



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SIMULACIÓN DE LA COLADA GRAVITACIONAL MEDIANTE PAQUETERÍA DE
ELEMENTO FINITO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A :

ALAN RODRIGO SAUCEDO OSORNO

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. EDGAR ISAAC RAMÍREZ DÍAZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

2013

Agradecimientos

A mi madre Gabriela y mi abuela Adda por todo el apoyo, tolerancia, paciencia, cuidados, enseñanzas, atenciones e innumerables gestos de consejo y guía que han tenido para conmigo hasta este momento de mi vida. Por todo esto y todo aquello que este olvidando muchas gracias.

A mi director de tesis M. en C. Edgar Isaac Ramírez Díaz por la paciencia, apoyo, consejos y ánimos brindados durante todo el tiempo que he trabajado bajo su tutela, así como por los conocimientos y la guía que me mostro para tener una nueva forma de pensamiento y ser mejor persona.

Al proyecto PAPIME PE100113 "Manual de prácticas para el laboratorio de modelado de procesos de manufactura 2", ya que sin este no hubiera logrado trabajar con un equipo de cómputo adecuado para la realización de este proyecto.

A mis sinodales: Dr. Armando Ortiz Prado, Dr. Rafael Schouwenaars, Dr. Fernando Velázquez Villegas y Mtro. Osvaldo Ruiz Cervantes, por todas las aportaciones, críticas y consejos que hicieron para la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad de tener estudios de licenciatura de forma libre y multidisciplinaria. Y a la Facultad de Ingeniería en la cual tuve la oportunidad de desarrollar muchas habilidad y adquirir algún conocimiento para mi vida futura.

Índice

Portada.....	1
Índice	3
Prólogo.....	5
Capítulo 1 Fundición.....	7
1.1 Introducción	7
1.1.1 Colada por gravedad	8
1.2 Análisis de flujo	10
1.2.1 Teorema de Bernoulli.....	10
1.2.2 Conservación de la masa.....	11
1.2.3 Parámetros adimensionales.....	13
1.3 Diseño de molde para colada por gravedad	16
1.3.1 Consideraciones en el diseño de lingoteras permanentes para colada por gravedad	17
1.4 Defectos en las piezas solidificadas.....	19
1.5 Ensayo patrón usado para la validación de simulaciones de colada.	19
1.5.1 Procedimiento	21
1.5.2 Resultados a comparar con la simulación.....	21
Capítulo 2 Simulación computacional de fluidos en cavidades.....	25
2.1 Introducción	25
2.2 Paqueterías y códigos empleados para el análisis de fundición	27
2.3 Modelos numéricos del llenado de cavidades	29
2.3.1 "Modelado de flujo de fluido"	29
2.3.2 Técnica MAC "Highlights".....	31
2.4 Manejo de fluidos en ABAQUS® "Interacción fluidos-estructuras (FSI)"	33
2.5 Análisis acoplado Euleriano-Lagrangiano en ABAQUS®6.12.....	36
2.5.1 Flujo del material en el dominio euleriano	36
2.5.2 Capacidades del dominio euleriano	37
2.5.3 Limitaciones del dominio euleriano	44
2.6 Manejo del CEL en ABAQUS®6.12.....	45
Capítulo 3 Modelado del proceso de colada por gravedad en ABAQUS®.....	53
3.1 Introducción	53

3.2	Modelo general	53
3.3	Planteamiento del problema	54
3.3.1	Geometría	54
3.3.2	Propiedades del material	58
3.3.3	Pasos definidos en el modelo.....	60
3.3.4	Condición de contacto.....	61
3.3.5	Cargas, restricciones e inicializaciones aplicadas al modelo.....	63
3.3.6	Definición de mallas	67
Capítulo 4	Resultados	73
4.1	Introducción	73
4.2	Análisis de la interacción FSI	73
4.2.1	Efecto de la condición de contacto y la onda de choque.....	73
4.2.2	Fuerza de reacción	79
4.3	Economía computacional.....	82
4.3.1	Escalamiento artificial de la velocidad	83
4.3.2	Seguimiento del material por el dominio euleriano	84
4.4	Validación mediante el comportamiento de las superficies libres	88
4.5	Llenado.....	93
4.5.1	Llenado del modelo "Benchmark Test"	93
4.5.2	Llenado del modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni".....	101
Capítulo 5	Conclusiones.....	107
Bibliografía	110
Mesografía	112

Prólogo

En la industria todos los metales inician su vida útil como planchas o lingotes obtenidos mediante el proceso de colada que requiere buen control en el flujo del metal en estado líquido, para disminuir la presencia de defectos y asegurar la calidad de las piezas finales. El estudio analítico de este proceso presenta limitaciones en la predicción del comportamiento del metal fundido en zonas específicas de los moldes. Para mejorar el proceso se recurre a las visualizaciones de la colada mediante radiografías o en modelos transparentes de los moldes que se requieren estudiar, lo que implica mayor costo y tiempo de proceso. Por ello, la simulación de la interacción entre sólidos y fluidos cobra importancia, sin embargo este tipo de análisis presenta complicaciones al requerir recursos computacionales y tiempos de cálculo elevados, esto se justifica pues la predicción de las simulaciones es precisa y los resultados obtenidos involucran varias variables físicas.

La mayoría de las simulaciones del proceso de colada se realizan en paqueterías de “Dinámica de fluidos asistida por computadora” (CFD) y se enfocan principalmente a la obtención de la distribución de presión, velocidad y temperatura. En este trabajo se presentan dos modelos para simular el llenado de moldes permanentes en una paquetería de elemento finito de propósito general que además de obtener los resultados ofrecidos por los códigos CFD permite observar el desplazamiento del fluido para predecir la formación de burbujas y las zonas con mayor probabilidad de presentar defectos debidos a la interacción con el molde.

Con la generación de estos modelos se definió una nueva herramienta eficiente para el estudio del comportamiento de fluidos mediante la implementación de un dominio euleriano, así como plantea la posibilidad de usar la capacidad de este tipo de dominios para la simulación de fenómenos que involucren deformación severa, flujo de material e incluso impactos. Al ser una herramienta nueva requiere validación que se realiza mediante la comparación de los resultados obtenidos de un ensayo experimental diseñado para el estudio del flujo de material en una cavidad definida y con imágenes de alta velocidad para determinar la exactitud de las superficies libres que ofrece la simulación.

Este trabajo está integrado por cinco capítulos en los cuales se abordan los temas de la siguiente forma.

El primer capítulo trata sobre los principios básicos del proceso de colada por gravedad, moldes usados para este proceso, la forma en que se realiza el llenado de estos y los fundamentos para diseñarlos. También se revisa la forma en que se realiza el análisis del flujo de los metales fundidos al ingresar al molde y qué variables son relevantes para el estudio de este proceso, así como el planteamiento de la validación experimental “Benchmark Testing the Flow and Solidification Modeling of Al Castings (Benchmark Test)” (Campbell, 1996) para paqueterías de elemento finito usadas en el análisis del proceso de colada por gravedad.

El segundo capítulo trata de los modelos numéricos que se han aplicado al estudio del llenado de moldes, como funcionan y como plantean el seguimiento y descripción de las superficies libres del fluido, además se presenta una revisión de modelos que involucran la interacción sólido-fluido en la paquetería ABAQUS®6.12 y se describe el uso, aplicaciones, capacidades y límites de los análisis “Acoplados Eulerianos-Lagrangianos” (CEL).

El tercer capítulo muestra el planteamiento de los modelos “Benchmark Test” y “Lingotera para aleación Cu-Al-Ni”, se describen las geometrías usadas, el material usado y el método para su aplicación en el dominio euleriano, la implementación de la interacción entre los dominios sólido y fluido, así como el mallado empleado para obtener un modelo adecuado.

El cuarto capítulo muestra los resultados obtenidos de los modelos realizados, la validación de estos mediante la comparación con los datos experimentales del ensayo “Benchmark Test” (Campbel, 1996) y con imágenes de alta velocidad del comportamiento de fluidos reales (Olando, 2010 y MIT, 2012).

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados y algunas recomendaciones para el planteamiento de modelos que incluyan la interacción sólido-fluido, así como para realizar mejoras a los modelos presentados en trabajos futuros.



Capítulo 1 Fundición

1.1 Introducción

Los procesos de fundición consisten en verter un metal fundido en el interior de un molde y la posterior solidificación de este, provocando que el metal ya solidificado reproduzca la geometría interna del molde; dicha geometría puede ser simple y simétrica o bien con formas muy complejas. Las formas complejas permiten la generación de cavidades o superficies internas en la pieza que se obtendrá al final del proceso.

El proceso de fundición permite manipular materiales que otros procesos no pueden, así como también obtener a bajo costo una gran diversidad de piezas con tamaños y formas que otros procesos no pueden conseguir.

Las piezas obtenidas por medio de fundición varían notablemente sus propiedades según la transferencia de calor, la solidificación, el flujo del metal fundido al ingresar al molde y el material del cual está hecho el molde o la pieza. Ya que el molde controla la mayoría de las propiedades del metal fundido, tanto en estado líquido como sólido, el proceso de fundición se clasifica según el material y tipo de molde, por ejemplo desechables y permanentes, los primeros son de materiales que pueden disgregarse para extraer la pieza solidificada como: el yeso, arena o algún tipo de cerámica específica que sea inerte en presencia del material que se está fundiendo. Por el otro lado están los permanentes, los cuales deben de ser buenos conductores térmicos para permitir una determinada velocidad de enfriamiento e impactar directamente en la microestructura, este tipo de moldes suelen fabricarse con acero o grafito (dependiendo del metal fundido) (López, 2011).

Sin importar el tipo de molde del que se trate, en el proceso de fundición siempre se tiene por objetivo vaciar el metal fundido a un cavidad para que este adopte la forma deseada, lo que implica que en cada colada convencional o por gravedad se encuentran los siguientes elementos:

- a) Metal Fundido: material que se quiere conformar.
- b) Bebedero: zona por la que el metal fundido debe ingresar, se diseña para asegurar un flujo laminar.
- c) Molde: pieza o piezas solidas que reciben el metal fundido y definen la forma de la pieza solidificada.
- d) Canal de colada: canal por el que el metal fundido viaja para llenar la cavidad del molde.
- e) Mazarota: cavidad usada ocasionalmente en moldes para fundición que previenen cavidades por contracción térmica.
- f) Molde: material que contendrá al metal fundido.
- g) Cavidad dentro del molde: perfil que se desea obtener del proceso.
- h) Cuchara de vertido: recipiente que transporta y vierte el metal al molde.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

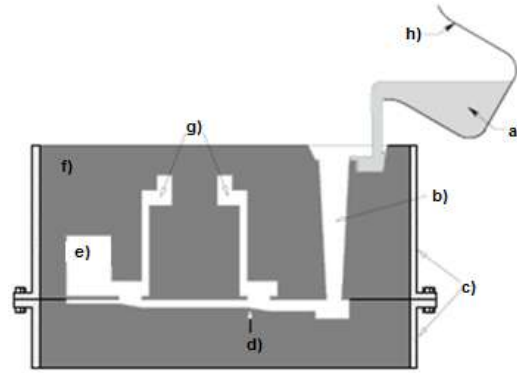


Imagen 1.1 Esquema del proceso de fundición por colada por gravedad (López, 2011).

1.1.1 Colada por gravedad

El proceso de colada por gravedad para moldes permanentes es el mismo que para el llenado de moldes de arena. La única asistencia que se tiene en este tipo de llenado es la gravedad, ya que simplemente se usa el peso del líquido para que se almacene en el bebedero del molde y llene todas las cavidades que se han dispuesto para ello. Este proceso es lento ya que depende del flujo natural del metal, sin embargo permite la manufactura de piezas con perfiles diversos y casi en su forma final.

Al tener el flujo impulsado únicamente por la gravedad, la viscosidad del metal es una variable importante, ya que si el metal presenta una viscosidad elevada no llenará las cavidades completamente o con el suficiente detalle que se requiere, por esto es necesario evaluarla, lo cual se consigue introduciendo el concepto de fluidez. Este concepto se define como la capacidad del metal fundido para llenar el molde antes de solidificarse y es determinado mediante ensayos (Lopez, 2011). Dichos ensayos surgen de la necesidad de caracterizar el proceso de fundición a pesar de la existencia de efectos desconocidos durante la colada, de esta forma es posible hacer comparaciones cuantitativas entre diversos materiales, con el debido cuidado de establecer las condiciones del ensayo de forma rigurosa y clara para que pueda ser repetido (Schey, 2000)

Imagen 1.2.

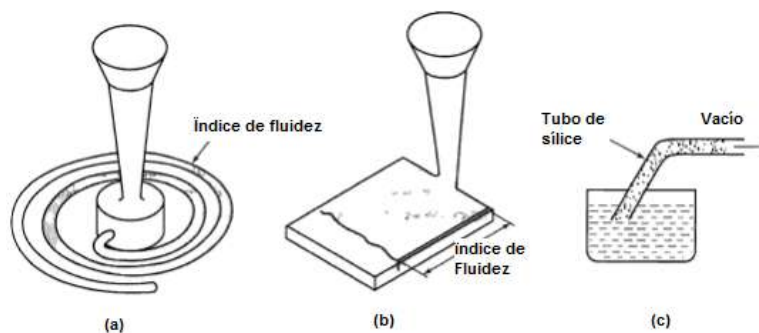


Imagen 1.2 Ensayos tecnológicos comunes para la obtención de la fluidez, a) molde espiral, b) molde en forma de placa y c) extracción por vacío.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Los ensayos mostrados en la *Imagen 1.2* consisten en la creación de una cavidad en forma de espiral o en forma de placa en el material del molde estudiado para determinar la fluidez en forma de un índice, el cual es determinado por la longitud recorrida por el metal fundido en la cavidad. En otros casos se expresa la fluidez bajo condiciones de llenado al vacío (succión del metal fluido).

La fluidez se ve afectada por las características del metal fundido y los parámetros del vaciado, estas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1.1 Variables asociadas al material que afectan la fluidez durante la colada por gravedad (Kalpakjian, 2002).

Elemento del proceso	Variable de interés	Descripción
Metal fundido	Viscosidad	Es inversamente proporcional a la fluidez, debido a la disminución de esta con la temperatura.
	Tensión superficial	A mayor tensión superficial, menor fluidez, se debe principalmente a la formación de óxido (en forma de película) en el frente de colada. La existencia del óxido puede triplicar la tensión superficial (Se observa en el aluminio).
	Inclusiones	La fluidez es directamente proporcional a la cantidad de inclusiones presentes, se observa que al estar estas presentes actúan como puntos de nucleación y aceleran el proceso de solidificación.
	Patrón de solidificación de la aleación	La fluidez es inversamente proporcional al rango de solidificación, es mayor en rango corto como en metales puros o eutécticos, pero menor en rango largo como en soluciones sólidas.

Tabla 1.2 Variables asociadas al vaciado que afectan la fluidez durante la colada por gravedad (Kalpakjian, 2002).

Elemento del proceso	Variable de interés	Descripción
Parámetros del vaciado	Diseño del molde	Longitud de los canales de alimentación, diámetros, reducciones, cambios de dirección afectan la formación de óxidos y el régimen en el que se encuentra el fluido (se debe procurar que sea siempre laminar).
	Material del molde y características superficiales.	La fluidez es inversamente proporcional a la conductividad térmica del molde y rugosidad de la superficie interna del mismo. Si la conductividad térmica es muy baja la solidificación es lenta y forma granos grandes.
	Grado de supercalentamiento	Se define como el incremento de la temperatura de fusión o liquidus. Esto retrasa la solidificación y mejora la fluidez, a costa de un mayor consumo de energía.
	Velocidad de vaciado	Es directamente proporcional a la fluidez, sin embargo se limita por la condición de conseguir el régimen laminar en el molde.
	Transferencia de calor	Las direcciones y velocidades de transferencia de calor deben ser homogéneas para asegurar una fluidez, ya que si comienza la solidificación en diferentes puntos la fluidez disminuye.



Además de las propiedades del material del molde y las características del vaciado, la variable más importante es el calentamiento por encima del punto de fusión o liquidus, también se conoce como sobrecalentamiento. Con el sobrecalentamiento se traen consecuencias, por ejemplo elevar la oxidación del metal y absorción de aire, así como causar erosión en las superficies del molde. Todo esto disminuye la calidad de la pieza solidificada, así como más energía que representa mayor costo.

Para llegar a la temperatura de sobrecalentamiento requerido para el vaciado, se debe conocer cuanta energía se requiere suministrar, para ello se utiliza un balance de calor como sigue (Groover, 2010):

Calor requerido = Calor sensible del metal sólido + Calor latente de fusión + Calor de sobrecalentamiento

Ecuación 1.1

$$H = \rho V \{ C_s (T_m - T_0) + H_f + C_L (T_p - T_m) \}$$

Donde H es el calor requerido para el vaciado [J], ρ es la densidad del fluido [kg/m^3], V es el volumen del metal calentado [m^3], C_s es el calor específico del metal sólido [$\text{J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$], T_m es la temperatura de fusión [$^\circ\text{C}$], T_0 temperatura inicial del metal [$^\circ\text{C}$], H_f calor de fusión [J/Kg], C_L calor específico del metal líquido [$\text{J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$], T_p temperatura de vaciado [$^\circ\text{C}$].

Cuando la temperatura de vaciado se ha alcanzado se realiza la colada dentro del molde, este es un paso crítico ya que el metal debe ocupar toda la cavidad antes de solidificarse, así que para asegurar esto se debe controlar cuidadosamente la temperatura, es decir que no disminuya (respecto a lo conseguido por el calentamiento en el horno), la velocidad del vaciado debe ser de tal modo que consiga un llenado completo y mantenga el régimen laminar, ya que si el flujo es turbulento se presenta la formación de óxidos, aumenta la erosión del molde debido a un impacto más severo a causa de un flujo con más energía, por tener una densidad mayor que otros materiales fluidos (son fluidos en condiciones ambientales) y presentar una reactividad química mayor por tener energía adicional debida a la temperatura y al régimen en el que se encuentre el flujo (Groover, 2010).

1.2 Análisis de flujo

Debido a los problemas anteriores se debe hacer un análisis ingenieril sobre el llenado, asegurar las condiciones ya mencionadas, para esto se usan dos principios físicos bien conocidos: el primero es el teorema de Bernoulli y el segundo es la conservación de masa.

1.2.1 Teorema de Bernoulli

Es un teorema que se basa en la conservación de la energía, específicamente la energía por cualquier medio observable en un fluido, como la presión, velocidad, la elevación del fluido y las pérdidas por fricción según la Ecuación 1.2 (White, 2008):



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Ecuación 1.2

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante}$$

Donde h es la elevación medida desde el punto de referencia, p es la presión a dicha elevación, v es la velocidad del líquido y g es la gravedad. Así aplicada a un punto del sistema se puede igualar la constante del estado uno y del estado dos, lo que deriva en la siguiente forma del teorema de Bernoulli:

Ecuación 1.3

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f$$

Cabe destacar que en la Ecuación 1.3 aparece un nuevo término " f ", este indica la pérdida por fricción en el líquido al moverse en el sistema, este término debe considerar las pérdidas de energía en las interfaces líquido-pared del molde y turbulencia en el líquido.

1.2.2 Conservación de la masa

En el proceso de colada se tiene un líquido, que es un fluido incompresible. Además en los moldes permanentes las paredes son de metal (y en ocasiones con recubrimiento interno), así que son impermeables al metal líquido; lo que obliga a que todo el fluido que entre en el bebedero se conserve durante todo el recorrido y si la velocidad de colada es constante la cantidad de material que pasa por la misma zona en el mismo incremento de tiempo (Gasto, Q) sea el mismo, dejando una relación como la siguiente (White, 2008):

Ecuación 1.4

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Donde A es el área transversal de la zona que se esté estudiando.

Para poder realizar modificaciones convenientes a la Ecuación 1.3 y Ecuación 1.4 se usa el siguiente esquema para plantear el sistema de referencia y la forma en que se miden las variables indicadas en dichas ecuaciones.

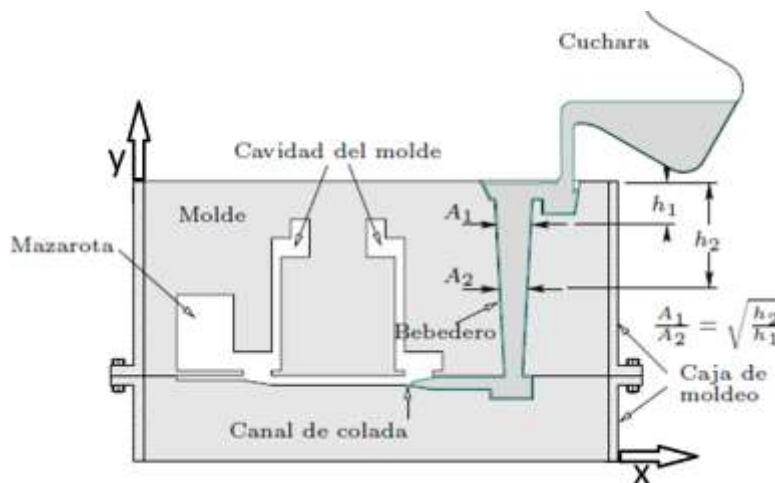


Imagen 1.3 Esquema de colada general, se representa gráficamente el cambio de área del bebedero (López, 2011).



