



Simulación de Inyección de Resina en Moldes RTM con Interacción Fluido-Estructura

Joselevich, Ignacio

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
6 de junio de 2023

Simulación de Inyección de Resina en Moldes RTM con Interacción Fluido-Estructura

Joselevich, Ignacio

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para
optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Directores:

Ing. Pedro Sismondi – Ing. Guillermo Rodríguez – Ing. Juan Sismondi

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
6 de junio de 2023

Agradecimientos

A mi familia por su eterno apoyo incondicional.

A la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario (UNR) por brindarme la posibilidad de formarme como Ingeniero Mecánico.

A los docentes, compañeros y amigos de la Escuela de Ingeniería Mecánica que me ayudaron a crecer como persona y como profesional.

Al Ministerio de Educación Argentino y al Servicio de Intercambio Alemán (DAAD) por permitirme estudiar e investigar en Alemania mediante el Programa ALEARG.

A la división de Tecnología Liviana del Instituto de Tecnología en Sistemas de Vehículos (FAST) del Intituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT) por dejarme participar del proyecto como investigador auxiliar.

A mi tutora M.Sc. Sarah Dietrich por abrirme las puertas del instituto, brindarme su apoyo y guiarme a lo largo de este proyecto y proceso de aprendizaje.

A los profesores de la cátedra del Proyecto Final de Ingeniería Mecánica por su tiempo, predisposición y ayuda.

A todos aquellos que por convicción, situacionalismo o simple coincidencia han estado ahí para contribuir, formar parte y acompañarme en este proceso.

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo un estudio de independencia de malla empleando un método de simulación acoplado que modela el proceso de Moldeo por Transferencia de Resina (RTM) para la fabricación de componentes ultralivianos tipo sándwich.

Este problema se considera de tipo Interacción Fluido-Estructura (FSI). Por lo tanto, se realizaron estudios independientes, basados en un caso práctico experimental, con su propia metodología para la parte estructural (núcleo sólido) y para el participante fluido (sólido permeable que admite la inyección de resina). Se seleccionaron los parámetros de control respectivos a cada caso y se determinó, a partir de qué cantidad de elementos el error relativo es lo suficientemente pequeño para considerar la independencia del resultado con respecto al la mallado empleado.

Dado que estas simulaciones hacen uso extensivo de los recursos computacionales y presentan inestabilidades numéricas, se optimizó la configuración de los parámetros de control utilizados por el solver.

Por último, se realizó un estudio final acoplado del proceso completo con la configuración óptima del solver. Se evaluó la influencia de cada participante y se verificaron los resultados del estudio de independencia de malla de forma exitosa.

Palabras clave: Composite - RTM - FSI - Sandwich - Foam - CFD

Abstract

In this work, a mesh independence study was carried out using a coupled simulation method that models the Resin Transfer Molding (RTM) process for the fabrication of ultra-lightweight sandwich components.

This is considered to be a Fluid-Structure Interaction (FSI) problem. Therefore, independent studies were conducted, based on an experimental case of study, with their own methodology for the structural part (solid core) and for the fluid participant (permeable solid that admits resin injection). The respective control parameters were selected for each study and it was determined, the minimum number of elements from which the relative error becomes small enough to consider that the result becomes independent from the mesh used in the simulation.

Since these simulations make extensive use of computational resources and present numerical instabilities, the configuration of the control parameters used by the solver was optimized.

Lastly, a final coupled study of the complete process with the optimal solver configuration was performed. The influence of each participant was evaluated and the results of the mesh independence study were successfully verified.

Keywords: Composite - RTM - FSI - Sandwich - Foam - CFD

Índice

1. Introducción	9
2. Estado del Arte	12
2.1. Compuestos Sándwich	12
2.2. Proceso RTM	15
3. Fundamentos	22
3.1. Definiciones	22
3.1.1. Medio Poroso	22
3.1.2. Permeabilidad	26
3.1.3. Modelo de Viscosidad	28
3.2. Ecuaciones de Gobierno	29
3.2.1. Cavidades No-Constantes	29
3.2.2. Método de Volúmenes Finitos para Mecánica Porosa	30
3.3. Resumen del Modelo Numérico	33
3.4. Consideraciones Generales de la Simulación	35
4. Metodología	37
4.1. Descripción General	37
4.2. Caso de Estudio	38
4.3. Procedimiento	40
5. Software	42
5.1. Mallado	42
5.2. Inyección del Fluido	42
5.3. Núcleo de Espuma	43
5.4. Acoplamiento	44
6. Estudio del Fluido	46

6.1. Geometría Base	46
6.2. Propuesta de Mallado	46
6.3. Software Set-Up	49
6.4. Resultados	50
6.5. Conclusiones	52
7. Estudio del Sólido	53
7.1. Geometría Base	53
7.2. Propuesta de Mallado	53
7.3. Software Set-Up	56
7.4. Resultados	61
7.5. Observaciones	65
7.6. Conclusiones	68
8. Caso Acoplado	70
8.1. Optimización de la configuración del solver	70
8.1.1. Propuesta de Mallado	70
8.1.2. Mapeo	70
8.1.3. Software Set-Up	72
8.1.4. Resultados	73
8.2. Estudio Final	75
8.2.1. Propuesta de Mallado	75
8.2.2. Software Set-Up	76
8.2.3. Resultados	77
9. Conclusiones y recomendaciones	83
Referencias Bibliográficas	91
Índice de figuras	92

Índice de Tablas**97**

1. Introducción

En la búsqueda de la eficiencia energética entran en juego muchas variables que permiten hacer más con menos recursos. Una de estas variables de interés es el peso.

En el caso de un vehículo, un menor peso representa menor cantidad de energía involucrada en su movimiento y, por ende, menor consumo de energía para lograr el mismo objetivo, a lo que podría referirse como un uso más eficiente de la energía. Esto lleva a infinidad de investigaciones que intentan obtener materiales más ligeros que puedan soportar las mismas exigencias mecánicas que los materiales tradicionales. Para esto, nacen con ello nuevos procesos de fabricación.

Esto tiene un impacto real. Como se puede ver en el siguiente estudio, por ejemplo, en la UE el consumo de energía debido a los vehículos ha alcanzado en estos últimos años cantidades similares que la energía necesaria para la producción electricidad requerida para consumo público y calefacción.

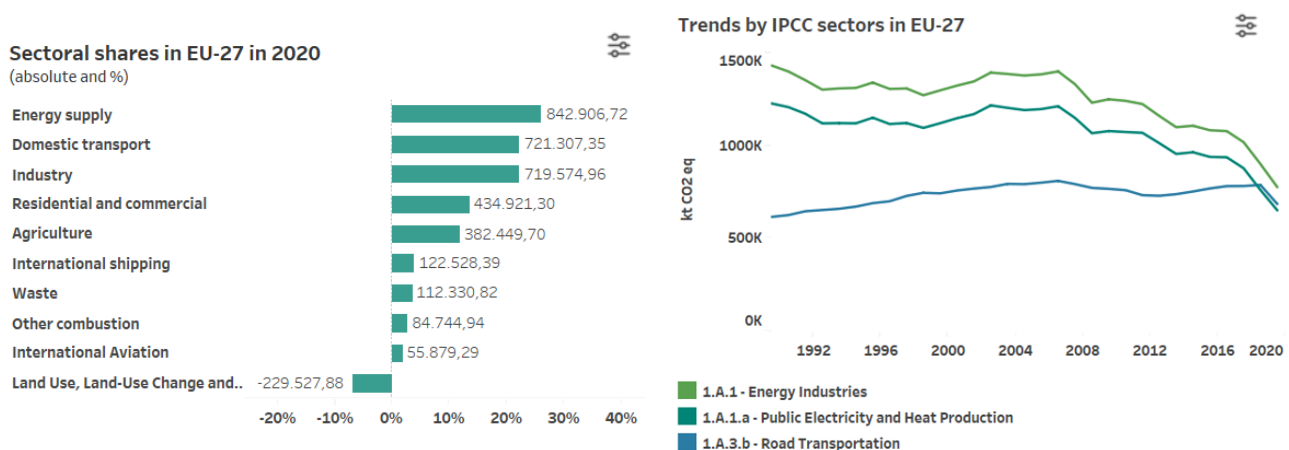


Figura 1: Emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero, enviadas por los países a la UNFCCC y al Mecanismo de Seguimiento de los Gases de Efecto Invernadero de la UE (Estados miembros de la UE).(2021). [1]

Para ello, se inventan y optimizan nuevos procesos de fabricación. Entre ellos, se encuentra el Moldeo por Transferencia de Resina (RTM: Resin Transfer Molding). Este proceso es una alternativa para fabricar composites de matriz

polimérica (PMC) estructural y geométricamente complejos mediante la inyección de resina en un molde a presión que contiene un laminado con las fibras del material que se desea impregnar. Además, la rigidez específica de estos componentes puede aumentarse añadiendo núcleos de espuma integrados, formando lo que se denomina un componente estructural tipo sándwich. Este compuesto es extremadamente ligero y logra unas propiedades mecánicas específicas sorprendentemente buenas.

Sin embargo, esto no es tan sencillo. Uno de los principales problemas que sufre este proceso de fabricación radica en la infiltración del material poroso. Las fibras oponen resistencia al fluido que intenta circular a través del tejido formado por estas fibras de refuerzo, lo que provoca un aumento de la presión en el molde. Esto provoca que el núcleo de espuma se comprima, liberando espacio en el molde, el cual es ocupado instantáneamente por las fibras del material poroso. De este modo, se pierde gran parte de la compactación de las fibras y de sus propiedades mecánicas. Además, este fenómeno también permite que entre más resina en el molde, lo que añade un peso extra innecesario a la pieza.

Asimismo, este tipo de proceso es realmente complejo y delicado, por lo que su ejecución requiere una planificación detallada y un control constante. Existen muchos tipos de defectos que pueden surgir tras el curado de la resina, que pueden ser no sólo inducidos por el diseño sino también por el proceso. Estos se han estudiado ampliamente y algunos ejemplos son los microvacíos (o puntos secos), la desalineación de las fibras, la delaminación, los pliegues de las capas, la deformación del núcleo y las zonas ricas en resina. [25, 26]

Además, cada componente requiere su propio estudio porque necesita que se diseñe su propio molde, una colocación estratégica de la admisión y el escape de resina, unas condiciones de temperatura favorables específicas y una fuerza de compresión del molde bien calculada para obtener la Fracción de Volumen de Fibra (FVF) deseada.

Debido a esta delicada relación entre el flujo de resina y la deformación del núcleo de foam (como consecuencia de las fuerzas causadas por la interacción entre fluido y sólido), es necesario analizar de forma más detallada lo que ocurre

realmente en el proceso. Una forma de abordar este problema es caracterizando y simulando el mismo. Esto mejora el análisis, añadiéndole más flexibilidad, además de permitir no sólo una reducción en los costes y tiempos de construcción de prototipos, sino también en el análisis de viabilidad de un proyecto.

Existen varios métodos de simulación utilizados para este proceso como LIMS [62], PAM-RTM [48], solvers comerciales [27] y métodos de elementos finitos [73], incluso combinado con el método Level Set [34]. Para esta tesis, se utiliza un enfoque de volumen finito implementado en la caja de herramientas (ToolBox) de código abierto OpenFOAM [30] que fue ampliado por Seuffert [61] para capturar el término fuente adicional inducido por la preforma de fibra. Se eligió este método porque se cree que es potencialmente flexible y también resuelve varios procesos similares además del RTM.

Basándose tanto en los desarrollos teóricos como en los casos experimentales de Seuffert [61], se busca predecir algunas de las variables de mayor influencia en el proceso RTM así como verificar la independencia de la malla y optimizar el uso del solver.

2. Estado del Arte

En este capítulo se describirán las generalidades de los componentes tipo sándwich, así como el proceso de fabricación por RTM y algunas consideraciones en el tratamiento de estos materiales, así como ventajas y limitaciones.

2.1. Compuestos Sándwich

En los últimos años, los materiales compuestos han alcanzado un gran protagonismo en el sector marítimo [47, 57], aeroespacial [46, 53] y el transporte terrestre, especialmente en la electromovilidad, ya que una reducción del peso tiene un gran impacto en el consumo de energía. [68, 39]. Esto se debe a que en estos sectores se requiere una elevada relación resistencia-peso, rigidez a la flexión y absorción de energía en caso de impacto. Los materiales más prometedores para cumplir estos requisitos son los compuestos tipo sándwich de matriz polimérica. Estos materiales están formados por finas capas de un material de recubrimiento (plástico reforzado) unidas a un material liviano de relleno, como una espuma polimérica. Estos dos materiales por separado carecen de la resistencia mecánica y la rigidez necesarias, pero la combinación de ambos puede producir un componente con excelentes propiedades mecánicas específicas. [7, 18]

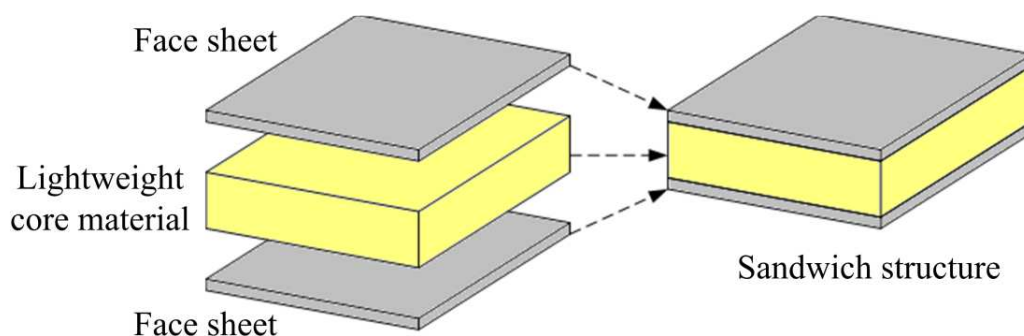


Figura 2: Concepto de Estructura tipo Sándwich. [11]

El material ultra-liviano del núcleo se conoce como rigidizador y se incorpora al material para crear volumen en el interior, separando los recubrimientos de la fibra neutra, aumentando así el momento de inercia de la sección sin que

esto conlleve a aumentar significativamente el peso [74]. Como se muestra en la figura 2, Como se muestra en la figura 2, el material compuesto está formado por dos láminas (normalmente de plástico reforzado) y un núcleo liviano en el interior, como lo son las estructuras de espumas poliméricas.

Existe una gran variedad de núcleos que pueden ser utilizados en el área de los plásticos reforzados con diferentes fines, entre los más usados se encuentran:

- **Espuma de polímero termoestable:** Ofrecen múltiples rangos de densidad y ventajas de aislamiento térmico. Pueden fabricarse con resina fenólica y poliuretano.
- **Estructura tipo Panal de Abeja:** Proporcionan una excelente rigidez y pueden funcionar a altas temperaturas. Suelen fabricarse con papel de aramida o papel de aluminio. Sus propiedades vienen determinadas por la densidad, el tamaño, la forma y el grosor de la pared de las celdas.
- **Madera Balsa:** uno de los elementos de núcleo más antiguos y baratos que se conocen, aunque está siendo sustituido por espumas poliméricas, sigue utilizándose habitualmente en la fabricación de embarcaciones.
- **Polietileno de Alta Densidad (HDPE):** Elementos sólidos rígidos de densidad relativamente baja. Tienen una baja absorción de humedad (lo que supone un gran problema en los materiales compuestos) y son fáciles de procesar. Además, presentan gran resistencia química y buen aislamiento eléctrico.

Los materiales para el núcleo más utilizados son los de espuma en el proceso RTM, ya que son homogéneos, tienen una superficie impermeable y son prometedores para hacer posible la industrialización del proceso. [51]. Las estructuras tipo panal de abeja y cualquier otro material de núcleo estructurado tienen la desventaja de que sus celdas son abiertas, lo cual hace imposible su procesamiento en RTM. Entre las espumas más utilizadas se encuentran la polimetacrilimida (PMI) [60], policloruro de vinilo (PVC) [65], poliuretano (PU) [33] y tereftalato de polietileno (PET) [19].

En cuanto a las láminas que completan el sándwich conteniendo el núcleo de espuma en el centro, normalmente están hechas de compuestos reforzados con fibras (FRC). Consisten en una matriz con fibras de refuerzo dispersas en ella. La matriz es la fase continua del compuesto, proporciona a las fibras la estructura y la forma deseadas, ayuda a una distribución más homogénea de las fuerzas aplicadas e incluso protege las fibras contra el medio ambiente y agentes corrosivos.

Las fibras, por su parte, aportan rigidez y resistencia mecánica a la pieza. Las matrices hechas de polímeros (como los termoplásticos o los termoestables) son de bajo costo en comparación con otros materiales y presentan densidades bajas, lo que representa una gran ventaja. Los materiales con este tipo de matrices se denominan plásticos reforzados con fibras.

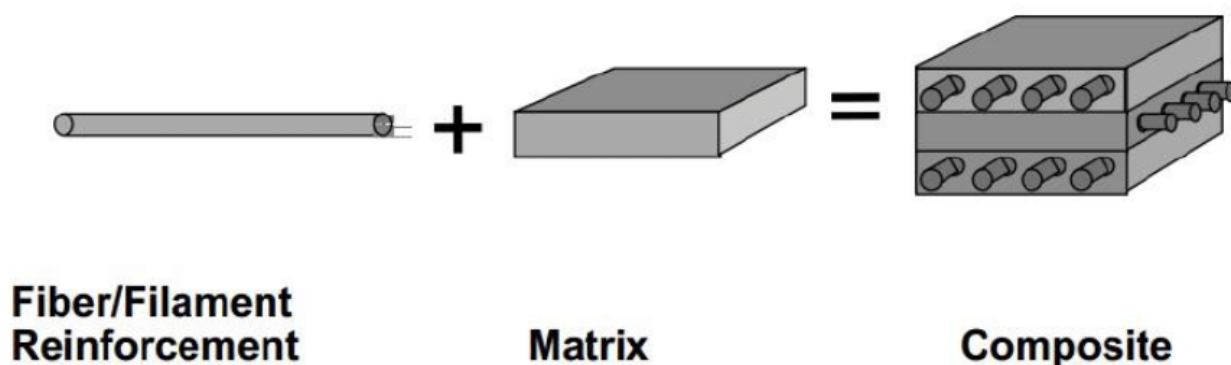


Figura 3: Concepto de materiales compuestos reforzados con fibras. [63]

El proceso RTM se centra en la fabricación de plásticos reforzados con fibras continuas (CoFRP). Por supuesto, es posible utilizar muchos tipos de fibra diferentes, siempre que presenten una buena capacidad de adhesión a la matriz y se ajusten a las condiciones del proceso. Sin embargo, las fibras de carbono y las de vidrio son las más utilizadas en RTM como materiales de refuerzo de fibras. La fibra de vidrio tiene la ventaja de ser de bajo coste, por lo que se usa a menudo en la industria automotriz. Por otro lado, las fibras de carbono tienen mayores propiedades mecánicas específicas, pero a su vez son más caras, por lo que se limitan a aplicaciones aeroespaciales, autos deportivos o industrias en las que el contar con un bajo peso es primordial. Últimamente, el uso de fibras

naturales ha aumentado y se sigue estudiando [35], sin embargo poseen una mayor variabilidad de las propiedades mecánicas, lo que consiste en una gran desventaja. [23]

2.2. Proceso RTM

Los inicios del concepto del método RTM se remontan a la década de 1950. Los refuerzos utilizados entonces eran fibras vegetales y amianto, y la resina de primera elección era la fenólica [54]. Sin embargo, no fue hasta 1980 cuando se desarrolló e implementó para algunas aplicaciones aeroespaciales generales. Hoy en día, aunque el proceso tecnológicamente se alejó mucho, sigue conservando la misma esencia.

El proceso RTM se considera una de las tantas técnicas del Moldeo líquido de Compuestos (LCM), en la que una resina (en estado líquido) fluye en una cavidad sellada que tiene la forma de la pieza y contiene el refuerzo que se va a infiltrar. También pertenece a este grupo la técnica de infusión, también conocida como VARTM (Moldeo por Transferencia de Resina Asistido por Vacío) o RIFT (Moldeo Flexible por Infusión de Resina), en la que se fuerza a la resina a fluir en el molde cerrado (un lado rígido y otro flexible) mediante vacío [13] [72]. Sin embargo, cuando este proceso se realiza a presiones superiores a la atmosférica y en moldes cerrados rígidos, la técnica se conoce como Moldeo por Transferencia de Resina (RTM).

Este proceso difiere de los demás debido al hecho de que el refuerzo seco (tejido de fibra) y la resina se unen dentro del molde para consolidar el compuesto. El refuerzo en forma de láminas, que puede estar preformado o no, se coloca dentro de la cavidad del molde, que se cierra, y a continuación se bombea o transfiere la resina desde un depósito (a través de un conducto) al interior del molde para impregnar la fibra. Por último, tiene lugar el curado y se procede a desmoldar la pieza.

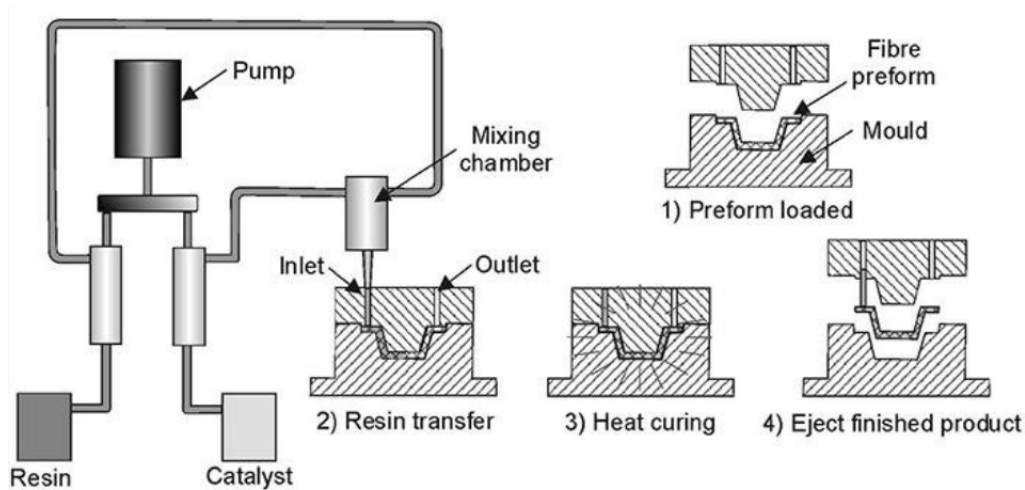


Figura 4: Diagrama esquemático del proceso de Moldeo por Transferencia de Resina. [2]

La técnica RTM tiene varias ventajas sobre otros procesos de fabricación de plásticos reforzados con fibras [45], entre las más importantes se encuentran las siguientes:

- Las dimensiones de la pieza que se va a fabricar están controladas por la geometría de la cavidad y la rigidez del molde.
- Es posible fabricar formas complejas, minimizando la necesidad de operaciones de acabado.
- Ofrece múltiples posibilidades para el uso de refuerzos, tejidos y preformas.
- Se puede utilizar una gran variedad de sistemas de resina.
- Para moldes rígidos, la fracción de volumen de fibra puede controlarse adecuadamente, consiguiendo propiedades mecánicas consistentes.
- La porosidad y los huecos en las piezas pueden controlarse con un diseño de molde y un control del proceso adecuados.

A nivel económico, el proceso RTM se torna una técnica muy importante a tener en cuenta, debido al coste relativamente bajo de las materias primas, en comparación con las técnicas de alta calidad que utilizan pre-impregnados (pre-pregs). Se trata de materiales compuestos de fibras reforzadas fabricados a partir de fibras "preimpregnadas" una matriz polimérica parcialmente curada

que puede manipularse fácilmente en moldes abiertos para fabricar geometrías complejas. Estos componentes se curan en autoclave para mejorar sus propiedades mecánicas. Durante el curado, se aplican simultáneamente vacío, presión y temperatura para consolidar los pre-pregs apilados. [71]

El procesado en autoclave se ha utilizado durante décadas debido al alto rendimiento y calidad de los composites que produce. La técnica de curado de pre-pregs sin autoclave sólo con bolsa de vacío (VBO) se ha concebido como un método de fabricación rentable para producir esta pieza compuesta de alta calidad [52]. Sin embargo, resultan más caros que el RTM debido a factores como: la elevada inversión y los costos elevados de los materiales auxiliares, como películas y láminas (consumibles del proceso). En cuanto al RTM, el coste se ve afectado básicamente por el sistema de resina y las preformas o refuerzos utilizados. Por otro lado, ofrecen piezas de mayor calidad y menor índice de defectos.

Algunas variantes del proceso RTM son:

- **Relajación de preformas inducida por vacío (VIPR):** el objetivo es controlar dinámicamente el comportamiento del flujo de resina durante la infusión. Esto se consigue mediante una cámara de vacío externa que sella contra la superficie flexible de un molde y un vacío secundario que reduce localmente la presión de compactación sobre las fibras. Esto conduce a un aumento de la permeabilidad de una zona de la pieza, dirigiendo el flujo de resina hacia esa región. [6]

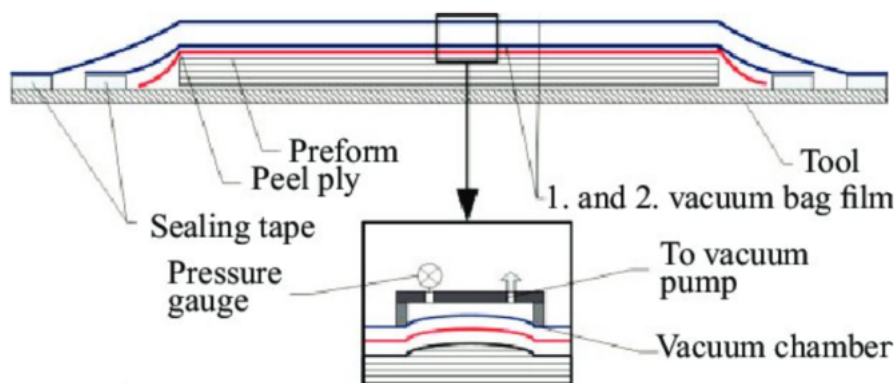


Figura 5: Dibujo esquemático del proceso VIPR. [29]

- **Canales rápidos de actuación remota (FASTRAC):** El objetivo de este método es evitar las marcas dejadas por el canal en las superficies de las piezas de material compuesto. Las consecuencias de estas marcas es una deformación localizada de las fibras y, por lo tanto, el laminado se vuelve más propenso al pandeo por cizallamiento en esta zona [29]. Si la inyección se realiza mediante la creación de trayectorias preferenciales de flujo de resina utilizando un herramental sin contacto, se evitarán dichas marcas superficiales [4].

