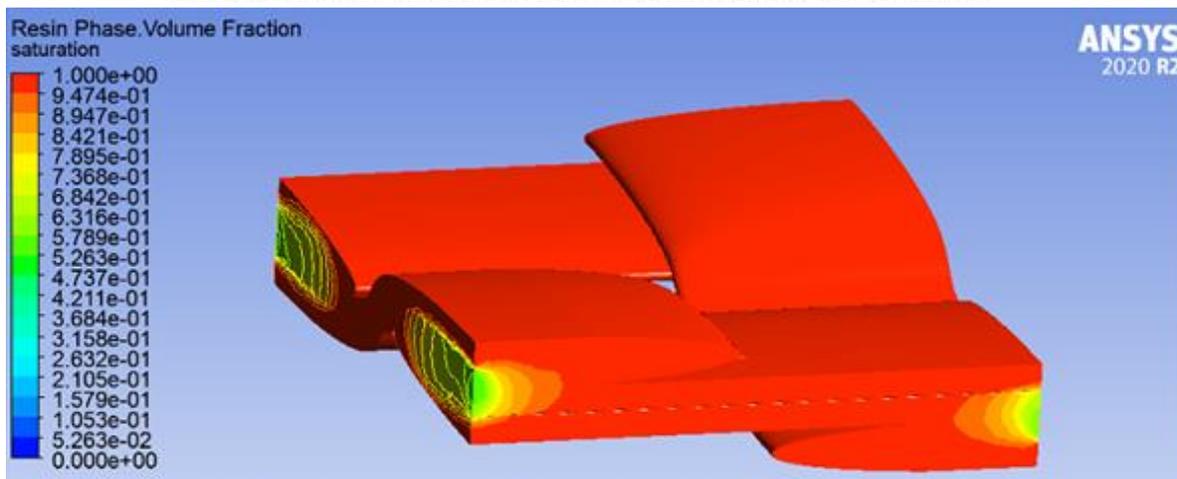


Fig. 4.4 Saturación para un tiempo de 5 horas a 10Pa en la presión de inyección

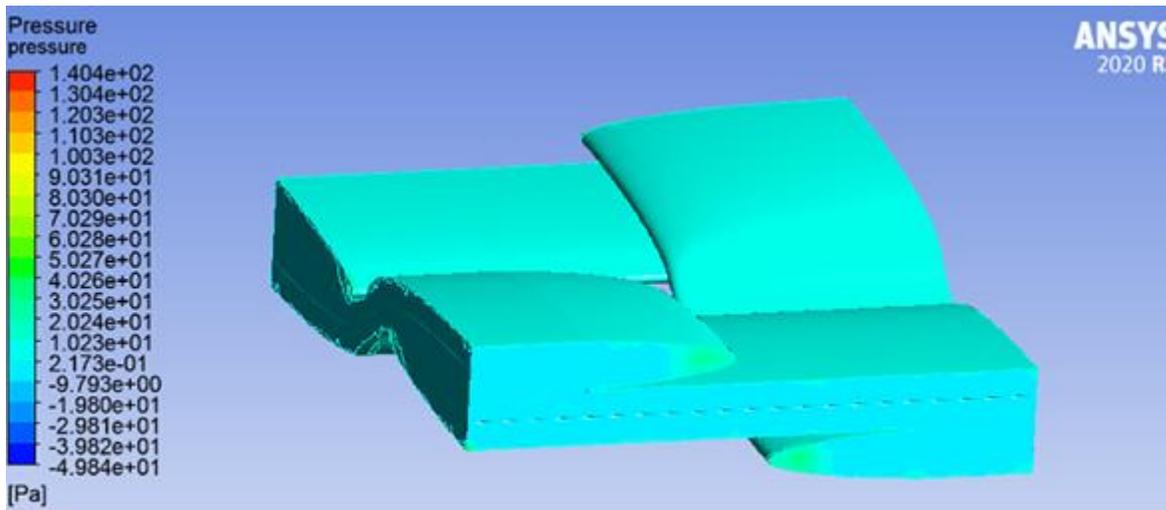


Fig. 4.5 Presión para un tiempo de 70,9 Seg a 10Pa en la presión de inyección

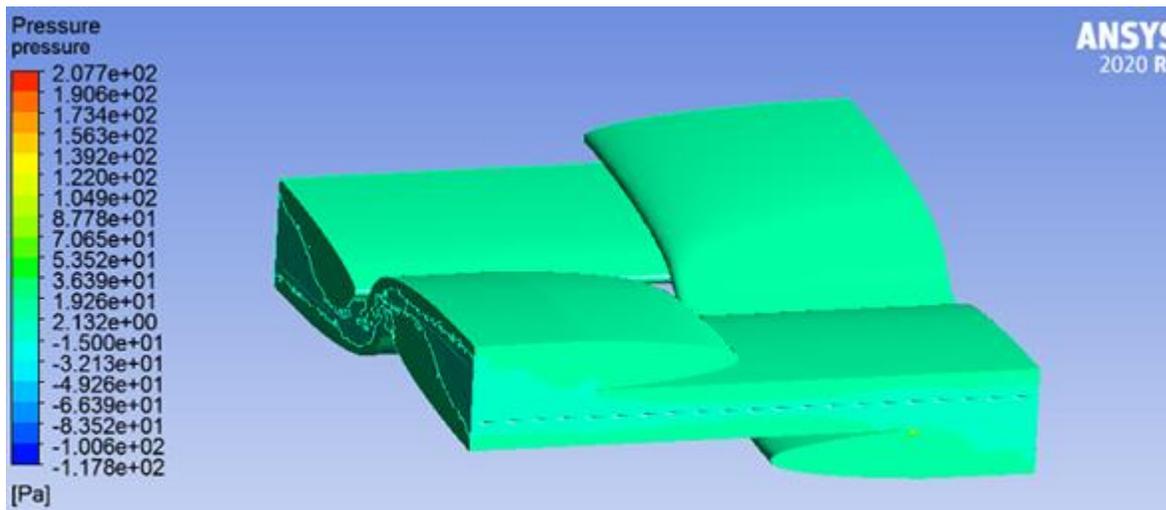


Fig. 4.6 Presión para un tiempo de 30 minutos a 10Pa en la presión de inyección

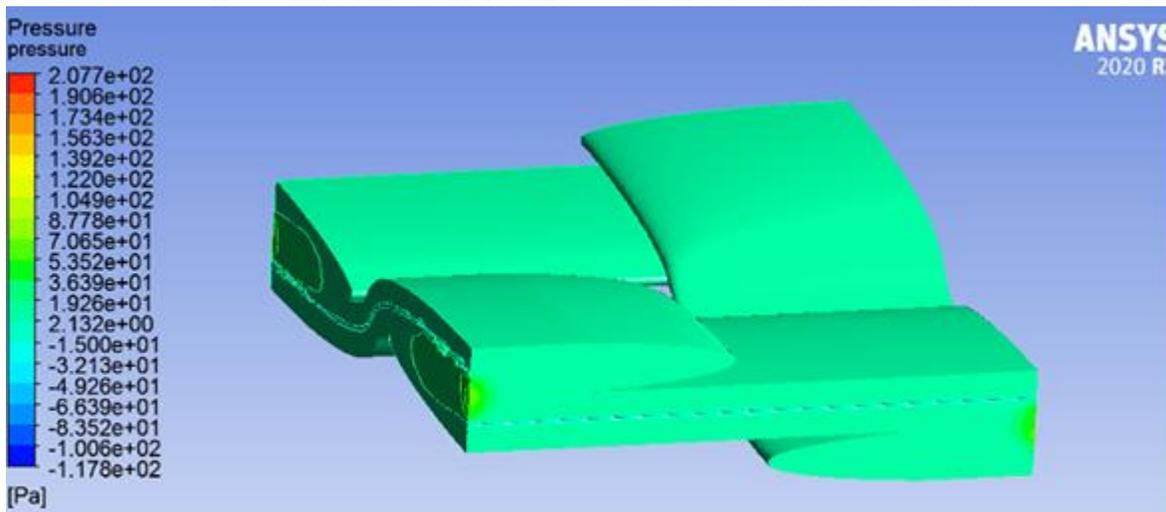


Fig. 4.7 Presión para un tiempo de 5 horas a 10Pa en la presión de inyección

Presión de inyección 100Pa		
Tiempo de Inyección	Saturación	Presión
0,7 Segundos	Se observa que la superficie está saturada (zona roja), pero la mayor parte de la CRU es aire (zona azul), (ver figura 4.8).	La presión en la superficie es de 100Pa, en el resto es de 50Pa aproximadamente, pero hay una pequeña zona circular con una sobrepresión de 170Pa (zona roja), (ver figura 4.11).
5,2 Minutos	Se ve una parte completamente saturada (zona roja), otra parte con aire (zona azul), y se tratan de formar unos vacíos en forma de elipse, con un 40% de saturación (ver figura 4.9).	La presión es de 100Pa en la mayor parte de la CRU, y de 60Pa aproximadamente en el resto, (ver figura 4.12).
98 Minutos	Se alcanza el 90% de la saturación, con los mismos vacíos pero ya con el 90% de saturación aproximadamente (ver figura 4.10).	La presión es de 100Pa en casi toda la CRU, pero hay una región sin presión (zona azul), (ver figura 4.13).