Simulación del proceso de colada por gravedad
mediante paquetería de elemento finito



Usando como referencia la *Imagen 1.3*, partiendo de la **Ecuación 1.3** y considerando que el cambio de presión en la parte superior del bebedero (donde se inicia la medición de h_1) y en la parte inferior es despreciable (pozo del bebedero), que la longitud del bebedero provoca una pérdida por fricción despreciable y por lo tanto el término f se pueda despreciar. Siguiendo el sistema de referencia en la parte superior del bebedero, se llega a que $\Delta h = h_1 - h_2$ es la longitud recorrida por el fluido, al despejar el cambio de velocidad se llega a la ecuación de Torricelli:

Ecuación 1.5
$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2) + v_1^2}$$

La Ecuación 1.5 indica que v_2 depende de la altura y velocidad con la que se haya comenzado a mover el fluido, al aplicar la Ecuación 1.5 a la Ecuación 1.4, ahora considerando un punto inicial y uno final con altura y áreas arbitrarias, denotadas por los índices i para inicial y f para final, el principio de continuidad toma la siguiente forma (Kalpakjian, 2002).

Ecuación 1.6
$$A_i \sqrt{2gh_i} = A_f \sqrt{2gh_f} \rightarrow \frac{A_i}{A_f} = \sqrt{\frac{h_f}{h_i}}$$

En la industria se acostumbra usar bebederos de sección regular para una fácil maquinado, es decir áreas de sección circular, así que al considerar el área inicial y final como circulares en la *Imagen 1.3*, se llega a la siguiente relación.

Ecuación 1.7
$$\pi r_f^2 = \pi r_i^2 \sqrt{\frac{h_i}{h_f}} \rightarrow r_f^2 = r_i^2 \sqrt{\frac{h_i}{h_f}} \rightarrow r_f = r_i \sqrt[4]{\frac{h_i}{h_f}}$$

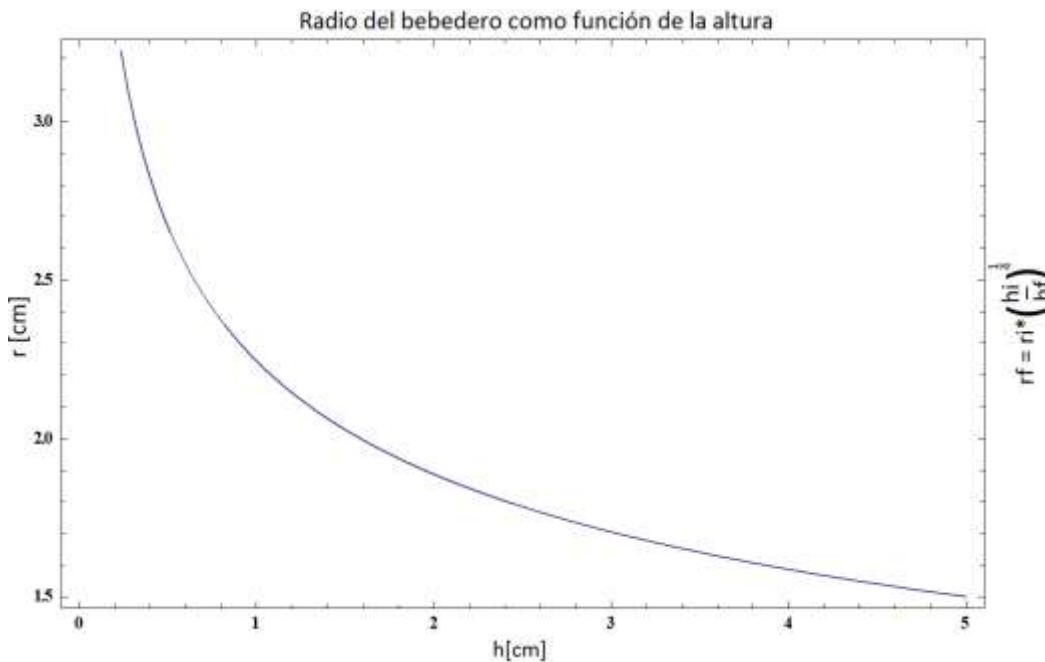


Imagen 1.4 Gráfica de la ecuación 1.8, para cuando el radio inicial del bebedero es 1.5 [cm], la altura medida desde la copa de recepción (con radio continuo) hasta el inicio del bebedero de 5 [cm] y 15 [cm] de longitud de bebedero (Datos hipotéticos para visualizar la progresión del radio).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Con los datos anteriores se observa que el bebedero debe ser ahusado, es decir que el área se reduce con forme el metal acelera, esto asegura que el flujo del metal no absorba aire, evitando así oxidación interna al flujo. Por otro lado el seguir la Ecuación 1.7 se garantiza que el gasto volumétrico del fluido sea el mismo en el inicio como en el fondo del bebedero.

Assumiendo que el canal de colada como el de la *Imagen 1.3* es horizontal, y que el gasto volumétrico del metal sigue constante debido a las condiciones planteadas en el bebedero, se puede estimar que el tiempo de llenado de la cavidad es (Groover, 2010):

Ecuación 1.8

$$t_c = \frac{V}{Q}$$

Donde t_c es el tiempo de llenado del molde, V es el volumen de la cavidad del molde y Q es el gasto volumétrico. Solo se debe considerar que al despreciar las pérdidas por fricción y el cambio de presión hidrostática, así como la constricción del flujo en el sistema de vaciado, la Ecuación 1.8 predice el tiempo mínimo teórico de llenado, en la realidad este será mayor y dependerá de las condiciones de fluidez que ya se han descrito, por ello en diseños nuevos o al usar nuevas aleaciones se debe experimentar antes de preparar la colada definitiva.

1.2.3 Parámetros adimensionales

El flujo se debe mantener laminar, como ya se mencionó y la herramienta que se tiene para este tipo de determinación es el número de Reynolds, el cual es un número adimensional que relaciona las fuerzas viscosas y la inercia, este número es (Falkovich, 2011):

Ecuación 1.9

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu}$$

Donde v es la velocidad del líquido, D el diámetro del canal o el diámetro hidráulico de la cavidad que este llenando, ρ es la densidad y μ la viscosidad del líquido, (aplica para flujos incompresibles). Mientras más elevado sea este número mayor turbulencia habrá en el flujo, en sistemas de alimentación ordinarios un $Re = 2000$, es límite superior del régimen laminar y hasta $Re = 20000$ es un régimen transitorio, aun en este régimen el flujo metálico no erosiona la cavidad por donde viaja, tanto para el molde como para el metal líquido. Si se llega al régimen turbulento el aire se atrapa en mayor cantidad generando óxidos, además la turbulencia mezcla los óxidos formados por el aire absorbido, degradando la pieza solidificada, al crear porosidad, inclusiones y discontinuidades en el metal. Los métodos comunes para evitar este fenómeno, es mediante la eliminación de cambios súbitos en la dirección del flujo y uso de geometrías suaves en las secciones transversales del canal en el diseño del sistema de alimentación (Kalpakjian, 2002).

Como consecuencia de la velocidad que desarrolla el fluido se pueden llegar a condiciones especiales, como por ejemplo el bloqueo o las pérdidas por fricción (una consecuencia más del flujo en régimen turbulento).

El análisis primario que se realiza son las pérdidas por fricción ya que pueden significar el uso de un material con menos rugosidad superficial, que puede ser incongruente con las características



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



de rigidez o transferencia de calor requerido en el material del molde, dicho estudio se realiza mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, la cual describe una pérdida en longitud, es decir el equivalente de ducto extra que se requerirá para crear la misma caída de presión en condiciones laminares (White, 2008).

Ecuación 1.10

$$h = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad \text{o} \quad \frac{fL}{D} = \frac{h}{\frac{v^2}{2g}}$$

Donde h es la pérdida en unidades de longitud, f es el factor de fricción propio del material por el cual viaja el fluido, L es la longitud del tramo analizado.

Todas las variables mencionadas se pueden determinar experimentalmente y por mediciones, excepto el término f de fricción, sin embargo al ser la constante de ajuste se puede despejar una vez medidos los demás parámetros, para así caracterizar una geometría o una superficie a usar en el molde.

Los experimentos indican que para flujo turbulento las pérdidas de carga varían según la **Ecuación 1.10** y además con la rugosidad de la superficie, la densidad y viscosidad del fluido, así como independencia respecto a la presión. Por estas observaciones se concluye que el parámetro f no se comporta como una constante, sino que es una función de las propiedades mencionadas y que no están especificadas en la Ecuación 1.10 (White, 2008).

$$f = f(v, F, \rho, \mu, \varepsilon, \varepsilon', m)$$

Donde F son las fuerzas de cuerpo que actúan en el fluido ε la rugosidad superficial y ε' es la rugosidad relativa, así como m es un factor de forma asociado a la geometría de las protuberancias que proveen la rugosidad, reacomodando las variables en términos adimensionales (por definición el factor es adimensional) dejan al factor f como:

$$f = f\left(\frac{vD\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{\varepsilon'}{D}, m\right)$$

Esta relación solo se ha podido comprobar de manera experimental, lo que ha dado la capacidad de un entendimiento básico de rugosidades artificiales que ha permitido aproximar de forma eficiente a ductos de rugosidades naturales, para tubos comerciales o rugosidades homogéneas, como el caso de metales maquinados o extruidos, se aplica el diagrama de Moody que es la representación gráfica del factor de fricción como función del Reynolds y la rugosidad relativa, es decir la grafica de la ecuación de Colebrook **Ecuación 1.11**, para régimen turbulento y la de Hagen-Poiseuille **Ecuación 1.12**, para régimen laminar (White, 2008).

Ecuación 1.11

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 1.12

$$f = \frac{64}{Re}$$



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Las pérdidas de carga causadas por el ducto mismo no son las únicas, cualquier accesorio, cambio de sección o cualquier modificación a la zona por donde viaja el fluido causa un cambio en el campo de velocidades y afecta directamente la presión, pudiendo causar una pérdida lo suficientemente importante como para detener el fluido. Para determinar la pérdida de carga causada por los accesorios se recurre a métodos experimentales; a excepción de una expansión brusca en la línea de flujo, la cual siempre se presenta al final de la línea de alimentación a la cavidad principal del molde. Este tipo de descarga también se ha modelado como salida de tubería por lo que se gobierna por (Crane, 2000):

Ecuación 1.13

$$h_f = k \frac{v^2}{2g}$$

Donde h_f es la pérdida de carga debida a accesorios y k es el coeficiente de pérdida asociado a cada accesorio o modificación a la tubería, se trata de de una salida de tubería el valor de k simplemente toma el valor de 1, lo cual significa que la única pérdida generada por el vaciado en esa zona es un cambio cinético del fluido, por ello se recomienda hacer el llenado de forma que este cambio se el menor posible, cualquier otro cuerpo o geometría que represente pérdida se debe determinar la correcta k . En el caso de las expansiones bruscas su modelo es (Crane, 2000):

Ecuación 1.14

$$k = \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right)^2$$

Además, como en los metales la viscosidad y tensión superficial toman importancia, sobre todo cuando comienza la solidificación mientras existe flujo o cuando pasa por cambios de sección dentro de las cavidades, surge la necesidad de comparar la fuerza inercial que presenta el fluido contra la tensión superficial que presenta el frente de este, ya que puede llegar a un bloqueo de flujo si la tensión superficial supera la fuerza inercial del fluido, el número adimensional que describe este comportamiento es el número de Weber. Es común usar este parámetro en el estudio de fronteras gas-líquido, líquido-líquido o con cualquier fluido en contacto con superficies sólidas, ya que la tensión superficial ocasiona la formación de pequeñas ondas mecánicas de propagación y gotas, así como incrementa las pérdidas de carga en flujo por orificios y vertederos (Falkovich, 2011).

El número de Weber se define usando γ , que es la tensión superficial, como:

Ecuación 1.15

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\gamma}$$



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

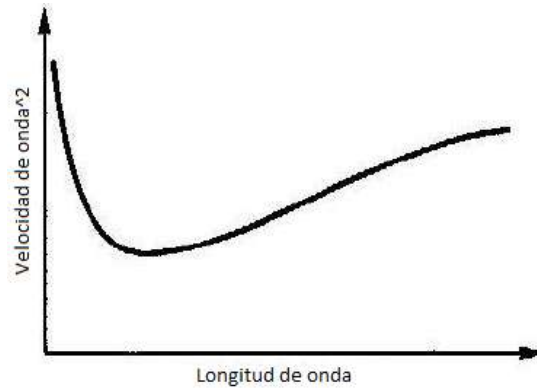


Imagen 1.5 Efecto de la tensión superficial en la propagación de ondas mecánicas de propagación, a la izquierda del mínimo de la curva la velocidad de propagación de la ondas es controlada por la tensión superficial, a la derecha del mínimo de la curva los efectos gravitacionales son predominantes (White, 2008).

1.3 Diseño de molde para colada por gravedad

El diseño de cualquier sistema de distribución debe asegurar la calidad de las piezas al evitar el confinamiento de gases (al evitar al máximo la turbulencia del flujo), contaminantes debido a la erosión del molde o por la formación de óxidos, así como flujos de calor indeseados que eviten el flujo del metal por solidificación prematura. En general el correcto llenado del molde depende de la forma en que este sucederá y la pieza que se requiera obtener, en términos generales se debe cumplir con (Lopez, 2011):

- Llenar rápidamente la cavidad del molde.
- Asegurar el flujo en régimen laminar, así como en estado permanente para evitar la interacción del metal con gases y erosión del molde.
- Permitir la fácil eliminación de la escoria y evitar inclusiones.
- Originar gradientes de temperatura favorables para evitar la distorsión de la pieza durante la solidificación y el enfriamiento del metal.
- Minimizar el sistema de distribución para maximizar el uso de la materia prima.
- Reducir lo más posible las entradas de fluido a la cavidad principal del molde.

Cuando ya se ha conseguido que la cavidad principal del molde se llene adecuadamente se debe enfriar, lo cual requiere tiempo y este dependerá tanto de los materiales de los cuales este hecho el molde, como de la fundición de la que se trate, sin embargo esta variable se ve más afectada por la geometría, como se observa en la regla de Chvorinov (Groover, 2010).

Ecuación 1.16

$$TST = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n$$

Donde TST es el tiempo de solidificación total [min], V es el volumen de la fundición en la zona de análisis (cavidad, mazarota, bebedero, etc.) [longitud³], A es la superficie de la fundición [longitud²] y Cm es la constante de proporcionalidad que es función de las propiedades de la



fundición (calor de fusión, calor específico conductividad termica), propiedades térmicas del molde (calor específico y conductividad térmica) y la temperatura de vaciado (sobre calentamiento), es determinada experimentalmente.

1.3.1 Consideraciones en el diseño de lingoteras permanentes para colada por gravedad

El diseño de lingoteras es más simple que el que se requiere para la fundición de formas, ya que como se ha mencionado un lingote será procesado posteriormente, así que en este caso se busca asegurar la concentración de los elementos aleantes con la mayor precisión posible, que exista la menor cantidad de porosidades, inclusiones y presente la mayor homogeneidad, tanto en estructura como en propiedades.

De lo anterior se sabe que siempre se ha de asegurar el régimen laminar, pero la velocidad en la puerta de entrada no es constante, si no que depende de la relación de áreas de la cavidad principal y la compuerta o puerta de entrada, así como del tiempo de llenado que depende de la masa, espesor dominante de la pieza así como del material fundido y las características del moles. Según el método de "British Non-Ferrous Metals Technology Center" propone el cálculo del área del área de la puerta de entrada (A_p) a partir del uso de la velocidad media a través de la puerta de entrada, esta no debe sobre pasar un valor límite de velocidad el cual se presenta para cuando el numero de Weber toma el valor de 1 (López, 2011).

Ecuación 1.17
$$A_p = \frac{v}{v_{lim}t}$$

Tabla 1.3 Velocidad límite para el cálculo de la velocidad en la puerta de vaciado a la cavidad principal, ecuación 1.20 (López, 2011)

Material	Velocidad límite [mm/s]
Bronces al aluminio	75
Aleaciones de Aluminio y cuya densidad es próxima a 2500 [kg/m ³]	250
Aleaciones de cobre, níquel, cobalto, aceros y Aleaciones cuya densidad se aproxime a 7000 [kg/m ³]	500

El parámetro A_p se vuelve difícil de calcular al ser función del área de la sección inferior y superior del bebedero, el área del canal de colada, la densidad de la aleación usada y la velocidad promedio de llenado, por ello se crearon dos nomogramas que permiten calcular eficientemente dicho parámetro, *Imagen 1.6* y la *Imagen 1.7* (Campbell, 2003)



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

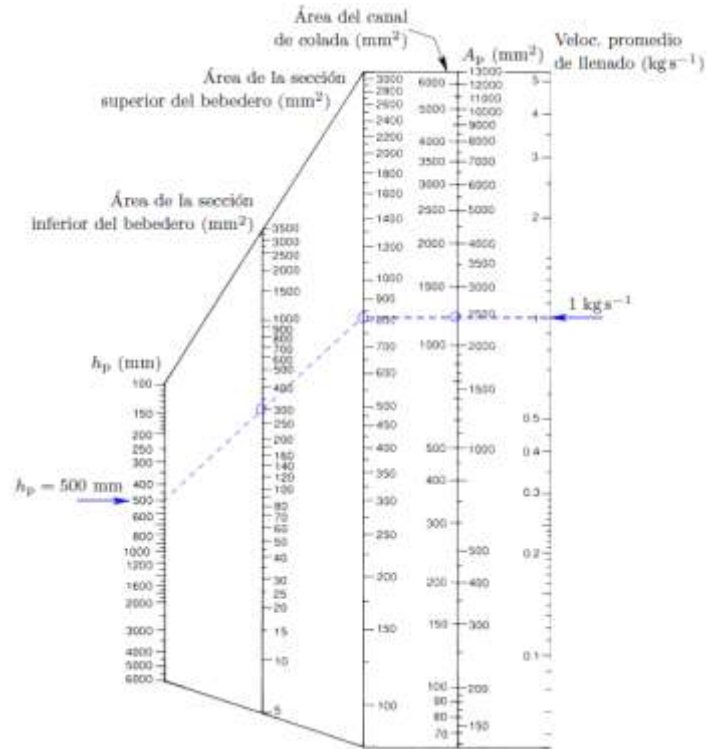


Imagen 1.6 Nomograma para el dimensionamiento de los sistemas de distribución para aleaciones con densidad cercana a $2500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (Campbell, 2003)

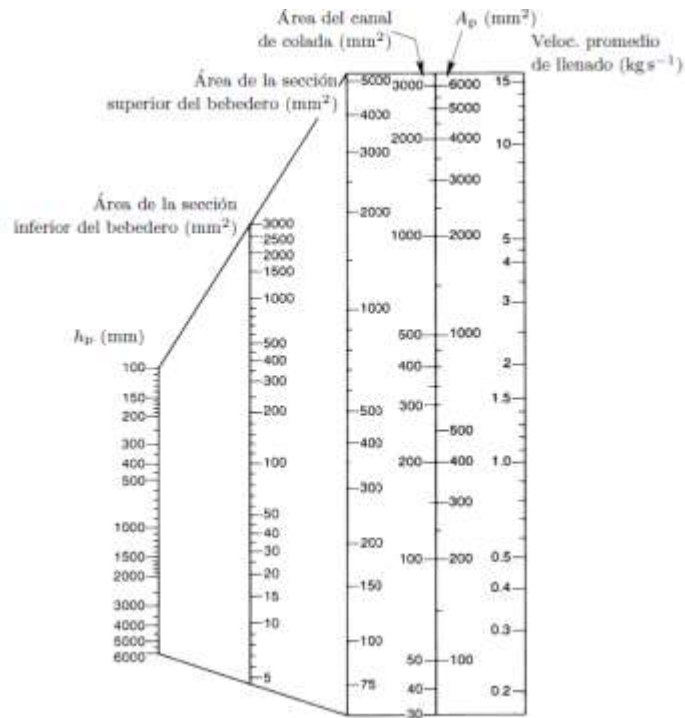


Imagen 1.7 Nomograma para el dimensionamiento de los sistemas de distribución para aleaciones con densidad cercana a $7000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (Campbell, 2003)



1.4 Defectos en las piezas solidificadas

Para identificar los defectos se debe saber cuales existen, para ello el “International Atlas of Casting Defects” ha creado una lista con causas de los defectos más frecuentes en las piezas obtenidas por fundición (Schey, 2000) y en conjunto con el “International Commite of Foundry Technical Associations” han desarrollado una nomenclatura de siete categorías que engloba los defectos más comunes en las piezas fundidas (Kalpakjian, 2002).