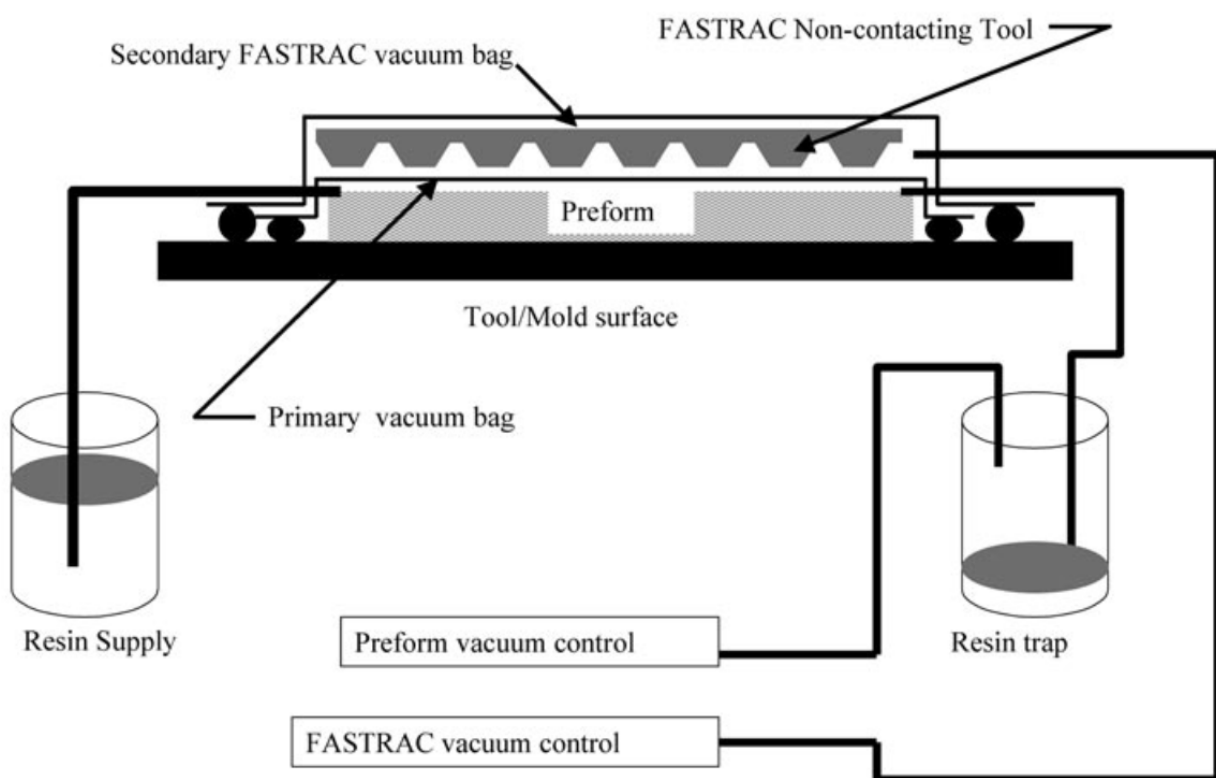


Figura 6: Esquema del proceso FASTRAC. [5]

- **RTM-Light (LRTM):** Esta variante consta de un molde rígido y un contramolde semirrígido. El primero incorpora juntas que crean un sello hermético cuando este y el contramolde se cierran por acción del vacío. Una vez que se aplica presión de vacío al molde sellado, se inyecta la resina a muy baja presión a través de los canales de resina. Luego de curada la resina, se corta el vacío de la cavidad y el sello, y se abre el contramolde para proceder al desmoldar la pieza fabricada.[40]

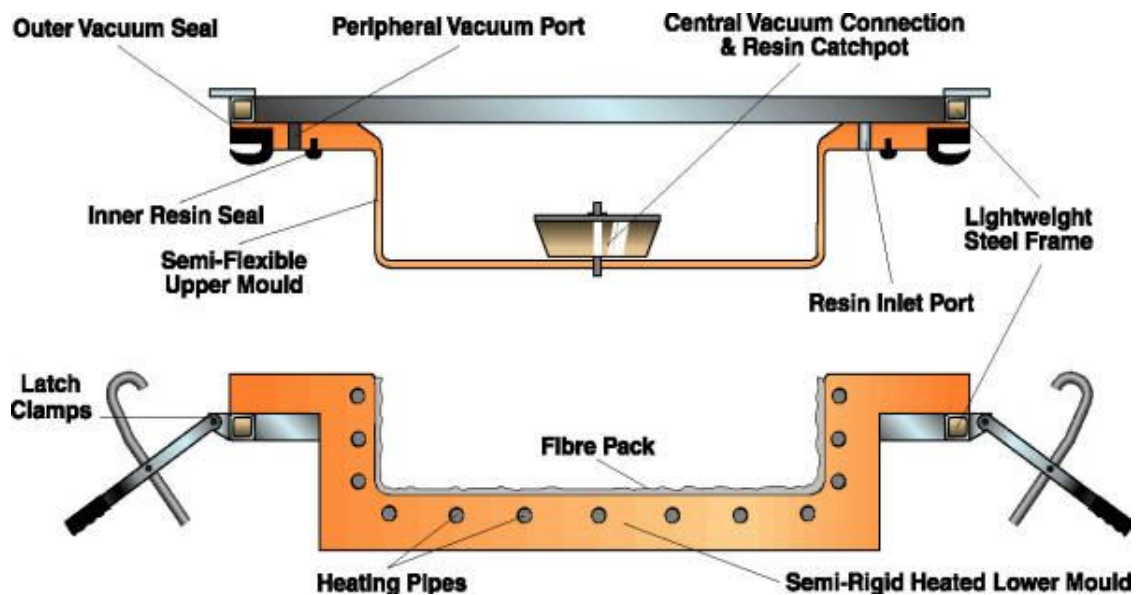


Figura 7: Esquema del proceso LRTM. [56]

- **Moldeo por inyección de reacción estructural (S-RIM):** Se basa en la tecnología de moldeo por inyección de reacción (RIM), en la que dos líquidos de baja viscosidad y altamente reactivos químicamente se hacen chocar entre sí a velocidades muy elevadas en una cámara mezcladora, inmediatamente antes de inyectar la mezcla líquida en una cavidad de molde cerrada (8). En el proceso S-RIM, se coloca una pila de fibras secas o una preforma en el molde antes de inyectar la mezcla líquida. Actualmente se utiliza en la industria del automóvil para fabricar grandes piezas externas de la carrocería, como la caja de carga de una camioneta pick-up. [41]

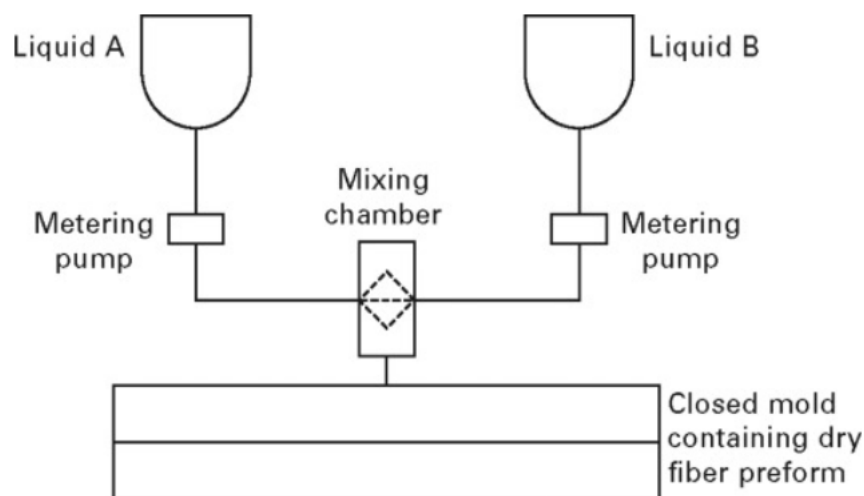


Figura 8: Dibujo esquemático del proceso SRIM. [41]

- **Moldeo por transferencia de resina por compresión (CRTM):** Esta técnica es una de las variantes más utilizadas de la familia de procesos RTM, ya que resulta prometedora para la producción de grandes volúmenes de piezas. [12]. Permite fabricar piezas de material compuesto con una elevada fracción volumétrica de fibra y un ritmo de producción rápido. En este proceso, la preforma de tejido de fibra se coloca en la cavidad de un molde. A diferencia del moldeo por transferencia de resina tradicional (RTM), el molde no está completamente cerrado, sino que se deja intencionadamente un pequeño hueco abierto entre las paredes de la platina del molde y la preforma de fibra. La resina se inyecta en este hueco para que pueda fluir fácilmente sobre la preforma. Una vez que se inyecta la cantidad necesaria de resina en el hueco, la platina del molde se mueve hacia abajo para cerrar el molde completamente y forzar la resina en la preforma, que también se somete a compactación para lograr la fracción de volumen de fibra deseada. Una vez curada la resina, se puede abrir el molde y desmoldar la pieza. (Ver figura 9)

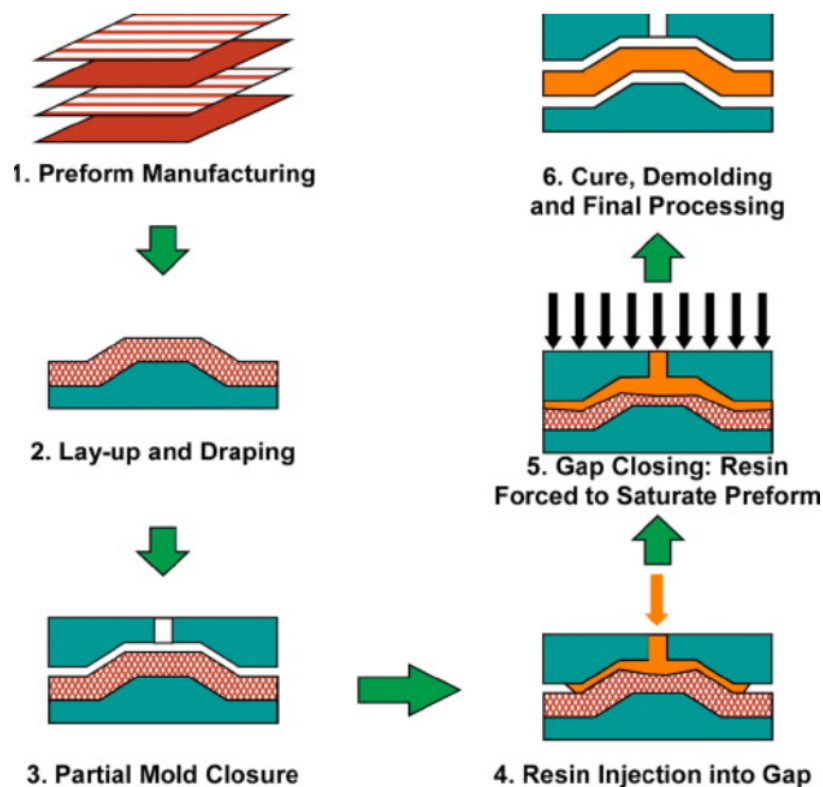


Figura 9: Esquema del proceso CRTM. [12]

- **Multi-directional Compression RTM (M-CRTM):** Este método es una nueva variación que tiene un hueco de inyección ajustable, ya que es un desarrollo del CRTM [42]. Se utiliza para reducir la fracción de volumen de la fibra durante el proceso de inyección, facilitando que la resina penetre en el refuerzo y que las burbujas de aire salgan del molde. Puede ayudar a reducir los defectos y la deformación máxima de curado. Su principal aplicación son láminas delgadas de material compuesto. [75]

3. Fundamentos

En este capítulo se explicará brevemente el método de simulación utilizado, así como las definiciones básicas de los modelos matemáticos implementados, las propiedades y la caracterización de los materiales implicados con las respectivas ecuaciones gobernantes para una comprensión general.

3.1. Definiciones

3.1.1. Medio Poroso

Para una mejor comprensión del llenado de moldes, es importante echar un vistazo a las diferentes escalas de la preforma de fibra. Si se desea tener en cuenta los fenómenos físicos que subyacen a la interacción entre el tejido de fibra y el fluido, existen 3 escalas bien diferenciadas a tener en cuenta:

- **Microescala:** implica el flujo alrededor de filamentos individuales o múltiples dentro de un mechón (roving). Los filamentos forman obstáculos para el flujo de resina, por lo que cuantas más fibras haya en un determinado volumen, mayor será la resistencia que oponen, ya que el fluido tiene menos espacio disponible para atravesarlo. Por otra parte, la dirección del flujo también es importante, de ahí que un flujo paralelo a las fibras tenga menor resistencia en comparación con un flujo perpendicular.
- **Mesoescala:** Un grupo de miles de fibras forma un roving o mechón. A esta escala, el comportamiento de la resistencia del fluido dentro de un mechón puede interpretarse como una propiedad homogeneizada que representa estadísticamente las características del flujo frente a muchos filamentos. Esta propiedad homogeneizada se asigna a un roving, formando un medio poroso. Sin embargo, a esta escala cada mechón se considera un medio poroso, mientras que el flujo entre los rovings se sigue captando como un flujo libre.

- **Macroescala:** Esta es la escala de interés a nivel de componente, ya que las fibras individuales y los rovings se homogeneizan en un único medio poroso. Sin embargo, debido al comportamiento multiescala en el llenado de moldes, esta caracterización homogeneizada de los materiales es bastante compleja y requiere investigaciones exhaustivas.

La imagen 10 ilustra a continuación esta descripción para aclarar lo expuesto anteriormente.

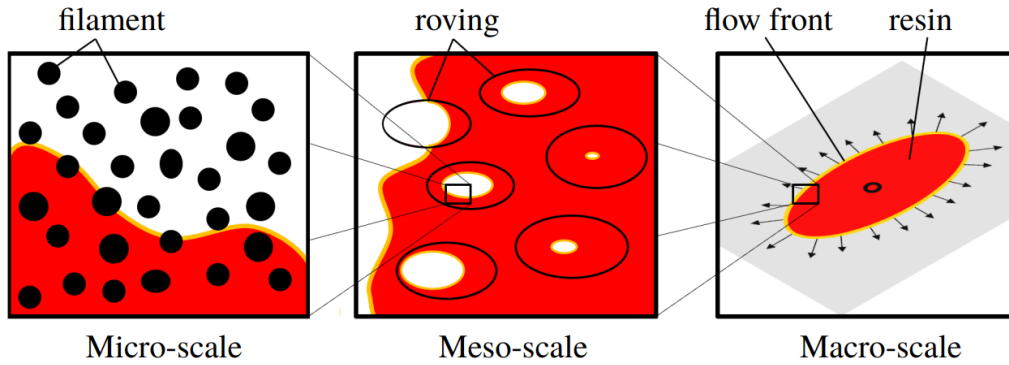


Figura 10: Comportamiento del flujo multiescala durante el llenado del molde en el proceso RTM. [28]

En el enfoque a macroescala se utiliza la ley de Darcy para describir el flujo de resina a través de un medio poroso:

$$\bar{\mathbf{u}} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla p \quad (1)$$

Siendo:

$$\bar{\mathbf{u}} = (1 - \varphi) \cdot \mathbf{u} \quad (2)$$

Donde:

$\bar{\mathbf{u}}$: la velocidad media.

φ : la fracción volumétrica de la fibra (FVF).

$\mathbf{u}$: la velocidad de la resina.

$\mathbf{K}$: la matriz que describe la permeabilidad del tejido de fibra.

μ : la viscosidad dinámica de la resina.

∇p : el gradiente de presión en la cavidad.

La ley de Darcy es una solución especial de las ecuaciones de Navier-Stokes ya que se demostró después de un siglo que él ya había determinado esta relación experimentalmente [70]. Se ha demostrado que esta relación lineal es válida siempre que el gradiente de presión o la velocidad del flujo sean lo suficientemente pequeños [16], para los que el RTM no es una excepción, ya que las velocidades de inyección son bajas y controladas.

Teniendo en cuenta el modelo descripto y la naturaleza del funcionamiento del proceso RTM, se pueden hacer algunas suposiciones fundamentales:

- Se asume que los fluidos son **Newtonianos**.
- Se asume que la resina es un fluido incompresible.
- El aire se supone compresible
- La viscosidad sólo depende de la temperatura y el tiempo.
- Las fibras son incompresibles y estáticas.
- Todas las fuerzas de inercia son realmente pequeñas comparadas con las fuerzas de arrastre poroso: **Número de Reynolds** $\ll 1$.

Teniendo esto en cuenta, la resina y el aire (que luego saldrá de ella) dentro de la cavidad pueden modelarse como un flujo compresible de fluidos viscosos. Por lo tanto, las ecuaciones utilizadas para modelizar el flujo en el interior del medio poroso son las ecuaciones de continuidad en un marco euleriano. Ecuación de continuidad de la masa 3, la conservación del momento para un fluido newtoniano 4 (descrita por Seuffert [61] y la ecuación en su forma de balance de energía 5 (descrita por Bernath [10]) se indican a continuación.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \times \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{Q} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho c_v T) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} c_v T) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t}(\rho |\mathbf{u}^2|) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}^2| \mathbf{u} \right) + \nabla \cdot (\mathbf{u} p) = \\ \nabla \cdot (\alpha_{eff} c_v \nabla T) + S_Q + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

$\mathbf{u}$: la velocidad del fluido.

ρ : la densidad del fluido.

p : la presión.

Q : término fuente de arrastre poroso basado en la ley de Darcy. (ver eq. 6)

μ : la viscosidad dinámica de la resina.

c_v : el calor específico a volumen constante.

T : la temperatura.

α_{eff} : la difusividad térmica efectiva.

$\boldsymbol{\tau}$: el tensor de esfuerzo cortante.

$\mathbf{g}$: el vector de aceleración gravitacional.

S_Q : término que denota el flujo de calor debido a fuentes de calor volumétricas.

Una observación importante que hay que hacer es que el término fuente Q en la ecuación del momento 4 se utiliza en el modelo para añadir el arrastre poroso que considera la resistencia opuesta por la influencia de las fibras en el flujo del fluido. Para ello, la ecuación de Darcy 1 se reescribe como sigue:

$$\mathbf{Q}_{Darcy} = \nabla p_{Darcy} = -\mu \mathbf{K}^{-1} (1 - \varphi) \mathbf{u} \quad (6)$$

Donde:

$\mathbf{K}$: el tensor de permeabilidad del tejido de fibra.

φ : la fracción volumétrica de fibra (FVF).

Este término es un sumidero de momento y contribuye a aumentar el gradiente de presión de la cavidad. Los tejidos de fibras utilizados en RTM tienen una permeabilidad muy baja y, por tanto, el término de arrastre de Darcy domina las ecuaciones.

Para simular el flujo bifásico de resina y aire, es necesario resolver adicionalmente una ecuación de fracción de fase:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \nabla(\alpha \mathbf{u}) \quad (7)$$

Donde α es el factor de llenado de la resina y puede adoptar valores entre 0 y 1. Al promediar este factor de llenado, las propiedades escalares generales de los materiales pueden calcularse como:

$$\psi = \alpha \cdot \psi_{resin} + (1 - \alpha) \cdot \psi_{air} \quad (8)$$

Esto permite utilizar un único conjunto de ecuaciones para ambas fases fluidas, donde las diferentes propiedades de los fluidos determinan el comportamiento del flujo para cada una de ellas.

3.1.2. Permeabilidad

La permeabilidad puede definirse a nivel básico como un parámetro homogeneizado que describe la capacidad de un material poroso para ser penetrado por un fluido. Este tema es ampliamente estudiado ya que tiene una gran aplicación en el campo de la ciencia y la industria.

Particularmente en el ámbito de los materiales compuestos de matriz polimérica este fenómeno es de gran importancia, ya que el proceso de fabricación RTM para este tipo de materiales parte de tener el refuerzo de fibra seco dentro de un molde listo para ser infiltrado por la resina líquida. La determinación de los valores de permeabilidad en los tejidos o refuerzos de fibras utilizados en RTM permite establecer el comportamiento del flujo de la resina en los moldes, lo cual es especialmente importante en la fabricación de piezas grandes y complejas.

Los valores de permeabilidad en laminados pueden variar drásticamente entre los distintos tipos de material y direcciones. En el proceso RTM normalmente

son realmente bajos y suelen expresarse en términos de área, generalmente en metros cuadrados (m^2). Por ejemplo, para fibras unidireccionales alineadas con un flujo paralelo y una fracción de volumen de fibra de 0,55 pueden alcanzar valores de $10^{-10}m^2$ y $10^{-11}m^2$ para flujo perpendicular [24].

Los modelos de permeabilidad, por tanto, son siempre función de la FVF y se representan mediante un tensor de segundo orden, ya que muestra un comportamiento muy anisótropo. Este tensor contiene toda la información de la geometría del tejido, sus rovings y filamentos homogeneizados de manera concentrada. Se puede colocar un sistema local de coordenadas cartesianas orientado en la dirección de las fibras para hacer una matriz diagonal. Esto significa que la permeabilidad se puede indicar en el sistema del eje principal, que está girado en la dirección de la fibra en cada celda, y por lo tanto tiene la ventaja de que los términos mixtos no tienen que ser caracterizados:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde:

K_{11} : valor más alto de permeabilidad en el plano (para refuerzos UD es igual a la orientación de la fibra).

K_{22} : valor más bajo de permeabilidad en el plano (para UD es perpendicular a la dirección de la fibra).

K_{33} : permeabilidad a través del espesor.

K_{33} normalmente no se tiene en cuenta en los tejidos utilizados en RTM, ya que las dimensiones del espesor del material reforzado son realmente pequeñas en comparación con sus otras dimensiones. [67]. Así, cuando se habla de material reforzado con fibras para RTM se habla de una permeabilidad paralela a la dirección de las fibras ($K_{||}$) y una permeabilidad perpendicular a la orientación de las mismas ($K_{\perp}$).

La permeabilidad puede determinarse experimentalmente, pero también existen enfoques analíticos. Éstos se basan principalmente en los trabajos de Gebart

[24], mediante una adaptación de la ecuación de Kozeny-Carman para el medio poroso fibroso [36] [15]:

$$K_{\parallel} = \frac{8r^2}{c} \cdot \frac{(1 - \varphi)^3}{\varphi^2} \quad (10)$$

$$K_{\perp} = C_1 r^2 \cdot \left(\sqrt{\frac{\varphi_{max}}{\varphi}} - 1 \right) \quad (11)$$

Donde:

r: el radio efectivo del filamento.

φ : la fracción volumétrica de fibra (FVF).

c y C_1 : variables en función del tipo de matriz de fibras.

φ : FVF máximo en función del tipo de conjunto de fibras.

En este trabajo los valores de permeabilidad utilizados son los descritos en su trabajo por Seuffert [61], que utiliza una combinación de este modelo y la caracterización experimental.

3.1.3. Modelo de Viscosidad

Como concepto general, la viscosidad describe la resistencia que presenta una sustancia para fluir y sufrir deformaciones y está relacionada con su fricción interna. Un fluido con alta viscosidad presenta cierta resistencia al movimiento que recibe, mientras que un fluido con baja viscosidad fluye con facilidad.

Para obtener estimaciones precisas en los tiempos de llenado y poder observar si habrá defectos locales por falta o exceso de resina, la viscosidad que presenta la misma es crucial y debe modelarse con exactitud. Esto es aún más importante cuando se trabaja con resinas de curado rápido, en las que su viscosidad puede cambiar significativamente durante el tiempo de inyección, lo que puede alterar el resultado esperado.

Para estimar la viscosidad de la resina durante el curado, se utilizan un

modelo cinético y un modelo reológico. El modelo cinético describe *el grado de curado de la resina* en función de la temperatura y el tiempo, mientras que el modelo reológico describe la dependencia de *la viscosidad* con la temperatura y el grado de curado.

Para este trabajo se ha dejado de lado este aspecto, ya que la atención se centra en las fuerzas que intervienen durante la inyección de resina, por lo que, para limitar la complejidad del caso, la viscosidad se ha considerado constante, pero es algo que merece la pena añadir y analizar en el futuro.

3.2. Ecuaciones de Gobierno

Aquí se dan las ecuaciones generales a resolver con el fin de tener un marco de referencia para una mejor comprensión del solver utilizado en este trabajo.

3.2.1. Cavidades No-Constantes

Para capturar el movimiento relativo entre los participantes es necesario utilizar solvers de mallas dinámicas que están disponibles en la librería Open-FOAM. El método es independiente del tipo de movimiento de malla elegido y consiste en utilizar un enfoque mixto Lagrangiano-Euleriano con la velocidad relativa entre fluido y la malla computacional. La ecuación general de continuidad utilizada para una propiedad tensorial Φ y un volumen en movimiento Ω con una superficie cerrada Γ en forma integral es:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \Phi d\Omega + \oint_{\Gamma} \rho \mathbf{n} \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) \Phi d\Gamma - \oint_{\Gamma} \rho \mu_{\Phi} \mathbf{n} \cdot \nabla \Phi d\Gamma = \int_{\Omega} q_{\Phi} d\Omega \quad (12)$$

Donde:

$\mathbf{n}$: el vector normal unitario en la superficie límite.

$\mathbf{u}_s$: la velocidad de la superficie límite de la celda.

μ_{Φ} : el coeficiente de difusión.

q_{Φ} : la fuente de volumen de Φ .

Uno de sus términos más importantes es $\oint_{\Gamma} \rho \mathbf{n} \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) \Phi d\Gamma$, que representa la convección y utiliza la velocidad relativa entre el fluido y la superficie de la malla.

La ecuación 12 debe discretizarse en fluidos de volumen finito y aplicarse a todas las ecuaciones que deben resolverse. Tras resolver el movimiento de la malla, se conoce la velocidad de las superficies de las celdas u_s y se puede resolver 12 utilizando los mismos métodos que para las mallas estacionarias.

3.2.2. Método de Volúmenes Finitos para Mecánica Porosa

Aquí, un algoritmo de poroelasticidad incremental no lineal desarrollado por Seuffert [61] es usado para esta parte. El mismo tiene en cuenta las grandes deformaciones incrementales y permite simular con pasos de tiempo mayores. Esto es especialmente bueno cuando se acopla la mecánica de sólidos porosos al flujo de fluidos, ya que el paso de tiempo puede definirse por la velocidad del flujo y no está limitado por el cálculo de la deformación del sólido poroso.

En esta sección se revisarán algunos de los fundamentos de este método. La descripción de un medio poroso en términos de mecánica de sólidos se basa en la ley de Terzaghi [64], por lo que se asume que las fibras del material sólido continuo dentro del medio poroso son incompresibles. En el caso de los materiales compuestos reforzados con fibras, esta suposición se considera válida, por lo que la compresibilidad del tejido de fibra es de órdenes de magnitud superiores a la de las propias fibras.

Terzaghi distingue entre la tensión del sólido y la del fluido por separado definiendo una "tensión efectiva" en el interior del medio poroso que se define del siguiente modo:

$$\sigma_{Total} = \sigma_{eff} + \sigma_{Fluido} \quad (13)$$

$$\sigma_{Fluido} = -p\mathbf{I} \quad (14)$$

Donde:

$\mathbf{p}$: la presión del fluido en el interior del medio poroso.

$\mathbf{I}$: el tensor identidad.

La ley de Terzaghi se utiliza en este contexto para acoplar la compresión de la preforma y la presión del fluido en un enfoque monolítico, con el fin de calcular qué fuerzas ejerce el fluido y cuáles ejerce la compresión del tejido.

La mecánica de sólidos del refuerzo poroso de fibras se define de forma muy similar a la implementada en fluidos. Para modelizar grandes deformaciones, especialmente en la dirección del espesor del laminado, el método utiliza una formulación lagrangiana actualizada. Para ello sólo se tiene en cuenta la ecuación del momento. La ecuación utilizada es la misma que 12 pero al tratarse de una aproximación lagrangiana la velocidad de la malla $\mathbf{u}_s$ es igual a la velocidad del material $\mathbf{u}$, y como consecuencia el término de convección es cero. Además, en lugar de tener el modelo constitutivo de un fluido newtoniano se utiliza la relación constitutiva hiperelástica de St. Venant-Kirchhoff. Así, la ecuación general sin modelo constitutivo para la conservación del momento lineal para un volumen de control general Ω con una superficie Γ y normal unitaria n en forma integral se puede escribir como:

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{\Omega} \rho \mathbf{u} d\Omega = \oint_{\Gamma} n \cdot \sigma d\Gamma + \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} d\Omega \quad (15)$$

Donde:

$\mathbf{u}$: la velocidad del sólido.

σ : el tensor de tensiones.

$\mathbf{b}$: fuerzas de cuerpo.

ρ : la densidad del sólido.

A continuación, se añade la relación constitutiva hiperelástica de St. Venant-

Kirchhoff y se aplica un enfoque lagrangiano incremental. Se asume que el tensor de rigidez no cambia.

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{\Omega} \rho \mathbf{u} d\Omega = \oint_{\Gamma_u} \mathbf{n}_u \cdot (\mathbf{S} \cdot \mathbf{F}) d\Gamma_u + \int_{\Omega_u} \rho \mathbf{b} d\Omega \quad (16)$$

Donde:

$\mathbf{F}$: el gradiente de deformación.

σ : el segundo tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff.

La ventaja del enfoque incremental es que el desplazamiento inicial en un incremento de tiempo es siempre cero y por tanto las ecuaciones terminan simplificándose bastante. Asumiendo esto y que las fuerzas de cuerpo son despreciables entonces:

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{\Omega} \rho \mathbf{u} d\Omega = \oint_{\Gamma_u} \mathbf{n}_u \cdot (\delta \mathbf{S} + \mathbf{S} \cdot \delta \mathbf{F} + \delta \mathbf{S} \cdot \delta \mathbf{F}) d\Gamma_u \quad (17)$$

Luego se desea aplicar la ley de Terzaghi (13) para diferenciar las tensiones causadas por el sólido y el fluido y seguir el modelo de medio poroso de la parte fluida. Así, el tensor de tensiones $\mathbf{S}$ se divide en la tensión efectiva $\mathbf{S}_{eff}$ y la contribución de la presión del fluido, pero también se utiliza en forma incremental:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_{eff} - p\mathbf{I} \quad (18)$$

$$\delta \mathbf{S} = \delta \mathbf{S}_{eff} - \delta p \mathbf{I} \quad (19)$$

Estos términos se pueden sustituir en la ecuación 17 y luego reemplazarse recursivamente en las relaciones constitutivas y el modelo para permitir el fuerte acoplamiento poro-elástico necesario entre el flujo de resina y la deformación del refuerzo de fibra.