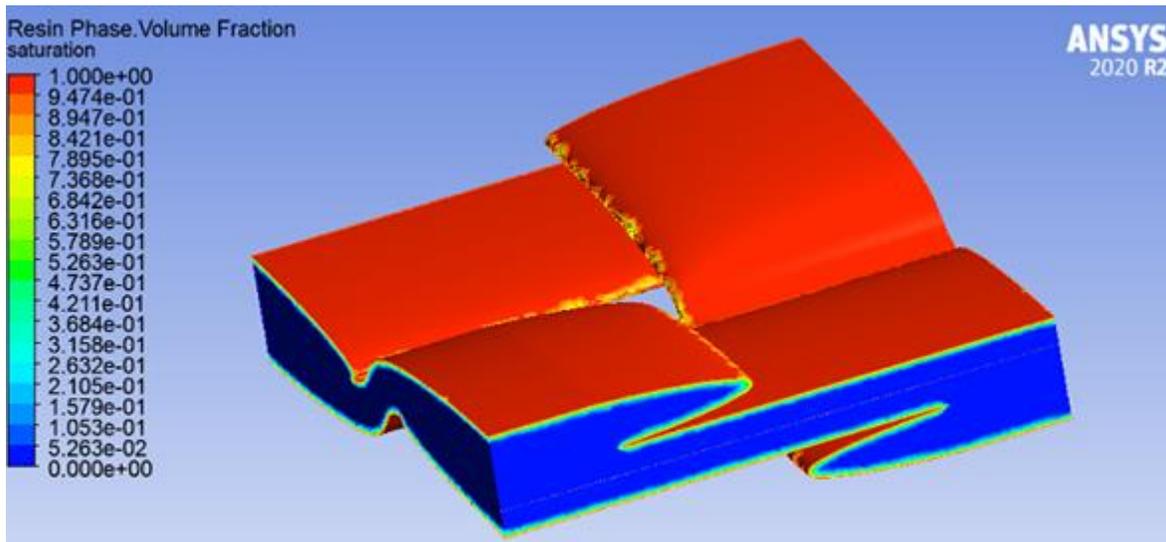


Fig. 4.8 Saturación para un tiempo de 0,7 Seg a 100Pa en la presión de inyección

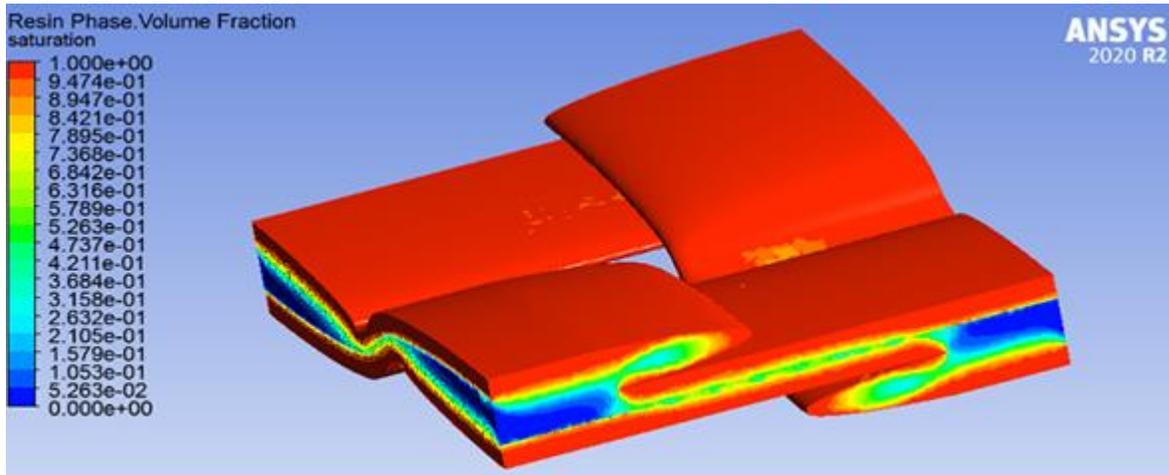


Fig. 4.9 Saturación para un tiempo de 5,2 minutos a 100Pa en la presión de inyección

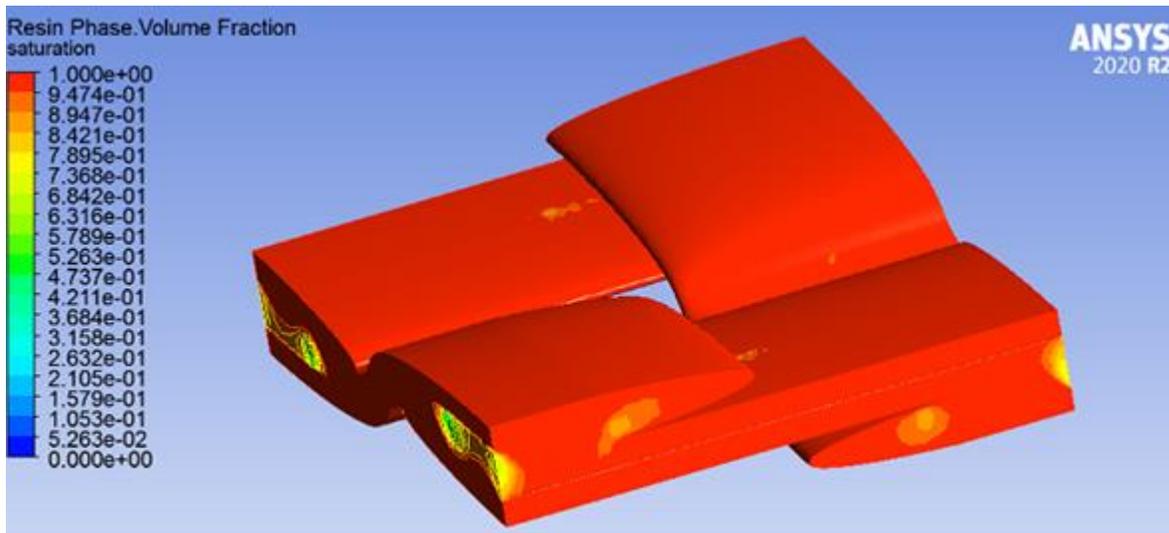


Fig. 4.10 Saturación para un tiempo de 98 minutos a 100Pa en la presión de inyección

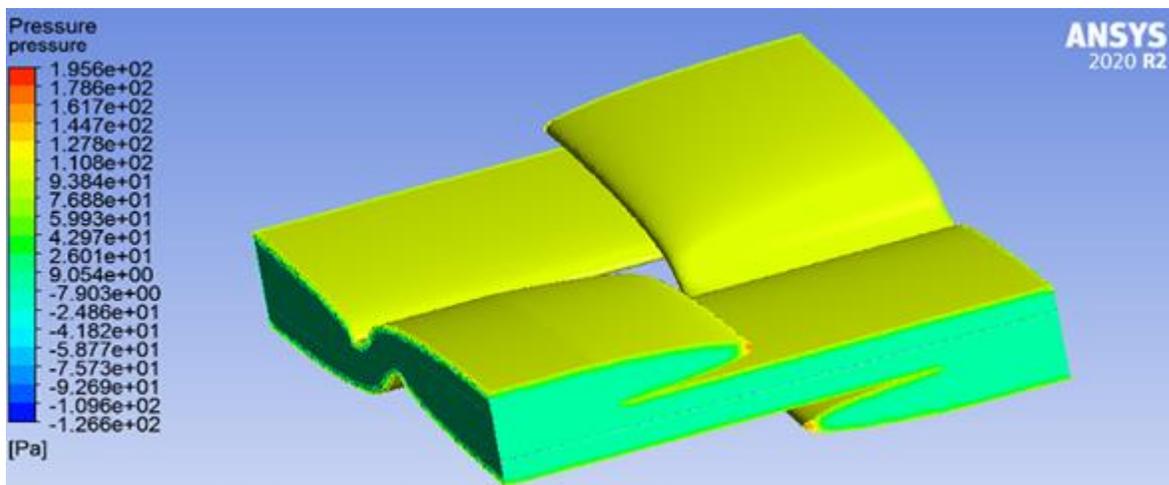


Fig. 4.11 Presión para un tiempo de 0,7 Seg a 100Pa en la presión de inyección

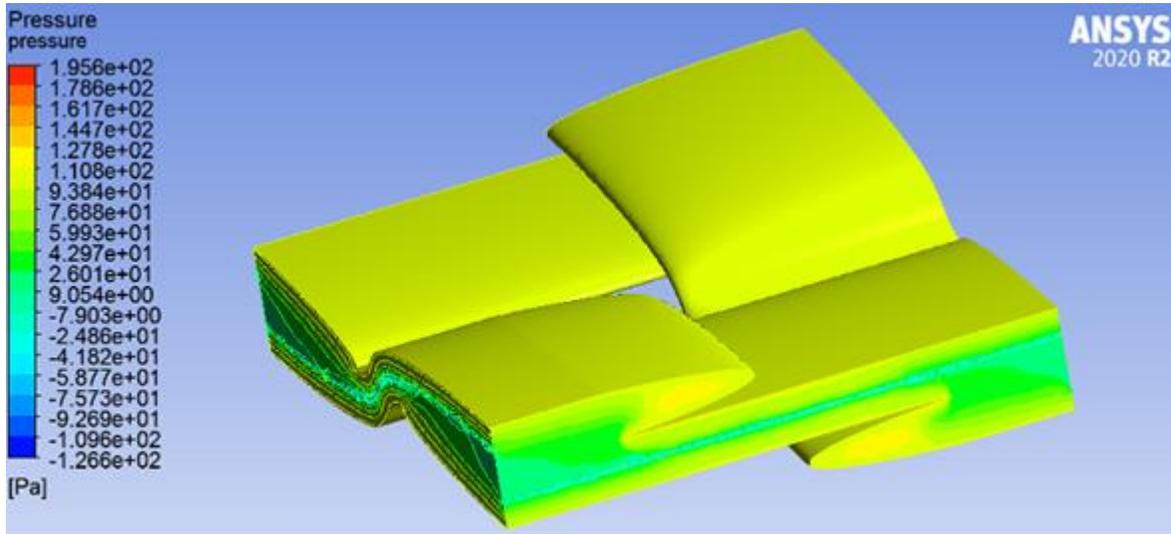


Fig.4.12 Presión para un tiempo de 5,2 minutos a 100Pa en la presión de inyección