Tabla 1.4 Clasificación de los defectos de fundición según el “International Commite of Foundry Technical Associations” (Kalpakjian, 2002)

Nomenclatura	Descripción de la falla	Causa
Proyecciones metálicas	Aletas, rebabas o proyecciones masivas como ondulaciones y superficies ásperas	Mala selección del material del molde, mal ensamble del mismo, deslizamiento de las partes del molde y excedente en tolerancias adimensionales.
Cavidades	Internas o externas, incluyen las sopladuras, porosidad y cavidades por contracción	Mal control de la temperatura de vaciado, en el diseño del sistema de alimentación y uso incorrecto de mazarotas.
Discontinuidades	Grietas (por contracción térmica brusca o restringida por el molde) y puntos fríos (junta fría)	Sobrecalentamiento inadecuado y mala ubicación de compuertas.
Superficie defectuosa	Pliegues, traslapes, cicatrices y cascarilla de óxido	Mal control en el sistema de alimentación que impide la salida de aire y sobrecalentamiento incorrecto.
Fundición incompleta	Faltas de llenado por solidificación prematura, vaciado de material insuficiente, fugas, temperatura de vaciado muy baja y velocidad de vaciado muy lenta.	Inadecuada determinación del área de contacto entre las entradas, las mazarotas y la cavidad principal.
Dimensiones o formas incorrectas	Error en el montaje del modelo, contracción irregular, modelo deformado o fundición torcida por esfuerzos residuales.	Mal cálculo de tolerancias, inadecuada determinación de deformación por dilatación
Inclusiones	Partículas de aproximadamente 30 [μm] de diámetro provenientes del molde, óxidos, partículas por reacción con el molde o el crisol y partículas del molde, corazones, cuchara o crisol por erosión del metal fundido.	Mala selección del material en los instrumentos a usar en el proceso de colada.

Un defecto más a considerar se conoce como metal granoso o gránulos fríos, estas son las salpicaduras durante el vaciado, las cuales forman glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición, estos funcionan como concentradores de esfuerzos y crean esfuerzos internos que pueden llegar a distorsionar la pieza final (Campbell, 2003).

1.5 Ensayo patrón usado para la validación de simulaciones de colada.

La simulación de transferencia de calor durante el proceso de colada se ha logrado adecuadamente, sin embargo se ha demostrado experimentalmente que algunas soluciones numéricas divergen considerablemente de la realidad. El modelado del flujo, donde la turbulencia es considerada adecuadamente, muestra resultados muy aproximados a los obtenidos



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



experimentalmente, sin embargo la implementación del efecto de tensión superficial debida al aire atrapado en el proceso de colada no se han podido validar. Con esto se hace necesario un ensayo estándar para determinar si una paquetería o código convergen adecuadamente (Campbell, 1996).

Un equipo de la universidad de Birmingham diseñó un molde en forma de placa, para probar los modelos térmicos y reológicos y no la capacidad de cómputo que se tiene disponible. Por otro lado el sistema de llenado se modeló para probar las capacidades de los códigos, paqueterías y equipos de simular la turbulencia y la superficie libre del metal fundido (Campbell, 1996).

El diseño consiste en una placa con una entrada simple, no usa mazarota y el ensayo se definió en un molde hecho de arena sílice "wash-and-drie" AFS grado 60 con 12% en peso de resina fenol-urea con el fin de que al momento de replicar el ensayo se logre una visualización con rayos X y simplificar el modelado, ya que la arena es altamente permeable al aire, de este modo no se requiere plantear ninguna interacción con el aire dentro del molde, presenta resistencia suficiente para la colada y no muestra erosión alguna, además es uno de los materiales más usados en la producción de moldes. El metal usado es Al 99.999%, esto evita ambigüedades al momento de establecer las propiedades de material. Los planos de diseño se muestran en la **Imagen 1.8** (Campbell, 1996).

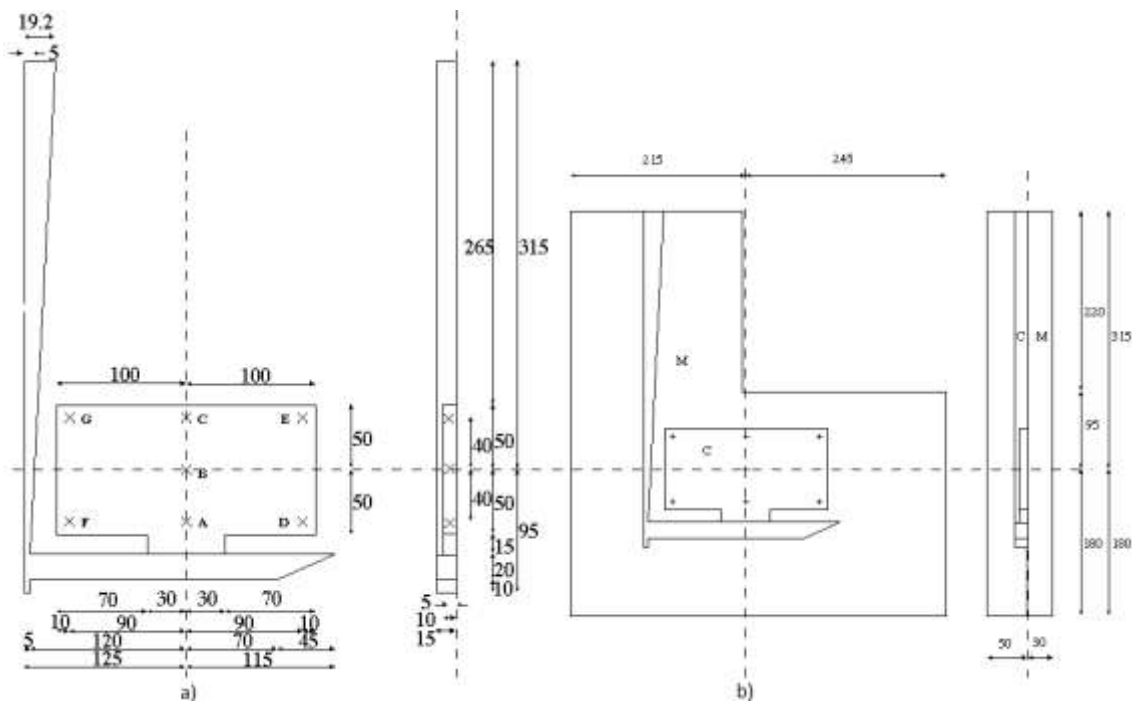


Imagen 1.8 Dimensiones del modelo, a) dimensiones internas del molde y b) dimensiones de la caja de molde (cantidad de arena) y vista izquierda, todas las dimensiones [mm], las cruces son termopares (Campbell, 1995).



1.5.1 Procedimiento

La colada consiste en vaciar 2.2 [kg] de metal líquido a una temperatura de 720 [°C] de la copa del molde, esta se bloquea para lograr 40 [mm] de altura de aluminio, en ese instante se permite el flujo libre del metal al molde durante 3.5 [s] a una temperatura aproximada a 700 [°C]. El viaje del metal se visualiza mediante cinematografía de rayos X de 16[kV] y 1.5 [mm] de diámetro.

En la realización del modelo se considera que la viscosidad del aluminio puro en el punto de solidificación es $1.3e-3$ [Pa*s] y densidad de $2.385e3$ [kg/m³], basados en eso se define una viscosidad cinemática de $0.55e-6$ [m²s⁻¹] (Campbell, 1996).

La medición de temperatura se hace con termopares de cable de 0.3[mm], ubicados en las cruces de la **Imagen 1.8** (Campbell, 1996).

La obtención de resultado debe realizarse para al menos tres eventos separados, con el objetivo de observar la reproducibilidad del experimento y observar la dispersión en las variables medidas.

1.5.2 Resultados a comparar con la simulación

Las variables medidas son la transferencia de calor y el flujo.

- a) Transferencia de calor: se obtienen las curvas de enfriamiento registradas por los termopares, la comparación de estas entre dos coladas indica que la medición y los datos son coherentes entre eventos. Solo presentan diferencias considerables en el tiempo de enfriamiento.

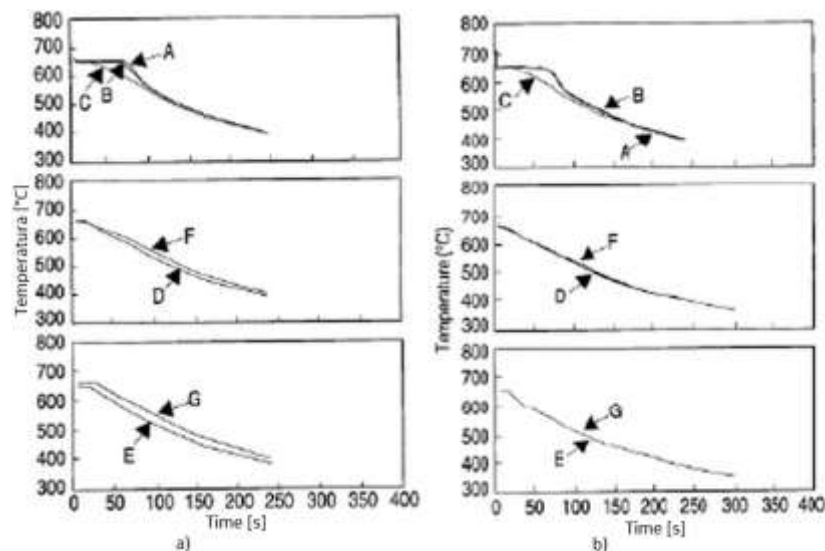


Imagen 1.9 a) colada 1, b) colada 2, las letras son los termopares ubicados en la Imagen 1.8 a (Campbell, 1996).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Tabla 1.5 Tiempo de solidificación medido en los termopares colocados (Campbell, 1995).

Ubicación	Tiempo de solidificación	
	Colada 1	Colada 2
A	63.00	63.67
B	56.95	60.20
C	19.75	18.55
D	13.10	13.20
E	12.75	10.63
F	15.35	15.27

Estos resultados muestran la problemática de este tipo de experimentos, aun realizados con rigurosidad científica, devuelven dispersión considerable en los resultados indicando que la variación que existe entre los modelos numéricos y los experimentos no sólo es provocada por la falta de precisión del modelo o el código construido si no a la aleatoriedad del fenómeno mismo (Campbell, 1996).

La variación de resultados es evidente cuando se usan datos térmicos de diferentes fuentes, planteamientos en el modelo y métodos de solución distintos. Si la desviación de resultados fuera únicamente producto de los datos de material usados se esperaría que hubiera una proporción entre el valor del tiempo de solidificación y la diferencia que hay entre el valor nominal de la propiedad usada de referencia, pero esto no ocurre, esto se muestra en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Comparación de los tiempos calculados en la simulación y el valor experimental (Campbell, 1996).

Referencia	Tiempo de llenado [s]	Tiempo de solidificación [s]		
		Más corto	Mas largo	Proporción
Experimental (promedio)	2.0	11.7	63.3	5.41
(Domanus, 1996)	2.15	20	50	2.50
(Lewis, 1996)	2.4			
(Rigaut, 1996)	2.06	13	53	4.08
(Xu, 1996)	2.20	50	92	1.84
(Barkhudarov, 1996)	1.83	5	35	7.00
(Ohnaka, 1996)	2.3	45	65	1.44
(Layton, 1996)	2.3	25	80	3.20

Todas las simulaciones citadas en la Tabla 1.6 predicen correctamente o de manera muy aproximada el lugar donde se presenta la última zona de solidificación, esta se presenta cerca de la puerta de entrada a la cavidad principal y no en el centro geométrico de la placa lo que demuestra que la validación de la simulación térmica debe hacerse en la distribución geométrica de temperatura y no en el valor calculado de tiempo de solidificación (Campbell, 1996).

- b) Flujo: en las referencias citadas en la Tabla 1.6 se pueden resumir los diversos planteamientos a tres consideraciones, flujo laminar con viscosidad elevada (modelo



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



aplicable a polímeros), flujo laminar sin mezcla con el flujo reflejado en el canal de colada, sin presión de aire y con viscosidad baja, y flujo turbulento mezclando el flujo de llenado y el reflejado, **Imagen 1.10 c**.

Los modelos que presentan alta viscosidad siempre concluyen que el régimen es laminar por la poca velocidad que puede desarrollar el material, de este modo el llenado se hace lento y homogéneo, **Imagen 1.10 a**. En el caso de un flujo laminar pero con baja viscosidad causa un llenado en tipo fuente debido al flujo reflejado en el canal de llenado, el fluido mantiene la cantidad de movimiento impuesta por el "rebote" al final del canal de colada produciendo así que el llenado sea hacia el lado contrario de la trampa de óxido, **Imagen 1.10 b**. Los modelos que consideran turbulencia presentan el mismo efecto de flujo reflejado, sin embargo este flujo se mezcla por completo por la energía cinética que tiene el material, esto causa que la puerta de entrada sea ocupada completamente y de forma casi instantánea, además el momento es igual al del canal de colada generando un llenado tipo fuente hacia el lado en que se mueve el flujo (Campbell, 1996).

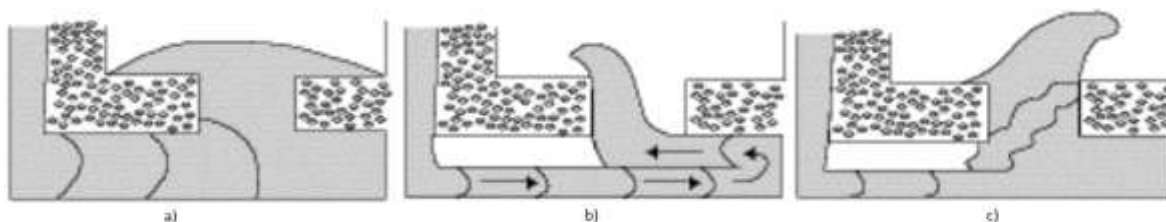


Imagen 1.10 a) flujo laminar con viscosidad alta, b) flujo laminar de baja viscosidad y c) flujo turbulento siendo esto el modelo más aproximado a los datos experimentales (Campbell, 1996).

El planteamiento que considera turbulencia lo hace con un $Re = 40000$ ¹, durante los experimentos se obtuvo un comportamiento aleatorio y un perfil de llenado diverso como resultado de la naturaleza física de la turbulencia. Las simulaciones son capaces de predecir correctamente el tiempo de llenado y el perfil de llenado en el canal de colada mostrando el efecto del flujo reflejado; por otro lado ningún planteamiento permitió predecir la formación de burbujas en la zona de mezcla del flujo directo y el reflejado, la formación y desaparición de la vena contracta² en la puerta de entrada se predijo de forma pobre ya que mostraban la existencia de esta después de 1.24 [s], que es el tiempo experimental promedio. Finalmente la formación de burbujas en el salto durante el llenado de la cavidad principal no se pudo aproximar en ningún modelo por falta de resolución en la visualización y ecuaciones más precisas para modelar el salto hidráulico³, las mejores aproximaciones se realizan en los modelos de Lewis y Rigaut (Campbell, 1996).

¹ Se obtiene de la velocidad captada en la cinematografía de rayos X y se posprocesa para obtener el Re , se usa el valor promedio de las coladas experimentales (Campbell, 1996).

² Vena contracta: punto de una corriente de fluido en el que se presenta la mínima sección transversal y la máxima velocidad de flujo (Falkovich, 2011).

³ Fenómeno que genera superficie libre en un fluido proyectado por acción del momento del resto del material (Campbell, 1996).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



El planteamiento que incorporó tensión superficial mostró que no es una variable importante para la simulación de flujo en este sistema, sin embargo es determinante para modelar la existencia y generación de burbujas en la fundición, las cuales son la fuente de defecto más importante (Xu, 1996). Por otro lado en todos los modelos se puede dar un seguimiento a las zonas de mayor probabilidad de defectos mediante la visualización de los vectores de velocidad en el fluido, estos muestran vórtices o zonas de choque que son las zonas de mayor formación de burbujas (Campbell, 1996).



Capítulo 2 Simulación computacional de fluidos en cavidades

2.1 Introducción

La simulación del proceso de colada ha tomado dos caminos principales, el primero se ha enfocado al modelado del proceso de solidificación y el segundo al análisis de flujo del metal durante el llenado de los moldes. En ambos casos las simulaciones simplifican el fenómeno a un solo aspecto físico, es decir analizan el avance de los frentes de solidificación, la transferencia de calor, los efectos de la convección libre y forzada, y finalmente los últimos avances han ocurrido en el modelado macro y microscópico con el cual se ha podido deducir el avance de la microestructura.

El enfoque anterior ha sido limitado por la dificultad de considerar efectos combinados, como el caso de la formación de la microestructura bajo los efectos de la convección libre y forzada en zonas de metal líquido o parcialmente solidificado, lo que ha obligado a prestar atención al modelado del flujo del metal fundido, sobre todo en los sistemas de llenado. Además la simulación de múltiples variables físicas (flujo y transferencia de masa y calor) ha permitido modelar la modificación de la distribución inicial de temperatura del metal fundido durante el vaciado y llenado de las cavidades de moldes (ASM Metals Handbook Castings, 1992).

Uno de los mayores inconvenientes de la simulación de múltiples variables físicas es el tiempo que requieren dichos modelos para ser configurados y analizados correctamente, ya que la capacidad computacional que se tiene lo ha limitado, sin embargo ha demostrado ser una de las formas rentables de análisis y estudio de este tipo de fenómenos, porque la capacidad computacional, los métodos de análisis y comprensión informática mejoran constantemente.

La adición de sistemas computacionales al estudio de las fundiciones han presentado ventajas tales como (ASM Metals Handbook Castings, 1992):

- a) Elevar la eficiencia, calidad y productividad del proceso de fundición y colada.
- b) Permitir un evaluación de costos y diseños preliminares rápidos, debido al conocimiento de características geométricas como el volumen y área de transferencia de calor, así como de la masa aproximada para el proceso.
- c) Automatización del mallado de cuerpos para análisis térmico y maquinado de los patrones, lo que acorta el tiempo de diseño y producción.
- d) Disminución de la necesidad de ensayos, aumento de la implementación y evaluación de cambios en el diseño y mejora en la capacidad de procesamiento de formas diferentes.

Las principales desventajas de la simulación computacional son (ASM Metals Handbook Castings, 1992):



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



- a) Limitación en la implementación simultánea de flujo y solidificación debido al poder de cómputo.
- b) Sistemas de modelado y simulación poco intuitivos.
- c) Falta de retroalimentación en el control del proceso de fundición.

El proceso de fundición presenta problemas fluido-dinámicos que demandan el análisis de la superficie libre del fluido, flujos no estacionarios y régimen del flujo. Para dichos análisis se han implementado métodos como: "MAC" (marker and cell), "VOF" (volume of fluid); el primero define partículas marcadoras para el análisis y el segundo usa una variable volumétrica para el tratamiento de la superficie libre (López, 2011).

Los métodos mencionados y en general cualquier modelo asociado a un sistema físico converge al planteamiento de ecuaciones diferenciales, en concreto el estudio del comportamiento de fluidos genera sistemas de ecuaciones en derivadas parciales que describen un comportamiento complejo descrito en múltiples direcciones. Dichos sistemas tienen que ser resueltos de forma aproximada mediante la implementación de métodos numéricos, los cuales están programados en diversas paqueterías comerciales, algunas son especializadas y otras de propósito general; sin embargo en ambos casos la implementación de la geometría y las condiciones iniciales y de frontera puede resultar muy compleja debido a la necesidad de plantar el problema de forma tal que converja al tipo de resultados deseados, es decir si se modela el inicio de la colada debe considerarse al flujo como no estacionario, la ingestión de aire y la generación de porosidad para que la solución converja a resultados aptos para el análisis de calidad o validación del diseño (López, 2011).



2.2 Paqueterías y códigos empleados para el análisis de fundición

La necesidad del análisis de múltiples variables físicas demanda la implementación de modelos físicos más adecuados, preprocesadores y posprocesadores que permitan el ingreso de geometrías más complejas (afines a la realidad). Así como la implementación de algoritmos mejorados para la preparación de los datos para el análisis deseado, por ejemplo software especializado en mallado A_MESH® permite la creación de piezas en tres dimensiones y la malla asociada a esta. La conjunción de diversos programas mejora el análisis ya que permite usar los resultados de una paquetería como entrada de otra, en este caso con lo obtenido de A_MESH® se realiza la simulación del llenado de la pieza una pieza en Wrafts®, aunque para esta pieza se modele el proceso de inyección y sea muy diferente al de colada por gravedad, el fenómeno de llenado de una cavidad con fluido permanece en el modelo, esto permite visualizar las capacidades actuales presentes en las paqueterías. (López, 2011).