La forma final de la ecuación utilizada con las relaciones constitutivas sustituidas es:

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t} \int_{\Omega} \rho_u \frac{\delta(\delta \mathbf{d})}{\delta t} d\Omega = \oint_{\Gamma_u} \mathbf{n}_u \cdot [2\mu_L \delta \mathbf{E}_u + \lambda_L \delta(\mathbf{E}_u)^T \mathbf{I}] d\Gamma_u \\ - \oint_{\Gamma_u} \mathbf{n}_u \cdot (\delta p \mathbf{I}) d\Gamma_u + \oint_{\Gamma_u} \mathbf{n}_u \cdot [(S_{eff,u} - p \mathbf{I} + \delta S_{eff,u} - \delta p \mathbf{I})] d\Gamma_u \quad (20) \end{aligned}$$

Donde:

μ_L : es el primer coeficiente de Lamé.

λ_L : es el segundo coeficiente de Lamé.

$\mathbf{d}$: es el vector de desplazamiento.

$\mathbf{E}_u$: es el tensor de deformación de Green-Lagrange.

Añadiendo el modelo constitutivo a esta ecuación (20) se completa el método de poroelasticidad incremental no lineal descrito por Seuffert [61].

3.3. Resumen del Modelo Numérico

El llenado de moldes en RTM con un núcleo de espuma deformable integrado puede definirse como un problema de interacción fluido-estructura (FSI) que implica a tres participantes: flujo de resina, deformación del laminado y deformación del núcleo de espuma.

Para el modelo, la parte monolítica se considerará como un sólido poroso, ya que las fibras son de alguna manera un obstáculo para el fluido, impidiendo su flujo libre. Este es un enfoque a macroescala que intenta replicar las propiedades distribuidas a través de las propiedades concentradas que se han promediado a escalas mucho mayores que el tamaño de la fibra. Conviene aclarar que en un enfoque microscópico o a mesoescala se hace más evidente que la dirección del flujo es importante: no es lo mismo un flujo paralelo a la fibra que perpendicular a ella. El flujo paralelo a la fibra tiene un arrastre mucho menor. Para el modelado a macroescala (que es la que interesa en este estudio) esto es casi imposible

de representar, por lo que se opta por un modelo con parámetros homogeneizados a macroescala. Esto a su vez tiene su desventaja: para poder utilizar estos parámetros de forma fiable se debe hacer una muy buena caracterización del material, además, la variación de estos parámetros entre los mismos materiales debe ser lo más pequeña posible (a partir de medidas de calidad del material) para poder obtener mejores resultados.

El modelo de medio poroso homogéneo es adecuado para este tipo de simulaciones a macroescala, por lo que se utiliza la ley de Darcy para su representación en cuanto a la parte fluida que interviene en el medio poroso y la ley de Terzaghi cuando se trata de la parte sólida porosa.

El modelo también tiene en cuenta las fuerzas de compresión que la matriz genera sobre el material reforzado con fibras, que a su vez se suman a la fuerza que ejerce sobre él el fluido del interior del molde.

En definitiva, se utiliza el modelo constitutivo hiperelástico para caracterizar el sólido poroso, y, tanto para el fluido como para el sólido del medio poroso, se utiliza el método de volúmenes finitos para su discretización, por lo que el modelo se considera un algoritmo FV de poroelasticidad.

Además, el modelo numérico considera el aire y el fluido como fases que no se mezclan. El aire se considera compresible, mientras que la resina es incompresible y, a su vez, un fluido newtoniano. La viscosidad de la resina se considera sólo una función de la temperatura y del tiempo (tiempo de curado) para el modelo del solver. Se representa con el modelo reológico de Castro Macosko en combinación con el modelo cinético de Grindling, esto permite modelar la viscosidad no isotérmica dependiente del tiempo y la temperatura. Sin embargo, en este trabajo se considera como un valor constante ya que las temperaturas implicadas son bajas. Se supone que las fibras son incompresibles y estacionarias. Además, la inercia del flujo en el medio poroso se considera despreciable $Re \ll 1$.

En términos generales, la permeabilidad describe la cantidad de fluido que puede fluir físicamente hacia el entramado de fibras y cómo es en realidad esa

interacción, que puede verse como fuerzas de arrastre. Esto se consigue mediante propiedades homogéneas que contienen información sobre el material. Aquí se asume que la permeabilidad de un tejido es independiente de las condiciones del proceso y, por lo tanto, sólo contiene información homogénea de su geometría, sus mechones y filamentos.

Por otra parte, el núcleo de foam polimérico se considera un material isótropo transversal lineal elástico, por lo que la rigidez del material de espuma de PET en la dirección del espesor es aproximadamente de 3 a 6 veces mayor que en la dirección transversal [61]. [32]. Este participante estaría bajo la influencia de las fuerzas de compresión transmitidas por el cierre del molde de compresión a través del laminado y la presión hidrostática de la resina que fluye a través de las fibras de este material poroso. Así, para este núcleo de espuma sándwich se implementa un método numérico avanzado para grandes deformaciones pero esta vez con discretización FEM, ya que se trata de un componente de estructura sólida y los métodos FE tienen muchas ventajas para este tipo de problemas.

3.4. Consideraciones Generales de la Simulación

La geometría utilizada para las simulaciones no es exactamente igual a la geometría final mostrada en el apartado 2.1 (ver figura 13), debido a que se deben tener en cuenta las deformaciones causadas por la compresión del molde. Por lo tanto, el espesor de cada lámina de material compuesto debe ser de 2,5 mm, lo que deja la pieza con un espesor total de 5 mm en los extremos donde las dos láminas están juntas.

Los parámetros utilizados y caracterizados por algunos de los modelos que se resumen más arriba y todos los datos relativos a los materiales utilizados en este trabajo proceden de la caracterización experimental realizada por Seuffert [61].

La compresión se ajusta para alcanzar un 50 % de Fracción de Volumen de Fibra (FVF) en la pieza final y tendrá lugar antes de que comience la inyección.

El tejido utilizado es de fibra de carbono biaxial, por lo que la permeabili-

dad y el módulo de compresión utilizados son los caracterizados para la fibra bidireccional Zoltek ($300 \text{ g}/\text{m}^2$) con una disposición casi simétrica de $(0^\circ - 90^\circ - 0^\circ - 90^\circ)_{sym}$ [76].

El núcleo de espuma utiliza para este fin las propiedades isotrópicas transversales del material caracterizadas para el PET Airex® T92 por 3AComposites [44] con una densidad de $(100 \text{ g}/\text{L})$.

Como ya se ha mencionado, la viscosidad de la resina se ajusta a un valor constante.

Se supone una admisión con un caudal másico constante y una distribución homogénea a lo largo de toda la pared de entrada. Por otra parte, se utiliza una condición de contorno de simetría a lo largo del plano central de la pieza, como ya se ha explicado y se muestra en la figura (12), no sólo para el llenado del molde, sino también para el núcleo de espuma. Los parámetros de simulación más importantes se resumen en la tabla 1.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
$\dot{m}_{entrada}$	2	g/s	Caudal másico de entrada
p_{salida}	1	bar	Presión de salida
μ_{resina}	0.02	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	Viscosidad dinámica de la resina
T	323	K	Temperatura del molde y de la resina
φ_{final}	0.5	-	FVF Final
$t_{compresion}$	5	s	Tiempo de compresión

Tabla 1: Parámetros más relevantes para el estudio del proceso FSI.

4. Metodología

Este capítulo describirá las generalidades de los métodos utilizados y brindará una visión más detallada del componente a estudiar que se empleará para el análisis. Además, también se explica brevemente cómo se llevará a cabo el procedimiento.

4.1. Descripción General

El método utilizado en este trabajo fue desarrollado por Weller [30] y ampliado por Seuffert [61] y consta principalmente de tres partes.

- **Fluido:** Este representa la resina que se inyectará a presión en el molde mediante una bomba. El flujo se modela como un flujo a través de un medio poroso ya que la resina se inyecta en una preforma de fibra.
- **Sólido Poroso:** Esto se refiere al tejido de fibra, que puede representarse (como se explicará más adelante) como un medio poroso deformable.
- **Sólido Externo:** Que en este caso es el núcleo de espuma integrado, pero puede ser cualquier tipo de estructura deformable de escasa permeabilidad que esté en contacto con la cavidad, como un inserto sólido o una herramienta deformable.

Los tres participantes también pueden considerarse bajo las fuerzas de compresión ejercidas por el molde rígido en el proceso de fabricación de RTM, representando así finalmente todo el proceso. Están íntimamente relacionados entre sí, ya que el fluido, en su intento de fluir a través de las cavidades del sólido poroso, aumentará la presión dentro del molde, provocando una deformación distinta en el sólido externo y el tejido de fibra, lo cual, a su vez, está vinculado con la calidad final de la pieza. Este fenómeno depende de muchos factores que se explicarán brevemente a continuación para así poder comprender mejor todo el proceso.

4.2. Caso de Estudio

Se toma como referencia el componente estudiado por J. Seuffert en su tesis doctoral, el cual es una pieza tipo sándwich que puede ser descrita de la siguiente manera: Como base se utiliza compuesto monolítico, compuesto por láminas de fibra de carbono. Luego, encima de él, en su centro, se coloca su núcleo de espuma trapezoidal, que le proporcionará la rigidez mecánica adicional necesaria, sin aportar una cantidad de masa importante. Finalmente, una tapa de compuesto monolítico, también formado por láminas de fibra de carbono, se coloca en la parte superior de ambas piezas, completando así el sándwich. La pieza se puede ver en la figura 11.

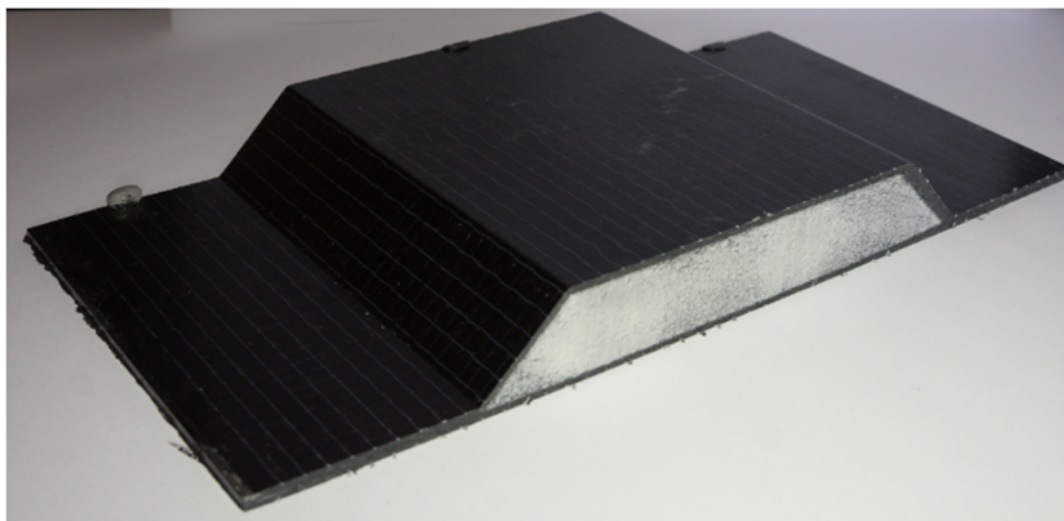


Figura 11: Componente RTM tipo sándwich fabricada por Seuffert en los experimentos de validación. [61]

Esta parte se toma como base, ya que Seuffert llevó a cabo no solo el estudio analítico, sino también el experimental. Caracterizó los materiales utilizados y llevó a cabo la fabricación de la pieza tipo sándwich, por lo que se dispone de muchos datos para analizar y contrastar con los resultados que se obtendrán en las simulaciones.

Las dimensiones finales de este componente tipo sándwich después de su fabricación se pueden observar en la siguiente figura (13). La entrada y la salida de resina se determinaron y diseñaron para que el flujo fuera lo más homogéneo posible. Se piensa que la misma fluiría a través de todo el perfil longitudinal

del componente. La imagen de la figura (12) ilustra mejor lo descripto anteriormente.

La condición de simetría de la pieza se utiliza como una para simplificar el modelo que se utilizará en la simulación, tal como se puede ver en la imagen (12). El modelo también tendrá **dos participantes bien diferenciados**: por un lado, **los compuestos monolíticos**, fabricados con plástico reforzado con fibras, *por los que circulará el fluido*. Por otro lado, **el núcleo de espuma** que proporcionará la rigidez extra específica y no admitirá el paso del fluido. Para ser más consistentes en este trabajo, a los participantes se les llamará a lo largo de este texto, **Fluido** y **Sólido**, respectivamente.

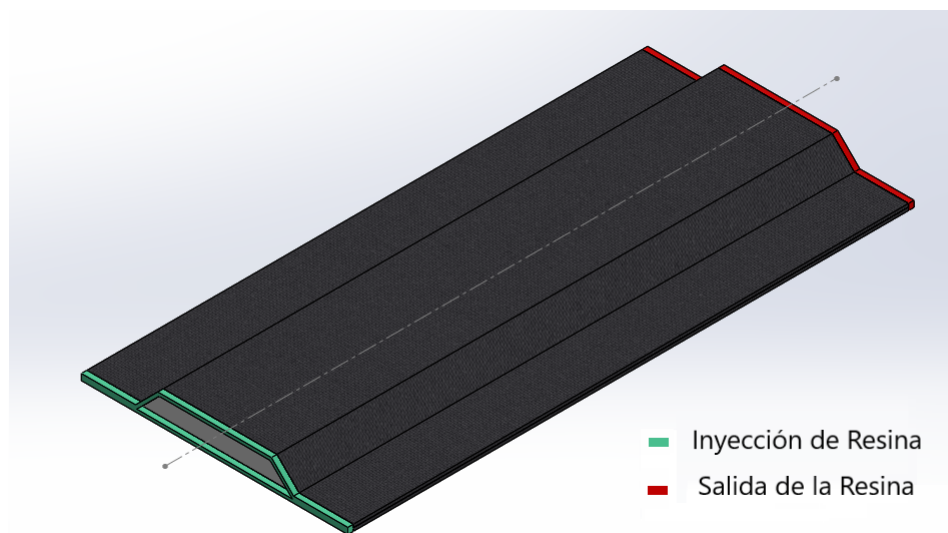


Figura 12: Geometría, posición de entrada y salida de resina para el caso de estudio: participante fluido en gris oscuro y participante sólido en gris claro. [61]

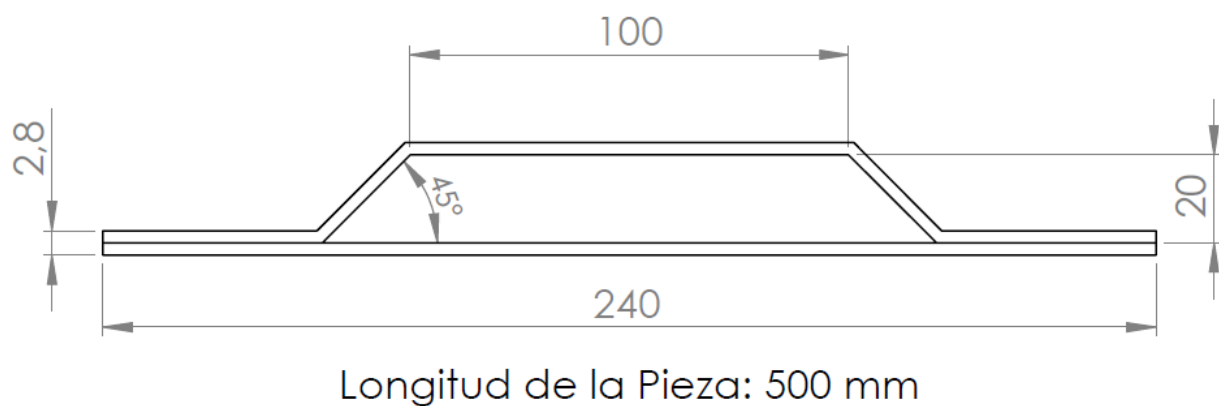


Figura 13: Dimensiones finales del componente RTM tipo sándwich fabricado por Seuffert en los experimentos de validación.

4.3. Procedimiento

Para poder validar los resultados obtenidos, inicialmente se planea realizar un estudio de independencia de malla. El objetivo principal de este estudio es determinar en qué medida la calidad de los resultados depende directamente de la malla elegida. Para esto se debe de encontrar un límite en el que, a partir de este punto, los resultados pasen a ser independientes del mallado elegido y luego utilizar esta referencia como punto de partida.

Para este propósito, se decidió atacar el problema de forma simplificada en principio, debido a su complejidad. Se decidió discretizar y simular el material de medio poroso a través del cual fluiría el fluido en primer lugar y, por otro lado, el núcleo del componente tipo sándwich como un sólido elástico por separado.

En principio, el procedimiento es el mismo para ambos: Se parte de una malla gruesa en la que se cuida su relación de aspecto (Aspect Ratio), su ortogonalidad, entre otros factores. Se elige una malla hexaédrica estructurada, orientada en la dirección del flujo, ya que se ha demostrado que tiene mejores resultados que un mallado tetraédrico no estructurado para este tipo de problemas [59] [58], a pesar de que implica un mayor esfuerzo a la hora de realizar de mallado.

Esto es muy importante ya que un buen resultado depende en gran medida de la malla utilizada. Un buen mallado es la base para un buen resultado y para lograr optimizar los tiempos en la simulación. Minimiza los recursos computacionales requeridos, lo que permite ver los detalles deseados de los fenómenos involucrados y obtener resultados que sean cualitativa y cuantitativamente fiables.

Una vez que se ha construido una malla base de calidad, se procede a crear mallados cada vez más refinados. Es decir, con un mayor número de elementos. Por último, se simulará el caso al menos una vez por malla, se realizará un post-procesamiento de los datos recopilados y se extraerán las conclusiones respectivas.

Para el Fluido, la variable de interés a controlar son las presiones implicadas,

ya que que las fuerzas dependen directamente de esta presión generada por el drag. A su vez, el tiempo de llenado también se ve afectado por estas presiones.

Con respecto al Sólido, la variable más importante son los desplazamientos, más específicamente, los que son perpendiculares a la superficie del núcleo de espuma. La razón de esto es que muestran el espacio generado entre el núcleo de foam integrado y el laminado de fibra de carbono, lo que conlleva a una reducción de la FVF y, por ende, de la calidad final de la pieza.

Luego de esto, el estudio se continuará mediante el ensamble de todo el caso en una sola simulación acoplada de interacción Fluido-Estructura (simulación particionada), la cual se dirigirá y controlará por la biblioteca de acoplamiento de preCICE. Se intentará comprobar que este comportamiento de independencia de mallado se cumpla también para el caso general acoplado.

Además, se buscará una configuración óptima para la simulación del caso de estudio mediante un análisis similar, el cual se llevará a cabo variando las tolerancias de convergencia del solver, el mapeo de la interfaz entre ambos participantes, los parámetros del esquema de aceleración y los factores de relajación, uno por uno, para poder analizar cómo influye cada una de estas modificaciones en el tiempo de cálculo y en los resultados obtenidos.

5. Software

En este capítulo se analizarán los diferentes tipos de software que se utilizarán durante el análisis y se describirá brevemente el propósito de cada uno de ellos en este trabajo.

5.1. Mallado

Para el modelado se utilizó el software de Altair® HyperMesh®, el cual permite un diseño eficiente a partir de la geometría CAD paramétrica y, al mismo tiempo, manipular detalles de mallado libremente. Este programa es un software de preprocesamiento y una herramienta de mallado avanzada en la que el usuario puede dividir el modelo en la cantidad específica de elementos y nodos que desee, además de brindar la libertad de elegir el tipo de elemento y su distribución específica.

Asimismo, este software ofrece al usuario la posibilidad de exportar las mallas creadas en diferentes formatos para todo tipo de software, lo que resulta en una gran ventaja para este trabajo, ya que se requería la compatibilidad con OpenFOAM®, por un lado, y con Calculix®, por otro. Con el uso de Hypermesh® no fue necesario aprender a mallar en cada programa específico para aplicar la discretización deseada, además de ser más intuitivo a la hora de modelar, ya que permite su visualización y análisis durante su desarrollo.

5.2. Inyección del Fluido

Para esta parte del proceso se necesitaba un software de dinámica de fluidos computacional. Dado que el software desarrollado por OpenFOAM® [69] es de código abierto, era el más adecuado para este tipo de simulación. Seuffert desarrolló un solver modificado [61] que introducía todos los detalles del modelo matemático tenido en cuenta en el apartado 3.2, introduciendo el medio poroso y permitiendo el acoplamiento entre fluido y sólido para simular su interacción.

La simulación de la inyección del fluido implica a dos participantes: el material compuesto de fibra de carbono permeable, considerado como un medio poroso a través del cual fluirá el líquido y la resina (el propio fluido) que se tiene en cuenta para el dominio y las condiciones de contorno.

Una explicación más detallada del modelo matemático implementado por este solver puede verse en la tesis doctoral de Julian Seuffert [61] en la que amplía y da una visión más detallada del mismo.

5.3. Núcleo de Espuma

Para determinar los desplazamientos y deformaciones de la parte de la simulación correspondiente al núcleo de espuma del sándwich, que se dan debido a las fuerzas de interacción entre sólido y fluido que intervienen en este problema FSI, se utiliza el software de CalculiX® [14]. El mismo es un software 3D gratuito que se usa principalmente para cálculos estructurales y hace uso del método de elementos finitos. Es posible importar mallas desde HyperMesh® en el formato de entrada de Abaqus® y también ofrece al usuario la posibilidad de escribir datos para códigos abiertos CFD como OpenFOAM. Por estos motivos, es uno de los programas más adecuados para la resolución de este problema.

El núcleo de espuma integrado se trata como un sólido lineal elástico e isótropo transversal, ya que que las cargas implicadas se transmiten por compresión y no deberían de superar la deformación plástica durante el llenado del molde en RTM. Con el fin de hacer un acoplamiento más fácil en problemas de FSI ya se ha intentado realizar que el acoplamiento FV/FV sea tan bueno como el FE/FV [21] [22], debido a que al usar este último, se tienen dos métodos diferentes que deben comunicarse entre sí. Sin embargo, aunque hay pruebas de que en algunos casos particulares el método FV es comparable a la FE [50], FEM ha demostrado ser en general extremadamente precisa y computacionalmente eficiente para el análisis de estructuras [49], por lo que es mejor que el análisis del participante Sólido se lleve a cabo por el método de elementos finitos.

5.4. Acoplamiento

Para el sistema de acople, se utilizó la biblioteca de acoplamiento para simulaciones multifísicas particionadas creada por preCICE® [17]. Este software ofrece métodos convenientes para el acoplamiento de ecuaciones transitorias, la comunicación y el mapeo de datos en las interfaces implicadas entre los dos (o más) participantes.

En este caso particular con dos participantes basta, ya que el composite monolítico, que está impregnado de resina, se trata como el participante fluido y el núcleo de espuma integrado se trata como el participante sólido. En la imagen (14), se representa de forma esquemática el modo en que preCICE realiza el acoplamiento para una mejor visualización y comprensión.

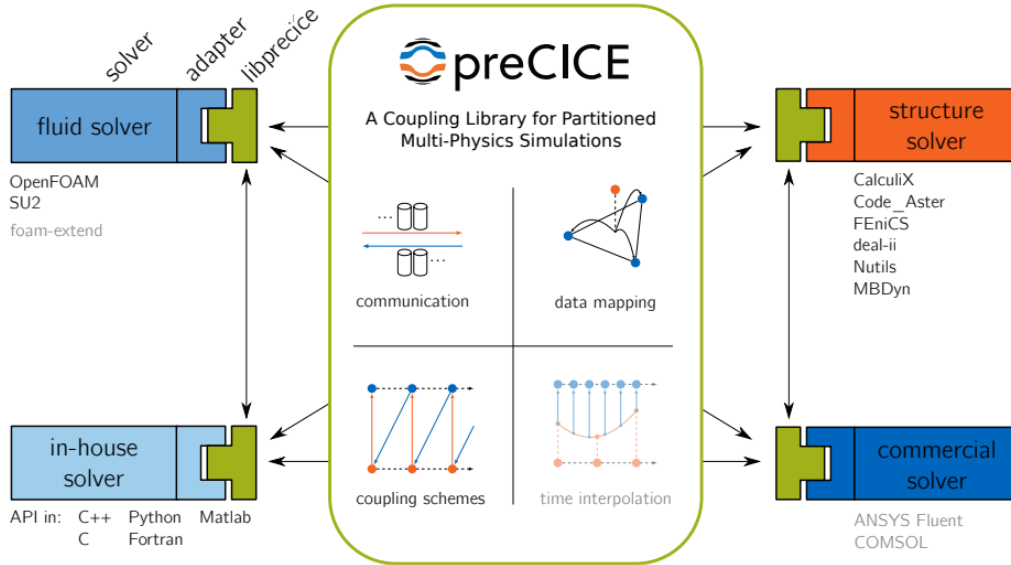


Figura 14: Vista general esquemática de la biblioteca de acople preCICE para FSI.[55]

También se muestra en la figura 15 cómo se implementa esto a los estudios realizados en este trabajo. El participante Fluido proporciona la información de las fuerzas en la interfaz a PreCICE, mientras que el participante Solid devuelve los desplazamientos calculados. Ambos son procesados por PreCICE y mapeados a la contraparte respectiva. El proceso se repite para cada paso de tiempo hasta que se encuentra una solución común.



Figura 15: Esquema de acople FSI para modelar la fabricación de componentes RTM tipo sándwich por Seuffert. [61]

Para acoplar un participante a la interfaz, se necesitan adaptadores específicos para cada software. Para el participante Sólido se utilizó el adaptador preCICE-CalculiX [66] y para el participante Fluido, se necesitó un adaptador preCICE que también fue utilizado en el algoritmo de acople interno modificado por Seuffert [61], que fue adaptado sólo para tener en cuenta las fuerzas poro-elásticas.

6. Estudio del Fluido

En este capítulo se detalla el estudio realizado para el participante Fluido, incluyendo su desarrollo, preparación, resultados y las conclusiones obtenidas.

6.1. Geometría Base

Todas las mallas partieron de una geometría base 2D, que luego se dividió y extruyó para obtener la geometría 3D final (consulte la figura 16). El modelo se realizó desde cero, tomando como referencia las medidas proporcionadas en la figura 13 pero con un grosor de 5 mm, ya que aquí se debe tener en cuenta la compresión del molde. La geometría representa la mitad de los dos compuestos monolíticos, divididos a lo largo de su eje de simetría para hacer uso de esta condición, como ya se mencionó.

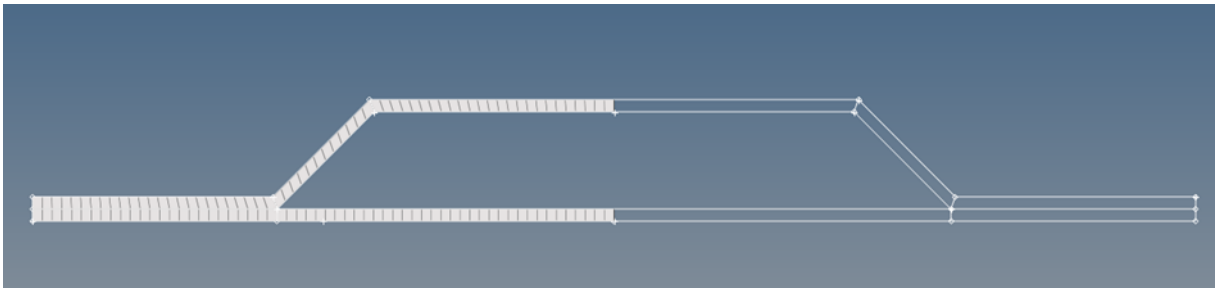


Figura 16: Modelo 2D base usado para el participante Fluido.