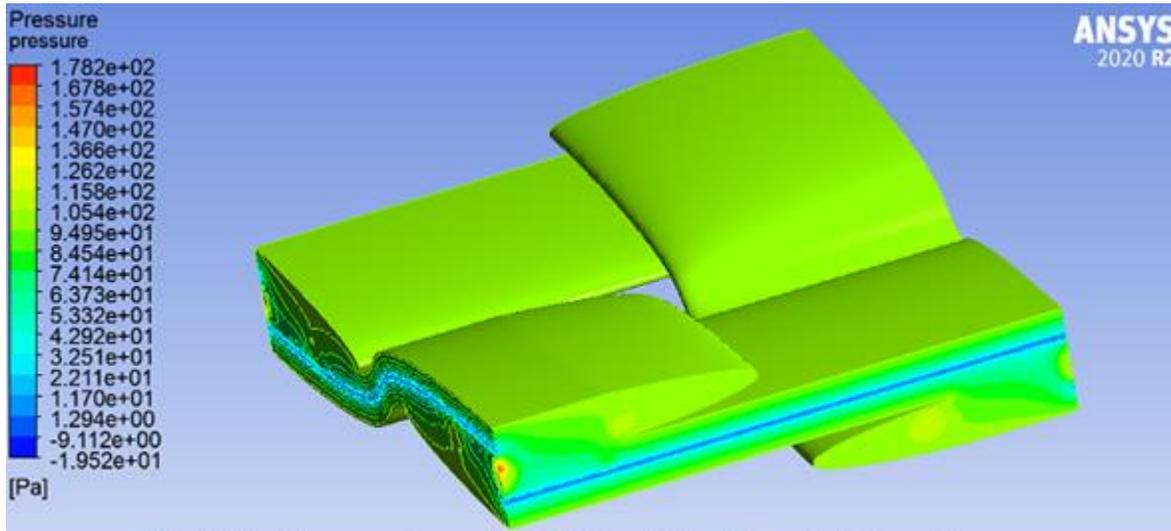


Fig. 4.13 Presión para un tiempo de 98 minutos a 100Pa en la presión de inyección

Presión de inyección 1KPa		
Tiempo de Inyección	Saturación	Presión
0,06 Segundos	Se observa que a los 0,06 segundos la superficie está saturada (zona roja), pero la mayor parte de la CRU es aire (zona azul), (ver figura 4.14).	La presión en la superficie es de 1KPa (zona roja), en el resto es de 81Pa aproximadamente (zona verde), (ver figura 4.17).
6,4 Segundos	Avanza la saturación, pero hay una gran parte de aire (zona azul), (ver figura 4.15).	La presión es de 1KPa en la superficie (zona naranja), y comienza a rebajar hasta llegar a cero en la parte interna (zona azul), (ver figura 4.18).
14,5 Minutos	Se alcanza el 90% de la saturación, con vacíos de forma elíptica con un 60 a 80% de saturación aproximadamente (ver figura 4.16).	La presión es de 1KPa en la mayor parte de la CRU, y la zona con presión cero disminuye (zona azul), pero hay una sobrepresión de forma circular (zona roja), (ver figura 4.19).

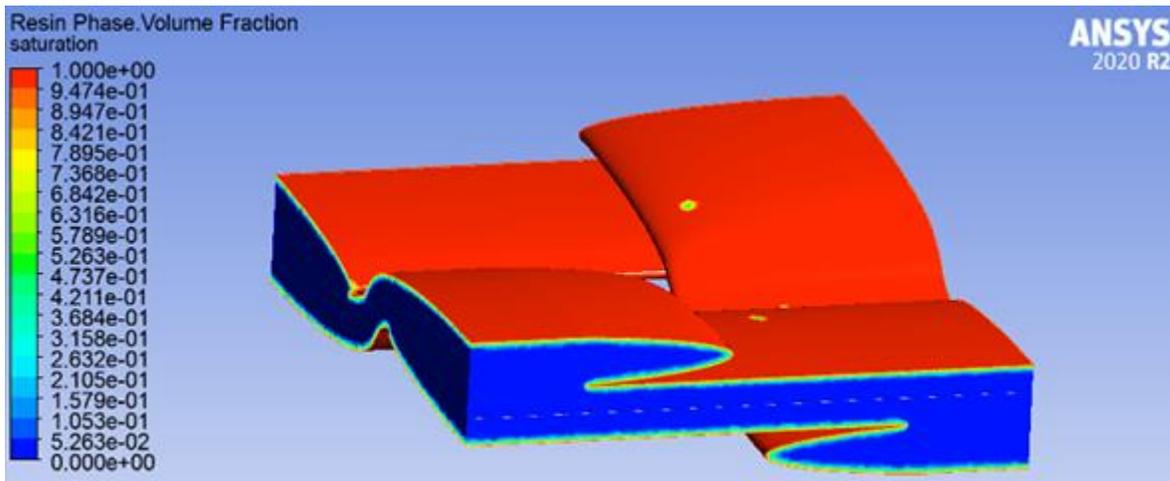


Fig. 4.14 Saturación para un tiempo de 0,06 Seg a 1KPa en la presión de inyección

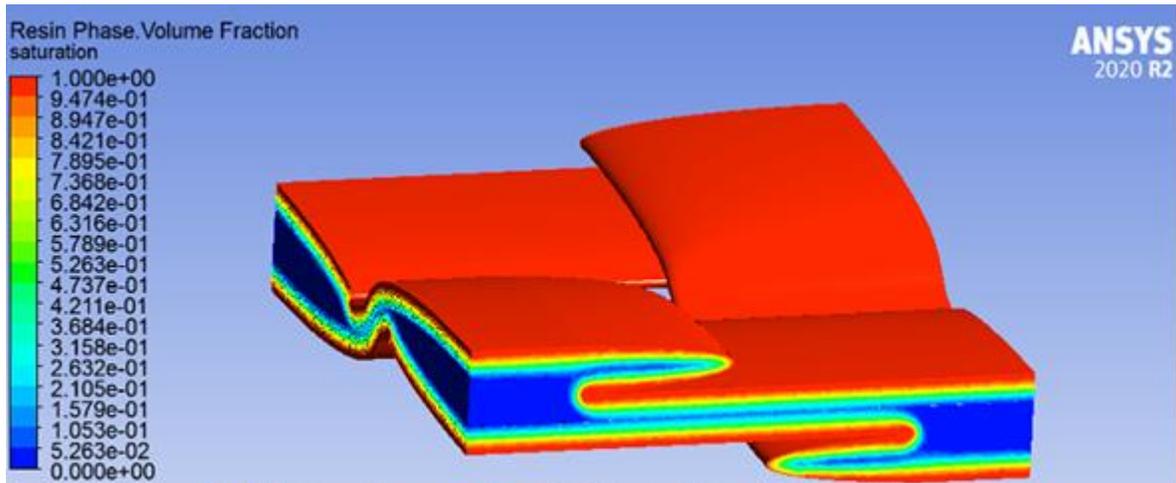


Fig. 4.15 Saturación para un tiempo de 6,4 Seg a 1KPa en la presión de inyección

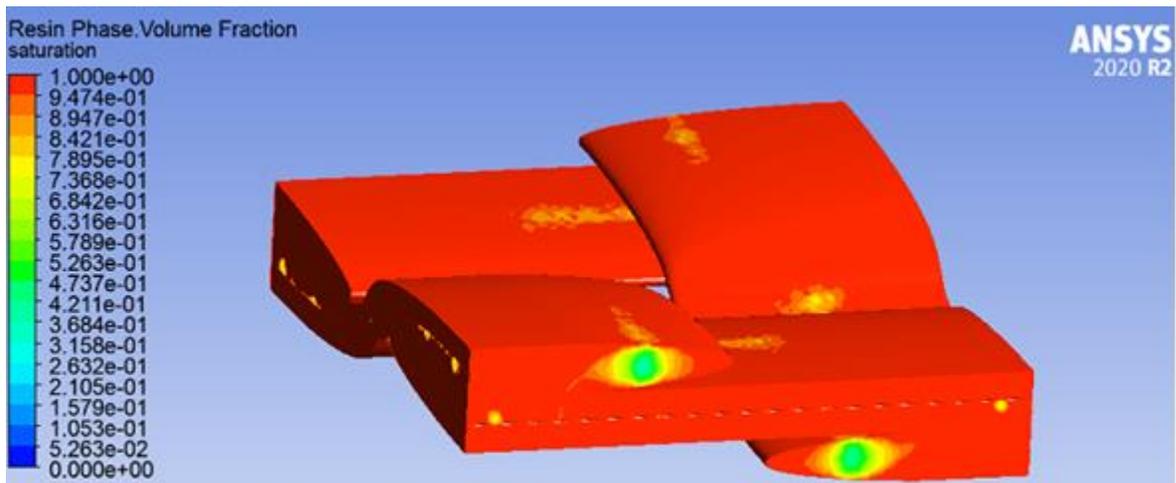


Fig. 4.16 Saturación para un tiempo de 14,5 minutos a 1Kpa en la presión de inyección