Imagen 2.1 Modelo tridimensional de una pieza plástica de un motor diesel fabricado en un Suzuki Santana motor, S.A. creado en A-Mesh® (López, 2011)



Imagen 2.2 Resultados del molde correspondiente al modelo tridimensional de la Imagen 2.1 obtenidos con el código de elementos finitos Wrafts® para distintas velocidades de inyección (López, 2011).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



En las imágenes anteriores se visualiza la capacidad de simulación que presentan los códigos actuales, la mayoría se enfocan a la representación de formas complejas, modelos de flujo del fluido y secuencias de llenado, transferencia de calor por radiación, transferencia de calor y solidificación, transformaciones sólido-líquido y en estado sólido, solicitaciones térmicas, en la formación de defectos, predicción de microestructuras y propiedades mecánicas. Los códigos y paqueterías comunes empleadas para el análisis de flujos se dividen según la especialización que tengan, esto se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Ejemplos de paqueterías comunes usadas en el análisis de procesos de fundición (López, 2011)

Clasificación	Compañía	Paquetería
Específicos para problemas de fundición	EKK, Inc.	WRAFTS-CAP (FE)
	UES, Inc.	PROCAST (FE)
	Magma, Inc.	MAGMASOFT (FV)
	Aluminium Pechiney	SIMULOR (FV)
	Metalworking Technology, Inc.	RAPID/CAST (FV)
	Kobe Steel, Ltd.	CASTEM (FE)
	Hotachi, Ltd.	HICASS (FV)
	Kawasaki Steel, Corp.	BACASS (FV)
	General Motors, Corp.	SOLCAST (FE)
	Foseco, Inc.	SOLSTAR (EMP, empírico)
Propósito general	Aachen Foundry-Institute.	CAST (FE)
	AFS, Inc.	AFSolid
	Cham, Ltd.	PHOENICS (FV)
	FDI, Inc.	FIDAP (FE)
	Fluent, Inc.	FLUENT (FV)
	Flow Science, Inc.	Flow3D (FV)
	Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.	ABAQUS (FE)
	Lawrence Livermore Natl, Lab.	DYNA (FE)
	Swanson Analysis System, Inc.	ANSYS/FLOTTRAN (FE)
	Fluent, Inc.	NEKTON (FE)
Modelado sólido y generación de malla	PDA Engineering	P/THERMAL (FE)
	Computational Fluid Dynamics Services, Inc.	ASTEC (FE)
	EKK, Inc.	A-MESH
	PDA Engineering	PATRAN
	Structural Dynamics Research Corp.	IDEAS
	XYZ Scientific Applications, Inc.	TRUE GRID
	Grace-Comp Systems, LTD.	Q-MESH

Los códigos mencionados en la tabla son sólo algunos de la gran variedad que existen, esto se debe a que ningún software hasta ahora ha podido combinar los requisitos de análisis, ni la integración de múltiples variables físicas, sin embargo se han logrado grandes avances en el manejo de superficies libres.



2.3 Modelos numéricos del llenado de cavidades

2.3.1 "Modelado de flujo de fluido"

a) Visualización

El modelado físico del flujo del metal es comúnmente realizado con agua en moldes transparentes. En general para el estudio de flujos que presentan fuerzas inerciales usa el número de Reynolds (sección 1.4) y el número de Froude que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales, este se define como (ASM Metals Handbook Castings, 1992):

Ecuación 2.1

$$N_{Fr} = \frac{v^2}{gl}$$

Este número se usa como comparación cuando se modela el llenado con agua y el sistema sea del mismo tamaño que el real, asegurando que el modelo sea representativo del metal si N_{Fr} es el mismo en ambos casos, lo que concluye que si el tamaño es igual, la longitud característica es la misma y la aceleración gravitacional es constante entonces existe una velocidad en la que ambos sistemas son equivalentes (ASM Metals Handbook Castings, 1992).

Es posible observar el flujo del metal fundido mediante cinematografía de rayos "X" de alta velocidad a través de un vidrio protector, esto se hace para tener parámetros de comparación entre las simulaciones numéricas y el flujo real del metal. La visualización del llenado se ha conjugado con las técnicas computacionales mediante la implementación de circuitos y termopares, de esta forma cada que un circuito es cerrado se toma una lectura en la unidad de reconocimiento que lleva la información de posición y temperatura, lo cual permite presentar una imagen precisa de la distribución del metal dentro del molde, para ello se cargan los datos obtenidos en un post-procesador de un código de elemento finito para desplegar los resultados, Imagen 2.3.

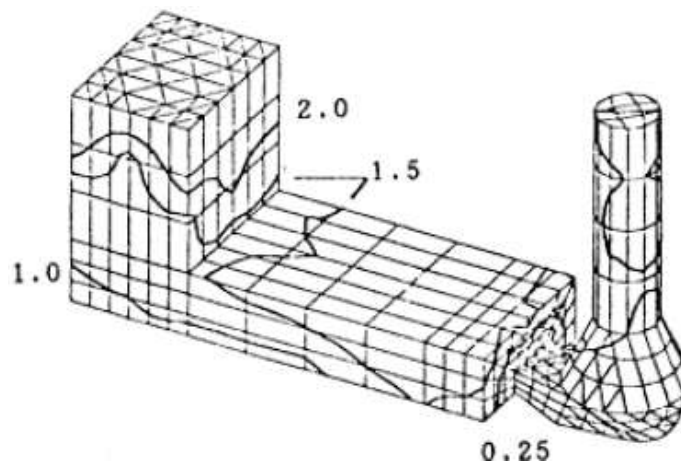


Imagen 2.3 Visualización tridimensional del metal fundido en contacto con los sensores, se determino mediante el método de contacto de cable y se desplego mediante un post-proceso de elemento finito, los números son segundos y tiene asociadas las lecturas hechas de posición y temperatura (ASM Metals Handbook Castings, 1992).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Los termopares pueden ser usados solos o en conjunto con los cables de contacto, ya que estos ofrecen mas información que el uso de los cables de contacto, ya que producen una señal analógica que requiere más tiempo para su lectura, sin embargo, el uso de ambos dispositivos es muy útil para determinar el flujo y la solidificación en patrones de pared delgada, en especial si se sabe que hay riesgo de soldadura fría.

b) Modelado en sistemas computacionales

Las técnicas computacionales para el modelado del flujo durante el llenado de una cavidad se dividen en dos categorías. La primera se basa en balance de energía o análisis cinético, mientras que la segunda usa el balance de momentum según la ecuación de Navier-Stokes y están diseñados en sistemas "Marker-and-Cell" (MAC), "Simplifier Marker-and-Cell" (SMAC) y "Solution Algorithm" (SOLA); los primeros dos se basan en definir celdas y hacer cálculos periódicos para determinar la cantidad de fluido y su distribución en cada una, mientras que el tercero lo hace aplicando el mismo principio en los nodos e interpolando al centro de cada celda.

Las aproximaciones cinéticas del fluido permiten determinar perfiles geométricos simples (caso del perfil en el bebedero del sistema de alimentación), determinar la velocidad promedio en el sistema, así como definir la cantidad de masa y distribución simple de presiones mediante la aplicación de conservación de momento; todo esto sirve en el diseño de programas semi-empíricos que incluyen reglas usadas en la industria, por ejemplo éstas establecen el rango aceptable de tiempo que una colada debe durar dependiendo de su peso y son tan específicas como para que cada sección del sistema de colada tenga un conjunto individual de éstas, lo que permite crear un diseño inicial (ASM Metals Handbook Castings, 1992).

Lo anterior se implementa en programas Computed-aded Desing o Diseño asistido por computadora (CAD) que son capaces de crear dibujos finales de patrones y moldes, así crear el control numérico para el maquinado de estos, **Imagen 2.4**.

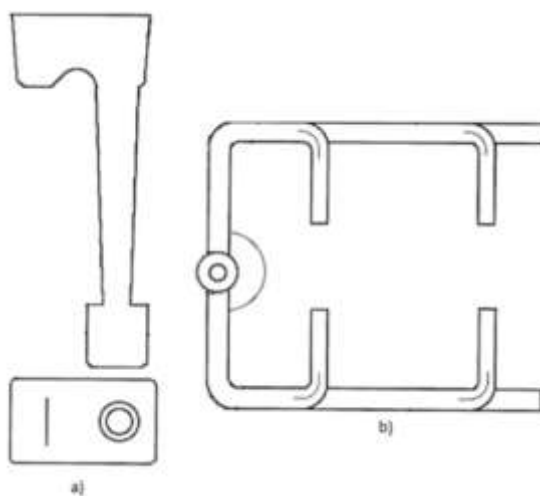


Imagen 2.4 Planos típicos un sistema de llenado generado por análisis de cinemática en sistemas CAD basado en reglas empíricas, ecuaciones de Bernoulli y Saint-Venant, a) Plano de vertedero, bebedero y pozo, b) sistema de llenado (ASM Metals Handbook Castings, 1992).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Por otro lado, el método de función de distribución, representa la fracción de volumen de la celda que contiene fluido, las únicas celdas que contiene una fracción cero son las vacías. Este método permite aproximar la ubicación y orientación de la superficie libre.

En la región interior se siguen los principios de conservación de masa y de cantidad de movimiento, que para el caso de los metales fundidos se aseguran que el fenómeno es incompresible por lo que el principio de conservación de la masa se reduce a

Ecuación 2.2
$$\nabla \mathbf{v} = 0$$

Así como la ecuación de Navier Stokes toma la forma:

Ecuación 2.3
$$-\nabla P + \mu \nabla^2(\mathbf{v}) + \rho \mathbf{F}_i = \rho \left[\frac{D}{Dt}(\mathbf{v}) \right]$$

Usando las ecuaciones *Ecuación 2.2* y *Ecuación 2.3* se rastrea al fluido, si se llega a regímenes turbulentos suele considerarse la viscosidad efectiva, sin embargo en los códigos creados no se realiza el cambio de forma automática, ya que dichos valores dependen de la definición del material al inicio del análisis. Para lograr el seguimiento adecuado se combina con el método de diferencias finitas.

En la región superficial del material la cantidad de movimiento debe ser asegurada mediante la condición de frontera de superficie libre, es decir se debe calcular mediante los esfuerzos normal y tangencial (ASM Metals Handbook Castings, 1992).

Esfuerzo tangencial:

Ecuación 2.4
$$\mathbf{v} \left[2\mathbf{n}_x \mathbf{m}_x \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\mathbf{n}_x \mathbf{m}_y + \mathbf{n}_y \mathbf{m}_x \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2\mathbf{n}_y \mathbf{m}_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]$$

Esfuerzo normal:

Ecuación 2.5
$$2\mathbf{v} \left[\mathbf{n}_x \mathbf{n}_x \frac{\partial u}{\partial x} + \mathbf{n}_x \mathbf{n}_y \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \mathbf{n}_y \mathbf{n}_y \frac{\partial v}{\partial x} \right] = P + p_s$$

En ambas ecuaciones n y m son las componentes de los vectores tangenciales de la superficie libre del fluido, P es la presión ejercida por el fluido y p_s la presión de tensión superficial, usando estos principios y relacionándolos con las propiedades del fluido se calcula el campo de flujo en la superficie libre.

Este método predice el llenado de una cavidad de forma precisa, genera un campo de velocidades adecuado que permite visualizar zonas de mayor probabilidad de erosión. El uso de gravedad mediante este método es adecuado, ya que en conjunción con la ecuación de Bernoulli para fluidos calcula adecuadamente la cantidad de movimiento presente en el fluido, *Imagen 2.6*. También permite acoplar la presencia de aire mediante la aplicación de un campo de presión, aun cuando la geometría tiene más perfiles que seguir, *Imagen 2.7 a - e*. Además, este método se probó con un modelo más grande que incluye más interacciones y se aproxima más a un molde permanente real, mostrando que la convergencia se mantiene y puede mostrar la superficie libre del fluido de forma adecuada, *Imagen 2.7*.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

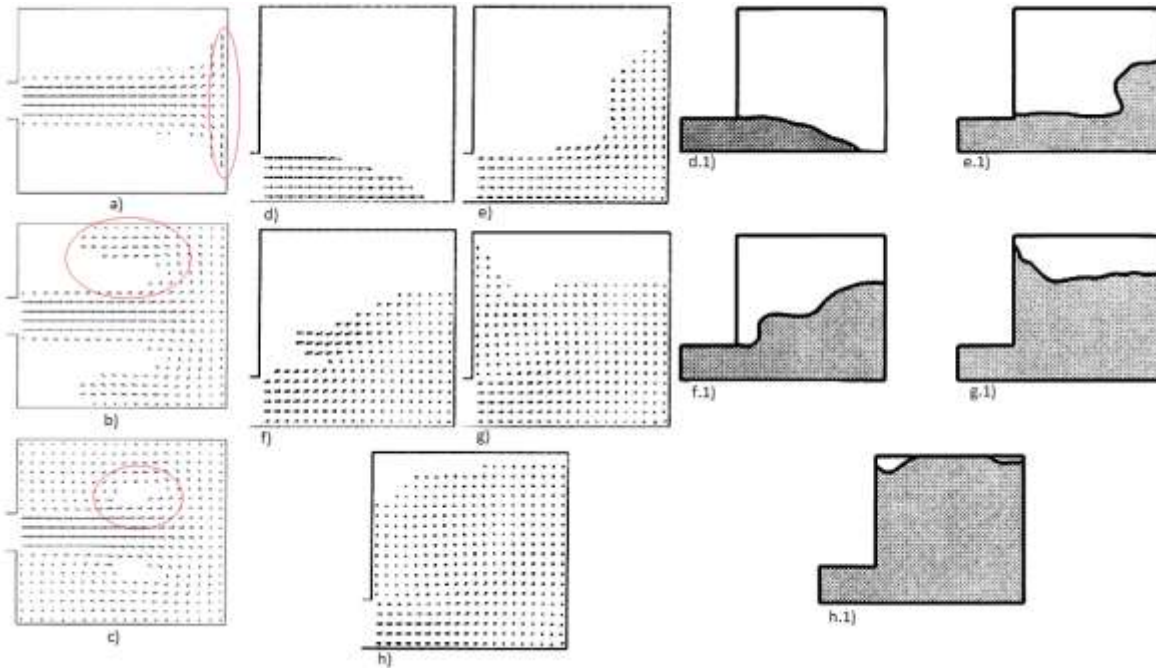


Imagen 2.6 a) hasta c) "MAC" con cálculo único de cantidad de movimiento, en rojo zonas de impacto y recirculación, d) hasta g) "MAC" considerando gravedad y los subíndices 1 muestran la medición de un llenado con agua y termopares postprocesado en software gráfico.

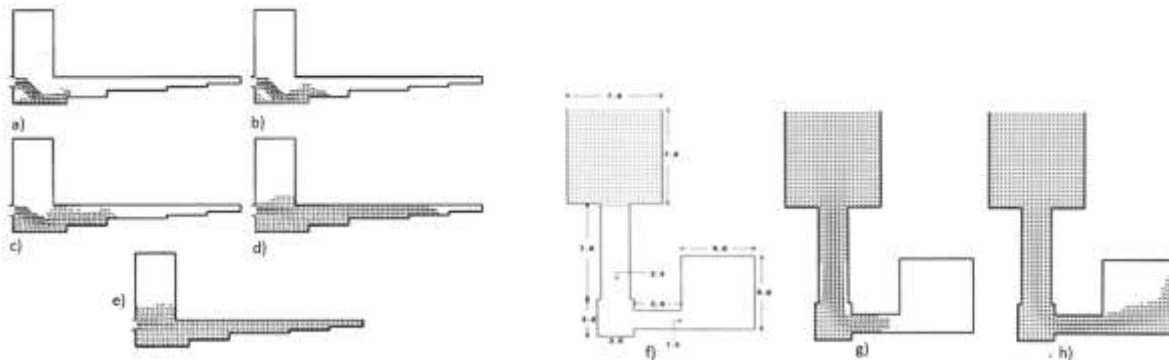


Imagen 2.7 a) hasta e) "MAC" con cálculo de cantidad de movimiento y gravedad aplicada al modelo, f) hasta h) "MAC" considerando solo cantidad de movimiento en una geometría realista, mostrando perfiles de superficie libre aceptables.

2.4 Manejo de fluidos en ABAQUS® "Interacción fluidos-estructuras (FSI)"

Las estructuras que contienen fluido se analizan bajo una gran variedad de tipos de carga para determinar su efectividad, los escenarios comunes de análisis son: pruebas de caída libre, cambios de temperatura, presión y apilado. Para llevar a cabo este tipo de análisis es necesario considerar la inercia y el movimiento del fluido bajo las cargas mencionadas, lo cual las paqueterías de rastreo de fluido (MAC) y dinámica de fluidos por computadora (CFD) no implementan, ya que necesita un método explícito que resuelva la inercia del fluido (Simulia, 2007).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



El método FSI requiere que cada entidad que participa en el análisis sea construida como un cuerpo sólido, a cada uno se le asignan propiedades que lo definen y controlan el comportamiento. El principal problema que se presenta en este tipo de análisis es la extrema deformación que sufre un fluido y la poca adaptabilidad de los criterios de calidad y convergencia en sólidos presentados por muchas paqueterías.

Si la deformación del fluido no es muy elevada como en el caso del oleaje dentro de tanques, se ha implementado la técnica de remallados, para casos que implican grandes deformaciones o pérdida de material se usa la técnica adaptativa Lagrangiano-Euleriano (ALE) la cual se aplica en análisis explícitos, el objetivo de la técnica es que la malla se mueva de manera independiente al material. Esto permite que la malla original se transforme ajustando la geometría de los elementos sin afectar la conectividad, de este modo los datos calculados con la malla sin cambio se extrapolan a la malla con nueva geometría (advección), tanto el algoritmo y frecuencia de remallado y advección se pueden controlar en la paquetería (Figuroa, 2009).

El contacto entre la estructura y el fluido se da de forma aleatoria, en ocasiones no se puede definir a priori si alguna superficie sólida no tendrá contacto con el fluido, por ello la paquetería implementa un algoritmo de contacto sumamente robusto, el cual consiste en incluir todas las entidades, superficies, dominios y además considera "autocontactos". Este algoritmo se denomina "Contacto General" y no requiere ninguna definición, solo activarse en el momento deseado de la simulación (Simulia, 2013).

En ABQUS® 6.10 se plantea un modelo en el que una botella de polietileno de alta densidad (HDPE) parcialmente llena de agua se deja caer de una altura de tres pies. El propósito del análisis es si la botella se romperá debido al impacto. La botella fue modelada con elementos laminares y elementos sólidos deformables de perfil hexaédrico para el fluido, para el suelo se usó una entidad plana con características de cuerpo rígido, con paredes más delgadas que el fondo, **Imagen 2.8** (Simulia, 2007).



Imagen 2.8 Entidad asociada a la botella usada para el modelo (Simulia, 2007).

Se definieron los contactos botella-fluido y suelo-botella, la gravedad sólo se aplicó al contenedor y al fluido. Para optimizar el tiempo de cálculo se aplicaron condiciones iniciales consistentes con la caída de 0.914 [m] de altura, es decir $v_0 = 4.27$ [m/s] de este modo la botella sólo se tiene que colocar ligeramente por encima la superficie del suelo (Simulia, 2007).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



El contacto fue definido como "Contacto General", así se evita que algún elemento pierda interacción con el modelo y las superficies de contacto se actualicen mientras ocurre la deformación, de esta forma se puede modelar la erosión superficial que ocurre cuando un fluido escurre de un contenedor roto. La interacción con el aire es despreciable y en el modelo se omite..

La aplicación del remallado adaptativo en este modelo, en combinación con los elementos hexaédricos y el algoritmo de suavizado permite que cada nueva malla concentre elementos en las zonas donde la curvatura del fluido aumenta, concentrando el análisis en dicha zona y de esta manera mejorando los resultados en la zona de daño (Simulia, 2007).

La visualización de deformación muestra claramente que el agua produce pandeo en la botella y que esta se rompe en el nivel de deformación esperado, sin embargo el módulo de visualización elimina los elementos incoherentes, es decir los que fallaron y se desprendieron del modelo principal, y suaviza las zonas donde ocurrió dicha "falla". Pero es apreciable que la zona de fractura se encuentra en la pared más delgada y en una de las aristas, lo cual es un resultado esperado, **Imagen 2.9** (Simulia, 2007).