6.2. Propuesta de Mallado

Se tomó como referencia para el participante Fluido una malla que constaba de 101 elementos a lo largo de la dirección del flujo, 16 elementos transversales a esta dirección y 2 elementos en la dirección del grosor ($101 \times 16 \times 2$) para cada compuesto monolítico o conjunto de láminas.

Se busca que los elementos tengan una relación de aspecto (Aspect Ratio) inferior a 10 y que su longitud máxima esté orientada en dirección al flujo. Además, se intenta mantener los niveles de no-ortogonalidad y asimetría lo más bajos posible, ya que esto induce errores e inestabilidades en la solución. [9, 38]

Se pretendía conseguir un aumento gradual del número total de elementos, manteniéndolo por debajo del doble entre mallas consecutivas. Para ello se multiplicó o dividió el número de elementos en distintas direcciones intentando mantener la calidad de la malla dentro de parámetros aceptables. Se realizaron cuatro mallas basadas en la planificación del siguiente esquema:

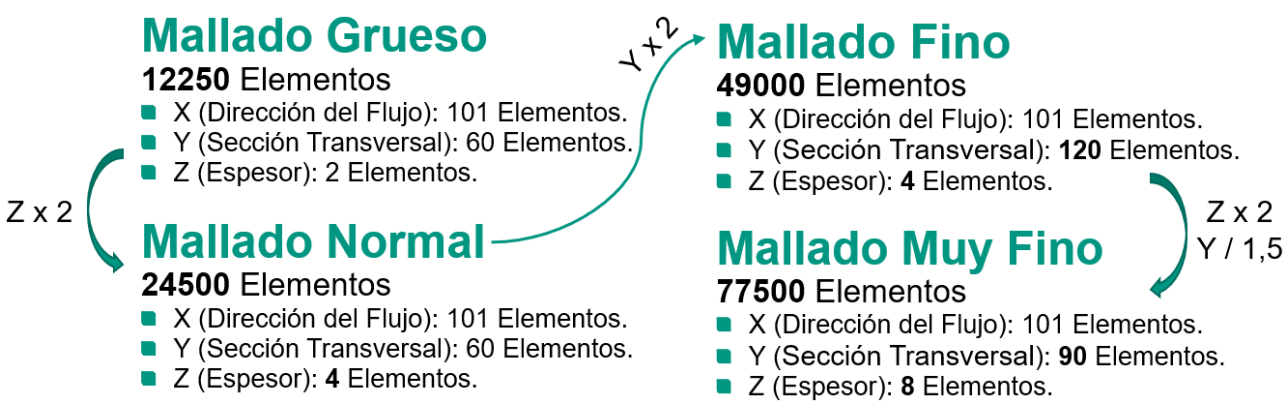


Figura 17: Plan de estudio de convergencia para el Fluido y distribución específica de elementos para cada malla.

Cada malla se detalla en la figura 17 con su propia distribución de elementos específica y además, se indica cómo es la transición y la correlación entre cada una de ellas. Las siguientes figuras muestran los diferentes mallados en perspectiva 2D (18) y 3D (19), los diferentes niveles de refinamiento se pueden también apreciar.

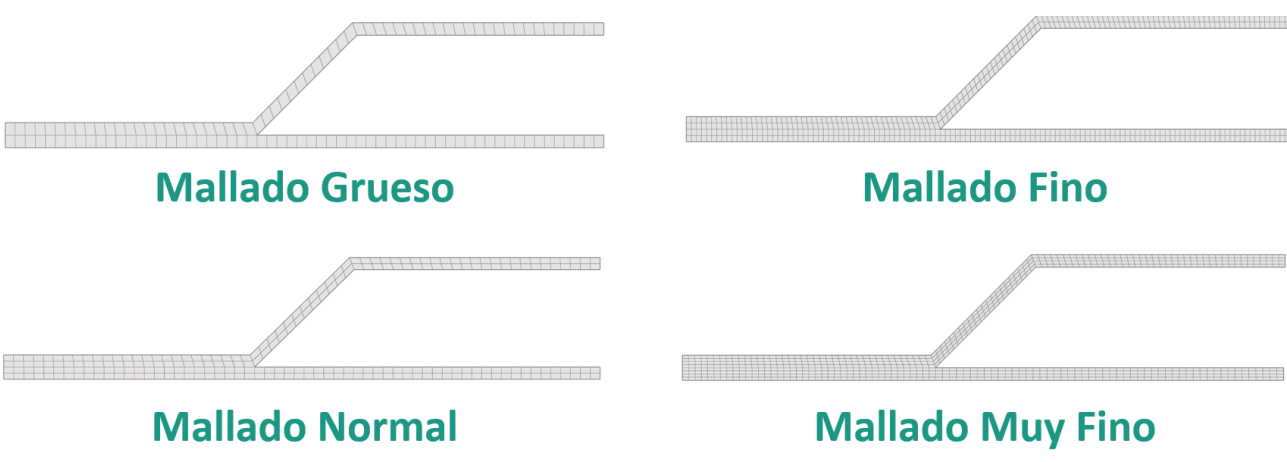


Figura 18: Vista frontal de las mallas del estudio de convergencia realizado para el Fluido incluyendo los diferentes niveles de refinamiento de cada una.

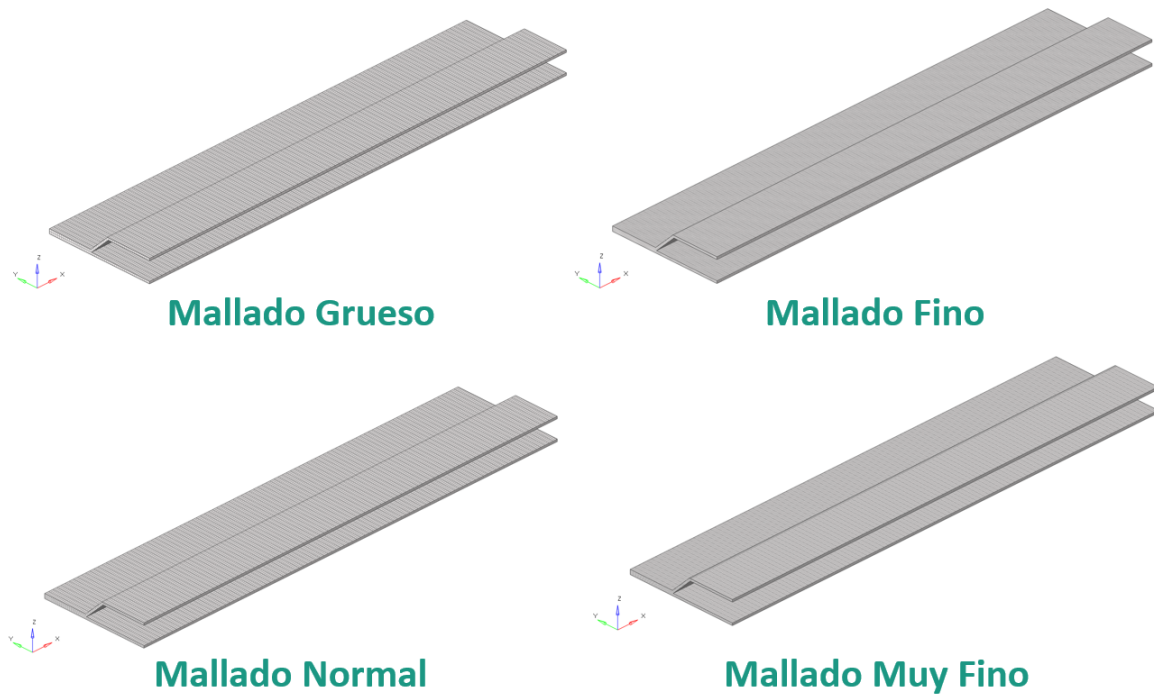


Figura 19: Vista isométrica de las mallas del estudio de convergencia realizado para el Fluido incluyendo los diferentes niveles de refinamiento de cada una.

Por último, todos los parámetros que permiten el análisis y el control de calidad de cada una de las mallas se detallan a continuación en la tabla 2. Cada malla parece estar dentro de los parámetros de buena calidad ya que aumentan su relación de aspecto en la dirección del flujo y tienen bajos niveles de no-ortogonalidad.

Parámetro / Malla	12300	24600	49300	77600
Tipo de Celda	Hexaedros	Hexaedros	Hexaedros	Hexaedros
Número Total de Celdas	12322	24644	49288	77568
Relación de Aspecto Máx	3.64	5.09	7.28	9.83
Superficie Mínima de las Caras	4.96E-06	2.48E-06	1.24E-06	7.73E-07
Superficie Máxima de las Caras	1.32E-05	1.17E-05	6.58E-06	6.88E-06
Volumen Total	3.09E-04	3.09E-04	3.09E-04	3.09E-04
Apertura Máxima de las Celdas	1.61E-16	1.72E-16	1.71E-16	1.85E-16
Asimetría Máxima (Skewness)	0.48	0.63	0.48	0.73
No-Ortogonalidad Promedio	7.29	8.14	8.23	8.90
No-Ortogonalidad Máxima	25.2	25.2	25.2	25.2
Volumen Mínimo	2.46E-08	1.23E-08	6.14E-09	3.83E-09
Volumen Máximo	2.80E-08	1.40E-08	7.01E-09	4.30E-09

Tabla 2: Parámetros de calidad de malla más relevantes para el estudio del Fluido.

6.3. Software Set-Up

En este capítulo sólo se investiga al Fluido. Este es representado por el flujo de resina a través del medio poroso compactado. Su dominio se modela utilizando la condición de contorno de no deslizamiento en las paredes de la interfaz con el núcleo de espuma (Fixed Walls condition). Esto significa que sólo hay un participante (el sólido poroso), el cual recibirá la inyección del fluido de resina. No hay comunicación con el otro sólido, que sería el núcleo de espuma integrado tipo sándwich respectivamente.

Por lo tanto, se puede decir que, para la simulación de las láminas de composites monolíticos, se utilizó el solver RTM extendido de Seuffert [61] desacoplado. Por estas razones sólo se utilizó OpenFOAM®[®], sin necesidad de la librería de acoplamiento preCICE®[®], ni la presencia del solver para estructuras de CalculiX®[®].

Los parámetros más importantes para la configuración del caso se detallan en la tabla 3. El único parámetro que se modificó entre estas simulaciones fue la malla utilizada en el participante a impregnar por el fluido.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
$\dot{V}_{entrada}$	1.82E-06	m^3/s	Caudal volumétrico de entrada
p_{salida}	1	bar	Presión de salida
Δt	0.01	s	Paso de tiempo
μ_{resina}	0.02	Pas	Viscosidad dinámica de la resina
C_p	4195	J/kgK	Capacidad calorífica específica de la resina
Pr	2.289	—	Número de Prandtl
M	18	kg/Mol	Peso molar de la resina

Tabla 3: Parámetros de simulación más relevantes para el estudio del participante Fluido.

6.4. Resultados

A continuación se analizan los resultados obtenidos en lo que respecta a la presión del fluido generada en el interior del molde debido a las fuerzas de drag provocadas por las fibras comprimidas del compuesto monolítico.

Se elige la presión como variable de interés principal ya que se trata de una simulación de Interacción Fluido-Estructura (FSI), y, por ende, las deformaciones generadas en el núcleo de espuma del compuesto tipo sándwich son de gran interés para este estudio. Es por eso que es imprescindible para este estudio calcular la magnitud de las fuerzas que se van a infligir sobre el mismo. Esto se explicará con más detalle en la sección 8 donde se realiza la simulación acoplada y también se revisará de nuevo en las conclusiones finales.

Como la permeabilidad es constante en todo el dominio y la resina se distribuye en toda la extensión de la entrada de manera homogénea, el frente de flujo tiene una forma lineal. Además, de acuerdo con el término de la ley de Darcy (véase la ecuación 1), existe una clara relación entre la caída de presión y la velocidad, que se supone constante a lo largo de la inyección. Puesto que no se produce ninguna deformación en el núcleo de espuma de la pieza tipo sándwich que pudiera dar lugar a un comportamiento diferente, y además, se supone que la viscosidad de la resina es constante, la presión tiene un perfil lineal como se observa en la figura 20.

Para comparar realmente los resultados de forma apropiada, se requiere de una medida particular para poder así determinar el error obtenido en la diferencia entre los cálculos realizados con las distintas mallas. Así pues, por este motivo se decidió utilizar la malla más fina como referencia para comparar y medir el error relativo de los demás resultados en relación con la misma malla.

La figura (21) muestra la tendencia del error relativo a lo largo de la dirección del flujo. La línea de la que se obtienen estos datos puede observarse en la figura 22. Corresponde a la unión de los puntos: (0 ; 0,06 ; 0,00125) y (0,5 ; 0,06 ; 0,00125).

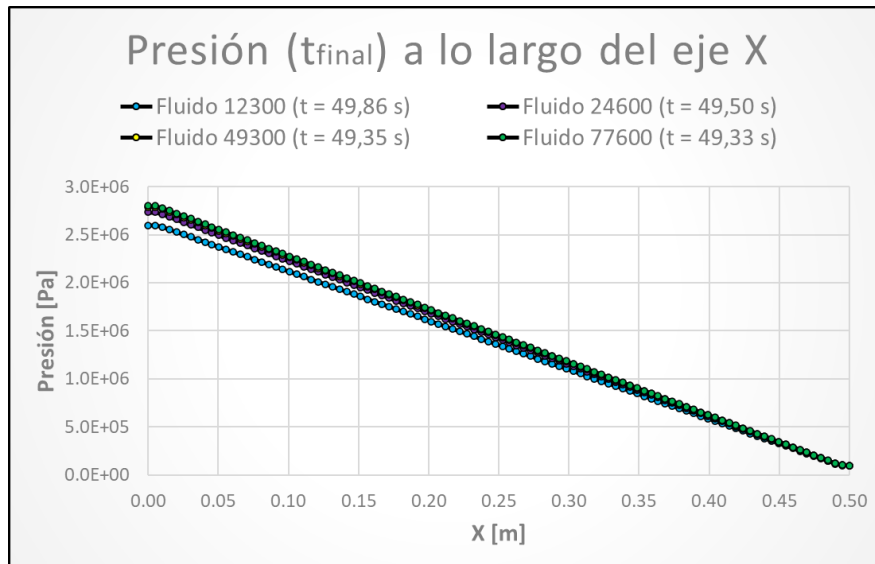


Figura 20: Perfil de presión a lo largo del eje X para cada malla.

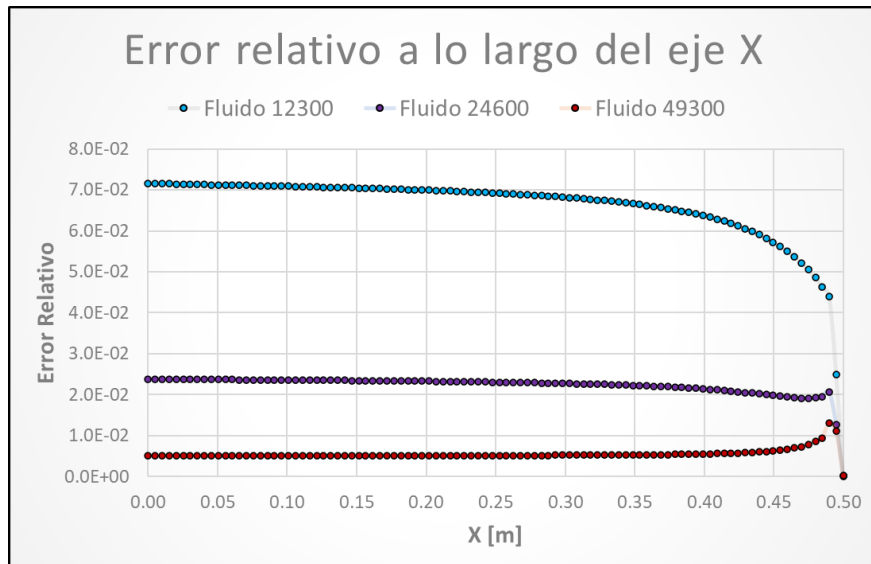


Figura 21: Error relativo del perfil de presión a lo largo del eje X para cada malla.

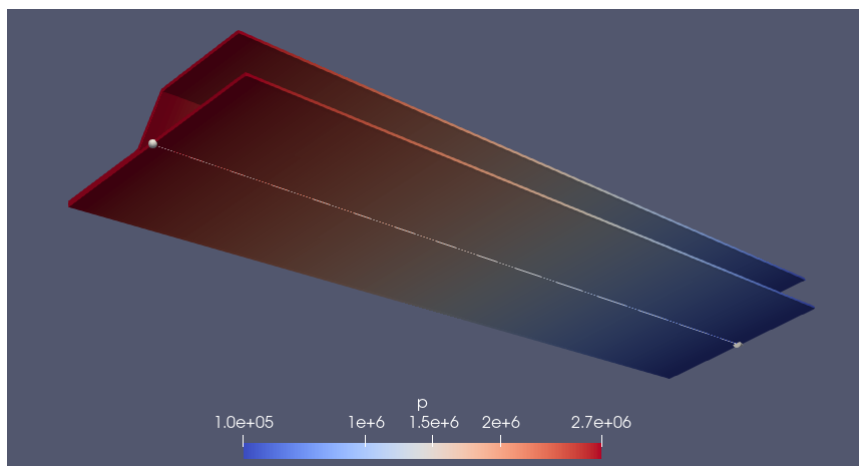


Figura 22: Línea de referencia de donde se obtuvieron los valores de presión.

6.5. Conclusiones

Claramente se puede concluir que a medida que aumenta el número de elementos de la malla del participante, disminuye la diferencia en los resultados obtenidos para la variable de interés. De lo anterior se puede afirmar que la independencia de malla se logra a partir de aproximadamente los 50000 elementos, ya que esta diferencia tiende a ser menor a 1 %.

Sin embargo, se obtiene un resultado cualitativamente bueno a partir de los 25000 elementos, ya que no se tiene más de un 2,5 % de error como máximo, lo cual es suficiente para el análisis que se realiza en este trabajo. Además, los tiempos de cálculo se muestran en la tabla 4, lo que demuestra también que es computacionalmente más eficiente.

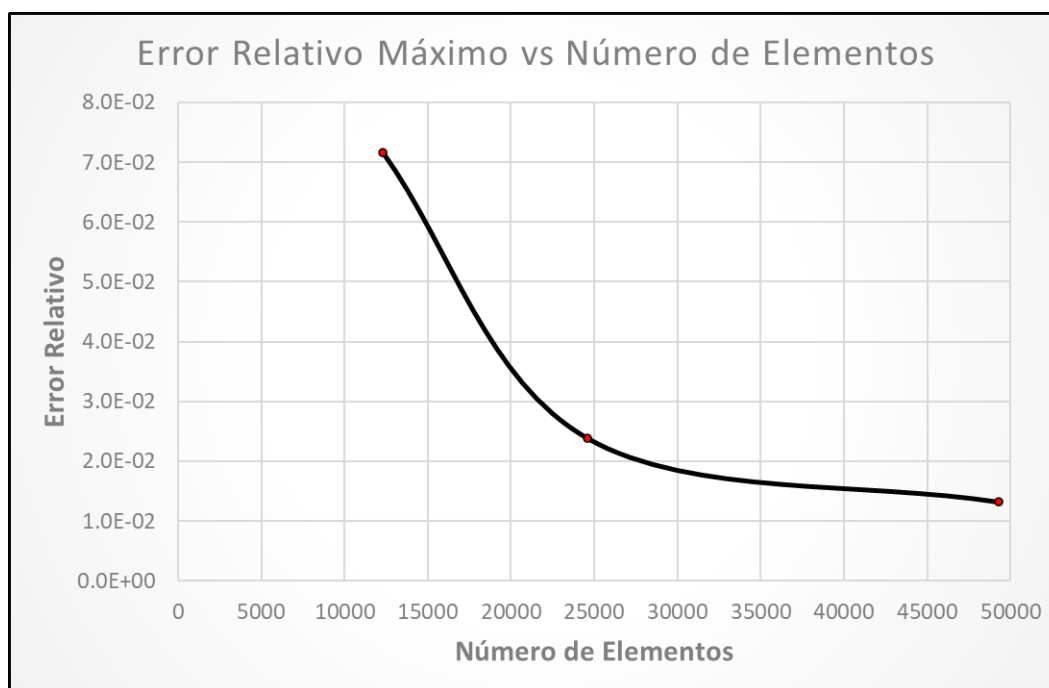


Figura 23: Error relativo máximo del perfil de presión a lo largo del eje X en función del número de elementos.

Parámetro / Malla	12300	24600	49300	77600
Tiempo [min]	14	30	63	119

Tabla 4: Tiempos de simulación para los distintos mallados del participante Fluido desacoplado.

7. Estudio del Sólido

Este capítulo presenta una visión general del estudio realizado para el participante Sólido. Se describe en él su desarrollo, preparación, resultados y conclusiones. Además, se hacen algunas observaciones importantes que quedan abiertas y es probable que den lugar a nuevos debates.

7.1. Geometría Base

De forma similar a lo que se realizó para el Fluido, todas las mallas parten de mallados 2D, que luego son extruídos a lo largo de la dirección longitudinal para obtener la malla 3D completa (véase la figura 26). Se tomaron como referencia las medidas proporcionadas en la figura 13. Por último, la geometría del Sólido, al igual que para el Fluido, es la mitad del núcleo de espuma original, el cual se divide a lo largo de su eje de simetría para aprovechar esta condición, simplificar y ahorrar tiempo de cálculo, como se ve en la figura 12.

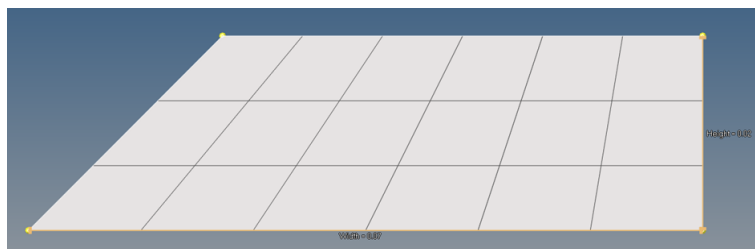


Figura 24: Modelo 2D base desarrollado para el participante Sólido.

7.2. Propuesta de Mallado

Se toma como punto de partida un mallado con 7500 elementos, que en el caso de la parte Sólida, está constituida por hexaedros lineales. Posee 50 celdas a lo largo de la dirección del flujo, 15 celdas transversales al flujo del fluido (eje Y) y 10 celdas en la dirección del espesor (eje Z).

Para realizar correctamente el estudio de independencia de la malla para el participante Sólido, se busca que los elementos tengan una relación de aspecto cercana a 1. Debido a que dentro del Sólido se considera que no circulará Fluido,

la orientación de los elementos no es necesaria para esta parte. Además esta relación de aspecto garantiza tamaños similares en todas las direcciones para cada elemento y que la malla se vea lo más estructurada posible, tal y como se recomienda en los principios para obtener un mallado de calidad [31]. Aunque no está garantizado que por el hecho de tener una malla estructurada la solución converja, ya que se necesita además un alto nivel de densidad de elementos, para cálculos de elementos finitos (FE) el mallado estructurado y una buena relación de aspecto sí que contribuyen a una convergencia más rápida de la solución. Esto por lo tanto, implica un menor número de elementos involucrados, de modo que la malla termina siendo más eficiente, lo que es parte del objetivo de este trabajo.

Para esta parte del estudio tenía más sentido que la malla aumentara gradualmente pero conservando las propiedades y características del mallado anterior a fin de mantener la calidad. Por ello las mallas progresivamente más finas se obtuvieron multiplicando a la cantidad de elementos en todas las direcciones por una constante. A esto se lo denomina una familia de mallas. También se pretendía que el número de elementos no aumentara bruscamente, controlando su número entre mallas consecutivas. Como resultado, se realizaron cinco mallas basadas en el siguiente esquema:



Figura 25: Plan de estudio de convergencia para el participante Sólido y distribución específica de elementos para cada malla.

Cada malla se detalla en la figura 25 con su propia distribución específica de elementos y se indica además, como es la transición y correlación entre las mismas. Las figura siguiente muestra los diferentes mallados 2D (26), dónde también se puede apreciar sus diferentes niveles de refinamiento.

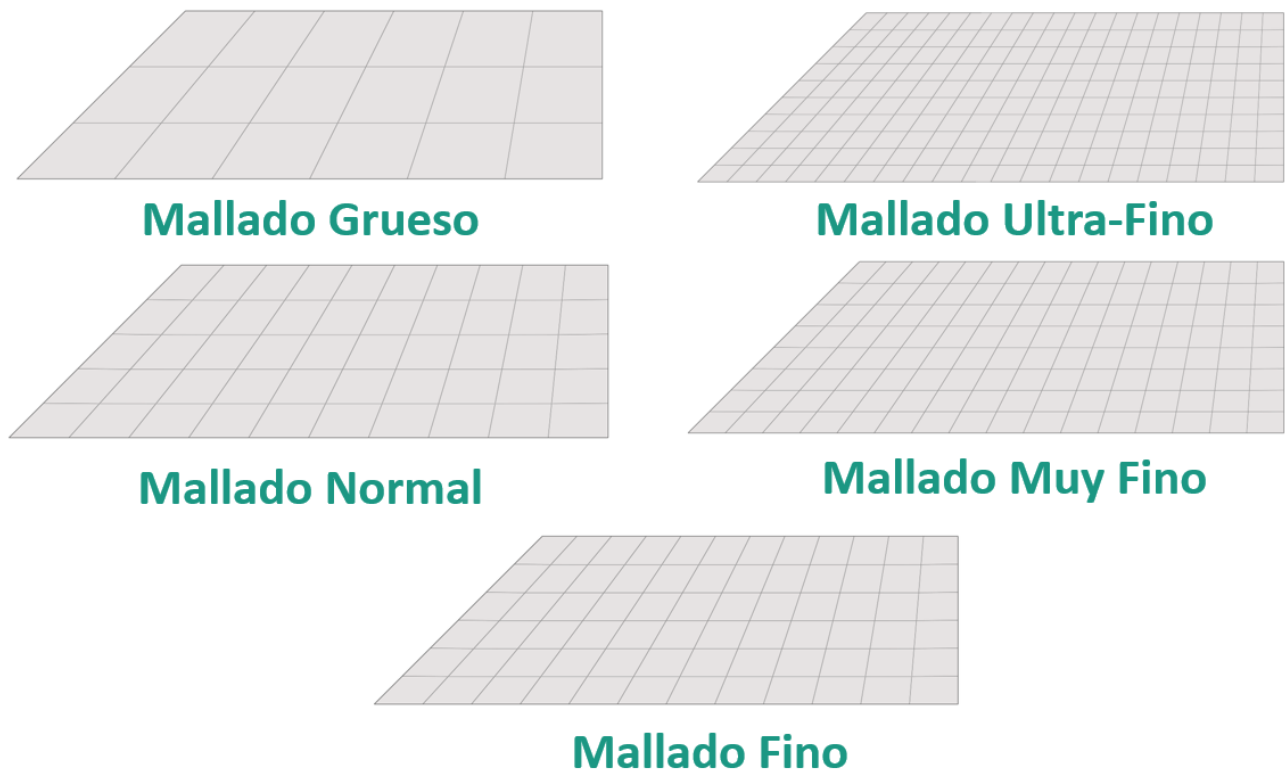


Figura 26: Vista frontal de las mallas creadas para el estudio de convergencia de participante Sólido con sus respectivos grados de refinamiento.

Por último, todos los detalles geométricos y parámetros de cada mallado se pueden observar en la tabla 5. A modo de resumen:

- **Relación de aspecto**: describe la medida de la desviación de un elemento de la malla de tener todos los lados de igual longitud. Se calcula como la relación entre la arista más larga de un elemento y su arista más corta. Una relación de aspecto a partir de 1 denota la situación ideal.
- **Alabeo (Warpage)**: cuantifica el grado en el que un elemento, o la cara de un elemento (para celdas 3D) se desvía de ser plano. 0 significa que no hay ninguna desviación, y que por ende se tiene un elemento plano.
- **Inclinación (Skew)**: describe la desviación angular con respecto a un rectángulo perfecto del elemento o de la cara del elemento.

- **Jacobiano:** Desviación de un elemento respecto a su forma ideal o "perfecta". Su valor oscila entre 0 y 1, donde 1 representa un elemento con forma perfecta.
- **Concavidad (Taper):** Máxima relación de longitudes derivadas de las aristas opuestas. A medida que la concavidad se acerca a 0, la forma se aproxima a un rectángulo.