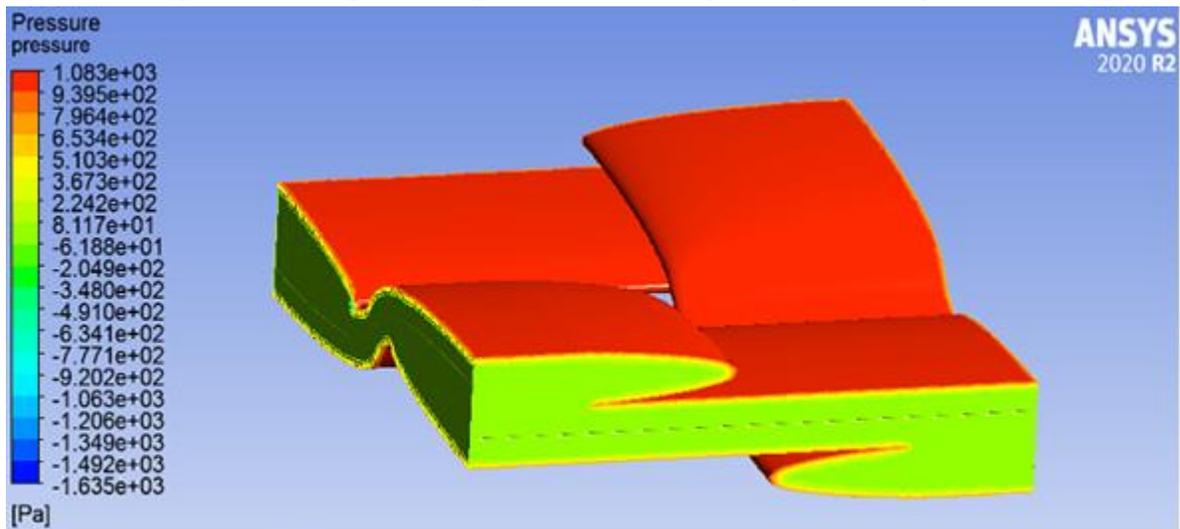


Fig. 4.17 Presión para un tiempo de 0,06 a 1KPa en la presión de inyección

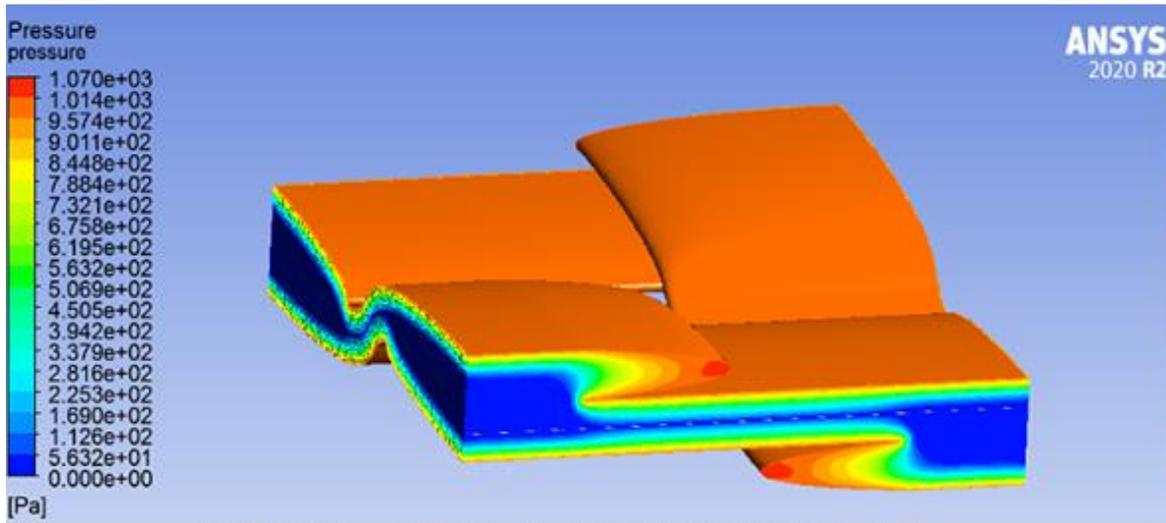


Fig. 4.18 Presión para un tiempo de 6,4 seg a 1KPa en la presión de inyección

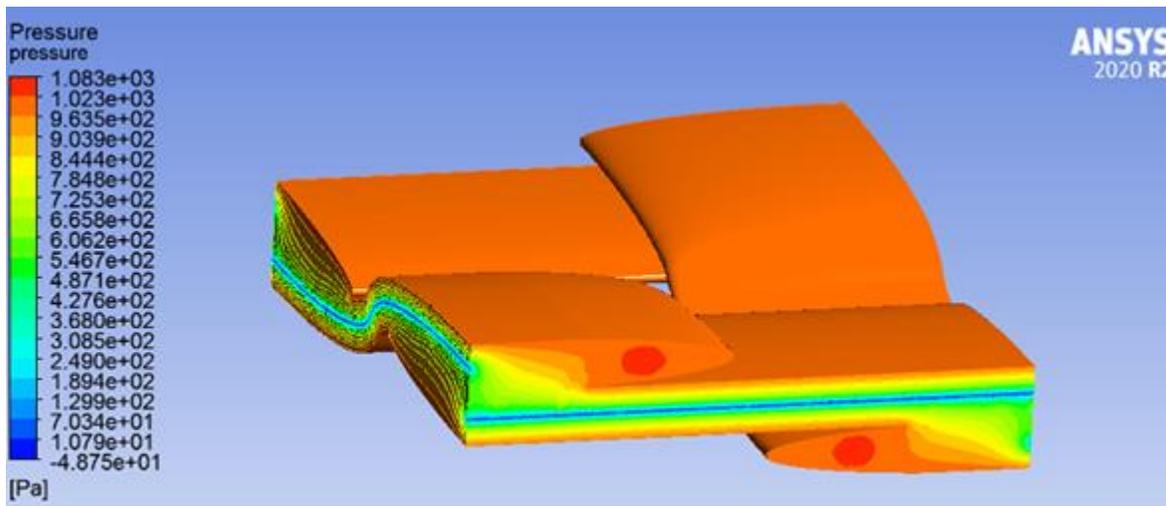


Fig. 4.19 Presión para un tiempo de 14,5 minutos a 1KPa en la presión de inyección

Presión de inyección 10KPa		
Tiempo de Inyección	Saturación	Presión
0,17 Segundos	La superficie está saturada (zona roja), pero la mayor parte de la CRU es aire (zona azul), (ver figura 4.20).	La presión en la superficie es de 10KPa (zona roja), y comienza a rebajar la presión a medida que se interna en la CRU, con una gran parte donde no hay presión (zona azul), (ver figura 4.23).
5,7 Segundos	Hay mucha parte saturada pero se forman los vacíos con forma de elipse con un 40% de saturación (ver figura 4.21).	Aumenta la región con presión de 10KPa, y aumenta la presión en las otras zonas, con una pequeña zona sin presión (zona azul), (ver figura 4.24).
11 Segundos	Se alcanza el 90% de la saturación, con vacíos de forma elíptica con un poco de aire, saturación con un 40 y 70% aproximadamente (ver figura 4.22).	La presión continua igual en toda la preforma, igual que en los 5,7 segundos, (ver figura 4.25).

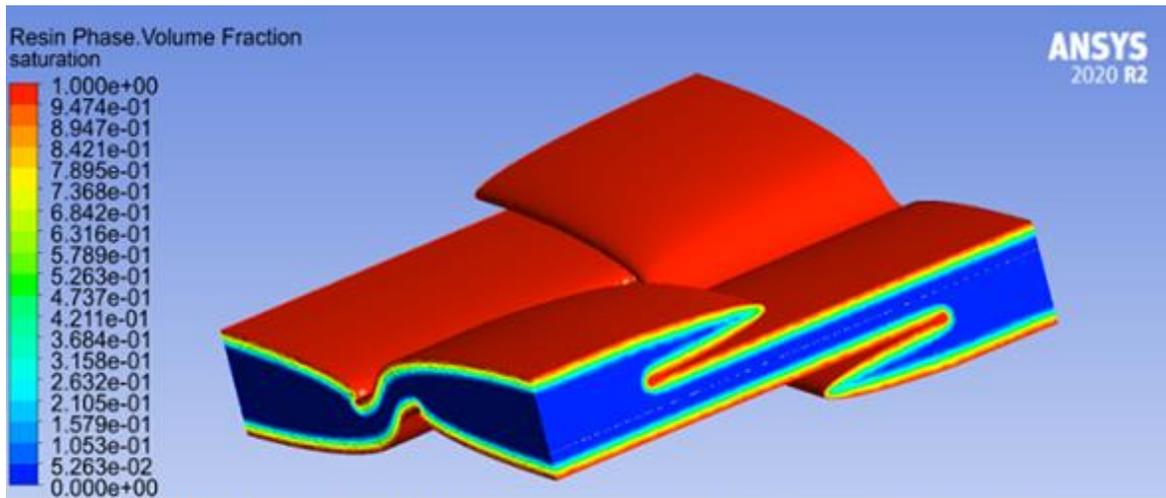


Fig. 4.20 Saturación para un tiempo de 0,17 Seg a 10KPa en la presión de inyección

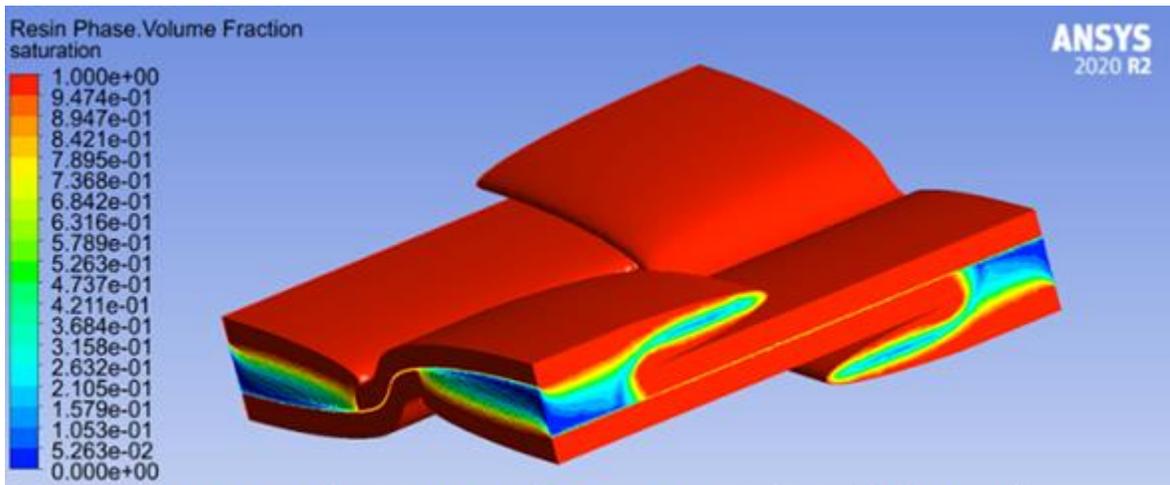


Fig. 4.21 Saturación para un tiempo de 5,7 Seg a 10KPa en la presión de inyección