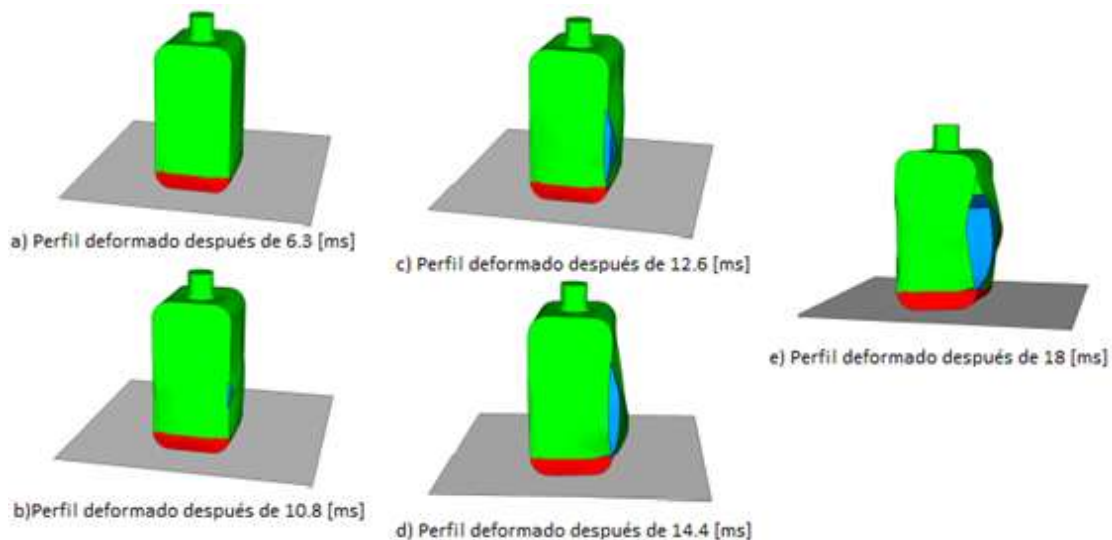


Imagen 2.9 Visualización de la deformación y fractura de la botella (Simulia, 2007).

El análisis explícito permite modelar movimiento de fluido confinado y la interacción con sólidos. En lo general no es posible modelar el comportamiento de flujo complejo, superficies libres y salpicaduras. La inercia del fluido es implementada de manera satisfactoria y se visualiza como deformación del fluido, pero sin los fenómenos mencionados el modelo aún es burdo.



2.5 Análisis acoplado Euleriano-Lagrangiano en ABAQUS®6.12

Los análisis eulerianos fijan los nodos en un posición espacial permitiendo que el material fluya a través de los elementos, esto tiene como consecuencia que las mallas de este tipo de análisis no deformen. El material no necesariamente ocupa la totalidad del espacio euleriano y a lo largo del análisis los elementos pueden estar llenos en un rango de 0 a 1 (método VOF , ver sección 2.1), esto implica que el límite del material sea calculado en cada incremento del análisis; la malla euleriana usada generalmente es una paralelogramo que cubra toda la sección donde el material fluirá, si algo del material sale de dicho dominio se excluye del cálculo (Simulia, 14.1.1, 2012).

El material definido como euleriano puede interactuar con los elementos tradicionales (lagrangianos) mediante el contacto Euleriano-Lagrangiano (CEL), de esta forma se logran simulaciones de múltiples variables físicas, por ejemplo análisis FSI complejos (ver sección 2.4). También son efectivos para modelos que presentan deformaciones extremas, como flujo de fluidos y problemas de penetración, además mediante análisis CEL se logra mayor precisión debido a la combinación del cálculo del flujo y el cálculo no lineal lagrangiano (Simulia, 14.1.1, 2012).

Los elementos eulerianos tiene la capacidad de contener más de un tipo de material, la suma de material en el elemento está contenida en el rango mencionado, si es menor que 1 el restante se llena con material "void", es decir material que no presenta ningún tipo de interacción. La definición de la distribución de material depende de la interacción entre materiales y geometrías que lo restrinjan, además como cada incremento re-calcula la superficie de dicho material se requiere una aproximación simple, en este caso con un plano limitante, la desventaja es la discontinuidad en elementos vecinos y la necesidad de una malla fina para el análisis; esto lleva a visualizaciones poco realistas que son solventadas visualizando la distribución promedio de los planos limite y no cada plano en sí (Simulia, 14.1.1, 2012).

2.5.1 Flujo del material en el dominio euleriano

La posibilidad de que fluya el material en las mallas de este tipo de análisis se logra con una combinación de cálculo lagrangiano común y una transición a cálculo euleriano (transporte), es conocida como "Lagrange-plus-remap". En la primera fase los nodos se fijan al material para calcular el recorrido de este, al pasar al periodo de la segunda fase la deformación es suspendida y los nodos con deformación sustancial son remallados a su posición de partida, dejando el material en la posición deformada, de esta manera se calcula la nueva distribución de material en el dominio euleriano (Simulia, 14.1.1, 2012).

La deformación de la fase lagrangiana se evalúa con una tolerancia no especificada en la paquetería, pero permite dejar inactivos a los elementos deformados ligeramente en la segunda fase optimizando así el cómputo del flujo de material, estas pequeñas deformaciones solo son apreciables con escalamientos muy elevados. En conjunto con el remallado las variables de estados son transferidos entre los elementos mediante advección, esta puede ser lineal al



considerarlas constantes, integrarlas en el nuevo elemento y distribuirlas en la cantidad de material en ese elemento; o bien puede ser mediante advección de segundo orden, el cual consiste en considerar las variables como una función lineal, para esto se usa una interpolación cuadrática a partir del valor constante de la variable asociada al elemento, para asegurar que el transporte es adecuado se diferencia la función encontrada para determinar la pendiente en el punto de integración a la mitad del elemento y esta debe estar comprendida en el rango de valores de la variable original de los elementos adyacentes, esto además asegura que la transición es suave y monótona, se usa por defecto en cada análisis (Simulia, 14.1.1, 2012).

El flujo en un material euleriano está sujeto a las condiciones de definición del modelo, lo cual causa que en la mayoría de los casos sea dependiente del tiempo y para incrementos de tiempo muy grandes o muy pequeños las variables calculadas no tengan convergencia o los errores numéricos se propaguen demasiado, afectando así el comportamiento de las variables a lo largo del cálculo, para controlar esto se regula el incremento estable de tiempo mediante la velocidad de advección.

La velocidad de advección mide cuantos elementos atravesó el material de un elemento original en el incremento de tiempo establecido, este debe ser limitado para que el material solo fluya a través de un elemento o una fracción de este por cada incremento. Se limita que el rango de flujo varíe entre 0.1 y 1; sin embargo solo se recomienda disminuir el rango cuando la velocidad de flujo se aproxima a la velocidad de propagación del sonido en dicho material (Simulia, 14.1.1, 2012).

2.5.2 Capacidades del dominio euleriano

Se definen condiciones iniciales tales como, esfuerzo, temperatura, velocidad y asignación de material, todas estas se definen como un campo para que su distribución se defina a lo largo del dominio, permitiendo asignar de forma homogénea o por una función discreta o analítica.

El material para el dominio euleriano siempre se define como una condición inicial al momento de crear un análisis, para esto se requiere una distribución de fracciones de volumen para cada elemento que se puede realizar por medio de la asignación a toda la geometría euleriana creada o mediante la definición con una geometría específica.

La asignación a una geometría específica es simple mediante la implementación de la herramienta "Volume Fraction Tool" (VFT) en ABAQUS/CAE®, esta herramienta permite colocar una geometría específica (pieza de referencia, PR) en el dominio euleriano para un análisis topológico, de esta forma determina que elementos están interactuando con la PR y en que volumen son afectados por la definición, además la herramienta permite multiplicar por un factor de 0 a 1 para establecer qué porcentaje de la PR está llena con el material definido, sigue el mismo principio de asignación que la técnica VOF (Simulia, 28.5, 2012).

El resultado del uso de la herramienta VFT es un campo discreto, el cual se usa para asignar material a los elementos que fueron determinados como intersecados o contenidos en la PR, de



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



esta forma se obtiene una sección con material definido que tiene la misma topología de la PR, esto también se puede definir para la parte exterior de la PR permitiendo crear análisis del comportamiento de un sólido inmerso en un medio fluido o deformable o bien crear análisis FSI para la contención de materiales ante determinadas solicitaciones, **Imagen 2.10**.

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.0	0.32	0.91	0.91	0.32	0.0	1.0	0.68	0.09	0.09	0.68	1.0
0.0	0.91	1.0	1.0	0.91	0.0	1.0	0.09	0.0	0.0	0.09	1.0
0.0	0.91	1.0	1.0	0.91	0.0	1.0	0.09	0.0	0.0	0.09	1.0
0.0	0.32	0.91	0.91	0.32	0.0	1.0	0.68	0.09	0.09	0.68	1.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

a) b)

Imagen 2.10 Campos discretos obtenidos mediante VFT, a) parte interna de PR, b) parte externa de PR (Simulia, 28.5, 2012)

Esta herramienta es eficiente tanto que las geometrías pueden ser complejas como un tanque de gasolina y permite de este modo simular la interacción con la carrocería del automóvil al cual pertenece, este análisis permite extraer deformaciones, esfuerzos y desplazamientos inducidos por el movimiento del fluido, **Imagen 2.11** y **Imagen 2.12** (Fan, 2009).

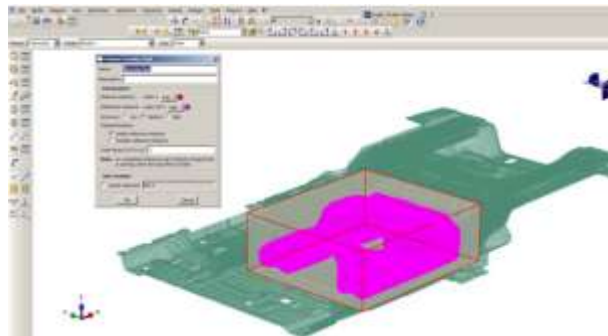


Imagen 2.11 Aplicación de VFT a un tanque de gasolina para una simulación del tipo FSI con el uso de un análisis CEL, dominio euleriano en gris y tanque lagrangiano en rosa (Fan, 2009).

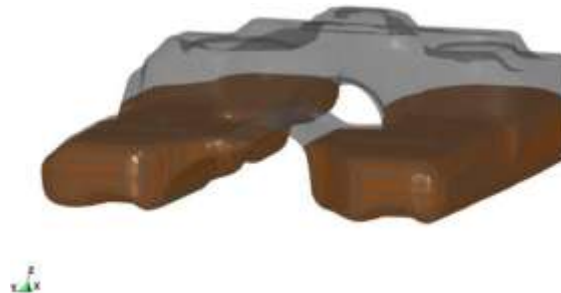


Imagen 2.12 Inicialización de gasolina en el tanque de almacenamiento para dar inicio al análisis CEL (Fan, 2009).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



El dominio euleriano puede ser restringido en la manera que fluye el material mediante la aplicación de condiciones en los límites del dominio que prescriba un comportamiento normal o tangencial a la superficie donde se está definiendo, de este modo si se describe una velocidad o aceleración en determinados nodos el material igualara dicha condición de flujo en el momento que entre en contacto con ellos. Si la condición de fluido provoca que este fluya al exterior del dominio euleriano este será excluido de la simulación y se observara el efecto en un pérdida de masa total y disminución de energía, si en cambio provoca que el material fluya la masa total aumentara, así como la energía; además el material que entra tendrá las mismas características de composición y estado que el material de la frontera por el cual entró (Simulia, 14.1.1, 2012).

En muchas ocasiones los análisis requieren de una cantidad finita de fluido que se moverá lo largo de una trayectoria específica, en la cual tendrá interacciones, solicitaciones o excitaciones, sin embargo para que no exista pérdida de material por salida del dominio definido y la malla euleriana esta fija en el espacio esta debería ser muy grande, esto demanda muchos recursos y tiempo de cómputo. Para este problema se creó la condición "Eulerian Mesh Motion", esta permite a la malla moverse en el espacio, seguir a una instancia o a un fluido en específico, expanda o contraiga según el perfil del fluido que sigue; de esta forma se puede disminuir el tamaño de la malla que sea únicamente el fluido a usar o un poco excedida de la geometría para permitir contactos con superficies definidos de forma más compleja, de este modo se asegura que si se presentan trayectorias inesperadas la masa de fluido no se pierda en el cálculo y visualización (Simulia, 14.1.3, 2012).

El algoritmo de seguimiento está basado en la determinación de una malla que encierre el dominio a seguir, esta tiene seis grados de libertad (desplazamiento y escalamiento en las tres direcciones), los cuales son referidos al sistema local de coordenadas, este sistema se fija en el espacio a lo largo de la simulación, si no existe un sistema local se usa el global. Esta algoritmo requiere una superficie para seguir, si esta es lagrangiana la malla euleriana encerrará los nodos que la definen, si la superficie a seguir es euleriana la malla de seguimiento encerrará al material definido (Simulia, 14.1.3, 2012).

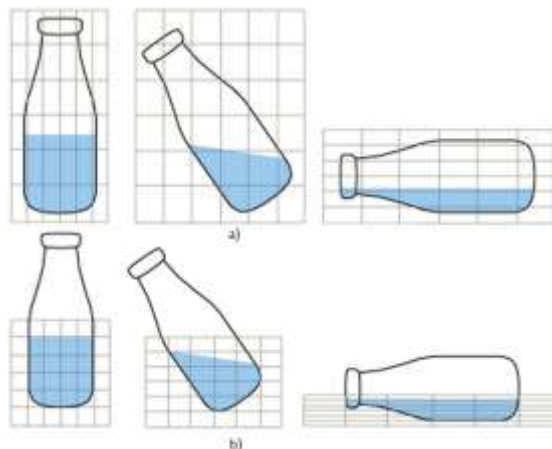


Imagen 2.13 a) esquema de seguimiento de la malla euleriana al sólido de la botella, b) esquema de seguimiento de malla euleriana al fluido definido (Simulia, 14.1.3, 2012).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Pueden presentarse fallas si la malla euleriana tiene restricciones contradictorias al seguimiento, no se alineó correctamente al sistema local, la geometría del material o del sólido no se adaptó adecuadamente la caja⁵ de seguimiento o que no se halla ubicado el material o la posición en el ensamble de forma adecuada (Simulia, 14.1.3, 2012).

Cuando la superficie de seguimiento es un dominio euleriano se pueden presentar casos en los que pequeños fragmentos demanden un movimiento de malla excesivo, para poder limitar ese defecto se especifica un volumen mínimo para ser incluido en el cálculo, por defecto se implementa 0.5, sin embargo se calibra de acuerdo a cada modelo y zonas que se deseen modelar o se puedan despreciar (Simulia, 14.1.3, 2012).

El algoritmo de seguimiento se limita de acuerdo a (Simulia, 14.1.3, 2012):

- a) Expansión y contracción: la caja de seguimiento mantiene toda la superficie euleriana confinada lo cual causa que los elementos superen el perfil del material definido o disminuyen tanto que no lo puedan contener, se puede definir que un límite de expansión o contracción entre 0.5 y 1.
- b) Contracción: evita que una vez que la malla a alcanzado determinado tamaño se contraiga, lo que optimiza el cálculo y permite que el volumen inicial sea contenido.
- c) Traslación: especifica el movimiento del centro de la caja de seguimiento fijándolo en una dirección o dejándolo libre, la dirección es definida sobre un eje del sistema de referencia (Simulia, 16.10.22, 2012).
- d) Centrar la caja de seguimiento: al centro de masa, permite seguir de forma eficiente modelos donde se tiene dispersión de masa. También se puede fijar sobre de un eje, si se conoce que el modelo seguirá una trayectoria específica. Los planos positivos o negativos se fijan para que no se desplacen o sean libres (Simulia, 16.10.22, 2012).
- e) Controlar el acercamiento a la superficie objetivo: especifica que tan de cerca o lejos aparezcan los límites de la malla euleriana respecto la superficie a la cual sigue, está comprendido entre 0 y 2 del máximo desplazamiento.
- f) Cambios de aspecto: evita la deformación de la caja en una dirección con el objetivo de mantener la integridad de los elementos eulerianos, se logra iniciando el movimiento en las otras direcciones para mantener la relación original entre los límites de la caja.
- g) Rango de movimiento: evita que la caja se mueva más rápido que la superficie a la cual sigue, permite especificar que un factor respecto a la máxima velocidad de la superficie que sigue para disminuir o aumentar la velocidad de seguimiento de la caja; también se puede limitar a que mantenga la misma distancia respecto a la superficie que en el paso "Initial" a lo largo de toda la simulación.

Los dominios eulerianos son restringidos para que se comporten como un flujo de material que interactuará con elementos sólidos o con otras condiciones de flujo, para esto se definen "Eulerian Boundaries" o condiciones en los límites del dominio euleriano. En general se aplican para control

⁵ Caja: la malla de seguimiento requiere que sea una malla rectangular para que se asigne cada lado a un eje y la expansión o contracción se calcule adecuadamente (Simulia, 14.1.3, 2012).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



la entrada de material, definir un campo de presión y simular un dominio infinito; todas y cada una de ellas han de asociarse a la superficie deseada, previamente definida en el dominio y solo se define una por superficie (Simulia, 14.1.2, 2012).

Cada una de estas es restringida y controlada para lograr precisión en la simulación, son:

Tabla 2.2 Condiciones de flujo aplicadas a dominios eulerianos (Simulia, 14.1.2, 2012).

Condición límite	Opciones	Características
Entrada de flujo	Flujo libre	Es la opción por defecto, permite que el material fluya libremente adoptando las condiciones preexistentes en el elemento que atraviesa.
	Sin flujo	No permite que el material (definido o void) fluya a través de la superficie asociada, la componente normal de velocidad es cero cuando esta se dirige hacia la frontera, la componente tangencial no se ve afectada.
	Flujo vacío	Permite que exista un flujo de entrada que esté lleno de material void, de esta forma se puede llegar a un momento del cálculo en que el dominio sea ocupado solo parcialmente por el material definido.
Salida de flujo	Salida de flujo libre	Mantiene las mismas características que el flujo libre, pero en condición de salida del dominio. Esta condición es la predefinida si el comportamiento flujo vacío se especifica en una superficie.
	Salida de flujo no reflejante	Se utiliza para simular dominios infinitos, o que la zona de análisis este muy alejada de las perturbaciones causados por los límites del sistema a modelar. Los casos en los que se debe evitar el uso de esta condición son cuando exista transferencia de masa importante a través de dicha frontera.
	Salida de flujo en equilibrio	Modela situaciones de dominio infinito, asume que el esfuerzo es continuo y cero en los elementos de la frontera, se aplica tracción a dichos nodos para balancear el esfuerzo debido al flujo. Aplica en condiciones de frontera de las cuales se desconoce la distribución de presión.
	Salida de flujo en presión cero	Aplica tracción suficiente para contrarrestar el esfuerzo cortante en el fluido, además genera un campo de presión uniformemente distribuido. Es la condición por defecto si la condición flujo libre no se ha especificado.

Los materiales se definen como en cualquier otro tipo de análisis, sin embargo los materiales anisotrópicos, hiperelásticos (se puede adaptar pero la orientación de material no regresa adecuadamente al retirar las cargas), materiales que fallen de manera frágil y materiales espumosos de baja densidad no son soportados por el análisis euleriano debido a inexactitudes en la simulación del comportamiento (Simulia, 14.1.1, 2012).

Como ya se ha discutido los dominios eulerianos permiten el flujo de material sin distorsión de la malla, para lograr esto de forma efectiva se debe definir el comportamiento del material en todo



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



el rango de deformación e incluso definir el comportamiento de falla. Si el material a modelar es isotrópico se simula la falla mediante la definición de una variable de daño que lo caracterice, sin embargo los modelos de falla debido a esfuerzo cortante, así como los modelos de amortiguación de masa de Rayleigh tampoco son soportados en este tipo de análisis (Simulia, 14.1.1, 2012).

Este tipo de dominios son mallados con un elemento de tipo multi-material "EC3D8R" y con el tipo multi-material térmicamente acoplado " EC3D8RT", se basan en el elemento "C3D8R" del dominio lagrangiano pero admite variedad de materiales y transporte de material a lo largo de la malla. Aplica la misma deformación a todo el material contenido en un elemento, esto permite que el esfuerzo y otras variables evolucionen de manera independiente a otros materiales definidos. Las variables de cada elemento se combinan usando la información de la cantidad de volumen por elemento para crear datos promedio con los cuales se generara la fuerza en cada nodo para la interacción con los elementos aledaños (Simulia, 14.1.1, 2012).

Los elementos mencionados requieren la definición de 8 nodos, solo están definidos para análisis tridimensionales, usan viscosidad con "hourglass control" por defecto a menos que se apliquen materiales definidos mediante ecuación de estado, sin embargo se les puede activar si el modelo lo requiere (Simulia, 14.1.1, 2012).

Los materiales puramente eulerianos no requieren de la definición de un contacto explícito, ya que la definición del elemento no permite que dos materiales definidos por separado ocupen el mismo espacio físico, además la interacción en las superficies se modela con un comportamiento adhesivo debido a que se asume que un campo simple de deformación se aplica a cada material dentro del elemento y el esfuerzo se transmite a través de la intercara del campo de deformación definido (Simulia, 14.1.1, 2012).