Una explicación más detallada de cómo se calcula cada uno de estos parámetros se define en el Manual del usuario de HyperMesh de Altair Hyperworks® [8].

Parámetro / Mallado	1350	6250	10800	25600	50000
Tipo de Celda	Hexaedros	Hexaedros	Hexaedros	Hexaedros	Hexaedros
Relación de Aspecto Máx	1.74	1.76	1.76	1.75	1.76
Máx Warpage	0	0	0	0	0
Máx Skew	6.43	43.3	43.6	43.9	43.3
Ángulo Máx del cuadrilátero	135	135	135	135	135
Ángulo Mín del cuadrilátero	45	45	45	45	45
Jacobiano Mín	0.93	0.95	0.96	0.97	0.95
Máx Taper	0.06	0.05	0.04	0.03	0.05

Tabla 5: Parámetros de calidad de malla más relevantes para el estudio del participante Sólido.

7.3. Software Set-Up

Para la simulación independiente del núcleo de espuma integrado, se utilizó CalculiX® solo para el cálculo sin comunicación con el participante Fluido. Por lo tanto, no fue necesaria la biblioteca de acoplamiento preCICE, ni la presencia del solver modificado de OpenFOAM. El objetivo era observar si el Sólido convergía por sí solo y cómo era su comportamiento con una configuración similar a la del caso acoplado.

Para esto se tomó como referencia un valor para la fuerza de compresión que afectará al núcleo de foam integrado a partir de una simulación acoplada de todo el proceso que fue previamente calculada. A continuación se muestra una imagen del análisis post-proceso que muestra las fuerzas ejercidas en cada nodo del elemento por los participantes porosos en la superficie de la interfaz (figura 27). La unidad definida para las fuerzas involucradas en la imagen es Newtons, ya que se utilizan para el cálculo el Sistema Internacional de Unidades (SI).

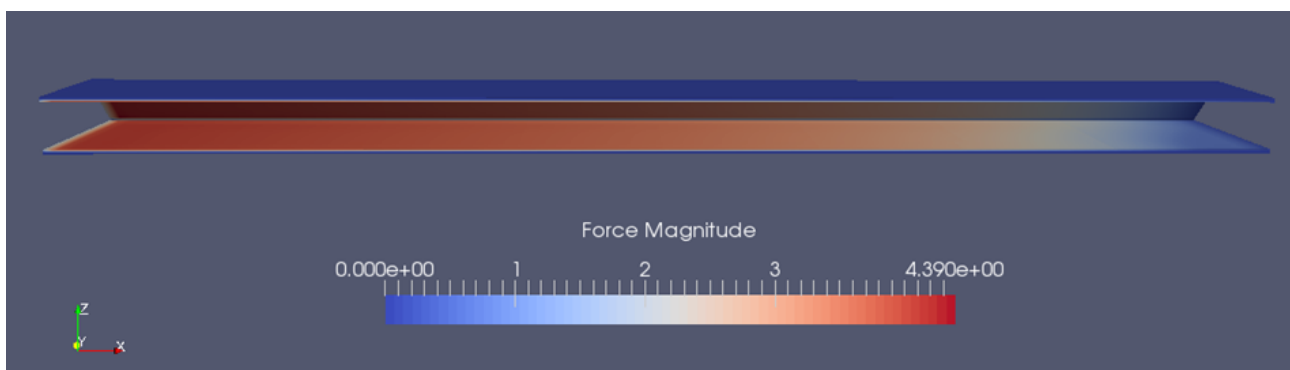


Figura 27: Magnitud de las fuerzas calculadas en el caso de prueba acoplado.

Por supuesto, es bueno tener en cuenta que esta magnitud no representa puramente la compresión, sino la magnitud de las fuerzas ejercidas por el fluido en la interfaz, que al final, efectivamente conducen a la compresión de la superficie del núcleo de foam. Sin embargo, sólo se tomaron como referencia las fuerzas normales a la superficie, ya que las fuerzas paralelas a la misma son 1 y 2 órdenes de magnitud inferiores. Por lo tanto, se puede afirmar que las fuerzas perpendiculares a la superficie de la interfaz son las más relevantes para este propósito y se utilizan como valor de referencia para la compresión.

Otra observación importante es que las fuerzas se calculan para cada nodo y la configuración utilizada para CalculiX® inserta este valor también en los mismos como condición de contorno. Por lo tanto, para realizar correctamente el estudio de independencia de la malla, hay que tener en cuenta la cantidad correspondiente de nodos que se encuentran en la superficie del núcleo de espuma integrado. Para provocar la misma cantidad de desplazamiento en cada malla, se debe recalcular la fuerza en función de la cantidad de nodos en la interface.

Dado que la malla del estudio anterior (el caso de prueba) contaba con 7500 elementos para el participante Sólido, para poder realizar el estudio correctamente, se dividió la interfaz en tres secciones: superficie *Superior*, *Inferior* y *45 Grados*. Los valores de referencia de las fuerzas normales a la interfaz se extrajeron del análisis anterior. Para poder aplicar esta fuerza directamente como condición de contorno en los otros estudios, este valor de referencia tuvo que ser recalculado en función del número de nodos de la interfaz de cada malla. Esto se debe a que la interfaz de la malla, por ejemplo, si tuviera 1,5 veces menos elementos no implica necesariamente que tendrá 1,5 veces menos nodos en su interfaz, por lo que no es directamente proporcional. Por ello, se realizaron los siguientes cálculos:

En primer lugar, se calculó el valor de una fuerza total equivalente para cada una de las tres subdivisiones de la interfaz. Los resultados pueden verse en la figura (6) y pueden interpretarse como si el núcleo de espuma estuviera sometido a 3 cargas concentradas de compresión perpendiculares a su superficie.

Caso de prueba: Fluido 24600 - Sólido 7500					
	Cantidad de Nodos	Fuerza Total [N]			
		Dirección X	Dirección Y	Dirección Z	Magnitud Total
Interfaz - Superficie Superior	2652	5.11	-94.25	-8322.10	8347.30
Interfaz - Superficie 45 Grados	1122	4.77	-2585.63	-2548.83	3630.81
Interfaz - Superficie Inferior	3673	6.91	-110.11	11095.97	11184.67

Sólido 1350					
	Cantidad de Nodos	Fuerza Específica [N/Nodo]			
		Dirección X	Dirección Y	Dirección Z	Magnitud Total [N]
Interfaz - Superficie Superior	532	0	0	-15.643045	8347.30
Interfaz - Superficie 45 Grados	152	0	-17.010724	-16.768618	3630.81
Interfaz - Superficie Inferior	532	0	0	20.857086	11184.67

Sólido 6250					
	Cantidad de Nodos	Fuerza Específica [N/Nodo]			
		Dirección X	Dirección Y	Dirección Z	Magnitud Total [N]
Interfaz - Superficie Superior	1386	0	0	-6.004401	8347.30
Interfaz - Superficie 45 Grados	504	0	-5.130218	-5.057202	3630.81
Interfaz - Superficie Inferior	1386	0	0	8.005750	11184.67

Sólido 10800					
	Cantidad de Nodos	Fuerza Específica [N/Nodo]			
		Dirección X	Dirección Y	Dirección Z	Magnitud Total [N]
Interfaz - Superficie Superior	1963	0	0	-4.239480	8347.30
Interfaz - Superficie 45 Grados	755	0	-3.424675	-3.375934	3630.81
Interfaz - Superficie Inferior	1963	0	0	5.652557	11184.67

Sólido 25600					
	Cantidad de Nodos	Fuerza Específica [N/Nodo]			
		Dirección X	Dirección Y	Dirección Z	Magnitud Total [N]
Interfaz - Superficie Superior	3417	0	0	-2.435499	8347.30
Interfaz - Superficie 45 Grados	1407	0	-1.837690	-1.811535	3630.81
Interfaz - Superficie Inferior	3417	0	0	3.247284	11184.67

Sólido 50000					
	Cantidad de Nodos	Fuerza Específica [N/Nodo]			
		Dirección X	Dirección Y	Dirección Z	Magnitud Total [N]
Interfaz - Superficie Superior	5271	0	0	-1.578847	8347.30
Interfaz - Superficie 45 Grados	2259	0	-1.144591	-1.128300	3630.81
Interfaz - Superficie Inferior	5271	0	0	2.105098	11184.67

Tabla 6: Cálculo de fuerzas equivalentes.

A continuación, se procedió a recalcular la carga concentrada que debe aplicarse en cada nodo (al final es una carga distribuida sobre la superficie) para las distintas mallas utilizando el siguiente método.

$$\mathbf{F}_{\text{nueva}}^{\text{int}} = \mathbf{n}_{\text{ref}}^{\text{int}} * \mathbf{F}_{\text{ref}} / \mathbf{n}_{\text{x}}^{\text{int}} \quad (21)$$

Donde:

$\mathbf{F}_{\text{nueva}}^{\text{int}}$: la nueva fuerza que se aplicará en cada nodo de la superficie considerada de la interfaz. $\mathbf{n}_{\text{ref}}^{\text{int}}$: el número de nodos en la superficie correspondiente a la malla con 7500 elementos (referencia).

$\mathbf{F}_{\text{ref}}$: el valor total de la fuerza de referencia aplicada en la cara respectiva de la interfaz.

$\mathbf{n}_{\text{x}}^{\text{int}}$: el nuevo número de nodos en la superficie de la interfaz de la malla correspondiente al nuevo estudio que se va a realizar.

Basándose en estos cálculos, a continuación se adjunta, como ejemplo de implementación, una imagen con los ajustes correspondientes para la simulación del Sólido con 1350 elementos. Es importante observar que se utilizaron las mismas condiciones de contorno que para el caso acoplado (excepto por la carga externa). Esto se puede interpretar con la ayuda del Manual de usuario de CalculiX [20]. Nfrontback es un conjunto de nodos que contiene todos los nodos de las dos caras perpendiculares al eje de simetría (consulte la figura 12). Estas caras están restringidas para que no giren alrededor de los ejes X y Z, ni se trasladen en la dirección X. Entonces, la cara sobre el plano de simetría no puede trasladarse en los ejes X o Y. Por último, se restringe además el desplazamiento de la fibra neutra en la dirección del eje Z. El intervalo de tiempo también está marcado como referencia.

```

8 *STEP, NLGEOM, INC=10000000
9 *DYNAMIC,DIRECT,ALPHA=-.3
10 1E-03,1000.0
11
12 *BOUNDARY
13 Nfrontback, 1, 1, 0.
14 Nfrontback, 4, 6, 0.
15 Nsymmetry, 1, 2, 0.
16 Ncenterline, 3, 3, 0.
17
18 *CLOAD
19 NinterfaceTop, 1, 0.0
20 NinterfaceTop, 2, 0.0
21 NinterfaceTop, 3, -15.643045
22
23 Ninterface45, 1, 0.0
24 Ninterface45, 2, -17.010724
25 Ninterface45, 3, -16.768618
26
27 NinterfaceBottom, 1, 0.0
28 NinterfaceBottom, 2, 0.0
29 NinterfaceBottom, 3, 20.857086

```

Figura 28: Configuración de las condiciones de frontera en CalculiX para la simulación desacoplada del Sólido con 1350 elementos.

El único parámetro que se cambió entre estas simulaciones, aparte de la fuerza de referencia, fue la malla utilizada en el participante Sólido de foam. El paso temporal utilizado para todos los casos fue el mismo: **0.001** segundos.

7.4. Resultados

Dado que lo que se analiza aquí es una simulación de FSI, debido a la naturaleza del problema, las principales variables de interés son los desplazamientos causados por las fuerzas que el otro participante ejerce sobre el núcleo de foam. Además, es crucial conocer los desplazamientos de los nodos de la superficie que están en contacto con el otro participante (interface), por lo que el desplazamiento de esta superficie es lo que conduce a la reducción de la fracción volumétrica de fibra (FVF) y, por lo tanto, a un componente fabricado con menor calidad y propiedades mecánicas más bajas. Esto es posteriormente mostrado de manera esquemática (consulte la figura 53). Por lo tanto, en este caso, dado que las zonas más comprometidas son las superficies de la interfaz, los nodos que yacen sobre la misma son los que se supervisarán y elegirán como medida de convergencia. Más específicamente, los desplazamientos medidos perpendicularmente a estas superficies: - Para la interfaz superior e inferior, justo en la dirección del eje Z. - Para la superficie de 45 grados, en ángulo, en la dirección de los ejes Y y Z.

Esto es más fácil de entender observando la siguiente figura. U se usa para representar los desplazamientos.

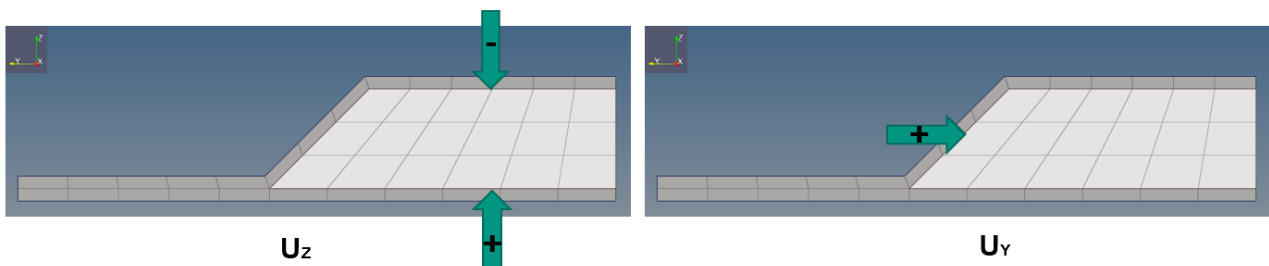


Figura 29: Representación esquemática de los desplazamientos en las superficies de la interfaz.

Los resultados de esta sección se obtuvieron mediante la aplicación de código abierto para la visualización científica interactiva de datos ParaView [3].

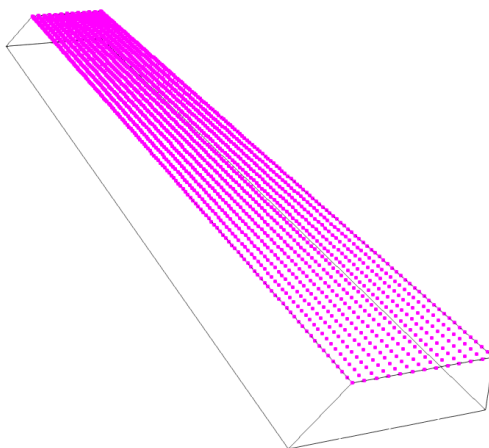


Figura 30: Extracción de datos de los nodos de la superficie superior de la interfaz.

Para la superficie superior de la interfaz, se seleccionaron los nodos correspondientes a cada resultado de la simulación (como se muestra en la figura 30) a fin de extraer específicamente los datos de esa zona. Se calculó un promedio de los desplazamientos sobre la superficie para los desplazamientos del eje Z y, a continuación, se realizó la comparación entre cada mallado, como se puede observar en las siguientes figuras. En la figura 31, se ve claramente cómo el error relativo de los desplazamientos perpendiculares a la superficie tiende a reducirse cuanto mayor es el número de elementos que tiene la malla, lo que significa que los resultados convergen a un determinado valor.

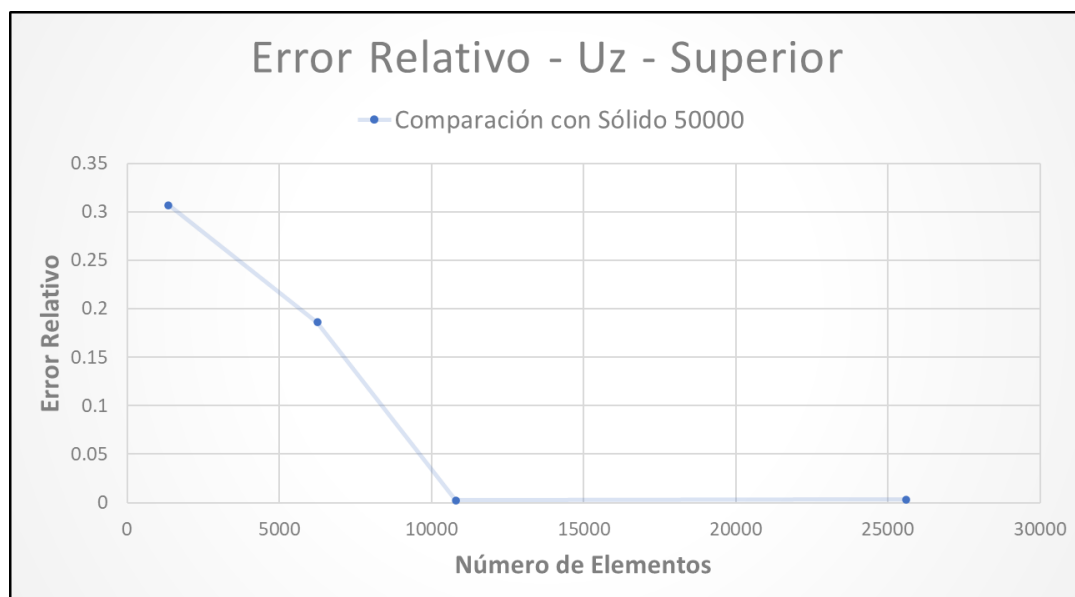


Figura 31: Error relativo de los desplazamientos de la superficie superior en la dirección del eje Z en función del número de elementos.

En lo que respecta a la superficie en ángulo de 45 grados, se aplicó el mismo método de post-proceso de datos a cada simulación. A continuación también se muestra una imagen de los nodos de la interfaz para dejar asentado de dónde provienen los resultados. Como puede observarse, los nodos que se encuentran en la arista entre la superficie superior y la superficie de 45 grados, así como los que se encuentran en la arista compartida entre la superficie inferior y de 45 grados, no se pueden definir dos veces. Por eso no se tienen en cuenta para esta superficie, sino que sólo para la parte superior e inferior.

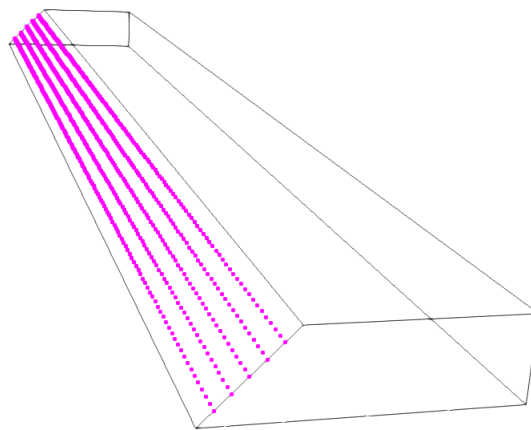


Figura 32: Extracción de datos de los nodos de la interfaz de la superficie a 45 grados.

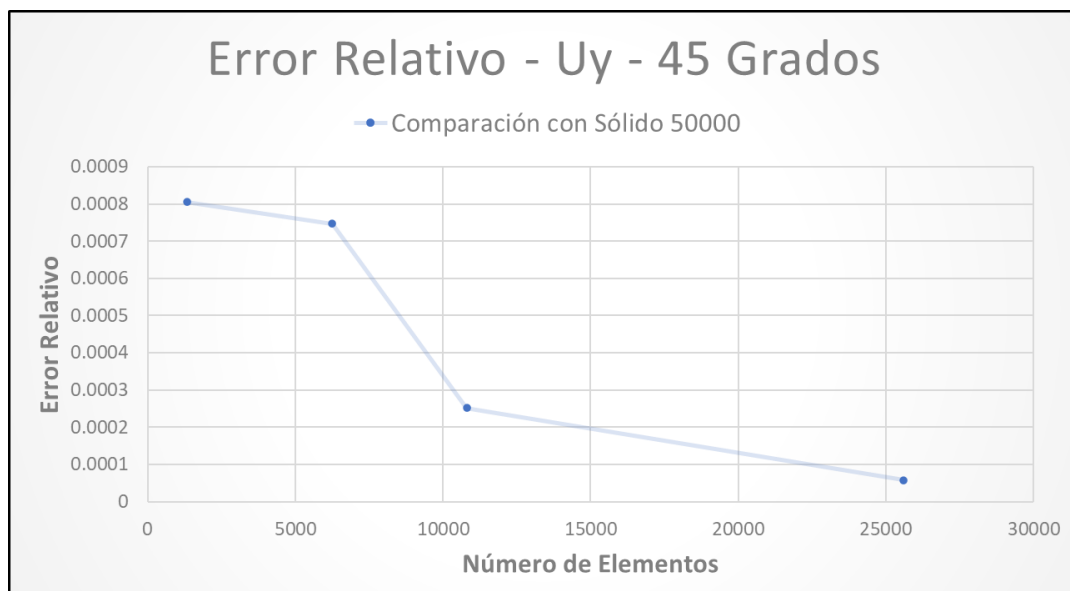


Figura 33: Error relativo de los desplazamientos en la dirección del eje Y para la superficie de 45 grados en función del número de elementos.

Esta tendencia se observa tanto para el desplazamiento a lo largo del eje Y

como para el desplazamiento en Z. Además, las curvas de error relativo muestran una mejor comprensión de estos resultados. Ambos desplazamientos exhiben un comportamiento de convergencia similar al mostrado para la superficie superior de la interfaz, aunque más lento para el desplazamiento en Z.

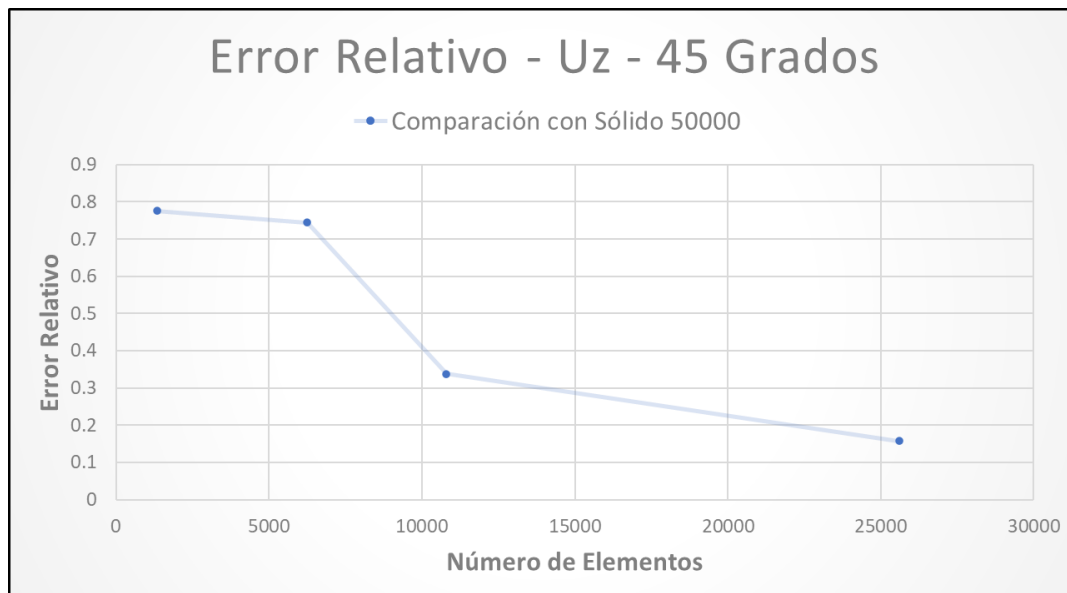


Figura 34: Error relativo de los desplazamientos en la dirección del eje Z para la superficie de 45 grados en función del número de elementos.

El cálculo de todos los errores relativos se realizó en referencia a los resultados de la malla más fina, la cual consta de 50000 elementos.

La superficie de interfaz inferior tiene un comportamiento muy similar al de la superficie superior. Al igual que en las otras dos áreas, se muestran los puntos de extracción y los resultados obtenidos para los desplazamientos de interés.

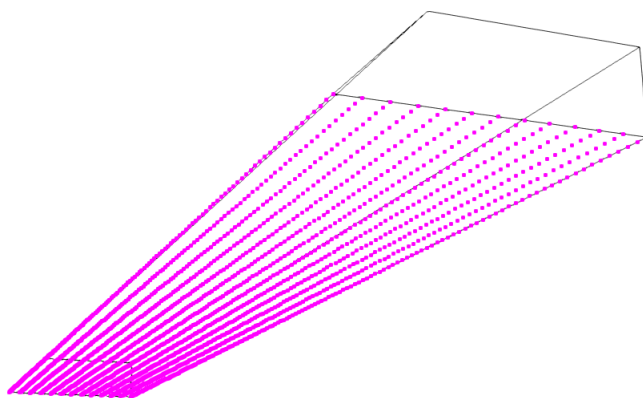


Figura 35: Extracción de datos de los nodos de la superficie inferior de la interfaz.

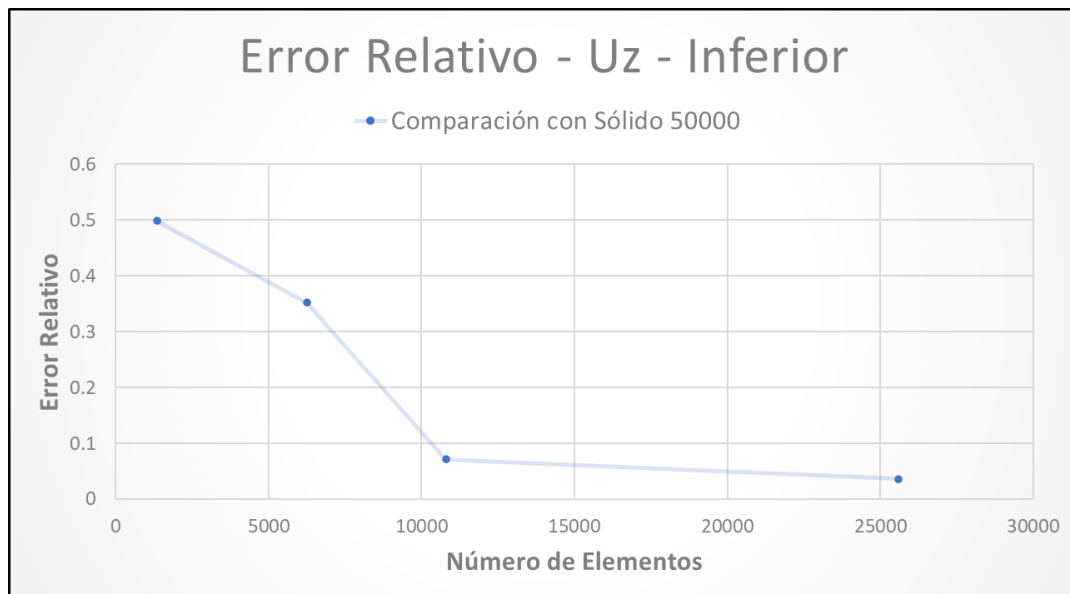


Figura 36: Error relativo de los desplazamientos en la dirección del eje Z para la superficie inferior en función del número de elementos.

7.5. Observaciones

En cuanto a la convergencia lograda, debe aclararse que se debieron tener en cuenta ciertas consideraciones.

Se detectó un comportamiento atípico en los resultados en términos de convergencia. Teniendo en cuenta que las simulaciones eran de naturaleza estática, se debe alcanzar un valor fijo o de tendencia para determinar la convergencia de los resultados, por lo que éste no debe variar con el tiempo.

En la figura 37 se puede notar, por ejemplo, que para el mallado grueso, que posee 1350 elementos, el valor promedio de los desplazamientos en todas las direcciones sobre la superficie superior tiende a converger a un solo valor luego de un número realmente elevado de iteraciones. Por otro lado, es también importante destacar que las oscilaciones son un orden de magnitud mayores para los desplazamientos en Y (figura 38).