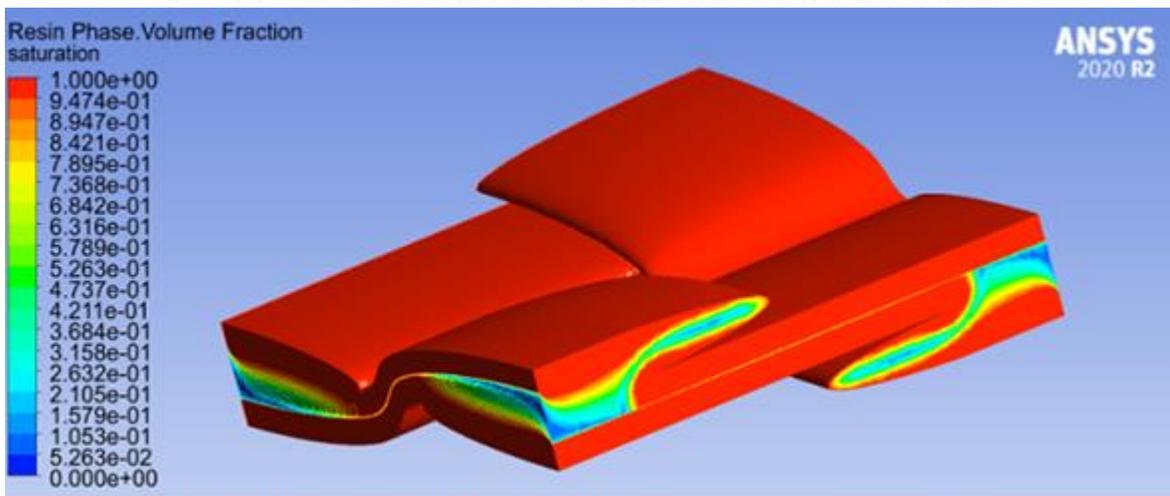


Fig. 4.22 Saturación para un tiempo de 11 Seg a 10KPa en la presión de inyección

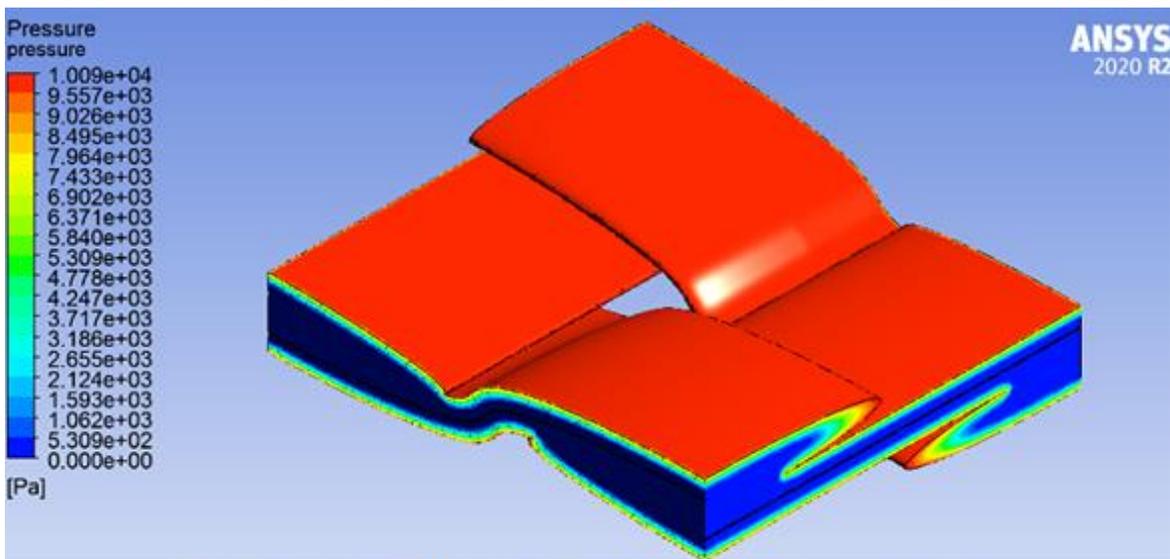


Fig. 4.23 Presión para un tiempo de 0,17 Seg a 10KPa en la presión de inyección

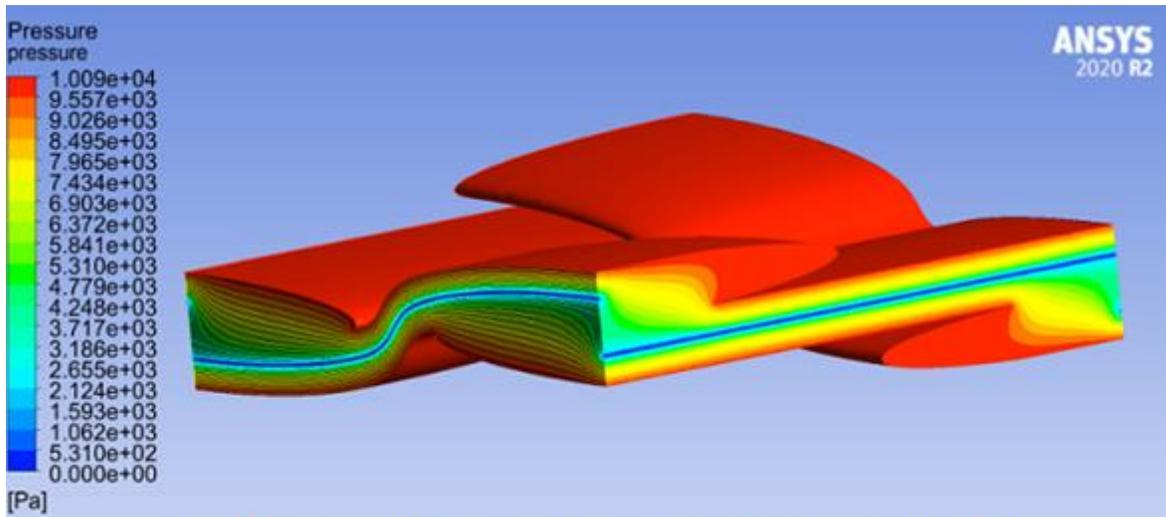


Fig. 4.24 Presión para un tiempo de 5,7 Seg a 10KPa en la presión de inyección

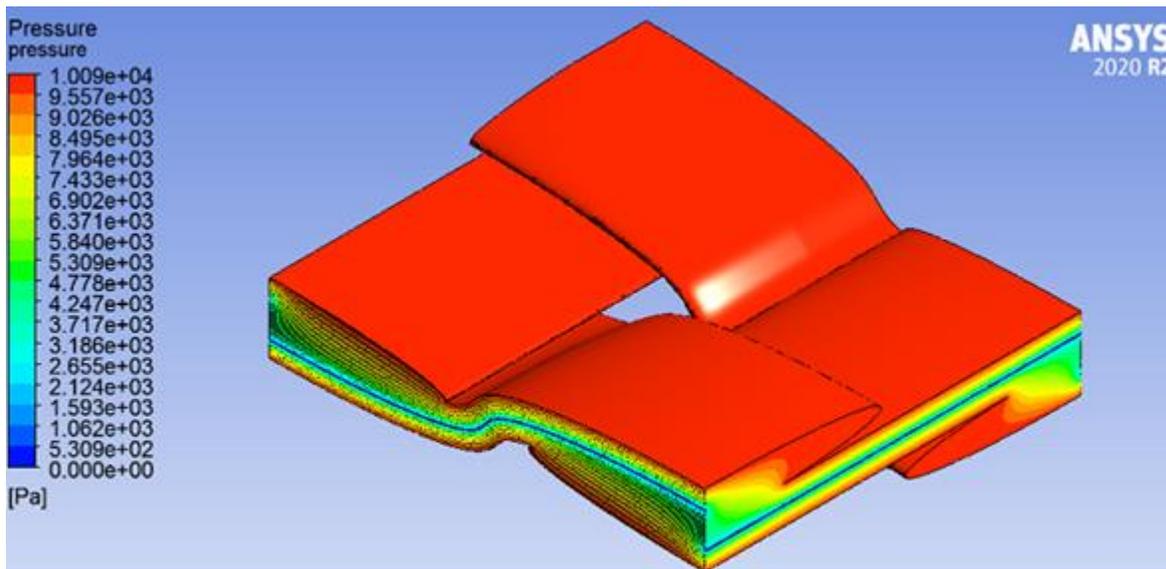


Fig. 4.25 Presión para un tiempo de 11 Seg a 10KPa en la presión de inyección

Presión de inyección 100KPa		
Tiempo de Inyección	Saturación	Presión
0,0006 Segundos	La superficie está saturada (zona roja), pero la mayor parte de la CRU es aire (zona azul), (ver figura 4.26).	Hay una sobrepresión en la superficie de 110KPa (zona roja), y en el resto es de 27KPa (zona amarilla), (ver figura 4.29).
3 Segundos	Hay mucha parte saturada pero se forman los vacíos con forma de elipse con un 60% de saturación (ver figura 4.27).	Aumenta la zona con presión de 100KPa (zona roja), y la presión disminuye hacia el interior con una pequeña zona sin presión (zona azul), (ver figura 4.30).
4,3 Segundos	Se alcanza el 90% de la saturación, con vacíos de forma elíptica con un 50 y 70% de saturación aproximadamente (ver figura 4.28).	La presión continúa igual que a los 3 segundos de inyección, (ver figura 4.31).