El contacto entre dominios eulerianos y lagrangianos se hace de forma explícita, ya que se detecta mediante la interacción de material en los elementos eulerianos y el material lagrangiano que ocupe el dominio del fluido, de esta forma el algoritmo calcula y sigue automáticamente la intercara generada entre ambos dominios, de esta manera no se requiere que la malla euleriana tenga un tamaño, forma ni movimiento definido para el análisis, ya que en conjunción con VFT y la condición de seguimiento se puede crear un rastreo de material finito en contacto en todo momento con las piezas lagrangianas sin perder material ni usar elementos innecesarios (Simulia, 14.1.1, 2012).

La definición del contacto entre estos dominios se puede realizar con dos enfoques (Simulia, 14.1.1, 2012):

- a) Dominio lagrangiano dentro del euleriano: requiere que los elementos lagrangianos ocupen elementos eulerianos vacíos, de esta forma cuando el flujo ocurre los sólidos lagrangianos empujan al material de unos elementos a otros, mientras que los originales pasan a ser ocupados por material void, además se complementa con la condición de que dos materiales no pueden ocupar el mismo espacio físico para prevenir el empalme de los dos dominios definidos.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



- b) Dominio lagrangiano fuera del euleriano: requiere que existan al menos una capa de material vacío para que exista material void que pueda fluir a los elementos que son dejados libres por el material definido.

Este método de contacto se define como contacto general, que es una versión más extensa del contacto superficie con superficie (Figuroa, 2009), además permite analizar falla y erosión en los cuerpos lagrangianos, ya que si el modelo genera cavidades en la superficie sólida, el material euleriano puede fluir sin problema por dicho espacio. En el caso de la erosión las caras interiores del sólido deberán ser incluidas en la definición de superficie de contacto (Simulia, 14.1.1, 2012).

El contacto general en ABAQUS®6.12 es especificado como parte del modelo o el planteamiento del mismo, permite definir contacto de manera sencilla con muy pocas restricciones en el tipo de superficies involucradas, usa algoritmos de seguimiento que aseguran las condiciones de contacto apropiadas de forma eficiente, es posible definirlo en conjunto con el algoritmo basado en pares de contacto, está limitado a superficies tridimensionales y a modelos que presenten contacto deslizante finito y solamente soporta restricciones de contacto mediante el método "penalty" (Simulia, 35.4.1, 2012).

Las superficies eulerianas se definen en tres dimensiones, como información del modelo y son creadas mediante la especificación de un entidad de material y asignándole un nombre único. Estas representan el exterior de un material definido en el dominio euleriano, y no se puede realizar mediante la asignación de una cantidad finita y precisa de nodos (debido a las capacidades de flujo), en vez de eso se asocian al volumen y su distribución del material asignado al dominio en cuestión, de esta forma se calcula en cada incremento asociándola a cada nueva distribución de volumen (Simulia, 2.3.5, 2012).

Una vez definida una superficie euleriana se usan para incluirlas en un contacto específico, exclusiones e interacciones individuales, no se pueden combinar. Para modelos que no requieran un contacto con especificaciones precisas se define contacto automático (método por defecto), de este modo todo el exterior del material euleriano se considera para el contacto (Simulia, 2.3.5, 2012).

Las principales ventajas de las superficies eulerianas son: asignar propiedades de contacto específicas para un material definido en el dominio euleriano y excluir interacciones innecesarias entre superficies lagrangianas específicas y materiales eulerianos específicos, esto mejora la eficiencia y el tiempo de cómputo (Simulia, 2.3.5, 2012).

Este algoritmo de contacto compensa automáticamente las discrepancias del tamaño de elementos en las mallas para prevenir la penetración de material euleriano en el dominio lagrangiano, este algoritmo solo funciona en elementos lagrangianos laminares y sólidos (Simulia, 2.3.5, 2012). Los dominios puramente eulerianos con varios materiales no requieren definir un contacto, se controlan por el algoritmo que define la limitación de que dos materiales ocupen el mismo espacio al mismo tiempo, una vez ocurrido el contacto de entidades eulerianas estas no se



separan para prevenir la necesidad de simular deslizamiento o un comportamiento perjudicial (Simulia, 28.3, 2012).

El conjunto de variables "EVF" (Volumen fraccionario asignado al dominio euleriano) se generan para cada material definido (incluido el void), este conjunto de datos deberá existir siempre, ya que la definición de superficies, velocidades y variables del dominio euleriano están basadas en este conjunto. Cada variable calculada para un material se identifica con el nombre asignado a este. Otra variable importante es SVAVG (Stress associate to Volume Average) que entrega un valor simple de esfuerzo para cada elemento calculado en base al esfuerzo calculado por fracción de volumen promedio de cada material que se encuentre en dicho elemento, también es posible determinar el volumen y la masa total de una sección euleriana específica, como antes se identificarán por el nombre del material asociado.

2.5.3 Limitaciones del dominio euleriano

Las limitaciones del dominio euleriano son (Simulia, 14.1.1, 2012):

- a) Las mallas eulerianas solo se mueven siguiendo superficies lagrangianas o material euleriano.
- b) El material euleriano solo se enlaza a los dominios lagrangianos para que los grados de libertad del dominio sólido se copien al del fluido.
- c) No se definen orientación de material o propiedades.
- d) Los elementos del dominio son EC3D8R y EC3D8RT, exclusivamente.
- e) No puede ser importado un dominio euleriano.
- f) El contacto en ambos lados de elementos laminares o de membrana puede causar penetración del material euleriano en el sólido lagrangiano, para evitarlo y solventar el problema de contacto mediante el uso de elementos sólidos.
- g) El confinamiento de un material euleriano en un sólido lagrangiano puede causar "escurrimientos" por las aristas del sólido, esto se evita refinando el dominio euleriano o agregando un filete con radio igual al tamaño local del elemento euleriano.
- h) El contacto CEL solo permite elementos laminares o sólidos.
- i) Contacto térmico solo definido para conducción directa, requiere contacto perfecto entre las superficies que se modelan, solo se define en un paso dinámico-temperatura-desplazamiento, si es un paso dinámico simple el comportamiento se asume adiabático.
- j) Solo se pueden aplicar cargas de tipo presión en los dominios eulerianos.
- k) El escalamiento de masa no es admisible para este dominio, se calcula en base a las propiedades definidas para el material, por lo que en general este tipo de análisis requerirá mayor tiempo de cómputo.



2.6 Manejo del CEL en ABAQUS®6.12

Mediante el método CEL, la deformación, el seguimiento de superficies libres y la necesidad de conocer las superficies de contacto a priori se ha eliminado, además de la implementación del contacto general usado en el FSI se agregan las capacidad del material euleriano, como el comportamiento adhesivo o la capacidad de que dos materiales no ocupen el mismo espacio al mismo tiempo. Todo esto ha permitido mejorar sustancialmente el modelado FSI, la comparación del ejemplo descrito en la sección 2.4 con el siguiente, 2.6 a), muestra la evolución del modelado de fluidos en dominios lagrangianos a modelos con CEL.

a) Ejemplo Impacto de una botella parcialmente llena con agua (Simulia, 2.3.2, 2012).

Este ejemplo evidencia el uso de la herramienta VFT para la asignación de material en un geometría compleja, el uso del contacto euleriano-lagrangiano para simular un evento dinámico que involucra un material fluido que tiene como fronteras una estructura sólida.

Se usa una botella plástica con un espesor homogéneo de 0.5 [mm], exceptuando la rosca que cuenta con 0.65 [mm] de espesor, está construida en HDPE, la tapa se define como una entidad separada con un espesor homogéneo de 1 [mm], la cual esta ensamblada en la boquilla de la botella. Se debe posicionar con un ángulo para que solo una de las esquinas del fondo tenga contacto con el suelo en el momento del impacto; el suelo se define como un cuerpo rígido plano con área suficiente para cubrir la extensión de la botella.



Imagen 2.14 Posición inicial para el análisis del impacto de la botella, se visualiza la botella en verde, el agua en azul, la tapa en rojo y el suelo en gris (Simulia, 2.3.2, 2012).

La simulación se ejecutó en un solo paso que tiene una duración de 0.5 [s], mediante el método de escalamiento de masa semiautomático se modificó el tiempo de incremento mínimo a $7.528e-7$ lo que reduce el tiempo casi a la mitad, con solo un incremento de masa de 0.11%; por el contrario al usar el método de ajuste de masa esta puede ser redistribuida entre los elementos de la botella para alcanzar el mismo tiempo de incremento sin afectar la masa de la botella. Un gran número de elementos tienen masa en exceso que es requerida para alcanzar el tiempo estable de incremento mencionado, solo 0.12% de ese excedente de masa es redistribuida a los elementos restantes para alcanzar el tiempo requerido, ninguno de los dos métodos afecta los resultados del análisis (Simulia, 2.3.2, 2012).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



En la definición de la botella se usaron las propiedades de HDPE para la botella, usando una curva de endurecimiento isotrópico, se estableció el punto de falla en $8.618 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ y una deformación de 0.59, con una densidad de $8.76e-7 \text{ [kg/mm}^3\text{]}$, módulo de Young de $903.114 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ y una relación de Poisson de 0.39. El agua se modeló mediante la ecuación U_s-U_p , que es la forma Hugoniot de la ecuación de estado Mie-Grüneisen, con una densidad de $9.96e-7 \text{ [kg/mm}^3\text{]}$ y un módulo de viscosidad de 2.094 [GPa] . El suelo fue restringido totalmente, es decir se encastro en la posición de ensamble para que modelara adecuadamente un suelo (Simulia, 2.3.2, 2012).

Para asignar el material al dominio euleriano se usó el concepto de "Volumen fraccionario euleriano", así se define los elementos que tiene material, cuales no y en qué porcentaje está presente, así se determina la superficie y forma del material asignado. Se aplicó una aceleración gravitacional de $9800 \text{ [mm/s}^2\text{]}$ en la dirección z negativa, además se aplicó un campo de velocidad a la botella, tapa y fluido de -2444 [mm/s] que es la velocidad que debe alcanzar para una caída de 300 [mm] , así solo se desplaza una longitud mínima para simular el impacto de manera adecuada.

La botella tiene contacto con tres componentes diferentes del modelo, el piso, la tapa y el agua; se simuló asumiendo que el contacto es sin fricción mediante el método de contacto general. Esta fue mallada con elementos laminares S4R al igual que la tapa, mientras que el suelo se malló con elementos laminares rígidos SFM3RD. El dominio de la malla euleriana es un paralelepípedo de $300 \times 250 \times 200 \text{ [mm]}$, con un tamaño de elemento de 5 [mm] , esta cubre la botella, la tapa y se extiende ligeramente por debajo del suelo.

El programa entregó como resultado los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la botella y la tapa. La deformación logarítmica, el porcentaje equivalente de deformación plástica fueron analizados únicamente para la botella. El criterio de iniciación de daño y el "STATUS" se usaron para seguir fallas potenciales en la botella, el esfuerzo de contacto y la fuerza de contacto se extrajeron para las piezas sólidas.

Los resultados indican que el comportamiento de la botella se ve iniciado y dirigido por el movimiento del fluido que contiene, ya que las deformaciones que esta presenta coinciden perfectamente con el perfil del fluido, esto es visible en la *Imagen 2.15*.



Imagen 2.15 Visualización de resultados con incrementos de 0.01 [s] iniciando en el instante cero (Simulia, 2.3.2, 2012).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Se extrajeron las deformaciones logarítmicas de la botella, de esto se observa que el mayor nivel se alcanza en los aristas de la botella debido a la curvatura que está presente, así como en el fondo de la botella justo en el lugar de contacto entre el piso y la botella, esto es visible en la Imagen 2.16. Además el criterio de falla establecido en la definición del modelo no se alcanzó en ningún lugar de la geometría definida, a pesar de que la deformación es elevada.

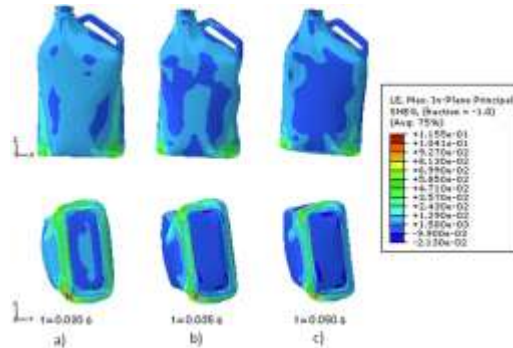


Imagen 2.16 Visualización de la deformación logarítmica desde a) el primer contacto total con el suelo, b) 0.015 [s] después del contacto total y c) final de la simulación (Simulia, 2.3.2, 2021).

Otra rama existente del manejo de fluidos en ABAQUS® 6.12 se implementó un nuevo dominio denominado "Smoothed Particle Hydrodynamic o hidrodinámica de partículas suavizadas", el cual permite discretizar el volumen de un dominio fluido mediante esferas con propiedades viscosas, mejora la cantidad de elementos a usar y limita más eficientemente la superficie libre del fluido. Es un método muy reciente que requiere validación ya que solo se ha probado de forma oficial por la compañía propietaria de esta paquetería simulando este mismo ejemplo (Simulia, 15.1.1, 2012).

b) Ejemplo "Deformación de un remache" (Simulia, 2.3.1, 2012)

La capacidad del análisis CEL no se limita al modelado de fluidos, este ejemplo muestra la aplicación a un modelo puramente mecánico que involucra deformación severa y evidencia las ventajas sobre un análisis sólido tradicional.

Este modelo tiene por objetivo determinar si la deformación del remache es apropiada en su aplicación y si el remache conserva suficiente resistencia mecánica después de la deformación cómo para sujetar las capas en cuestión, así como sí el mecanismo de instalación del remache es adecuado. Para la determinación de los parámetros mencionados se observa el desplazamiento, el porcentaje de deformación plástica y la fuerza de reacción en la herramienta.

Para simular la deformación el remache es colocado en un agujero en el centro de una placa circular, mientras que la herramienta se simula con dos placas circulares ubicadas en los límites superior e inferior del remache, Imagen 2.17.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

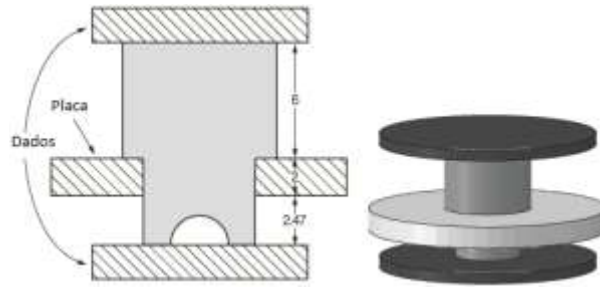


Imagen 2.17 Geometría usada para la simulación, todas las dimensiones en [mm].

El remache es modelado como acero con densidad $7.85e-9$ [t/mm³], con un módulo de Young de $2.1e5$ [N/mm²], coeficiente de Poisson 0.266, esfuerzo de cedencia $3e5$ [N/mm²]. El plato y las herramientas se modelan como rígidos, puesto que no se tiene interés en el análisis de dichas piezas.

Tabla 2.3 Curva de deformación plástica en forma tabular para modelar la deformación del remache (Simulia, 2.3.1, 2021).

Esfuerzo de cedencia [N/mm ²]	Deformación plástica
3.0e5	0
4.5e5	0.02
7.5e5	0.34
1.4e5	0.35

Se estableció un desplazamiento de las herramientas, la superior desciende 3 [mm] y el inferior sube 2 [mm], estas se controlan con una amplitud tipo rampa con un dominio de $0.8e-3$ [s] y se empotran para el resto del paso, la placa se restringe totalmente. La placa y las herramientas son restringidas con condición de cuerpo rígido, además para las herramientas se restringe la capacidad de giro y desplazamiento en el plano horizontal. Y se define un paso dinámico explícito cuasi estático con duración de $1e-3$ [s].

Se extrae el porcentaje de deformación plástica, la fuerza de reacción en la dirección vertical medida en las herramientas. El análisis lagrangiano y el análisis CEL requieren variaciones en la malla, la definición de interacciones, método de solución, condiciones iniciales y resultados a visualizar, esto se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Diferencias para el planteamiento lagrangiano y CEL (Simulia, 2.3.1, 2012)

Sección que se modifica	Análisis lagrangiano (Tradicional)	Análisis CEL
Malla	Se usan elementos C3D8R con tamaño global de 0.25 [mm], para la pieza deformable, plato y herramientas.	Región rectangular de 17x17x11.5 [mm] con elementos EC3D8R con un tamaño global de 0.25 [mm]
Interacciones	Se usa método de contacto general sin fricción.	Se usa método de contacto general sin fricción. Se dejan unas capas de



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



		elementos vacíos entre la herramienta y el material euleriano para que el método reconozca las superficies pertinentes.
Condiciones iniciales	Las ya definidas.	Se asigna el material mediante el uso de la VFT y un campo predefinido de asignación de material, la pieza de referencia es el remache sin deformar del análisis tradicional.
Método de Solución	Solución por defecto para comparar con el planteamiento CEL.	Solución preestablecida.
Salida	Las ya definidas.	Las ya definidas y las asociadas a la variable EVF

La visualización preliminar denota que la malla en el análisis tradicional deforma severamente el perfil de la malla y hace inútiles los resultados obtenidos de esa región, mientras que el análisis CEL muestran un perfil de deformación similar pero con una malla regular con calidad inicial, *Imagen 2.18.*

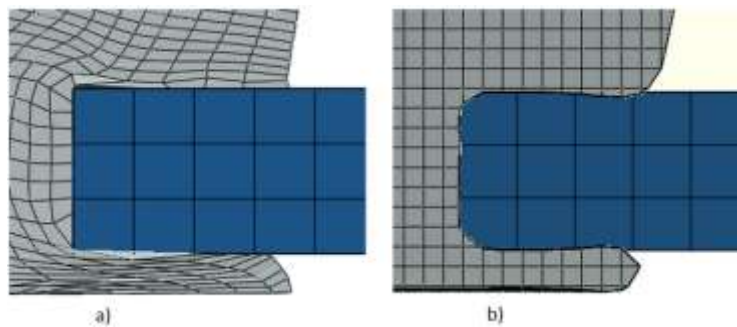


Imagen 2.18 a) deformación obtenida en el análisis tradicional (Simulia, 2.3.1, 2012).

El contacto general presenta fallas en el cálculo preciso del límite de las superficies donde hay interacción, en ambos análisis se presenta penetración del remache en las herramientas. En el caso puramente lagrangiano se debe a la distorsión de la malla, ya que la compresión de la malla causa que haya menos nodos que se puedan usar para referencia de los nodos aledaños permitiendo a las caras de los elementos reubicarse en zonas que pertenecen a otra región ocupada, *Imagen 2.18 a).*

El análisis CEL presenta penetración debido a la aproximación utilizada en la visualización, el límite del material euleriano no corresponde a la cara del elemento discreto, dicha aproximación está basada en un promedio numérico y no en propiedades geométricas, esto causa la penetración aparente en las superficies de contacto y explica porque en zonas con aristas se visualiza penetración del material. Los resultados extraídos a pesar de la pseudo penetración son aceptables lo que rectifica que no hubo un fallo en el contacto definido, *Imagen 2.18 b).*

El problema en ambos análisis puede ser resuelto mediante una malla más fina, para reducir la distorsión en el análisis clásico y más elementos generan un promedio de volumen más preciso y mejor distribución en la visualización.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



La visualización del porcentaje equivalente de deformación es similar en ambos análisis, la diferencia más notoria es que el máximo de esta variable aparece en áreas ligeramente diferentes. En el CEL aparece cerca de la esquina donde hay contacto con la placa, mientras que en el análisis tradicional aparece en los elementos más deformados, en las zonas con menor deformación la visualización de ambos análisis es comparable. Lo anterior indica que para zonas muy deformadas en análisis CEL es más confiable, Imagen 2.19.

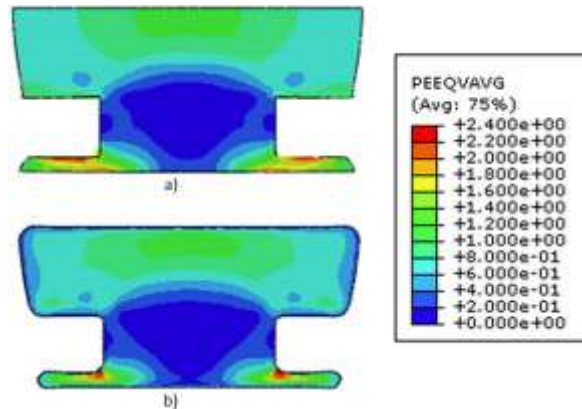


Imagen 2.19 Porcentaje de deformación plástica a) análisis tradicional lagrangiano, b) análisis CEL (Simulia, 2.3.1, 2012).

La observación de la fuerza de reacción en las herramientas muestra que ambos análisis son comparables en la primera mitad de la simulación, pasado este periodo el análisis lagrangiano muestra oscilaciones y divergencia del análisis CEL. Las oscilaciones del análisis clásico se deben a la deformación de la malla, Imagen 2.20.