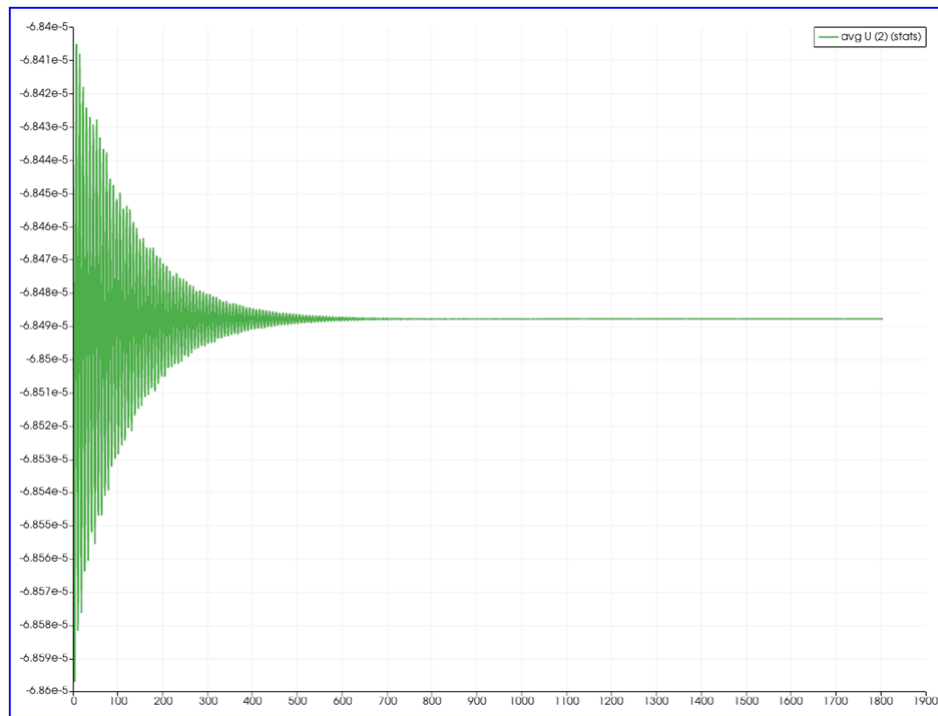


Figura 37: Promedio de los desplazamientos [m] frente al tiempo [s] en la dirección del eje Z sobre la superficie superior del Sólido con 1350 elementos.

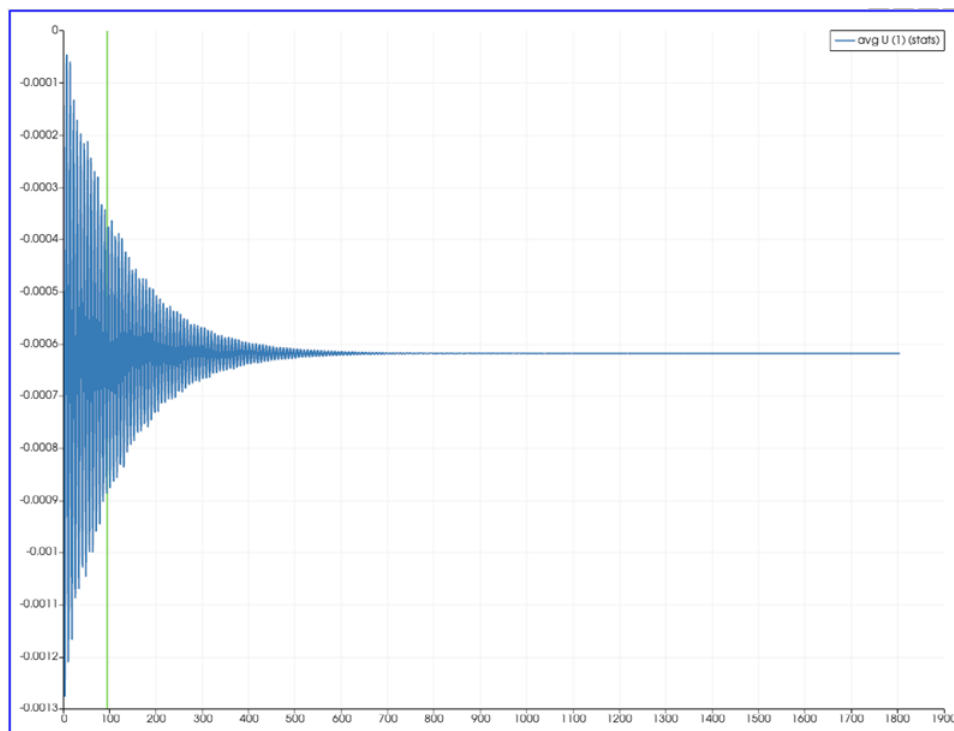


Figura 38: Promedio de los desplazamientos [m] frente al tiempo [s] en la dirección del eje Y sobre la superficie superior del Sólido con 1350 elementos.

Por otro lado, cuantos más elementos poseía el sólido, más recursos compu-

tacionales y, por lo tanto, más tiempo de simulación implicaba. Como el tiempo de convergencia de la malla más gruesa fue de unas 48 horas, con 8 procesadores realizando cálculos en paralelo, y este patrón de convergencia se observó repetidamente, se decidió hacer un promedio general a lo largo del tiempo de estos valores ya promediados, ya que estos marcan una línea de tendencia que debería converger para un tiempo relativamente largo. Esto se comprobó previamente haciendo lo mismo con los resultados obtenidos para la malla gruesa y normal y tuvo resultados realmente prometedores, por lo que se puede tomar como una buena aproximación sin tanto coste computacional. Esto podría interpretarse mejor como se ve en la figura 39.

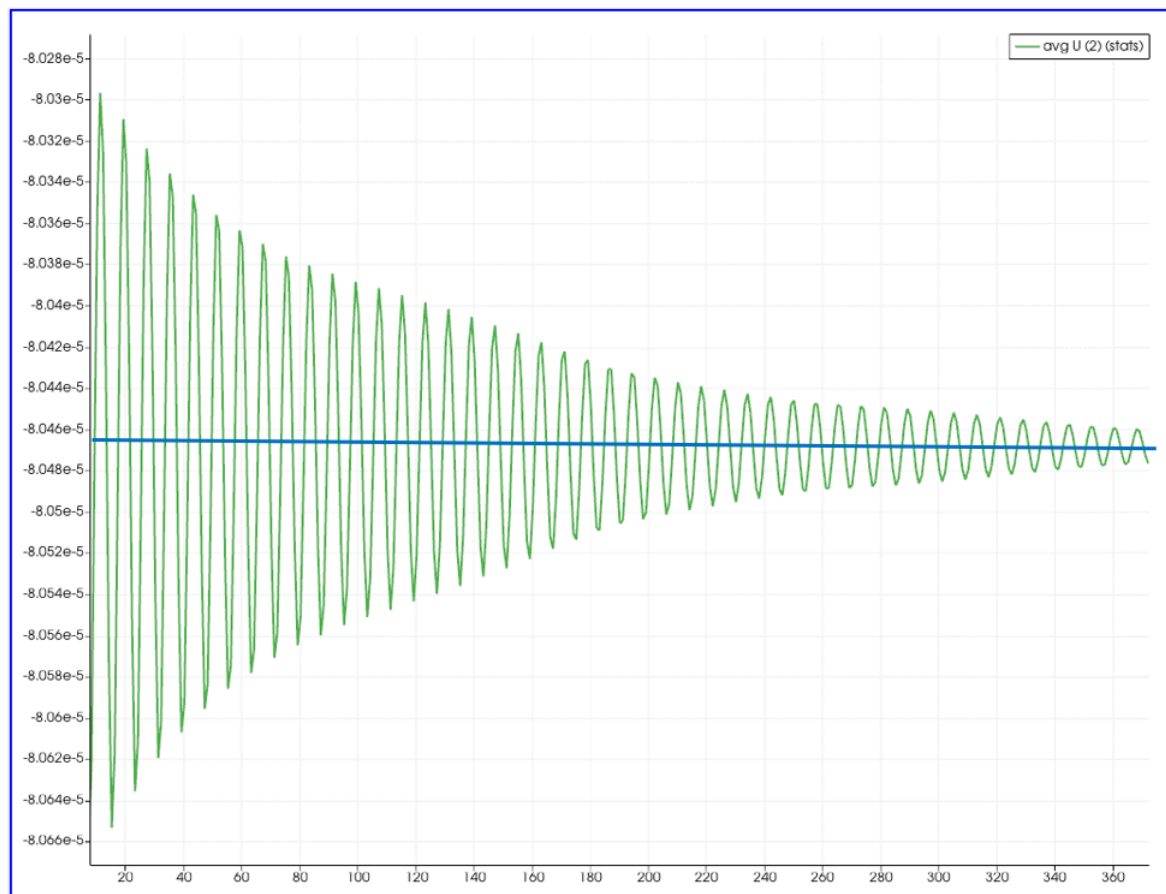


Figura 39: Línea de tendencia del promedio general realizado a partir de la media de los desplazamientos [m] frente al tiempo [s] en la dirección del eje Z sobre la superficie superior del Sólido con 6250 elementos.

Finalmente, estos valores promediados se calcularon para continuar con la comparación sin necesidad de tanto tiempo de cálculo. Al final, los resultados parecen ser lógicos y seguir la tendencia de convergencia.

7.6. Conclusiones

Se puede concluir que a medida que aumenta el número de elementos del mallado del participante, la diferencia en los resultados obtenidos para la variable de interés disminuye. Sin embargo, se ve que la convergencia más lenta se da en los desplazamientos en dirección del eje Z para la superficie de 45 grados. Esto se debe al hecho de que el número de elementos en Z debería aumentarse, ya que la superficie de 45 grados depende de estos y de los elementos Y. Esto se probó creando otra malla con el doble de elementos en Z e Y que la muy fina (la cual posee 25600 elementos). Esta malla tenía 16 elementos en Z y 32 en Y. Tenía menos elementos (22500) porque estaba refinada localmente en la superficie para ahorrar costo computacional. Los resultados se muestran en la siguiente imagen.

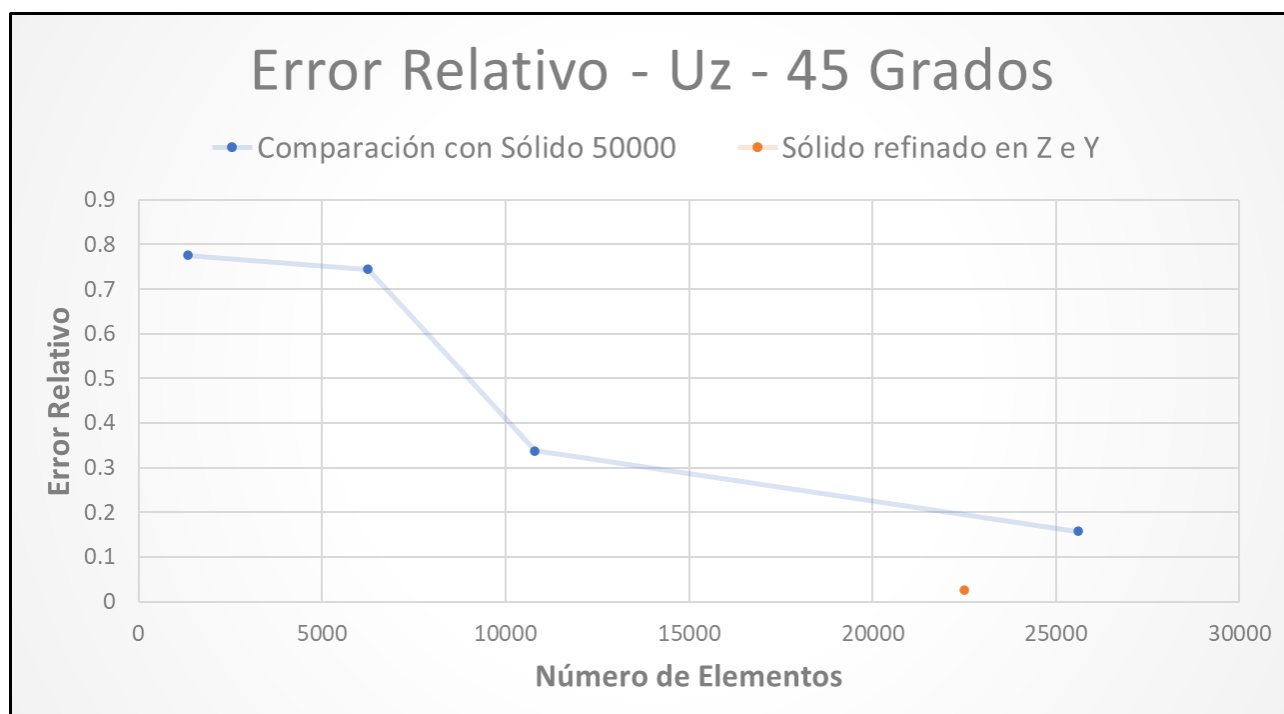


Figura 40: Comparación de la prueba de convergencia con el doble de elementos en Z e Y.

Sin embargo, dado que el caso acoplado requiere de muchos recursos computacionales, menos del 15 % de error en la peor de las situaciones es un resultado aceptable y se puede afirmar que se lograría una independencia de malla para el siguiente sólido con aproximadamente 50 000 elementos.

Por otro lado, en lo que respecta al comportamiento oscilatorio, se cree que esto se debió al solver no lineal elegido de CalcuLix®[®], que con elementos muy pequeños tarda su tiempo en converger correctamente, pero proporciona una estimación rápida y buena del valor de interés.

Por último, cabe aclarar que, si bien los desplazamientos parecen pequeños (del orden de la centésima o décima de milímetro), hay que recordar que los mismos se promedian en toda la superficie. Esto no quita que haya puntos donde las tensiones sean grandes y sufran mayores desplazamientos, lo que podría generar un defecto en la pieza, debido a una zona más débil, con menor FVF y, por lo tanto, con propiedades mecánicas más bajas. Estas zonas son críticas, ya que el origen del defecto puede provocar un fallo abrupto y prematuro del componente tipo sándwich en estudio. Por ejemplo, el mayor desplazamiento que se encuentra en el Sólido con la malla más fina es de 3,62 mm, lo que no es para nada despreciable.

8. Caso Acoplado

Este capítulo está dividido en dos partes. Debido a la complejidad del problema y a los recursos disponibles, primero se decidió lograr una optimización en la configuración del solver para poder realizar el cálculo con la precisión deseada y en un tiempo aceptable. Luego, en base a estos resultados, se realizó el estudio final y la evaluación de los resultados.

8.1. Optimización de la configuración del solver

8.1.1. Propuesta de Mallado

Para la optimización, se decidió utilizar los mallados más robustos, ya que la idea era comparar diferentes configuraciones con las mismas mallas y ver la diferencia en los resultados y los tiempos obtenidos. Por esta razón, se eligieron **el Fluido 24600 y el Sólido 6250**.

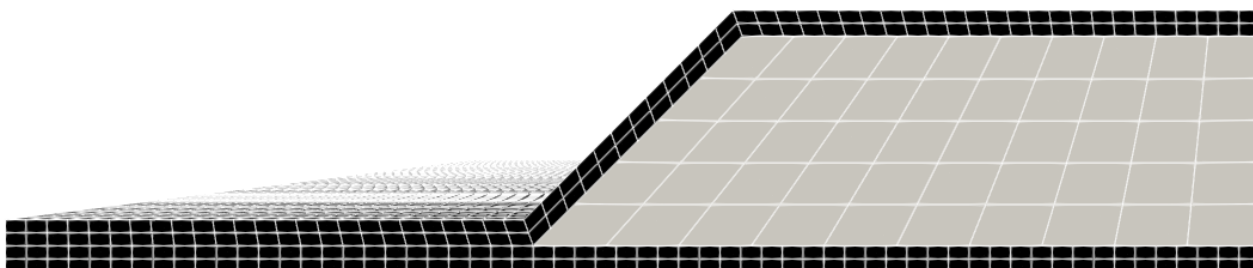


Figura 41: Vista frontal de la malla acoplada empleada para el estudio de optimización de la configuración del solver.

8.1.2. Mapeo

Después de muchas pruebas, se identificó que los parámetros que más influían en los tiempos de cálculo eran el mapeo y las tolerancias controladas para la convergencia en la interface.

¿Qué es un *mapeo*?

Cuando dos participantes son acoplados por una interfaz común a ambos, en general, las dos mallas de la superficie no coinciden. Por lo tanto, Precice® proporciona métodos de mapeo de datos para pasar los datos de acoplamiento de una malla a otra. Esto determina cómo se transmitirá y leerá la información entre los mallados. Consecuentemente, se generará un nuevo error debido a esta adaptación, que depende del método utilizado para este propósito.

La biblioteca Precice® cuenta con varios mapeos con diferentes características y grados de precisión, entre estos se encuentran [43]:

- **Nearest-Neighbor (Vecino más cercano):** Un método de primer orden, rápido y fácil de usar, pero con deficiencias numéricas.
- **Nearest-Projection (Proyección más cercana):** un método (en su mayoría) de segundo orden, que primero se proyecta en elementos de malla y, a continuación, utiliza la interpolación lineal dentro de cada elemento (consulte la figura 42). La desventaja es que es necesario definir información acerca de la conectividad de los mallados.
- **Función de Base Radial (RBF):** calcula un interpolante global en uno de los mallados, que luego se evalúa en la otra malla. El mismo está formado por una combinación lineal de funciones básicas radialmente simétricas centradas en cada vértice, optimizado además por un polinomio lineal global [37]. A su vez, hay dos tipos de mapeo de RBF.
 - **Función básica con soporte global:** son más fáciles de configurar, ya que no es necesario setear ningún otro parámetro. Sin embargo, en el caso de mallas considerablemente grandes, estas funciones generan problemas de rendimiento en términos de complejidad algorítmica, condición numérica y escalabilidad.
 - **Funciones básicas con soporte local:** necesita la definición de un radio de soporte o un parámetro de forma. Para lograr un buen equilibrio entre precisión y eficiencia, el radio-soporte de cada función base debe cubrir de tres a cinco vértices en todas las direcciones.

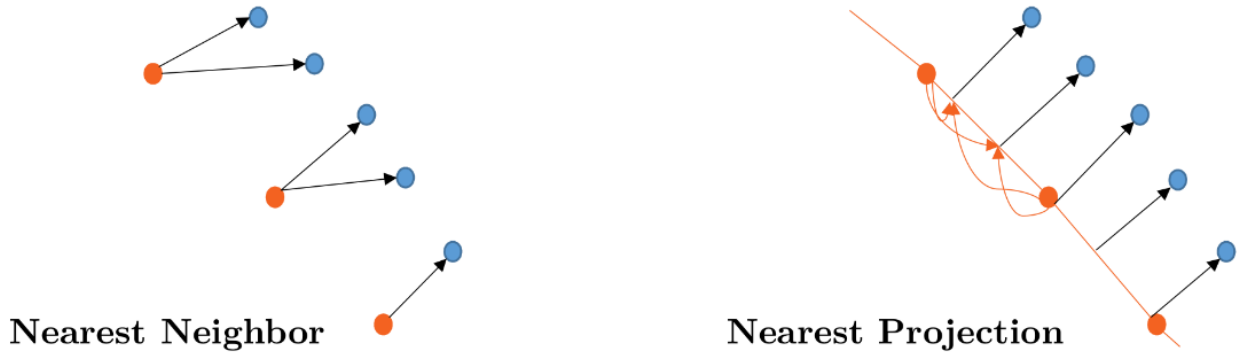


Figura 42: Comparación entre el mapeo Nearest-Neighbor y Nearest-Projection. [43]

8.1.3. Software Set-Up

Primero se intentó una simulación con parámetros de tolerancia finos y un mapeo preciso. El uso del RBF completo con soporte global no mostró ningún progreso considerable con los recursos computacionales disponibles, por lo que se descartó de inmediato. Por esta razón, se decidió comenzar con el mapeo RBF pero con un soporte local, mediante la definición de un parámetro de forma, algo más eficiente desde el punto de vista computacional.

Luego se procedió a cambiar el mapeo, ya que esto influía drásticamente en los tiempos de cálculo, aunque por supuesto conlleva un error intrínseco. Se utilizó entonces la misma configuración pero con un mapeo de Nearest Neighbor, el cual es de primer orden y mucho menor precisión.

A esto se añadió una reducción en el número máximo de iteraciones establecido, para ver cómo afectaba a los resultados. Este límite se redujo a la mitad.

Por último, se procedió a bajar un poco las tolerancias en la comunicación entre Sólido y Fluido, por supuesto, además de utilizar el mapeo de primer orden, de modo de obtener el cálculo mucho más rápidamente, cediendo un poco de precisión.

Mediante post-proceso se obtuvieron los resultados para el participante Fluido directamente a través de OpenFOAM® y para el Sólido se utilizó nuevamente ParaView®. La configuración individual utilizada para los participantes

Parámetro / Mallados	24600 6250 RBF G100	24600 6250 NN	24600 6250 NN mIter	24600 6250 NN mTol
Mapeo	RBF-Gaussian	Nearest-Neighbor	Nearest-Neighbor	Nearest-Neighbor
Parámetro de Forma	100	-	-	-
Tol Abs Desplazamiento	1E-06	1E-07	1E-07	1E-05
Tol Abs Fuerza	1E-02	1E-04	1E-04	1E-02
Paso Temporal	0.01	0.01	0.01	0.01
Relajación Inicial	0.05	0.1	0.1	0.1
Máx Iteraciones	50	50	25	25
Máx Iter. Reutilizadas	50	50	25	25
Ventana Temp. Reutil.	25	25	15	15

Tabla 7: Parámetros más relevantes utilizados en el método de acoplamiento para el estudio de optimización de recursos.

fue la misma que se utilizó en las secciones 6 y 7, respectivamente. Sin embargo esta vez se necesitó una configuración de acoplamiento. Esto se puede observar en la tabla 7. Todas estas simulaciones fueron realizadas con 8 procesadores en paralelo.

8.1.4. Resultados

A efectos prácticos, la simulación se llevó a cabo hasta aproximadamente un tercio de su totalidad como para poder realizar las comparaciones deseadas y extraer las conclusiones necesarias. Además, la relación entre llenado y tiempo es casi lineal, como se verá más adelante. Esto significa que, si todo el proceso de llenado dura unos 60 segundos, aproximadamente a los 15 segundos se habrá llenado una cuarta parte del molde y a los 30 segundos se habrá impregnado aproximadamente la mitad de la pieza.

A continuación se muestran las cifras correspondientes al perfil de presiones obtenido para los tres casos (43) y el error relativo (44), tomando como referencia el cálculo con el mapeo RBF y las tolerancias más finas debido a su mayor precisión. Las gráficas se cortaron en los 200 mm (poco menos de la mitad de la pieza), ya que el frente de flujo no había llegado aún a esa zona y, en consecuencia, las presiones ejercidas por el fluido eran nulas a partir de ahí.

Adicionalmente, se adjuntan en la tabla 8 los tiempos implicados para cada simulación, donde se aprecia claramente, aunque a costa de perder precisión en los resultados, cómo éstos se reducen considerablemente. Queda aún por determinar cuánta precisión se requiere y, en función de los recursos disponibles, elegir la mejor opción.

	24600 6250 RBF G100	24600 6250 NN	24600 6250 NN mIter	24600 6250 NN mTol
Tiempo	34 hs 50 min	20 hs 23 min	4 hs 49 min	3 hs 14 min

Tabla 8: Tiempos de simulación obtenidos en los distintas simulaciones realizadas para optimizar la configuración del solver.

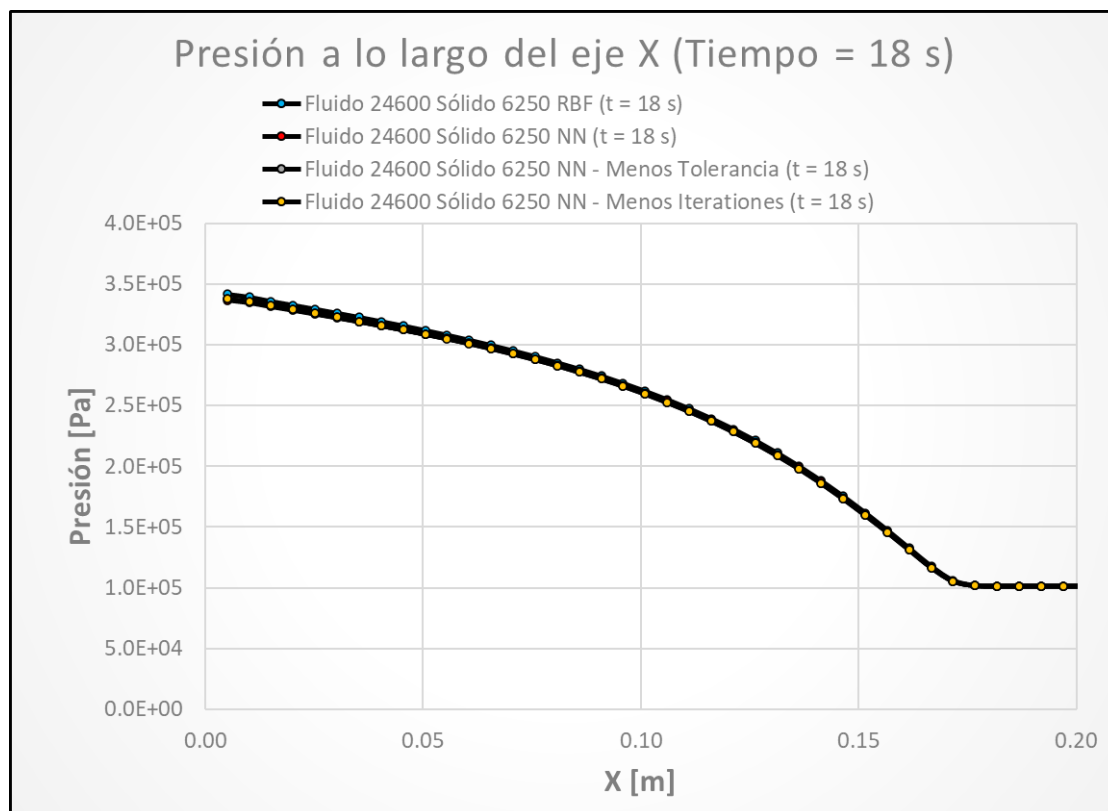


Figura 43: Comparación del perfil de presión entre las distintas simulaciones realizadas para optimizar la configuración del solver.

Como se puede notar en la tabla 8 la reducción de tiempo es un factor a tener en cuenta ya que se puede reducir hasta 10 veces, manteniendo el error por debajo del 1,5 %.

Por otro lado cabe destacar de la figura 44 que al quitar tolerancias o iteraciones se pierde esa tendencia a reducir el error a medida que la posición se acerca al frente de flujo.

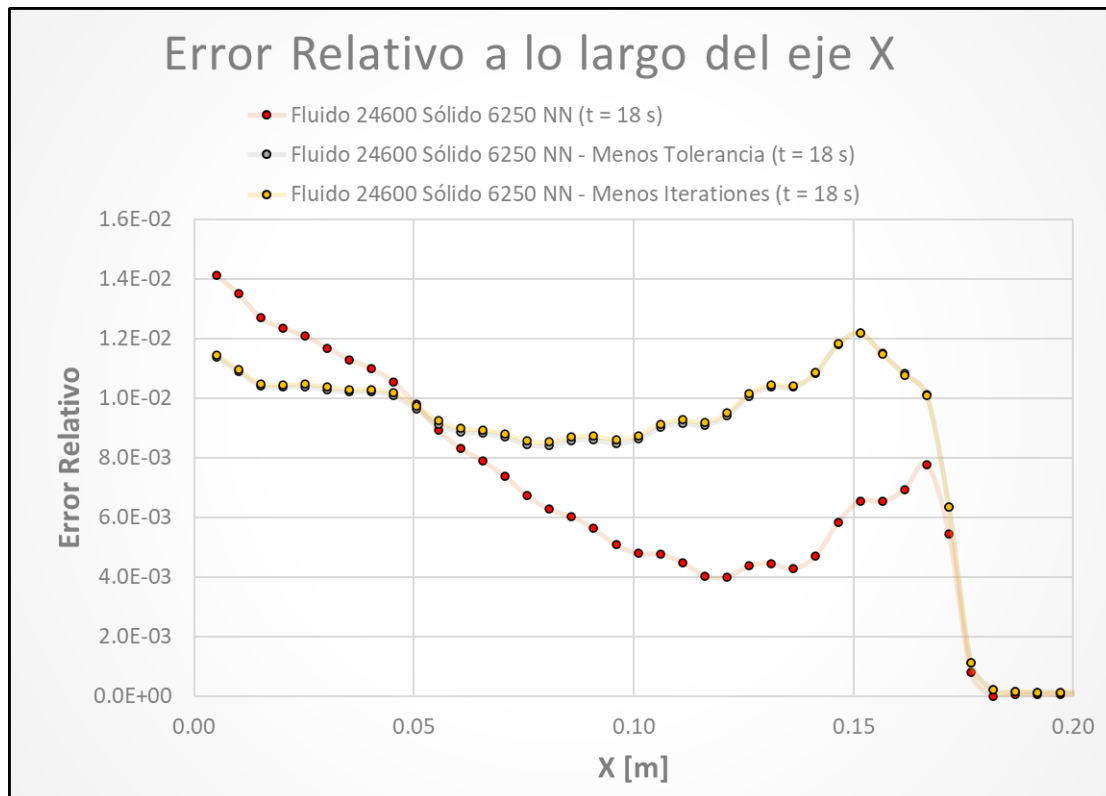


Figura 44: Comparación del error relativo del perfil de presión a lo largo del eje X entre las distintas simulaciones realizadas para optimizar la configuración del solver.