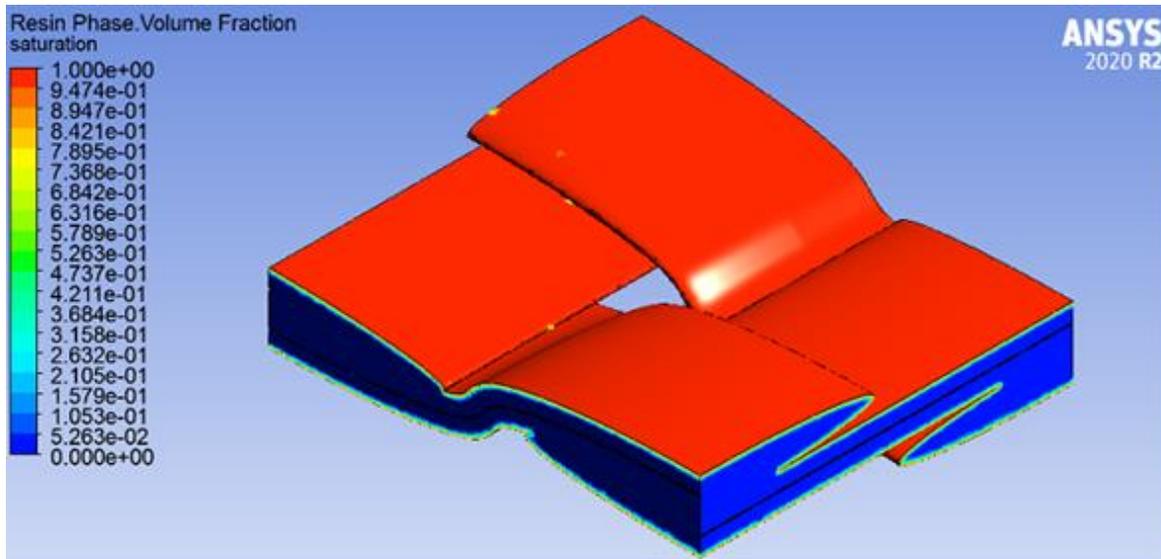


Fig. 4.26 Saturación para un tiempo de 0,0006 Seg a 100KPa en la presión de inyección

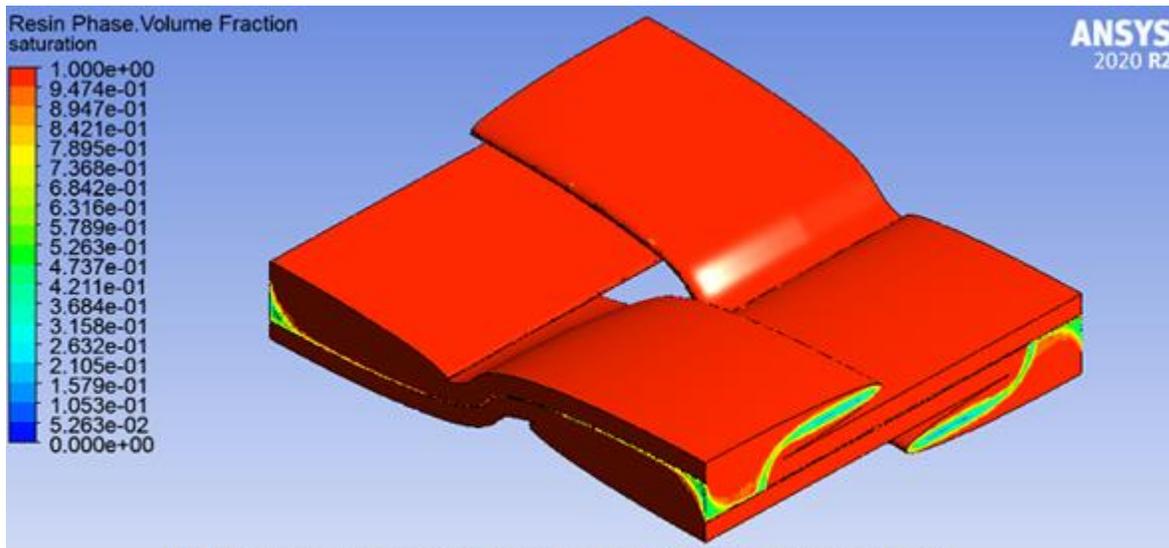


Fig. 4.27 Saturación para un tiempo de 3 Seg a 100KPa en la presión de inyección

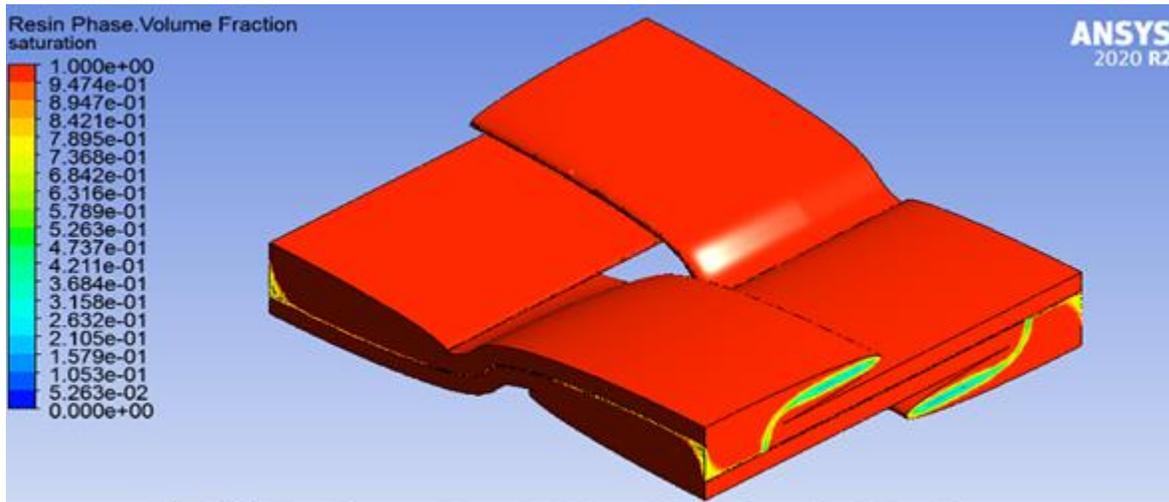


Fig. 4.28 Saturación para un tiempo de 4,3 Seg a 100KPa en la presión de inyección

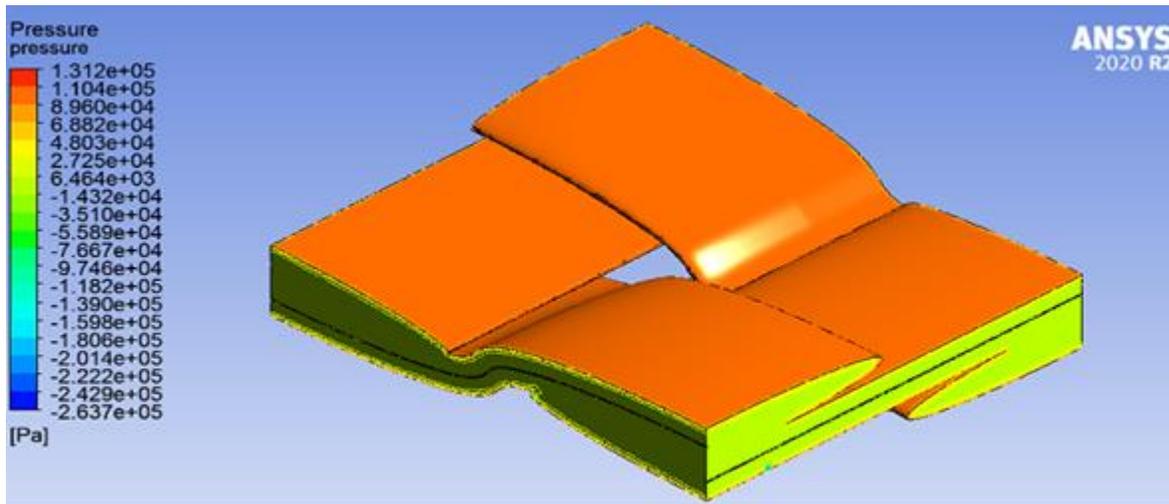


Fig. 4.29 Presión para un tiempo de 0,0006 Seg a 100KPa en la presión de inyección