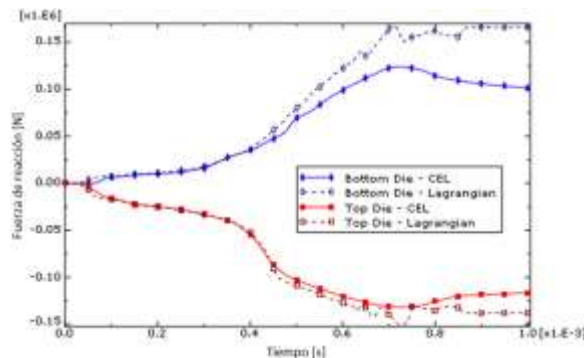


Imagen 2.20 Fuerza de reacción obtenida de ambos análisis (Simulia, 2.3.1, 2012).

El análisis CEL permite un análisis con desplazamientos de material importantes, mediante una definición más sencilla en el modelo pero a un costo computacional más elevado. Así como permite modelar fluidos o sólidos mediante la correcta definición de propiedades y una asignación simple al dominio y lugar que se quiera modelar, así como también admite la interacción con muchos cuerpos a la vez sin necesidad de definirlos detalladamente.

El realismo de la simulación se alcanza de mejor manera en el análisis CEL, tanto en la visualización de superficie libre como en la de porcentaje de deformación severa.



c) Ejemplo "Análisis Euleriano de una columna de agua colapsando" (Simulia, 1.7.1, 2012)

Una columna de agua está sujeta a la aceleración gravitacional que causa su colapso y fluya a lo largo de una superficie rígida y se compara con los resultados experimentales (Martin, 1952), lo que demuestra la efectividad del análisis CEL y el uso de la ecuación de estado para simular la dinámica de un fluido en paquetería de elemento finito con método explícito.

La aproximación al modelo se hace en un modelo de pseudo dimensión 2, ya que el agua se define en un dominio de $10 \times 5 \times 0.05$ [m] (para cumplir con el requerimiento CEL de usar elementos 3D).

En todas las caras del dominio se definió una condición de frontera de velocidad cero normal a la cara en cuestión, así se previene el flujo de material fuera o hacia el dominio euleriano.

La asignación de material solo se hace en una partición del dominio de $2.25 \times 4.5 \times 0.05$ [m], ubicada en la extrema izquierda del dominio total, se le asigno agua modelada como un fluido incompresible Newtoniano mediante la ecuación $U_s - U_p$ con parametros $\rho = 998.2$ [kg/m^3], $\eta = 0.001003$ [Ns/m^2], $C_0 = 1500$ [m/s], $s = 0$, $\Gamma_0 = 0$, con un módulo de viscosidad aproximado a 2.246 [GPa]. Se definieron dos cargas, la gravedad con el valor conocido y una iniciación de esfuerzo geostático, para simular la presión hidrostática. La malla generada cuenta con 222×111 elementos eulerianos.

Se obtuvo la progresión del movimiento del fluido en el dominio euleriano mediante el seguimiento de la distribución de volumen del material asignado, Imagen 2.21, así como la velocidad en la dirección del eje horizontal, esto permite visualizar que el agua se mueve hacia abajo debido a la gravedad ya que la superficie libre de la columna cae más rápido que la superficie en contacto con la pared provocando la aceleración del fluido en la dirección horizontal, Imagen 2.22.

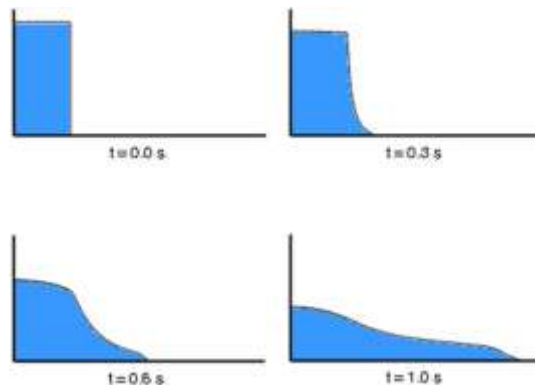


Imagen 2.21 Grafica de la distribución de agua obtenida de las salidas tabulares del programa y pos procesadas en una paquetería puramente matemática, cada rastreo muestra en instante en que se realizo (Simulia, 1.7.1, 2012).



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

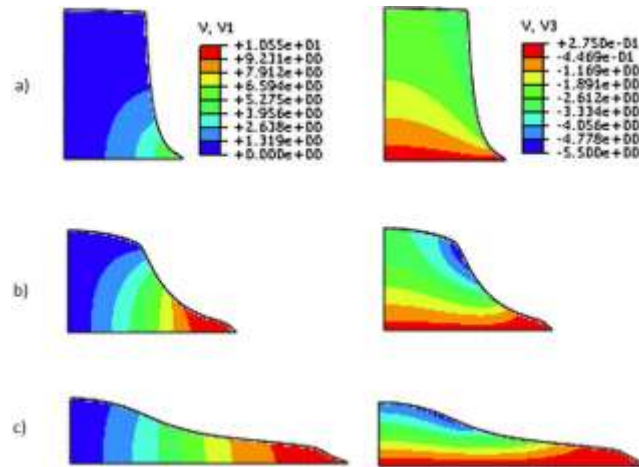


Imagen 2.22 Visualización de la velocidad adquirida por el fluido en la simulación, la columna de la izquierda muestra la velocidad horizontal, la de la derecha muestra la vertical, a) muestra el campo de velocidades a los 0.3 [s], b) a los 0.6 [s] y c) 1 [s] (Simulia, 1.7.1, 2012).

La dinámica de un fluido se modela de manera eficiente mediante la definición de una ecuación de estado y propiedades viscosas.

Las condiciones de frontera de velocidad cero son suficientes para determinar zonas por donde el fluido no puede viajar.



Capítulo 3 Modelado del proceso de colada por gravedad en ABAQUS®

3.1 Introducción

La implementación del análisis CEL en la paquetería de propósito general ABAQUS®6.12 permite plantear una posible solución al problema de rastreo de superficies libres, cálculo de distribución del volumen de un material dentro del dominio CEL y el modelado de múltiples interacciones de cuerpos sólidos y diversos fluidos de manera simultánea mediante un algoritmo de fácil definición.

Conociendo las capacidades anteriores y los intentos previos del modelado de FSI en ABAQUS® se diseñó un modelo que permite explorar las capacidades mencionadas y comparar la efectividad de la simulación de flujo con procesos experimentales conocidos. El primero estandarizado llamado "Benchmark Testing of the flow and Solidification Modeling of Al Castings" (Campbell, 1996) y el segundo una colada por gravedad conocida en una lingotera simple rectangular para lingotes de 350 [g], en la cual se tiene un lingote enfriado que presenta rastros del comportamiento del flujo durante el llenado (Martínez, 2012).

3.2 Modelo general

El modelo de colada por gravedad consiste en tres piezas fundamentales y una pieza auxiliar, debido a que el proceso sigue los mismos principios sea cual sea la pieza que se requiera obtener de este proceso. Las piezas son: un dominio euleriano donde se define la fundición y el cálculo de flujo de esta, una pieza que induzca que el material fluya hacia la cavidad de interés y la cavidad en donde se realizará el análisis.

La pieza auxiliar es una referencia que permite asignar el material en una zona, volumen y condiciones iniciales específicas para controlar el comportamiento de la fundición en el modelo, esta puede ser tan compleja como se requiera, ver sección 2.5.2.

La idealización más importante del modelo es que la cavidad que se analiza se representa como cuerpo rígido para analizar detalladamente el flujo del metal fundido, por otro lado los procesos a estudiar se realizan en moldes que no sufren daño por la colada, por ser un molde permanente y esta condición de integridad se asegura en el ensayo "Benchmarktest" (Campbell, 1996). De este modo lo único que limita dicha idealización es el análisis térmico en el molde.

La segunda idealización importante es que el fluido con el que se modela es agua debido al conocimiento que se tiene de sus propiedades y constantes de la ecuación de estado usada en la paquetería para calcular el comportamiento del fluido, esto se justifica por la experiencia práctica de los experimentos y las condiciones de similitud entre fluidos con comportamiento dinámico, ver sección 2.3.1.



3.3 Planteamiento del problema

El modelo en ambos casos consiste en llenar una cavidad de volumen conocido con un fluido sometido únicamente a cargas debidas a la gravedad, buscando que el fluido reconozca la geometría e interactúe de tal forma que ocupe la cavidad. Los problemas que se deben superar son la correcta interacción entre el fluido y el sólido para que no exista algún traslape de elementos o material, así como encontrar el tamaño adecuado de malla para el dominio fluido y el sólido que permita que los algoritmos de contacto converjan adecuadamente.

En los modelos se busca identificar el perfil de flujo que el fluido desarrolla, la velocidad que este presenta así como la ubicación de este mediante el rastreo de distribución de volumen, para determinar las zonas de recirculación y turbulencia para predecir las zonas de mayor probabilidad de aparición de defectos.

3.3.1 Geometría

La geometría usada para el primer modelo esta descrita en la sección 1.5, fue construida con elementos "shell" discretamente rígidos, con un espesor de 5 [mm] de acuerdo a lo especificado en el modelo estandarizado (Campbell, 1996), el resultado dentro de la paquetería se observa en la *Imagen 3.1*.

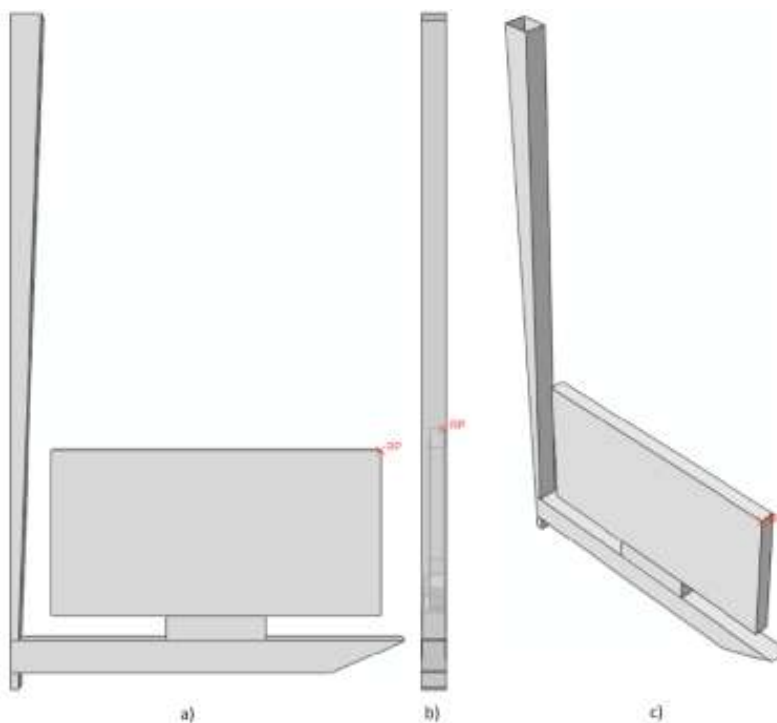


Imagen 3.1 Geometría creada dentro de la paquetería para la simulación de la colada estandarizada, a) vista frontal, b) vista izquierda, c) vista isométrico. El punto RP es un nodo de referencia, su función se especificará más adelante.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



La segunda pieza usada para modelar la cavidad asociada a la lingotera se crea con elementos "shell" discretamente rígidos de acuerdo a lo medido en la lingotera usada para la colada de lingotes Cu-4Al-Ni (Martínez, 2012), el resultado de la paquetería se observa en la *Imagen 3.2*.

Tabla 3.1 Medidas para crear la geometría de la cavidad de lingotera para el modelo.

Dimensión	Magnitud [cm]
X	8.8
Y	14.3
Z	0.7
Radio mayor del bebedero	1.2
Radio menor del bebedero	0.4

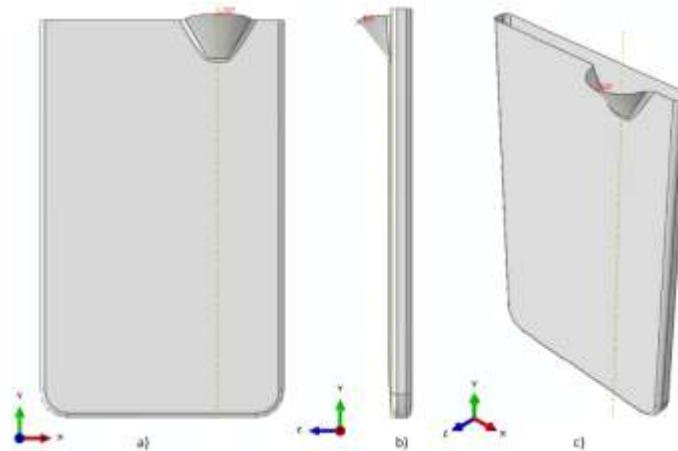


Imagen 3.2 Geometría creada dentro de la paquetería para la simulación de la colada de lingotes base Cu, a) vista frontal, b) vista izquierda, c) vista isométrico. La línea amarilla es el eje de simetría para crear el bebedero, todas las aristas fueron redondeadas con un radio de 10 [mm].

En la simulación de ambas coladas se usa un embudo para canalizar el material a la cavidad, este tiene las dimensiones para aceptar todo el material y dirigirlo en forma de chorro intentando imitar la caída natural de un líquido, la dimensión del material se explica en la sección 3.3.2, se redondean las aristas del embudo para asegurar un cambio suave en la dirección de flujo y evitar conflicto en la interacción de contacto en una zona de poco interés para el análisis.

Los embudos tienen un sobre dimensionamiento en el radio, respecto al volumen requerido de material, de 1 [mm] para que el material pueda asignarse adecuadamente y no cause problemas de visualización, ni de interacción al inicio del cálculo.

El embudo usado en el modelo de la lingotera para Cu-Al-Ni (Martinez, 2012), es una pieza discretamente rígida construida como sólido de revolución, esta definición no requiere material ni espesor pero si restricciones de comportamiento, que se describen ampliamente en la sección 3.3.4, con una altura total de $42e-3$ [m] y radio menor de $4.36e-3$ [m], el primer redondeo esta a una altura de $13e-3$ [m] y el segundo se encuentra a $38e-3$ [m] respecto del borde superior, el resultado se muestra en la *Imagen 3.3*. El embudo usado para el modelo "Benchmark Test" (Campbell, 1996), se definió de la misma manera que el embudo para el modelo mencionado,



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



pero se agregó una extrusión progresiva que va de la sección circular al inicio del bebedero del molde definido para el ensayo, de esta forma el modelo se aproxima a las condiciones planteadas en el método experimental, sección 1.5.1 ya que se evita la existencia de superficies libres en áreas donde no se tiene interés, la altura total del cilindro constante es $87e-3$ [m], *Imagen 3.4 a sec. 1*, la de la primera reducción es $17e-3$ [m] con un radio de $53e-3$ [m] *Imagen 3.4 a sec. 2*, la de la segunda reducción es $33e-3$ [m] con un radio de $45e-3$ [m] *Imagen 3.4 a sec. 3* y la de la sección progresiva es $118.5e-3$ [m], la cual converge a las dimensiones exactas del inicio del bebedero *Imagen 3.4 a sec. 4*.

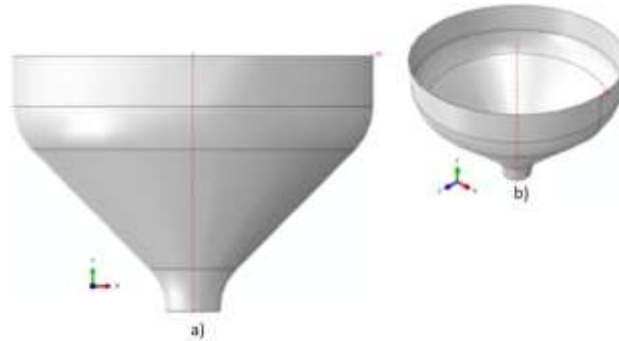


Imagen 3.3 Embudo para el modelo "Lingotera para Cu-Al-Ni", la línea en rojo es el eje de simetría respecto a la cual se generó la pieza, a) vista frontal, b) vista isométrica.

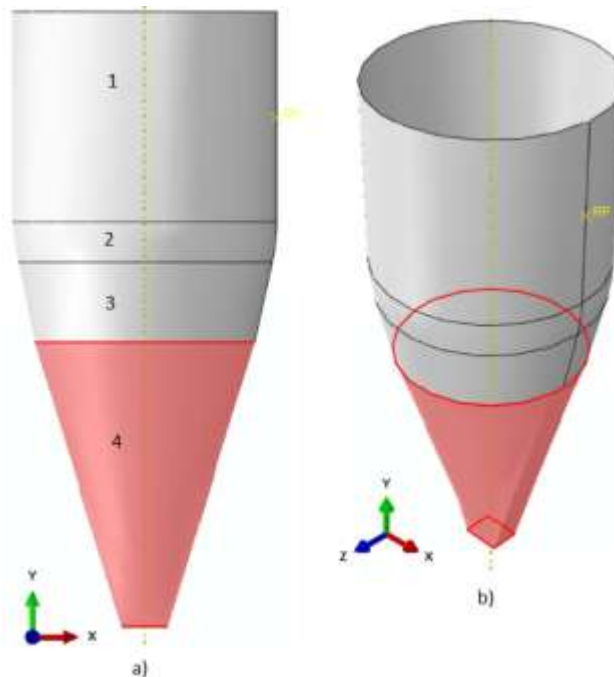


Imagen 3.4 Embudo para el modelo "Benchmark Test", a) sección resaltada en rojo es la extrusión progresiva, el perfil circular y rectangular (el mismo perfil que la entrada del bebedero del molde para el "Benchmark test") usados, el radio de la sección 2 es de $80e-3$ [m], b) vista isométrica del embudo terminado.

Las piezas usadas para el dominio de euleriano en ambos casos son sólidos extruidos, definidos como eulerianos, el dominio del modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni" presenta una



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



profundidad de extrusión de $7.5e-2$ [m], y la del dominio del modelo "Benchmark test" es igual a $15e-2$ [m], las dimensiones para su generación se muestran en la *Imagen 3.5*.

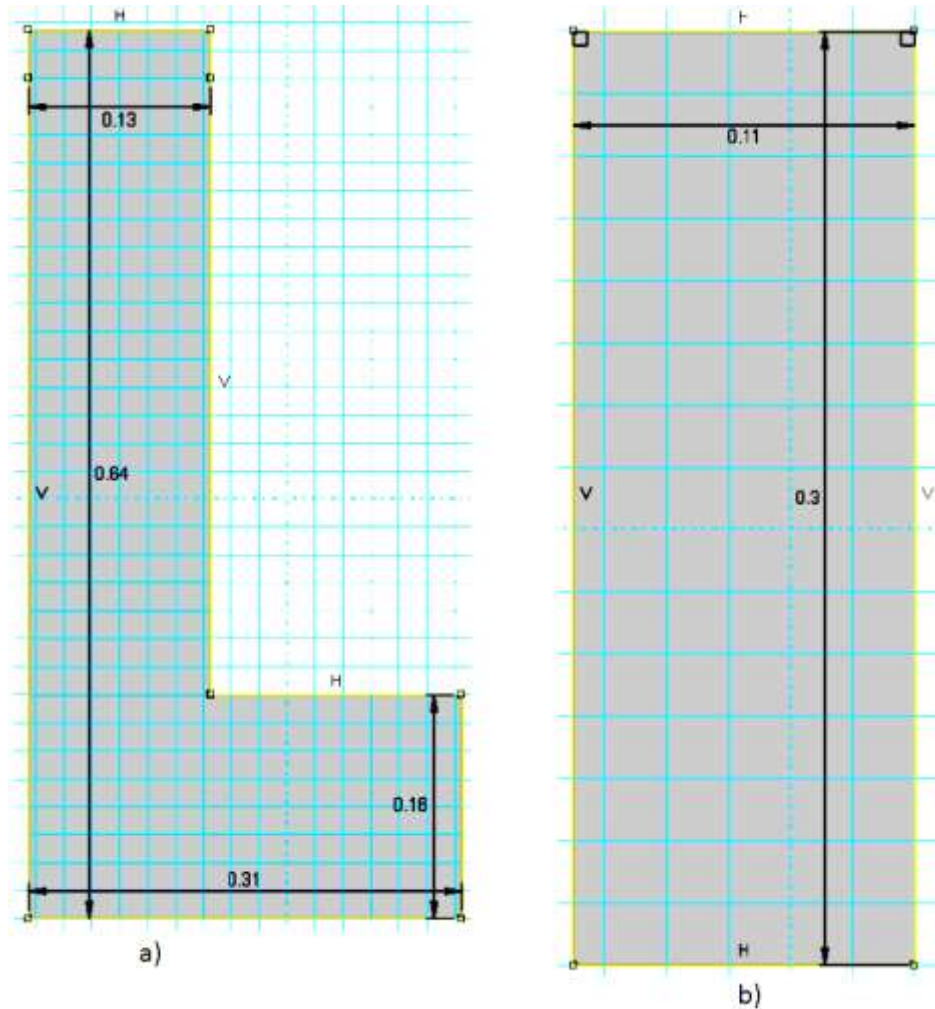


Imagen 3.5 Dimensiones para la creación de los dominios en el ambiente de dibujo de ABAQUS® a) Dominio para el modelo "Benchmark test", b) Dominio para el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni"



El ensamble de todas las piezas de ambos modelos se observa en la *Imagen 3.6*, se muestran todas las piezas que intervienen en la simulación.