8.2. Estudio Final

8.2.1. Propuesta de Mallado

Continuando con el estudio de independencia de malla se decidió utilizar el Sólido con 50000 elementos y el Fluido con 49300 para mantener el error dependiente de la malla lo más bajo posible. Para hacer una comparación y ver la influencia de uno u otro participante se realizaron dos simulaciones más alternando dos mallados más gruesos y una última que utilizando ambos. Esto se puede observar esquemáticamente en la figura 45:

El resultado de estas mallas acopladas puede verse en la figura 47, donde se presenta la vista frontal 2D de las mismas.

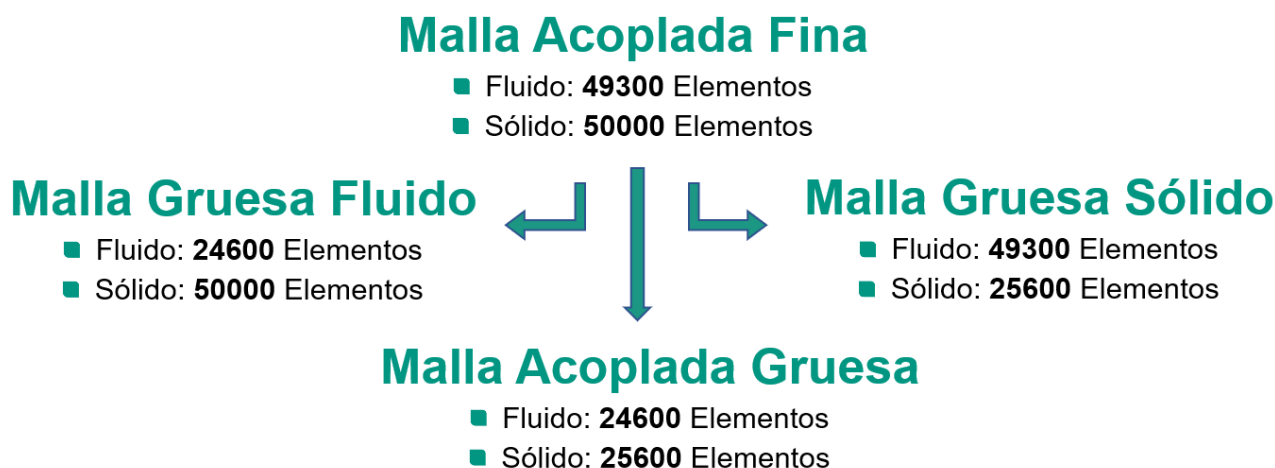


Figura 45: Plan de estudio de convergencia final acoplado y número total de elementos de los mallados empleados.

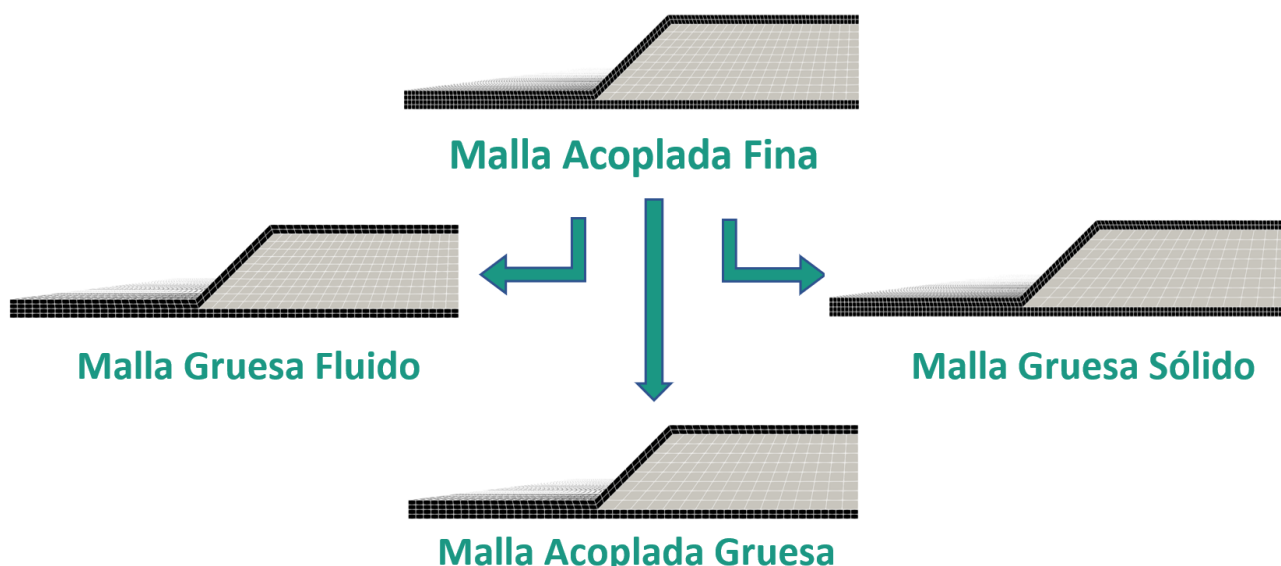


Figura 46: Vista frontal de los mallados utilizados en el estudio de convergencia acoplado y su grado de refinamiento correspondiente.

8.2.2. Software Set-Up

Por último, todos los softwares fueron utilizados acoplados como se explica en el capítulo 5. Las 4 simulaciones se ejecutaron todas al mismo tiempo con un solo procesador cada una, en lugar de utilizar 8 procesadores en paralelo como se realizó para los estudios aislados. Se optó entonces por utilizar el mapeo Nearest-Neighbor, ya que juega un papel muy importante en los tiempos de cálculo, manteniendo a su vez resultados de alta calidad. Además, cuanto menos volumen tienen los elementos, más se reduce este error de mapeo. Asimismo,

la tolerancia límite en la interfaz se eligió de forma conservadora, con el fin de hacer la simulación más eficiente en términos de tiempo sin perder calidad, como ya se ha mostrado en la sección 8.1.

Todos los parámetros de la simulación fueron recopilados en la tabla 9, para tener un resumen de la configuración utilizada. Lo único que cambió entre simulaciones fueron los mallados empleados para poder hacer una comparación posterior y sacar las respectivas conclusiones.

Parámetro	Valor
Mapeo	Nearest-Neighbor
Tol Abs Desplazamiento	1E-06
Tol Abs Fuerza	1E-03
Paso Temporal	0.01
Relajación Inicial	0.05
Máx Iteraciones	50
Máx Iteraciones Reutilizadas	50
Ventana Temporal Reutilizada	25

Tabla 9: Parámetros de calidad de malla más relevantes para el estudio del caso acoplado.

8.2.3. Resultados

Por último, se reunieron y compararon todos los resultados e información obtenidos en cada caso para obtener las conclusiones finales.

Para el participante fluido, como en las pruebas de experimentales para este caso [61], los resultados de presión se obtuvieron en la posición donde se encontraban los sensores de presión reales. Estos eran en total 6, y la posición se puede ver mejor en la siguiente imagen extraída de la fuente del procedimiento experimental.

En la figura 48, se puede observar el comportamiento de la presión medida por los sensores a lo largo del tiempo de llenado. Con el fin de hacer la comparación más clara, sólo la información de tres sensores se muestra, ya que los mismos fueron elegidos debido a su distancia en el eje X. Se puede observar que los perfiles son casi idénticos pero están desfasados en el tiempo. Esto se debe

al hecho de que la presión empieza a acumularse más tarde en las zonas más alejadas de dónde se da la inyección de la resina.

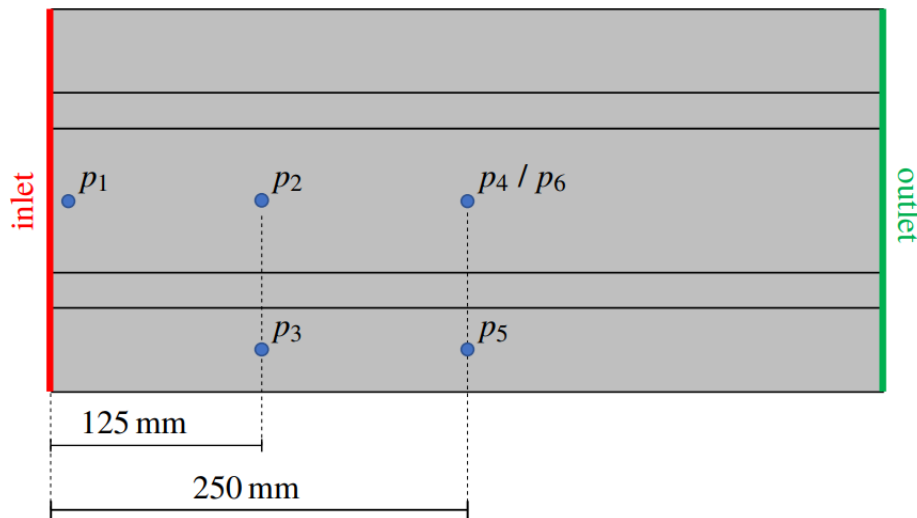


Figura 47: Posiciones de los sensores de presión en la herramienta RTM - Todos los sensores excepto p_6 estaban situados en la parte inferior del molde. [61]

Otro hecho importante a tener en cuenta es que el perfil de presión cambia rápidamente mientras que el frente del flujo pasa por el sensor, pero luego el valor de la presión se estabiliza y sólo aumenta lentamente debido a las presiones generadas por las fuerzas de arrastre. Debido a este hecho, se puede hacer un análisis cualitativamente bueno del error a partir de aproximadamente un tercio del llenado del molde (como se hizo para la optimización), ya que la presión no continúa variando de manera considerable en ese punto. Además la sección de mayor interés será la inyección, donde se encuentra el sensor p_1 , ya que allí se generan las presiones máximas.

En la tabla 10 se muestran y comparan para cada simulación los resultados obtenidos en el sensor p_1 a los 18 segundos del inicio del llenado del molde (aproximadamente un tercio de la duración total). Además, también se muestra el tiempo de simulación necesario para alcanzar ese punto. Cabe destacar que la simulación con los mallados más finos tardó unas dos semanas en alcanzar sólo un tercio del tiempo total del llenado del molde, haciendo uso de un sólo procesador.

Debido a que el error relativo no disminuye para el caso acoplado sólo con la

malla refinada para el fluido, el perfil de presión a lo largo del eje X también se analiza en las figuras 48 y 49 para el mismo tiempo. En ellas puede observarse que la malla de fluido más fina es más precisa cerca del frente del flujo fluido, pero curiosamente pierde precisión en las zonas más alejadas. Sin embargo, por otro lado, cuando se refina la malla sólida, el resultado es completamente el contrario: es realmente precisa lejos del frente pero pierde precisión cuanto más cerca del frente de fluido está el punto analizado.

El error relativo se calculó tomando como referencia el caso acoplado con los mallados más finos.

Tiempo de Simulación = 18s	24600 25600	24600 50000	49300 25600	49300 50000
Presión (sensor p1)	342448.13 Pa	340578.31 Pa	344552.81 Pa	340821.21 Pa
Error Relativo	0.477 %	0.071 %	1.095 %	-
Tiempo	91 hs 20 min	162 hs 40 min	161 hs 20 min	333 hs 10 min

Tabla 10: Resultados y tiempos de simulación para los casos acoplados.

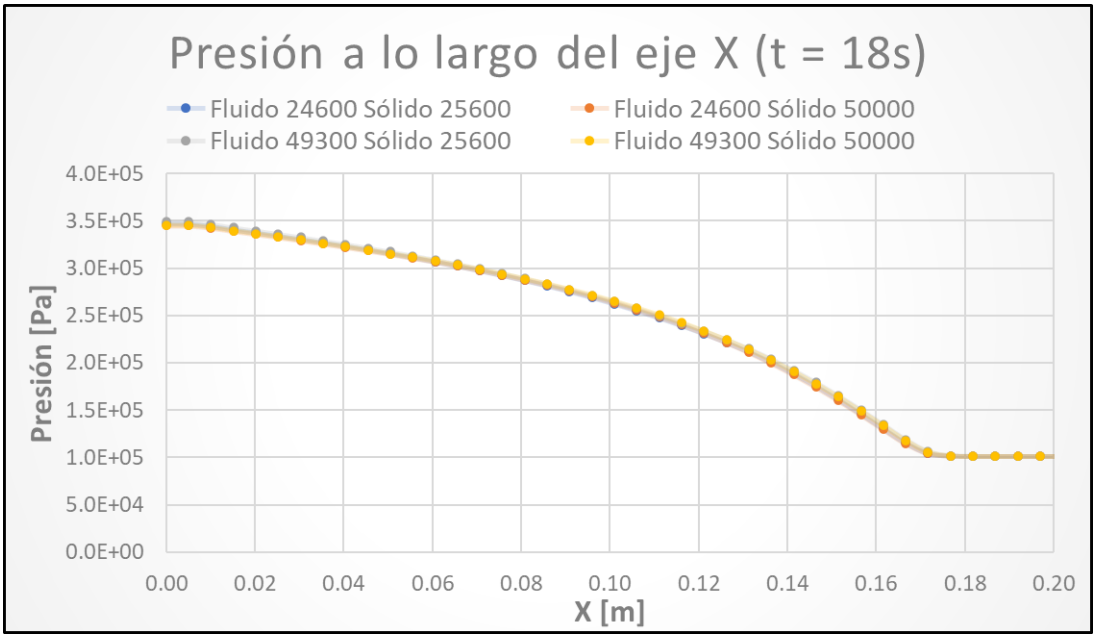


Figura 48: Perfil de presión a lo largo del eje X para cada estudio de malla acoplado.

Se puede observar claramente en la figura 48 cómo el perfil de presión no es más lineal a medida que se produce la deformación del núcleo de foam.

En cuanto al núcleo de espuma, los desplazamientos se calculan para la superficie de 45 grados, que es la más comprometida y mostró el mayor error. En las figuras 50 y 51 se muestra el error relativo en función del tiempo (hasta 18 segundos) para los desplazamientos verticales y horizontales, respectivamente. Ambos muestran un error relativo bajo, especialmente en la dirección del eje Z.

El error relativo máximo alcanza el 35 % en un momento dado. Sin embargo, se trata de un pico instantáneo, ya que se puede observar cómo este error disminuye y se estabiliza a medida que transcurre el tiempo de simulación y, luego, se mantiene por debajo del 5 %. Para los desplazamientos verticales, la malla del Fluido es la que tiene el mayor impacto a la hora de reducir el error relativo.

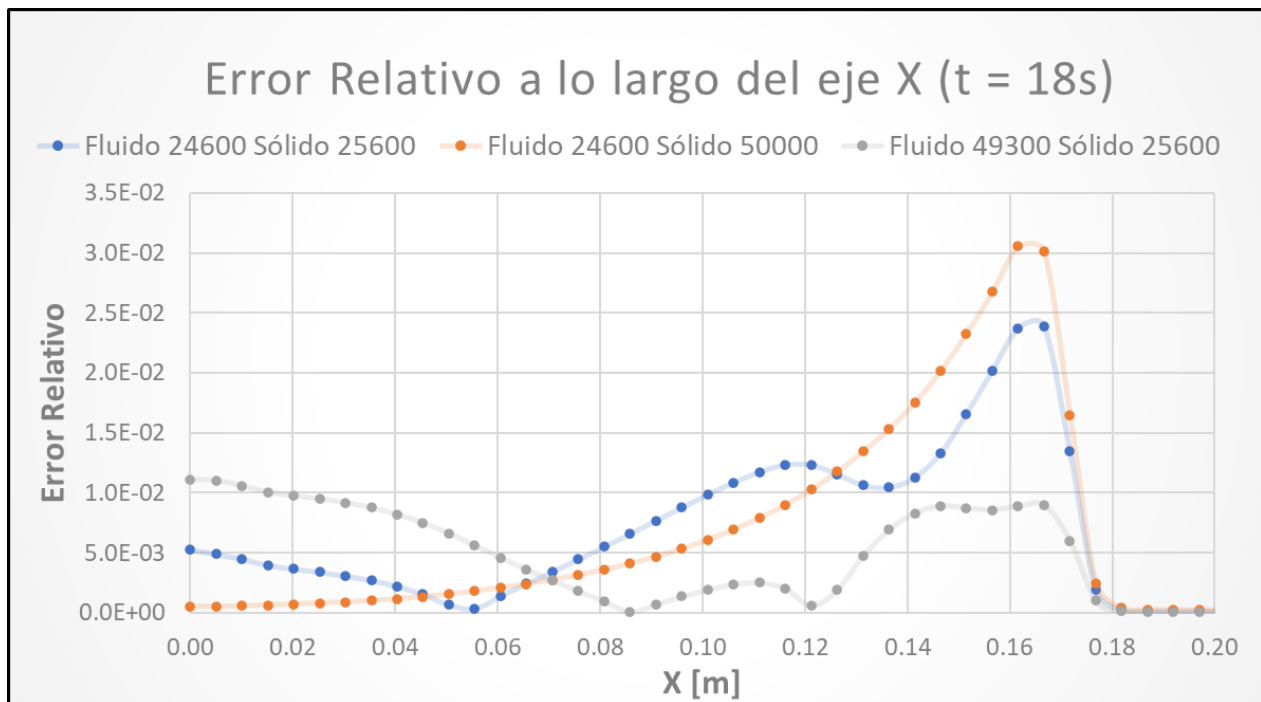


Figura 49: Error relativo del perfil de presión a lo largo del eje X para cada estudio de malla acoplada.

Sorprendentemente, el caso acoplado con los mallados más robustos muestra el menor error relativo para los desplazamientos laterales. Esto puede deberse al tamaño de los elementos. Si los elementos son demasiado pequeños pueden generar inestabilidades que, al final, conducen a un error. Por otro lado, para los tres casos el error se mantiene por debajo del 1 %, por lo que la diferencia entre ellos no es significativa.

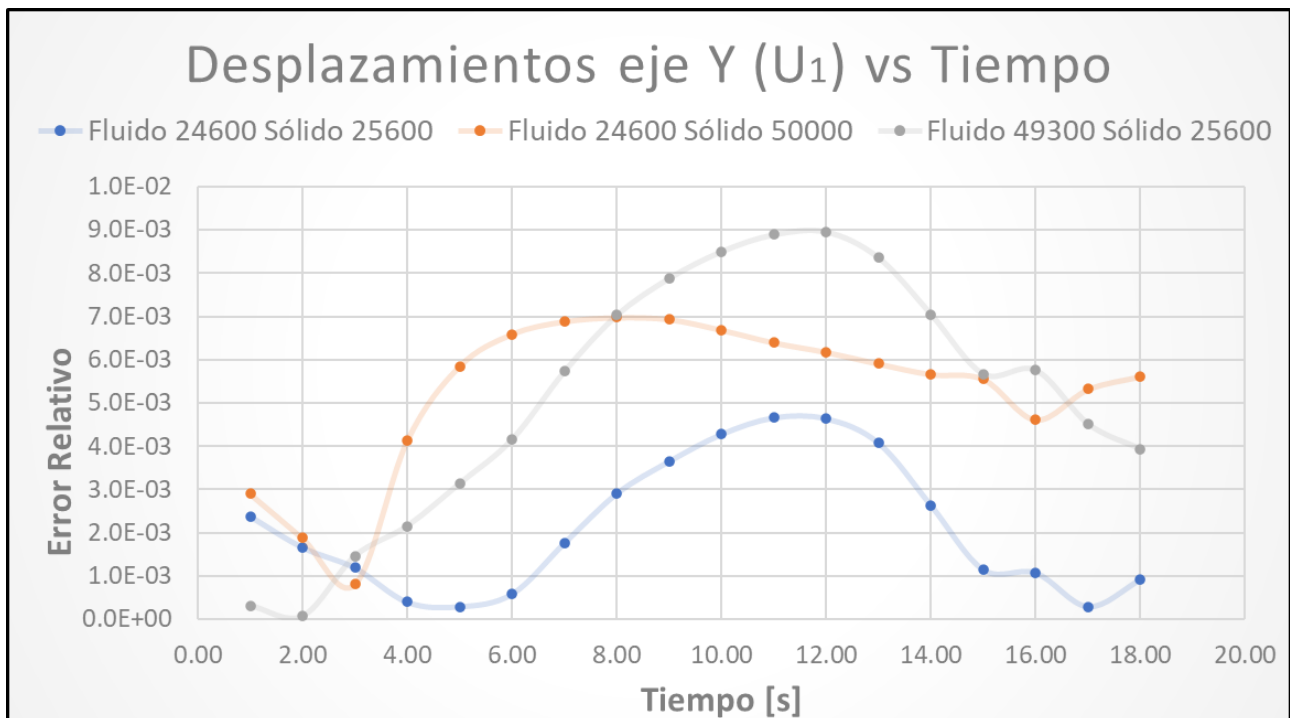


Figura 50: Error relativo de los desplazamientos horizontales promedio sobre la superficie de 45° en la dirección del eje Y en función del tiempo para cada estudio de malla acoplado (hasta los 18 segundos de tiempo de llenado del molde).

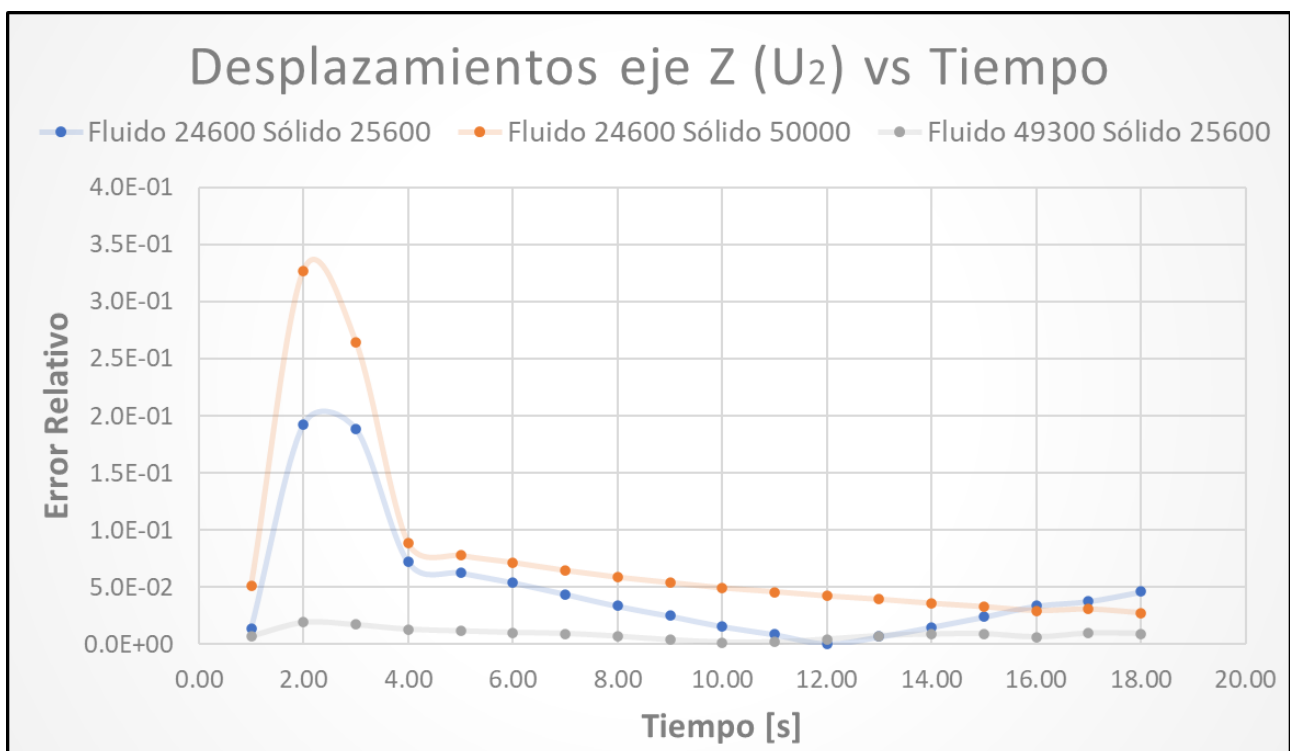


Figura 51: Error relativo de los desplazamientos verticales promedio sobre la superficie de 45° en la dirección del eje Y en función del tiempo para cada estudio de malla acoplado (hasta los 18 segundos de tiempo de llenado del molde).

En la tabla 11 se puede observar un resumen con los desplazamientos medios, sus correspondientes errores relativos y los desplazamientos máximos para la superficie de 45 grados del núcleo de foam para un tiempo de llenado del molde de 18 segundos.

De ello se deduce que si hay que refinar alguna de las mallas, el mallado correspondiente al participante Fluido es la que hay que elegir, ya que proporciona el mejor resultado.

Los desplazamientos puntuales máximos en la superficie de 45 grados son del orden de medio milímetro. Presentando 5 décimas de milímetro para los desplazamientos verticales y 1,5 milímetros para los horizontales. Las mallas más robustas muestran un error de más del 30 % para esos valores máximos, lo cual no es despreciable.

Tiempo de Simulación = 18s	24600 25600	24600 50000	49300 25600	49300 50000
Media Desplazamientos Horizontales (U1)	-4.72E-04 m	-4.69E-04 m	-4.74E-04 m	-4.72E-04 m
Error Relativo U1 (media)	0.09 %	0.56 %	0.39 %	-
Media Desplazamientos Verticales (U2)	8.58E-05 m	9.24E-05 m	9.08E-05 m	9.00E-05 m
Error Relativo U2 (avg)	4.60 %	2.74 %	0.93 %	-
Desplazamientos Puntuales Máximos (U1)	-1.65E-03 m	-1.69E-03 m	-1.59E-03 m	-1.58E-03 m
Desplazamientos Puntuales Máximos (U2)	3.26E-04 m	4.12E-04 m	4.99E-04 m	4.77E-04 m

Tabla 11: Resultados de los desplazamientos para los casos acoplados.

La figura 52 muestra el perfil del frente de flujo simulado para aproximadamente un tercio del tiempo de llenado del molde (a los 18 segundos).

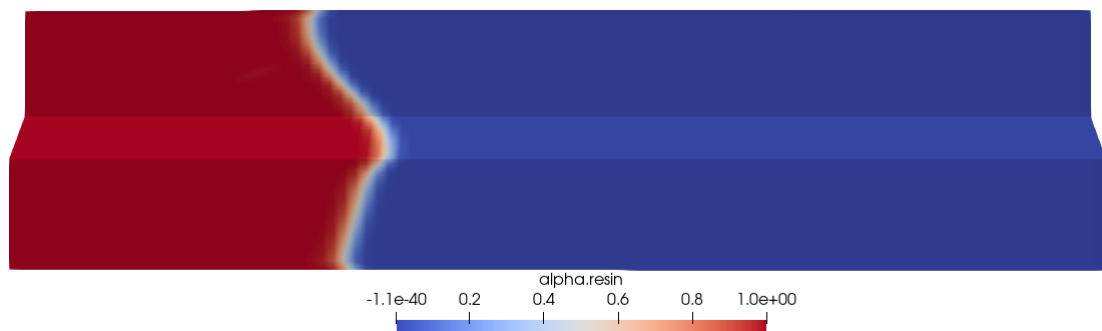


Figura 52: Perfil del frente de flujo para aproximadamente un tercio del tiempo de llenado del molde.

9. Conclusiones y recomendaciones

La fabricación de componentes tipo sándwich con núcleos de espuma mediante RTM es un proceso complejo que depende de muchos factores para su correcta implementación. Este trabajo pone de manifiesto la importancia de estimar los desplazamientos que se generarán en la interfaz para ajustar adecuadamente los parámetros del proceso y obtener así un componente ultra-liviano de alta calidad.