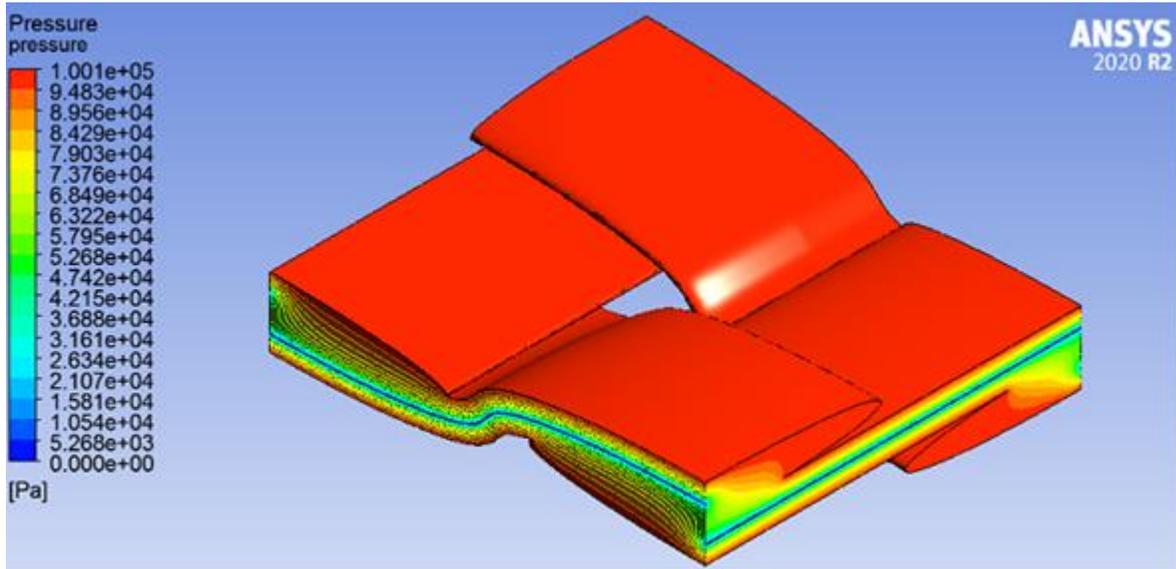


Fig. 4.30 Presión para un tiempo de 3 Seg a 100KPa en la presión de inyección

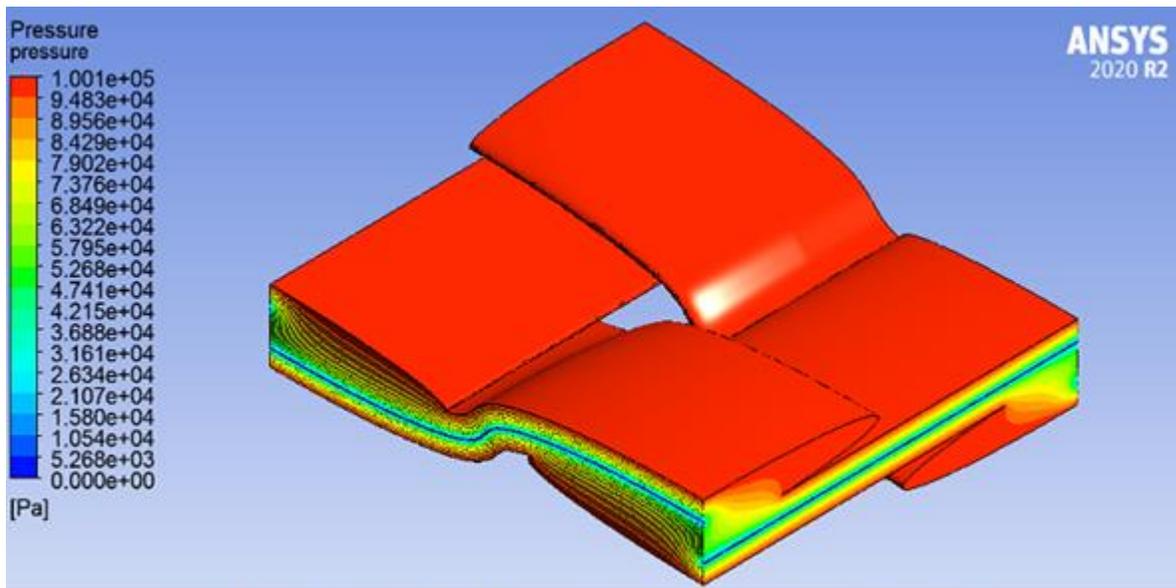


Fig. 4.31 Presión para un tiempo de 4,3 Seg a 100KPa en la presión de inyección

Los resultados obtenidos en este proyecto, es lo que se esperaba, ya que en estudios similares, se ha llegado a resultados y conclusiones muy parecidas, donde solo se varían los tipos de fibra, la resina con una viscosidad diferente, entre otros. Diferentes autores han realizado estudios, obteniendo las siguientes conclusiones:

La formación de vacíos por atrapamiento mecánico, presentan diferentes geometrías, dependiendo del tiempo de impregnación, al principio estos vacíos, toman una forma esférica, luego comienzan a achatarse formando una elipse, para finalmente tomar una forma de hilo (DeValve, 2013). Este autor utiliza una geometría idéntica a la nuestra, pero con múltiples capas de tela de ligamento tafetán (ver figura 4.32), obteniendo unos vacíos por atrapamiento mecánico, igual que nosotros (ver figura 4.33).

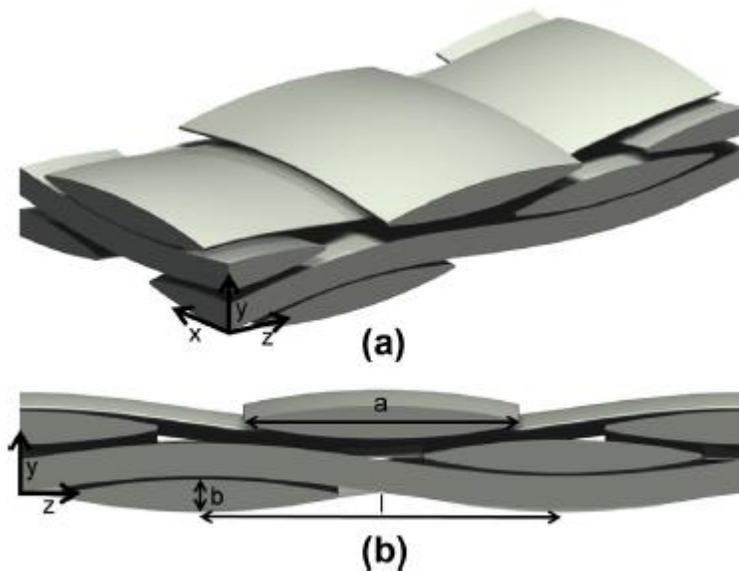
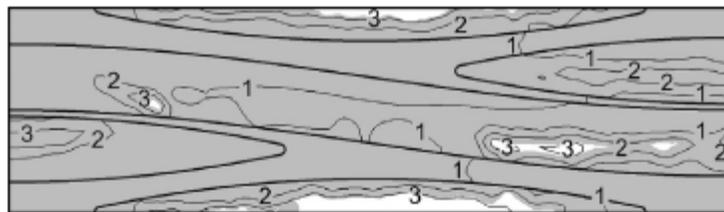
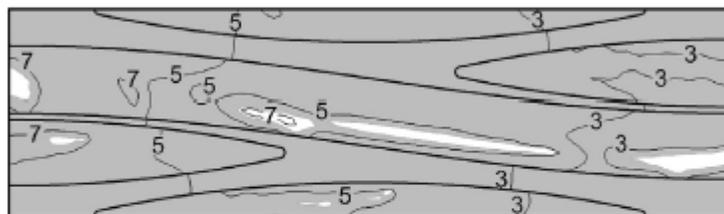


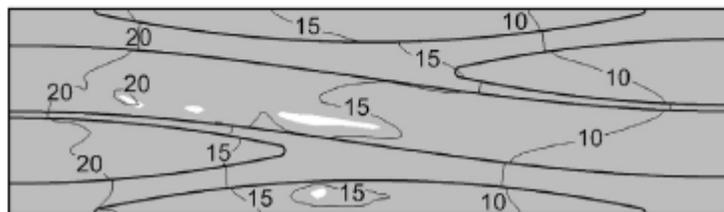
Fig. 4.32 Geometria utilizada por DeValve



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.33 Resultados obtenidos por Devalve

El tiempo de impregnación, es inversamente proporcional a la presión de inyección, esto debido a la formación de poros por atrapamiento mecánico, ya que estos poros requieren una presión de inyección mayor (Wang, 2008). Este autor toma presiones de 10Pa a 50KPa, con una geometría parecida a la de nuestro estudio (ver figura 4.34), utilizaron refuerzos de tejido liso, y obteniendo resultados parecidos en diferentes tiempos de inyección (ver figura 4.35).

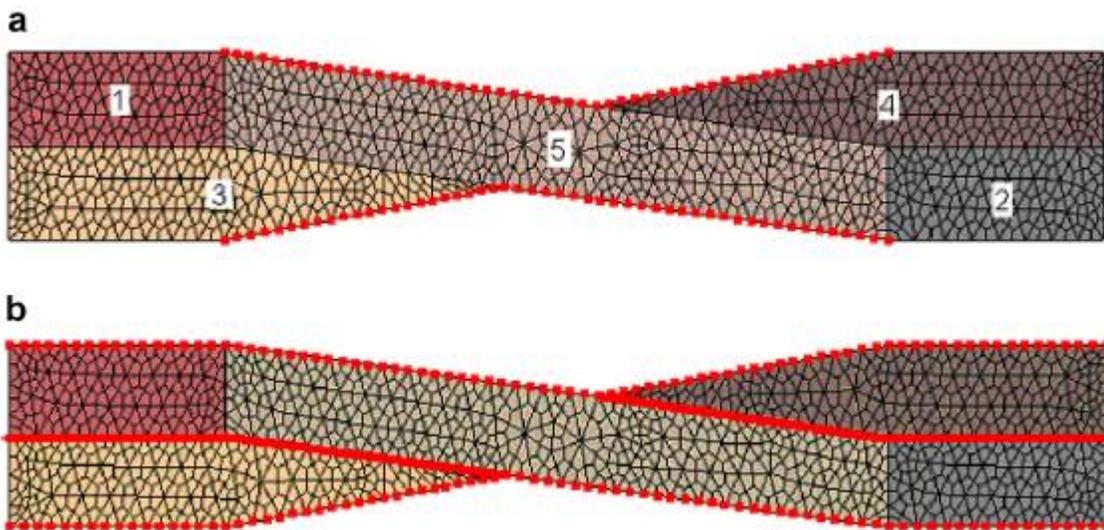


Fig. 4.34 Geometría utilizada por Wang

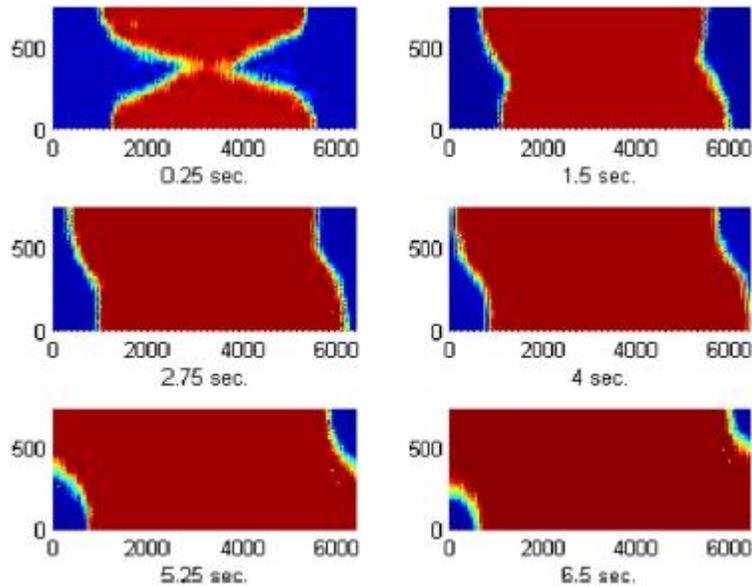


Fig. 4.35 Impregnación resina a 10Kpa de presión

La diferencia entre el tamaño de los poros, depende de diferentes características de flujo en cada región, flujo capilar en micro poros, y flujo viscoso en macro poros, ya que los poros tienden a presentarse en unas zonas específicas de la preforma (Park, 2011). Este autor utiliza una geometría muy similar (ver figura 4.36), y analiza la no linealidad en la presión de inyección.