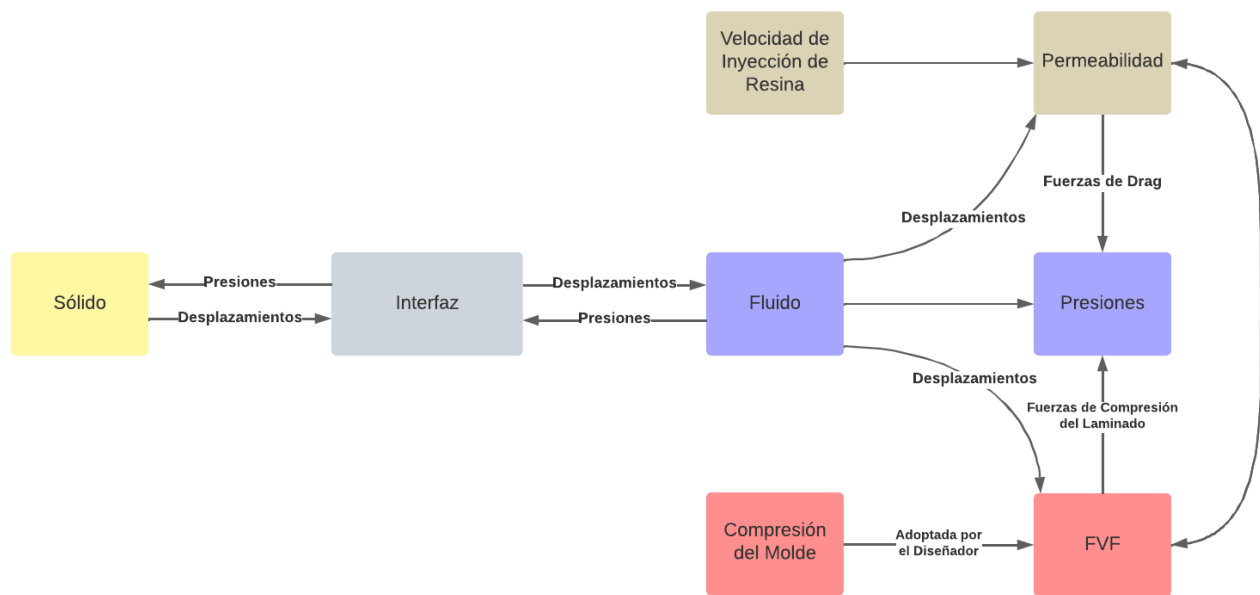


Figura 53: Diagrama conceptual para vincular conceptos.

Para poder predecir los desplazamientos, es necesario estimar las fuerzas que actúan sobre la interfaz. Dado que estas fuerzas dependen de la compresión del molde (que es un parámetro elegido por el diseñador al crear la estrategia de fabricación de la pieza) y de la presión hidrostática ejercida por el fluido, será de interés común obtener este valor desconocido de antemano. Esta variable depende tanto de la velocidad de inyección como de la permeabilidad del composite, que a su vez también depende de las condiciones geométricas de la pieza, así como del material y de la fracción volumétrica de fibra (que es función directa del nivel de compresión del molde elegido). La figura 53 resume todo esto

de una forma gráfica y práctica y muestra estas relaciones.

Por estos motivos, la presión generada por el fluido y los desplazamientos en la superficie de la interfaz se eligieron como parámetros determinantes y variables de control en los estudios realizados.

Durante la ejecución de las simulaciones se encontraron muchos problemas de estabilidad inesperados, por lo que los parámetros deben ajustarse con mucho cuidado para su correcto funcionamiento. Al final, el estudio de independencia de la malla se pudo llevar a cabo con éxito y se esperan errores generados por la malla inferiores al 1 % para el uso del mallado con 49300 elementos para el participante Fluido y la malla de 50000 elementos para el participante Sólido.

Referencias Bibliográficas

- [1] European Environment Agency (EEA). *Data viewer on greenhouse gas emissions and removals, sent by countries to UNFCCC and the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism (EU Member States)*. Abr. de 2021. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>.
- [2] Arzu Ahmadova. “Numerical Modelling of porosity generation, movement, and compaction during the RTM process.” Tesis doct. Sep. de 2018.
- [3] James Ahrens, Berk Geveci y Charles Law. “ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization”. En: *Visualization Handbook*. Elsevier, 2005. ISBN: 978-0123875822.
- [4] Melquiades Allende, Ram V. Mohan y Shawn M. Walsh. “Experimental and numerical analysis of flow behavior in the FASTRAC liquid composite manufacturing process”. En: *Polymer Composites* 25.4 (2004), págs. 384-396. DOI: [10.1002/pc.20032](https://doi.org/10.1002/pc.20032).
- [5] Melquiades Allende, Ram V. Mohan y Shawn M. Walsh. “Experimental and numerical analysis of flow behavior in the FASTRAC liquid composite manufacturing process”. En: *Polymer Composites* 25.4 (2004), págs. 384-396. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.20032>. eprint: <https://4srepubications.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pc.20032>. URL: <https://4srepubications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.20032>.
- [6] Justin B. Alms, Suresh G. Advani y James L. Glancey. “Liquid Composite Molding control methodologies using Vacuum Induced Preform Relaxation”. En: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42.1 (2011), págs. 57-65. ISSN: 1359-835X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.10.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X10002708>.
- [7] Hassan Alshahrani et al. “Mechanical Properties Study on Sandwich Composites of Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) Using Liquid Thermoplastic Resin, Elium®: Preliminary Experiments”. En: *Coatings* 12 (sep. de 2022), pág. 1423. DOI: [10.3390/coatings12101423](https://doi.org/10.3390/coatings12101423).
- [8] Altair. *Hypermesh User’s Guide - Meshing: How element Quality is Calculated*. 2017. URL: https://2017.help.altair.com/2017/hm/hmbat.htm?element_quality_calculation_hy.htm.
- [9] Inc. ANSYS. *Mesh quality and advanced topics Ansys workbench 16.0*. Oct. de 2015. URL: https://www.academia.edu/16970000/MESH_QUALITY_AND_ADVANCED_TOPICS_ANSYS_WORKBENCH_16_0.
- [10] Alexander Bernath. *Numerical prediction of curing and process-induced distortion of composite structures*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, oct. de 2021, pág. 296. ISBN: 978-3-7315-1063-5. DOI: [10.5445/KSP/1000125453](https://doi.org/10.5445/KSP/1000125453).

- [11] Camille C. Besse. “Development and optimization of a formable sandwich sheet”. En: 2012.
- [12] Prabhas Bhat et al. “Process analysis of compression resin transfer molding”. En: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40.4 (2009), págs. 431-441. DOI: [10.1016/j.compositesa.2009.01.006](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.01.006).
- [13] A T Bhatt y P P Gohil. “To study effect of VARTM process parameters for composite strength: Taguchi approach”. En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1004.1 (2020), pág. 012001. DOI: [10.1088/1757-899x/1004/1/012001](https://doi.org/10.1088/1757-899x/1004/1/012001).
- [14] Dhondt Guido D C. *The finite element method for three-dimensional thermomechanical applications*. Wiley, 2004.
- [15] P.C. Carman. “Fluid flow through granular beds”. En: *Chemical Engineering Research and Design* 75 (1997), S32-S48. ISSN: 0263-8762. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876297800032>.
- [16] Zhenhua Chai et al. “Non-Darcy flow in disordered porous media: A lattice Boltzmann study”. En: *Computers & Fluids* 39.10 (2010), págs. 2069-2077. ISSN: 0045-7930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.07.012>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045793010001878>.
- [17] G Chourdakis et al. “preCICE v2: A sustainable and user-friendly coupling library [version 2; peer review: 2 approved]”. En: *Open Research Europe* 2.51 (2022). DOI: [10.12688/openreseurope.14445.2](https://doi.org/10.12688/openreseurope.14445.2). URL: <https://doi.org/10.12688/openreseurope.14445.2>.
- [18] Alaa Deli, Karoly Jarmai y György Kovács. “Optimal Design of a Fiber-Reinforced Plastic Composite Sandwich Structure for the Base Plate of Aircraft Pallets In Order to Reduce Weight”. En: *Polymers* 13 (mar. de 2021), pág. 834. DOI: [10.3390/polym13050834](https://doi.org/10.3390/polym13050834).
- [19] Rafael de Delucis et al. “In situ L-RTM manufacturing of sandwich panels with pet foam core reinforced by polymeric pins”. En: *Journal of Sandwich Structures and Materials* 23.1 (2019), págs. 241-254. DOI: [10.1177/1099636219830145](https://doi.org/10.1177/1099636219830145).
- [20] Guido Dhondt. *CalculiX CrunchiX USER’S MANUAL version 2.19*. Dic. de 2021. URL: http://www.dhondt.de/ccx_2.19.pdf.
- [21] Rabii El Maani, Bouchaib Radi y Abdelkhalak ELHami. “Comparison of the FE/FE and FV/FE treatment of fluid-structure interaction”. En: *International Journal of Engineering Research and Applications* 5 (ene. de 2015), págs. 59-69.
- [22] N.A. Fallah et al. “Comparison of finite element and finite volume methods application in geometrically nonlinear stress analysis”. En: *Applied Mathematical Modelling* 24.7 (2000), págs. 439-455. ISSN: 0307-904X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(99\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(99)00047-5). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X99000475>.

- [23] Omar Faruk et al. "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010". En: *Progress in Polymer Science* 37.11 (2012). Topical Issue on Polymeric Biomaterials, págs. 1552-1596. ISSN: 0079-6700. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670012000391>.
- [24] Rikard Gebart. "Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM". En: *Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER* 26 (ago. de 1992), págs. 1100-1133. DOI: [10.1177/002199839202600802](https://doi.org/10.1177/002199839202600802).
- [25] A. Al-Hamdan et al. "Behaviour of core materials during resin transfer moulding of sandwich structures". En: *Materials Science and Technology* 16.7-8 (2000), págs. 929-934. DOI: [10.1179/026708300101508711](https://doi.org/10.1179/026708300101508711).
- [26] Youssef K. Hamidi y Cengiz M. Altan. "2.5 process-induced defects in resin transfer molded composites". En: *Comprehensive Composite Materials II* (2018), págs. 95-106. DOI: [10.1016/b978-0-12-803581-8.09902-1](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.09902-1).
- [27] Song Hee Han et al. "Study on high-speed RTM to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites". En: *Composite Structures* 119 (2015), págs. 50-58. ISSN: 0263-8223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.023>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822314004139>.
- [28] Frank Henning et al. "Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components". En: *Composites Science and Technology* 171 (2019), págs. 261-279. ISSN: 0266-3538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.12.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635381732434X>.
- [29] Arne Hindersmann. "Experimental investigation of a method to avoid channel marks during vacuum infusion". En: *Journal of Composite Materials* 54.16 (2019), págs. 2147-2158. DOI: [10.1177/0021998319889120](https://doi.org/10.1177/0021998319889120).
- [30] H. Jasak y H. G. Weller. "Application of the finite volume method and unstructured meshes to linear elasticity". En: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 48.2 (2000), págs. 267-287. DOI: [10.1002/\(sici\)1097-0207\(20000520\)48:2<267::aid-nme884>3.0.co;2-q](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0207(20000520)48:2<267::aid-nme884>3.0.co;2-q).
- [31] Amir Javidinejad. "FEA Practical Illustration of Mesh-Quality-Results Differences between Structured Mesh and Unstructured Mesh". En: *ISRN Mechanical Engineering* 2012 (jul. de 2012). DOI: [10.5402/2012/168941](https://doi.org/10.5402/2012/168941).
- [32] Qusai Jebur et al. "Characterisation and modelling of a transversely isotropic melt-extruded low-density polyethylene closed cell foam under uniaxial compression". En: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 226 (sep. de 2012), págs. 2168-2177. DOI: [10.1177/0954406211431528](https://doi.org/10.1177/0954406211431528).
- [33] Maya John. "Design and Manufacturing of Bio-Based Sandwich Structures". En: jul. de 2017, págs. 93-110. DOI: [10.1002/9781119441632.ch22](https://doi.org/10.1002/9781119441632.ch22).

- [34] Yeonhee Jung, Seung Jo Kim y Woo-Suck Han. “Numerical simulation of RTM process using the extended finite element method combined with the level set method”. En: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 32.5 (2013), págs. 308-317. DOI: [10.1177/0731684412474526](https://doi.org/10.1177/0731684412474526).
- [35] Muhammad Yasir Khalid et al. “Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications”. En: *Results in Engineering* 11 (2021), pág. 100263. ISSN: 2590-1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123021000645>.
- [36] J. Kozeny. *Über kapillare Leitung des Wassers im Boden: (Aufstieg, Versickerung u. Anwendung auf die Bewässerung) ; Gedr. mit Unterstützung aus d. Jerome u. Margaret Stonborsugh-Fonds*. Hölder-Pichler-Tempsky, A.-G. [Abt.:] Akad. d. Wiss., 1927. URL: <https://books.google.de/books?id=yERGGwAACAAJ>.
- [37] Florian Lindner. “Data transfer in partitioned multi-physics simulations interpolation and communication”. Tesis doct. 2019, pág. 37.
- [38] Andreas Lintermann. “Computational Meshing for CFD Simulations”. En: oct. de 2020, págs. 85-115. ISBN: 978-981-15-6715-5. DOI: [10.1007/978-981-15-6716-2_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6716-2_6).
- [39] Timothy E. Lipman y Petra Maier. “Advanced Materials Supply Considerations for Electric Vehicle Applications”. En: *MRS Bulletin* 46.12 (2021), págs. 1164-1175. DOI: [10.1557/s43577-022-00263-z](https://doi.org/10.1557/s43577-022-00263-z).
- [40] Oliver J. Maclaren et al. “The RTM-Light Manufacturing Process: Experimentation and Modelling”. En: 2009.
- [41] P.K. Mallick. “Chapter 6 - Thermoset matrix composites for lightweight automotive structures”. En: *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles (Second Edition)*. Ed. por P.K. Mallick. Second Edition. Woodhead Publishing in Materials. Woodhead Publishing, 2021, págs. 229-263. ISBN: 978-0-12-818712-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818712-8.00006-9>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128187128000069>.
- [42] A. Mamoune, A. Saouab y C. H. Park. “Simple models of CRTM process”. En: *International Journal of Material Forming* 1.S1 (2008), págs. 911-914. DOI: [10.1007/s12289-008-0244-4](https://doi.org/10.1007/s12289-008-0244-4).
- [43] *Mapping configuration*. URL: <https://precice.org/configuration-mapping.html>.
- [44] 3A Composites Core Materials. *TDS Airex T92 E 3101 - 3accorematerials.com*. 2020. URL: <https://www.3accorematerials.com/uploads/documents/TDS-AIREX-T92-E-01.2020.pdf>.
- [45] Bernard Miranda Campos et al. “Thermoplastic matrix-based composites produced by Resin Transfer Molding: A Review”. En: *Polymer Composites* 43.5 (2022), págs. 2485-2506. DOI: [10.1002/pc.26575](https://doi.org/10.1002/pc.26575).

- [46] Mária Mrázová. “Advanced composite materials of the future in aerospace industry”. En: *INCAS BULLETIN* 5 (sep. de 2013), págs. 139-150. DOI: [10.13111/2066-8201.2013.5.3.14](https://doi.org/10.13111/2066-8201.2013.5.3.14).
- [47] Gökdeniz Neşer. “Polymer Based Composites in Marine Use: History and Future Trends”. En: *Procedia Engineering* 194 (2017). 10th International Conference on Marine Technology, MARTEC 2016, págs. 19-24. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.111>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817332460>.
- [48] I.R. Oliveira et al. “Numerical Analysis of the resin transfer molding process via PAM-RTM Software”. En: *Defect and Diffusion Forum* 365 (2015), págs. 88-93. DOI: [10.4028/www.scientific.net/ddf.365.88](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.365.88).
- [49] Eugenio Oñate. “Introduction to the Finite Element Method for Structural Analysis”. En: ene. de 2009. ISBN: 978-1-4020-8732-5. DOI: [10.1007/978-1-4020-8733-2_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8733-2_1).
- [50] Eugenio Oñate, Miguel Cervera y O. Zienkiewicz. “Finite volume format for structural mechanics”. En: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 37 (ene. de 1994), págs. 181-201. DOI: [10.1002/nme.1620370202](https://doi.org/10.1002/nme.1620370202).
- [51] Mark Opitz, Dominic Bertling y Nico Liebers. “FAUST: MATERIAL CHARACTERIZATION OF LOW-COST FOAM MATERIALS UNDER REAL BOUNDARY PROCESS CONDITIONS FOR RTM LARGE-SCALE PRODUCTION”. En: *Technologies for economical and functional lightweight design*. Ed. por Klaus Dröder y Thomas Vietor. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, págs. 221-233. ISBN: 978-3-662-58206-0.
- [52] sang yoon Park et al. “A Comparison of the Properties of Carbon Fiber Epoxy Composites Produced by Non-autoclave with Vacuum Bag Only Prepreg and Autoclave Process”. En: *Applied Composite Materials* 26 (feb. de 2019). DOI: [10.1007/s10443-018-9688-y](https://doi.org/10.1007/s10443-018-9688-y).
- [53] Bisma Parveez et al. “Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review”. En: *Polymers* 14 (nov. de 2022), pág. 5007. DOI: [10.3390/polym14225007](https://doi.org/10.3390/polym14225007).
- [54] K.D. Potter. “The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications.” En: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 30.5 (1999), págs. 619-621. ISSN: 1359-835X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00179-1](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00179-1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X98001791>.
- [55] Precice. *preCICE schematic overview*. 2021. URL: <https://github.com/precice/precice.github.io/tree/master/material>.
- [56] *RTM light*. URL: <https://www.kutec-gmbh.at/v07/?sn=200&se22=2944#images>.
- [57] Felice Rubino et al. “Marine application of fiber reinforced composites: A Review”. En: *Journal of Marine Science and Engineering* 8.1 (2020), pág. 26. DOI: [10.3390/jmse8010026](https://doi.org/10.3390/jmse8010026).

- [58] Ideen Sadrehaghighi. *Mesh Assessment & Quality Issues*. Dic. de 2022.
- [59] Ideen Sadrehaghighi. *Structure Meshing for CFD*. Oct. de 2022.
- [60] Hermann F. Seibert. “Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures”. En: *Reinforced Plastics* 50.1 (2006), págs. 44-48. DOI: [10.1016/s0034-3617\(06\)70873-6](https://doi.org/10.1016/s0034-3617(06)70873-6).
- [61] Julian Seuffert. “Mold-filling Simulation of Resin Transfer Molding with Fluid-Structure Interaction”. Inglés. Tesis doct. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2022. 219 págs. DOI: [10.5445/IR/1000144393](https://doi.org/10.5445/IR/1000144393).
- [62] P. Simacek, Suresh Advani y Christophe Binetruy. “Liquid injection molding simulation (LIMS) a comprehensive tool to design, optimize and control the filling process in liquid composite molding”. En: *JEC-Compos* 8 (ene. de 2004), págs. 58-61.
- [63] A. Brent Strong. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, methods, and applications*. Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- [64] K. v. Terzaghi. “Erdbaumechnik : auf bodenphysikalischer Grundlage”. En.
- [65] Ahmed Thabet, Krishna Shankar y E. Morozov. “Insight into the shear behaviour of composite sandwich panels with foam core”. En: *Materials & Design* 50 (sep. de 2013), págs. 92-101. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.03.016](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.016).
- [66] Benjamin Uekermann et al. “Official preCICE Adapters for Standard Open-Source Solvers”. En: *Proceedings of the 7th GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia*. Oct. de 2017.
- [67] N. Vernet et al. “Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II”. En: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 61 (2014), págs. 172-184. ISSN: 1359-835X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.02.010>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X14000505>.
- [68] Adil Wazeer et al. “Composites for electric vehicles and automotive sector: a review”. En: *Green Energy and Intelligent Transportation* 2.1 (2023), pág. 100043. ISSN: 2773-1537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100043>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773153722000433>.
- [69] H. G. Weller et al. “A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques”. En: *Computers in Physics* 12.6 (1998), pág. 620. DOI: [10.1063/1.168744](https://doi.org/10.1063/1.168744).
- [70] Stephen Whitaker. “Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy’s law”. En: *Transport in Porous Media* 1 (1986), págs. 3-25.
- [71] Felipe Wolff-Fabris, Hauke Lengsfeld y Johannes Krämer. “Prepregs and their precursors”. En: *Composite Technology* (2015), págs. 11-25. DOI: [10.3139/9781569906002.002](https://doi.org/10.3139/9781569906002.002).

- [72] Changlei Xia et al. "Property enhancement of kenaf fiber composites by means of vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM)". En: *Holzforschung* 69.3 (2014), págs. 307-312. DOI: [10.1515/hf-2014-0054](https://doi.org/10.1515/hf-2014-0054).
- [73] Anita Zade, Pakala Shyamprasad y Raghu Raja Pandiyan Kuppusamy. "Finite element modelling of non-isothermal curing kinetics for resin transfer moulding process". En: *Materials Today: Proceedings* 47 (2021). International Conference on Sustainable materials, Manufacturing and Renewable Technologies 2021, págs. 5281-5288. ISSN: 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.695>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321043327>.
- [74] Dan Zenkert. *An introduction to sandwich construction*. Engineering Materials Advisory Services, 1997.
- [75] Ce Zhang et al. "Study on curing deformation of composite thin shells prepared by M-CRTM with adjustable injection gap". En: *Polymers* 14.24 (2022), pág. 5564. DOI: [10.3390/polym14245564](https://doi.org/10.3390/polym14245564).
- [76] Zoltek. *Technical datasheet zoltek™ Px35 uni-directional fabrics*. URL: https://zoltek.com/wp-content/uploads/2017/09/TDS_PX35_Uni-Directional_Fabric.pdf.

Índice de figuras

1.	Emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero, enviadas por los países a la UNFCCC y al Mecanismo de Seguimiento de los Gases de Efecto Invernadero de la UE (Estados miembros de la UE).(2021). [1]	9
2.	Concepto de Estructura tipo Sándwich. [11]	12
3.	Concepto de materiales compuestos reforzados con fibras. [63]	14
4.	Diagrama esquemático del proceso de Moldeo por Transferencia de Resina. [2]	16
5.	Dibujo esquemático del proceso VIPR. [29]	17
6.	Esquema del proceso FASTRAC. [5]	18
7.	Esquema del proceso LRTM. [56]	19
8.	Dibujo esquemático del proceso SRIM. [41]	19
9.	Esquema del proceso CRTM. [12]	20
10.	Comportamiento del flujo multiescala durante el llenado del molde en el proceso RTM. [28]	23
11.	Componente RTM tipo sándwich fabricada por Seuffert en los experimentos de validación. [61]	38
12.	Geometría, posición de entrada y salida de resina para el caso de estudio: participante fluido en gris oscuro y participante sólido en gris claro. [61]	39
13.	Dimensiones finales del componente RTM tipo sándwich fabricado por Seuffert en los experimentos de validación.	39
14.	Vista general esquemática de la biblioteca de acople preCICE para FSI.[55]	44

15.	Esquema de acople FSI para modelar la fabricación de componentes RTM tipo sándwich por Seuffert. [61]	45
16.	Modelo 2D base usado para el participante Fluido.	46
17.	Plan de estudio de convergencia para el Fluido y distribución específica de elementos para cada malla.	47
18.	Vista frontal de las mallas del estudio de convergencia realizado para el Fluido incluyendo los diferentes niveles de refinamiento de cada una.	47
19.	Vista isométrica de las mallas del estudio de convergencia realizado para el Fluido incluyendo los diferentes niveles de refinamiento de cada una.	48
20.	Perfil de presión a lo largo del eje X para cada malla.	51
21.	Error relativo del perfil de presión a lo largo del eje X para cada malla.	51
22.	Línea de referencia de donde se obtuvieron los valores de presión.	51
23.	Error relativo máximo del perfil de presión a lo largo del eje X en función del número de elementos.	52
24.	Modelo 2D base desarrollado para el participante Sólido.	53
25.	Plan de estudio de convergencia para el participante Sólido y distribución específica de elementos para cada malla.	54
26.	Vista frontal de las mallas creadas para el estudio de convergencia de participante Sólido con sus respectivos grados de refinamiento.	55
27.	Magnitud de las fuerzas calculadas en el caso de prueba acoplado.	57
28.	Configuración de las condiciones de frontera en CalculiX para la simulación desacoplada del Sólido con 1350 elementos.	60

29.	Representación esquemática de los desplazamientos en las superficies de la interfaz.	61
30.	Extracción de datos de los nodos de la superficie superior de la interfaz.	62
31.	Error relativo de los desplazamientos de la superficie superior en la dirección del eje Z en función del número de elementos.	62
32.	Extracción de datos de los nodos de la interfaz de la superficie a 45 grados.	63
33.	Error relativo de los desplazamientos en la dirección del eje Y para la superficie de 45 grados en función del número de elementos.	63
34.	Error relativo de los desplazamientos en la dirección del eje Z para la superficie de 45 grados en función del número de elementos.	64
35.	Extracción de datos de los nodos de la superficie inferior de la interfaz.	64
36.	Error relativo de los desplazamientos en la dirección del eje Z para la superficie inferior en función del número de elementos.	65
37.	Promedio de los desplazamientos [m] frente al tiempo [s] en la dirección del eje Z sobre la superficie superior del Sólido con 1350 elementos.	66
38.	Promedio de los desplazamientos [m] frente al tiempo [s] en la dirección del eje Y sobre la superficie superior del Sólido con 1350 elementos.	66
39.	Línea de tendencia del promedio general realizado a partir de la media de los desplazamientos [m] frente al tiempo [s] en la dirección del eje Z sobre la superficie superior del Sólido con 6250 elementos.	67

40.	Comparación de la prueba de convergencia con el doble de elementos en Z e Y.	68
41.	Vista frontal de la malla acoplada empleada para el estudio de optimización de la configuración del solver.	70
42.	Comparación entre el mapeo Nearest-Neighbor y Nearest-Projection. [43]	72
43.	Comparación del perfil de presión entre las distintas simulaciones realizadas para optimizar la configuración del solver.	74
44.	Comparación del error relativo del perfil de presión a lo largo del eje X entre las distintas simulaciones realizadas para optimizar la configuración del solver.	75
45.	Plan de estudio de convergencia final acoplado y número total de elementos de los mallados empleados.	76
46.	Vista frontal de los mallados utilizados en el estudio de convergencia acoplado y su grado de refinamiento correspondiente. . .	76
47.	Posiciones de los sensores de presión en la herramienta RTM - Todos los sensores excepto p6 estaban situados en la parte inferior del molde. [61]	78
48.	Perfil de presión a lo largo del eje X para cada estudio de malla acoplado.	79
49.	Error relativo del perfil de presión a lo largo del eje X para cada estudio de malla acoplada.	80
50.	Error relativo de los desplazamientos horizontales promedio sobre la superficie de 45° en la dirección del eje Y en función del tiempo para cada estudio de malla acoplado (hasta los 18 segundos de tiempo de llenado del molde).	81

51. Error relativo de los desplazamientos verticales promedio sobre la superficie de 45° en la dirección del eje Y en función del tiempo para cada estudio de malla acoplado (hasta los 18 segundos de tiempo de llenado del molde). 81
52. Perfil del frente de flujo para aproximadamente un tercio del tiempo de llenado del molde. 82
53. Diagrama conceptual para vincular conceptos. 83

Índice de Tablas

1.	Parámetros más relevantes para el estudio del proceso FSI. . . .	36
2.	Parámetros de calidad de malla más relevantes para el estudio del Fluido.	48
3.	Parámetros de simulación más relevantes para el estudio del participante Fluido.	49
4.	Tiempos de simulación para los distintos mallados del participante Fluido desacoplado.	52
5.	Parámetros de calidad de malla más relevantes para el estudio del participante Sólido.	56
6.	Cálculo de fuerzas equivalentes.	59
7.	Parámetros más relevantes utilizados en el método de acoplamiento para el estudio de optimización de recursos.	73
8.	Tiempos de simulación obtenidos en los distintas simulaciones realizadas para optimizar la configuración del solver.	74
9.	Parámetros de calidad de malla más relevantes para el estudio del caso acoplado.	77
10.	Resultados y tiempos de simulación para los casos acoplados. . .	79
11.	Resultados de los desplazamientos para los casos acoplados. . . .	82