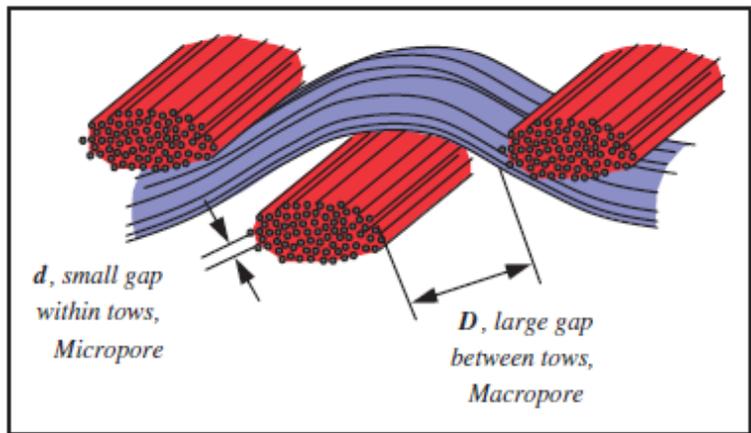


Fig.4.36 Geometría utilizada por Park

La falta de homogeneidad micro estructural en la fibra, es de gran importancia para la predicción precisa de la permeabilidad local y el modo de llenado de LCM (He, 2019). Este autor utiliza tela de vidrio de tejido simple (ver figura 4.37), la geometría es muy similar (ver figura 4.38), el valor de la viscosidad es de 0.059 Pa s, y le asignaron un campo de presión.

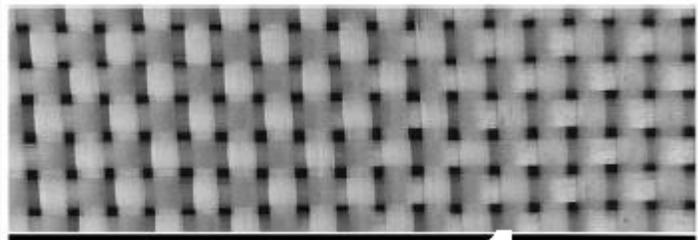


Fig. 4.37 Fibra utilizada por He

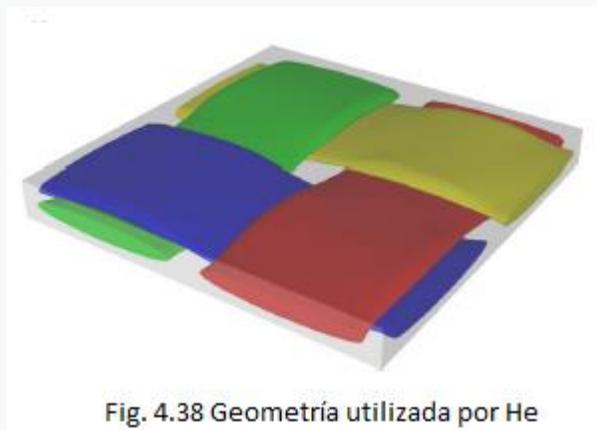


Fig. 4.38 Geometría utilizada por He

La permeabilidad es determinante, en la formación y en el tamaño de los vacíos, generados por atrapamiento mecánico (Jinlian, 2003). Este autor utiliza una fibra y una geometría muy idéntica a la nuestra (ver figura 4.39), toman una presión de inyección de 200KPa y una viscosidad de 0.01 Pa s, dando como resultado, un frente de flujo en forma de elipse para diferentes tiempos de inyección, donde la relación del eje mayor y el eje menor, es siempre igual (ver figura 4.40).

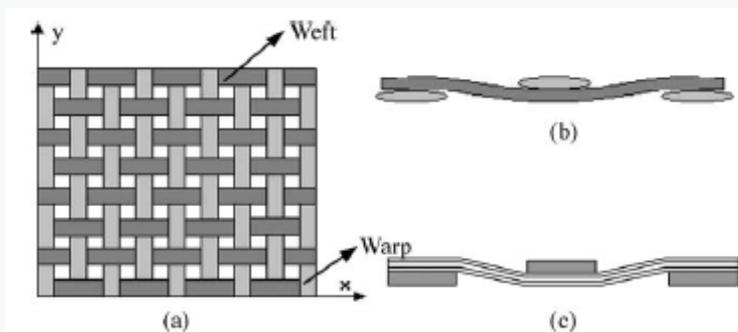


Fig. 4.39 Fibra y geometría utilizada por Jinlian

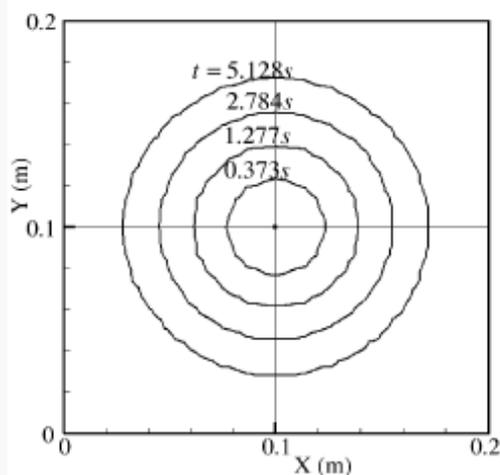


Fig. 4.40 Flujo para diferentes tiempos

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- En el proceso de saturación, en las cinco diferentes presiones de inyección, se observa que al inicio la formación de poros por atrapamiento mecánico de aire a escalas mesoscópicas, se presenta de forma circular, luego de forma elíptica, hasta que finalmente tiende a una forma de hilo, y al mirar el comportamiento de la presión en el proceso de llenado, se observa una sobrepresión de forma circular o elíptica, en los mismos lugares donde se presenta la formación de poros. La forma de generación de poros, se encontró parecida con respecto a estudios similares encontrados en la literatura.
- Es muy importante, para la confiabilidad de los resultados, caracterizar muy bien la preforma, así como la correcta medición de la viscosidad de la resina.
- Sin importar cuál sea la presión de inyección, siempre se generarán vacíos por atrapamiento mecánico de aire a escala mesoscópica, los cuales disminuyen a través del tiempo.
- Mediante simulaciones sucesivas, en un software especializado de mecánica de fluidos, como el ANSYS, es posible obtener los puntos para hallar las curvas de la tasa de saturación vs saturación para las cinco diferentes presiones de inyección.
- Cuando se alcanza el 90% de saturación de la preforma, el software debe detener la simulación, este criterio es importante porque de ahí en adelante el llenado se vuelve sumamente lento, y los cambios no tienen mucha relevancia.
- Todos los resultados obtenidos son fundamentales para posteriores proyectos, con los cuales se pueden deducir funciones de ajuste de la tasa de saturación, en términos de la presión y la saturación, mediante regresión, para así, llevar a cabo simulaciones de llenado a escala macroscópica y partir de aquí para nuevos proyectos a futuro.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

REFERENCIAS

- Advani, S. G., & Sozer, E. M. (2011). *Process modeling in composites manufacturing* (2.ª Ed.). Boca Ratón, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- C. Devalve and R. Pitchumani, "Simulation of void formation in liquid composite molding processes," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 51, pp. 22–32, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.03.016.
- Grand Research View. (2015). *Composites Market: Estimates and Trend Analysis*. USA. Recuperado a partir de <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/composite-market-200051282.html>
- L. He, S. Yan, Y. Li, P. Wen, X. Xie, and W. Liu, "Simulation of stochastic flow considering mesoscale permeability variability during the resin transfer molding process," *Polym. Compos.*, no. May, pp. 1701–1710, 2019, doi: 10.1002/pc.25490.
- H. Jinlian, L. Yi, and S. Xueming, "Study on void formation in multi-layer woven fabrics," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 5, pp. 595–603, 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2003.11.007.
- Kruckenberg, T. M. *Resin Transfer Molding for Aerospace Structures*. Kluwer Academic Publishers. 1998.
- Mazumdar, S., Karthikeyan, D., Pichler, D., Benevento, M., & Frassine, R. (2017). State of the Composites Industry Report for 2017. *January*, 12.
- Miravete, A. *Materiales Compuestos*. Tomo I y II. INO Reproducciones. 2000
- Montés, N. *Marco Computacional para el Diseño, Optimización y Control de Procesos de Moldeo con Resinas Líquida (LCM)*. Valencia: Universidad CEU-Cardenal Herrera. 2009

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

- C. H. Park and W. Il Lee, “Modeling void formation and unsaturated flow in liquid composite molding processes: a survey and review,” *J. Reni. Plast. Compos.*, vol. 30, no. 11, pp. 957–977, 2011, doi: 10.1177/0731684411411338.
- Patiño Arcila, I. D., Power, H., Nieto Londoño, C., & Flórez Escobar, W. F. (2016). Boundary element simulation of void formation in fibrous reinforcements based on the Stokes–Darcy formulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 304, 265-293. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.02.010>
- Patiño, I. D. (2017). *Boundary Element Techniques for the infiltration of dual-scale porous media in the processing of composites materials*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Potter, K. Resin Transfer Molding. Chapman & Hall. 1997. Pág. 48-49.
- Rudd, C. ASM Handbook Composites. Volume 21. 2001.
- Y. Wang and S. M. Grove, “Modelling microscopic flow in woven fabric reinforcements and its application in dual-scale resin infusion modelling,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 5, pp. 843–855, 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2008.01.014.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

ANEXOS

ANEXO A

Para calcular la porosidad, se calcula el area total, para ello, multiplicamos los valores que se encuentran en la parte superior de la imagen recortada:

Area Total= 6840*5060

Porosidad= Area Porosidad / Area Total

Porosidad= 8147900 / 34610400

Porosidad= 0,23

Para hallar la permeabilidad, utilizamos la fórmula (1):

$$K_2 = c_1 \left(\sqrt{V_{f,max}/V_f} - 1 \right)^{5/2} R_f^2 \quad (1)$$

Se toma un arreglo hexagonal entonces:

$$c_1 = \frac{16}{9\pi\sqrt{6}}$$

$$V_{f,max} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}$$

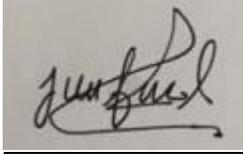
Vf = porcentaje de fibra = 0,765

Rf = Radio de la fibra = 19,8 10e-6 (se calculó con ImageJ)

Donde el inverso de la permeabilidad = 1/K2 = 0,907x10e13

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

FIRMA ESTUDIANTES



FIRMA ASESORES





ENTREGA: Feb 17 de 2022

Se firma las correcciones menores, realizadas a las sugerencias hechas por trabajo de grado de electromecánica