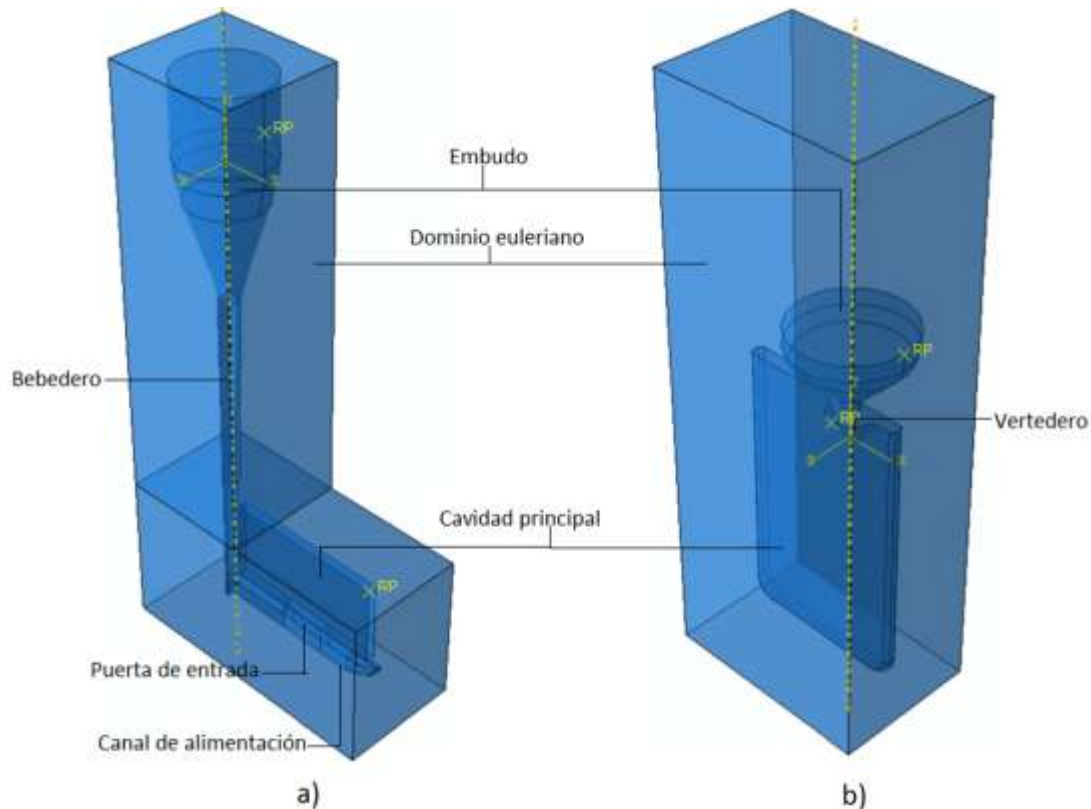


Imagen 3.6 Ensamble de los modelos, a) Modelo "Benchmark Test" y b) Modelo para lingotes base cobre.

3.3.2 Propiedades del material

El único material definido en el modelo es el fluido a usar en el dominio euleriano, para esto se requiere una ecuación de estado, que tiene la capacidad de (Simulia, 25.2.1, 2012):

- Proveer un modelo hidrodinámico que describe la resistencia volumétrica del material.
- Determinar la presión (positiva en compresión) como función de la densidad y la energía interna por unidad de masa.
- Permite la definición de la ecuación de estado de Mie-Grüneisen en la forma lineal de Hugoniot de energía neta U_s-U_p .
- Permite la definición de ecuaciones tabulares que definen una ecuación de estado lineal como función de la energía.
- Establece el comportamiento de compactación de materiales porosos dúctiles, en conjunto de la ecuación de Mie-Grüneisen o la ecuación tabular.
- Tiene la capacidad de modelar comportamientos explosivos, de ignición y expansión.
- Este tipo de dominios pueden usar diversas ecuaciones para su definición como la ecuación de gas ideal, ignición y desgaste.



- h) Define un material que únicamente presenta resistencia volumétrica, es decir que no presenta resistencia al cortante, o un material que tiene propiedades elásticas isotrópicas o viscosas.
- i) Es usada junto con los modelos plásticos de Mises, Johnson-Cook, Drucker-Prager (sin dilatación plástica), fractura bajo tensión, corte dinámico o por presión.

En los modelos tratados se requiere definir un fluido incompresible newtoniano e incompresible que será sometido a cambios de dirección, reducciones de área transversal e impactos por efecto de la carga por gravedad. Esto demanda calcular el flujo y el estado de cada punto del material en cada incremento realizado durante la simulación para así representar el comportamiento del fluido durante la colada, para estas solicitaciones la paquetería ofrece el modelo de Mier-Grüneisen en la forma linealizada de Hugoniot.

Este modelo está constituido por un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas que son la energía por unidad de masa, E_m , y la presión en el sistema, p (Simulia 25.2.1, 2012):

- a) Ecuación de conservación de energía describe el incremento de energía interna por unidad de masa respecto al incremento de trabajo debido al esfuerzo y a la absorción de calor.

Ecuación 3.1

$$\rho \frac{\partial E_m}{\partial t} = (P - P_{bv}) \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + 2\mu \dot{\epsilon} + \rho \dot{Q}$$

Donde P es el estado de presiones, P_{bv} es el estado de presiones debido a la viscosidad volumétrica (Bulk viscosity), para comportamiento viscosos $S = 2\mu \dot{\epsilon}$ es el tensor desviador, $\dot{\epsilon}$ es el tensor desviador asociado a la deformación, $\dot{\gamma} = 2\dot{\epsilon}$ es el rango de la deformación cortante ingenieril es el flujo de calor \dot{Q} .

- b) Presión como función de E_m

Ecuación 3.2

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m$$

Donde ρ_0 es la densidad de referencia del material (estado con solicitaciones), c_0 es la velocidad de propagación del sonido de referencia en el medio (bulk speed of sound) y $s = \frac{dU_s}{dU_p}$ es la pendiente de hugoniot, que juntos definen una relación lineal entre la velocidad de impacto U_s y la velocidad de la partícula U_p , Ecuación 3.3, Γ_0 es la constante de Grüneisen en el estado de referencia, $\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$ es la deformación compresiva volumétrica nominal.

Ecuación 3.3

$$U_s = c_0 + sU_p$$

De las ecuaciones anteriores se debe resaltar que el producto de $\rho_0 c_0^2$ de la Ecuación 3.2 en deformaciones nominales pequeñas equivale al módulo de compresibilidad que describe el comportamiento del material sometido a impacto.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Este sistema tiene un estado límite establecido en la Ecuación 3.2 y descrito por $\eta_{lim} = \frac{1}{s}$ y $\rho_{lim} = \frac{s\rho_0}{s-1}$. En este estado establece que el estado de tensión mínimo, sobrepasando este nivel el cálculo arroja una velocidad del sonido negativa, esto se puede interpretar como que el material emite sonido o que aparece un error numérico en el método, esto depende del conocimiento a priori del fenómeno modelado.

Las constantes utilizadas para la definición del comportamiento del agua mediante el modelo de Mie-Grüneisen son:

Tabla 3.2 Propiedades ingresadas en la paquetería para la definición del material.

Propiedad	Magnitud
ρ_0	998.2 [kg/m ³]
ν	0.001003 [Ns/m ²]
c_0	1500 [m/s]
s	0
Γ_0	0

3.3.3 Pasos definidos en el modelo

El problema de la colada por gravedad está planteado mediante el método acoplado euleriano-lagrangiano, como ya se revisó en la sección 2.5.2 este tipo de análisis requiere una definición tridimensional, demandando así una gran cantidad de elementos y un algoritmo de cálculo explícito para usar variables conocidas al inicio del cálculo en la determinación los desplazamientos y velocidades en el material, evitando así la formación de la matriz de rigidez asociada al sistema y disminuyendo el costo computacional requerido para cada incremento (Alameda, 2010).

Una ventaja obtenida mediante la definición de un cálculo explícito es la capacidad de escalar la velocidad y reducir el tiempo en el que el proceso físico modelado se calcula. Esta aceleración artificial puede causar una respuesta inesperada del sistema al incrementar los efectos inerciales presentes y causar que los resultados obtenidos no sean próximos a la realidad, además este escalamiento no es posible emplearlo si el material definido tiene propiedades dependientes de la velocidad ya que la aplicación de este factor causa que se modele un sistema diferente al que se quiere analizar (Figuroa, 2009), el escalamiento de masa no está soportado para materiales definidos mediante ecuación de estado ya que la masa y su distribución se calculan para cada incremento según las variables de la ecuación definida.

El fenómeno de colada es continuo y solo es afectado por la aceleración gravitacional, lo que en principio hace innecesaria la aplicación de diferentes condiciones de frontera para diferentes etapas de la simulación, sin embargo el modelo de llenado planteado no presenta resultados hasta que la simulación alcanza la vigésima pieza del tiempo definido para el paso. Para obtener visualizaciones de flujo mas descriptivas se dividió el tiempo en diferentes pasos idénticos entre sí



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



con duración de 0.1 [s], con lo que se logra visualizar el fluido y su comportamiento con resolución de $5e-3$ [s], esto permite además reinicializar o continuar el análisis desde un paso, incremento, ciclo o rutina establecida, de esta forma se logra calcular todo el fenómeno en diferentes sesiones (Simulia, 9.1.1, 2012).

Con esta definición de paso cada modelo requiere una diferente cantidad de estos, para el caso del modelo "Benchmark test" se requirieron 50 pasos para lograr un llenado suficiente y comparar con lo reportado en la literatura, de esta manera se simulan 5 [s] de llenado, mientras que para el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni" se definieron 15 pasos con lo que se alcanza una simulación de 1.5 [s] que es el tiempo aproximado reportado de vaciado durante la experimentación (Martinez, 2012).

3.3.4 Condición de contacto

La interacción que tiene un fluido con la superficie que lo contiene es muy importante, ya que causa el comportamiento de capa limite y obliga a generar teorías complejas para asegurar la continuidad de las propiedades dentro del medio estudiado, pero cualquier teoría aplicada requiere condiciones de frontera para su solución y la principal en el estudio del movimiento de fluidos es la de no deslizamiento, la cual define que no existe movimiento relativo entre el fluido y el entorno, es decir las partículas de fluido adoptan las mismas condiciones cinemáticas de dicha superficie (Mott, 2006).

La aplicación de la condición de contacto mencionada se define mediante un propiedad de interacción denominada "Rough" la cual establece que no ocurrirá deslizamiento una vez que los puntos entren en contacto (Simulia, 15.14.1, 2012). Esta propiedad de contacto se define en el algoritmo de "Contacto General", sección 2.4, de esta manera se asegura que la condición de frontera se cumpla en cualquier zona del flujo de material, en la *Tabla 3.3* se resume el contacto aplicado en el modelo.

Tabla 3.3 Parámetros de contacto

Parámetro requerido	Definición
Tipo de interacción	Contacto general (cualquier superficies, cuerpo o arista, incluido consigo mismo, "All itself")
Formulación mecánica	Contacto con Fricción
Restricciones	Cuerpo rígido en los cuerpos sólidos
Coefficiente de fricción	El algoritmo "Rough" considera un coeficiente de fricción infinito (Simulia, 15.14.1, 2012)

La restricción de contacto aplicado a las piezas sólidas, es decir embudos y moldes se aplica mediante la imposición de una restricción de contacto del tipo "Rigid body". Esta condición es necesaria ya que al haberse definido los cuerpos como discretamente rígidos no tienen parámetros, constantes o ecuaciones que definan su comportamiento durante el cálculo, (Alameda, 2010). Por lo que son una colección de nodos, elementos o superficies que se asocian a un nodo de referencia que gobierna su movimiento, todos mantienen su posición relativa entre sí a lo largo de toda la simulación, esto hace que no se deforme pero si pueda desplazarse



libremente. La masa e inercia de los elementos se calcula en base a la contribución de sus elementos (si es que tienen material asignado) o bien se asigna específicamente (Simulia, 2.4.1, 2012).

El movimiento de un cuerpo rígido se asigna mediante la aplicación de condiciones de frontera al nodo de referencia, las cargas en un cuerpo rígido son generadas a partir de cargas concentradas aplicadas a los nodos y de cargas distribuidas aplicadas a los elementos asociados al cuerpo rígido. Este tipo de cuerpos interactúan con los demás tipos de cuerpos y elementos de ABAQUS® (Simulia, 2.4.1, 2012).

Dado que en el ensayo "BenchMark test" (Campbell, 1996) y en la lingotera para aleación Cu-Al-Ni (Martínez, 2012), no se presenta deformación o desgaste alguno en una colada. Las regiones con restricción de cuerpo rígido no afectan el tiempo de incremento mínimo requerido por la paquetería lo que reduce el tiempo y cómputo requerido.

El resultado de la aplicación de esta condición en ambos modelos es la mostrada en la *Imagen 3.7*, a y c son las vistas frontales de los modelos completos, mientras que b y d son las vistas en isométrico, en d se hace una distinción de línea de simetría siendo la roja la asociada al embudo y la amarilla la asociada al bebedero de la lingotera. La aplicación de la condición se visualiza como una sucesión de círculos amarillos distribuidos sobre las superficies a las que se les asignó.

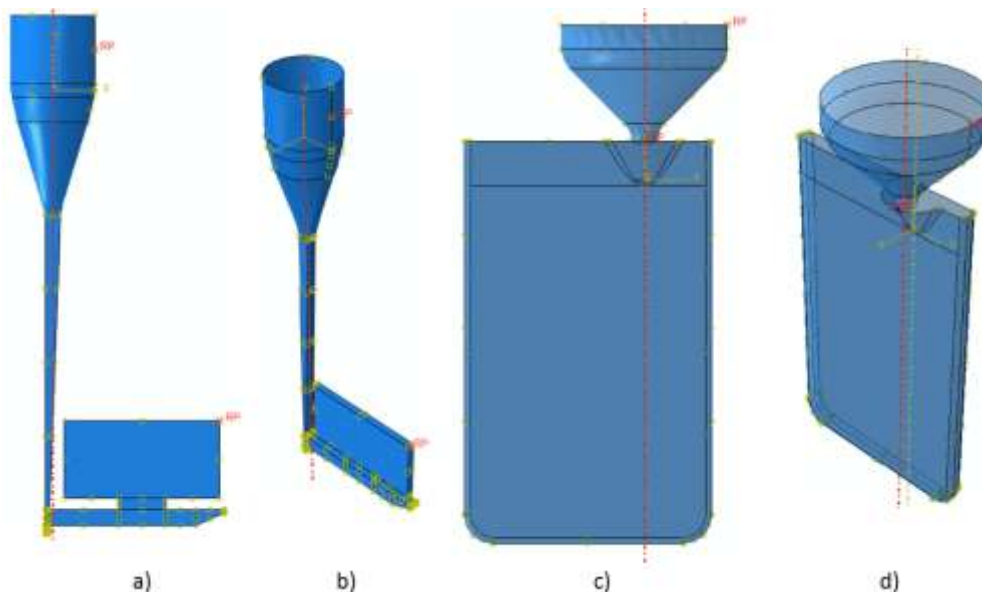


Imagen 3.7 Aplicación de la condición de cuerpo rígido en las piezas sólidas de los modelos "Benchmark" y "Lingotera para Cu-Ni-Al", se muestran el rojo las líneas de simetría de las piezas cilíndricas o cónicas, así como los nodos de referencia.



3.3.5 Cargas, restricciones e inicializaciones aplicadas al modelo.

Las restricciones y entradas que se aplican al sistema para lograr el comportamiento deseado del fluido se limitan básicamente a la aplicación de una carga por gravedad, la restricción de cualquier tipo de movimiento de las piezas rígidas y la limitación de la velocidad normal a la cara respectiva del dominio euleriano para evitar pérdidas de volumen, energía y calidad durante la simulación.

El material en un dominio euleriano, como ya se había mencionado en la sección 3.2, es asignado mediante un campo predefinido que permite el cálculo de distribución como función de las condiciones de volumen mediante la utilización de la herramienta VFT y la pieza auxiliar, esta herramienta genera un campo discreto para asignar un volumen específico a cada elemento del dominio euleriano, pero además permite generar un set de nodos para poder aplicar un campo predefinido únicamente a esa sección y material, simplemente en la herramienta de creación del campo discreto se debe indicar la creación de dicho set.

Durante el ensayo "Benchmark test" y la colada de la aleación Cu-Al-Ni el fluido de trabajo son metales fundidos, esto obligó la obtención de una variable equivalente aceptada por la paquetería y como el comportamiento de los metales fundidos y el agua es incompresible se seleccionó como variable al volumen; la determinación de este es como sigue.

a) Modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni"

En la literatura se reportan las densidades de los metales fundidos que componen esta aleación, se muestran en la *Tabla 3.4*.

Tabla 3.4 Propiedades de interés de los metales usados para la aleación (López, 2011).

Metal	Punto de Fusión [°C]	Densidad del metal fundido [kg/m ³]	Densidad del metal sólido [kg/m ³]	Cambio de volumen [%]	Viscosidad
Al	660	2368	2550	7.14	1.1 a 700[°C] [mPa*s] (Hufnagel, 2004)
Cu	1083	7938	8382	5.30	40 [m ² /s] (Desplaines, 1973)
Ni	1453	7790	8210	5.11	4.2 [mPa*s] (Cherne, 1998)

Basados en los datos en estado líquido de los elementos de aleación y conociendo el porcentaje de masa de cada uno de estos se hace una aproximación de la densidad global mediante un promedio ponderado de las densidades individuales, esto es:

Ecuación 3.4
$$\rho_g = \%W_{Cu}\rho_{Cu} + \%W_{Al}\rho_{Al} + \%W_{Ni}\rho_{Ni} = 7152.28 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Donde ρ_g es la densidad global, $\%W_i$ es el porcentaje en masa del elemento en cuestión y ρ_i es la densidad del elemento individual.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Conociendo que la masa de los lingotes obtenidos para esta aleación es de 0.35 [kg] (Martinez, 2012) se realiza el cálculo de volumen, con lo que se obtiene el siguiente resultado.

Ecuación 3.5
$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow v_{aleación} = \frac{m_{aleación}}{\rho_g} = \frac{.35}{7152.28} = 4.89e^{-5} [m^3]$$

El volumen teórico obtenido en la *Ecuación 3.5* se asocia a un cilindro, al cual se propuso un radio de $3e-2$ [m], que es el valor entero más próximo al doble del radio mayor del bebedero de la lingotera de esta forma se tiene una referencia visual del volumen asignado, con este valor propuesto se calcula la altura requerida para asegurar el volumen teórico.

Ecuación 3.6
$$h = \frac{v_{aleación}}{\pi r^2} = \frac{4.89e-5}{\pi(3e-2)^2} = 1.72e^{-2} [m]$$

La medición de la lingotera muestra que se trata de lingotes prismáticos rectangulares con lados que miden $x = 8.8e-2$ [m] y $z = 0.7e-2$ [m], ver *Tabla 3.1*, lo que indica que la sección transversal del lingote es $A_t = 6.16e-4$ [m²] y conociendo el volumen teórico se calcula la altura teórica del lingote.

Ecuación 3.7
$$y = \frac{v_{aleación}}{x*z} = \frac{4.89e-5}{8.8e-2*0.7e-2} = 7.944e^{-2} [m]$$

El valor de altura encontrado en la *Ecuación 3.7* define un parámetro de verificación para los resultados que se obtengan de la simulación de este modelo.

b) Modelo "Benchmark Test" (Campbell, 1996)

En la sección 1.5 se especifican los parámetros con los que debe cumplir la colada, con esto se calcula el volumen teórico, el cual se asocia a un cilindro igual que en el modelo anterior. Además el ensayo establece que la altura de aluminio presente en el vertedero al momento del vaciado es de $40e-3$ [m], entonces se usa esta altura como dato de referencia para el cálculo del cilindro, de esto resulta lo siguiente.

Ecuación 3.8
$$r = \sqrt{\frac{v_{Al}}{\pi*h}} = \sqrt{\frac{m_{Al}/\rho_{Al}}{\pi*h}} = \sqrt{\frac{2.2/2368}{\pi*40e-3}} = 8.5984e^{-2} [m]$$

Tabla 3.5 Resumen de dimensiones a usar para la pieza auxiliar en ambos modelos.

Modelo	Dimensión	Magnitud [m]
Lingotera para aleación Cu-Ni-Al	r	3e-2
	h	1.72e-2
Benchmark test	r	8.6e-2
	h	40e-3



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

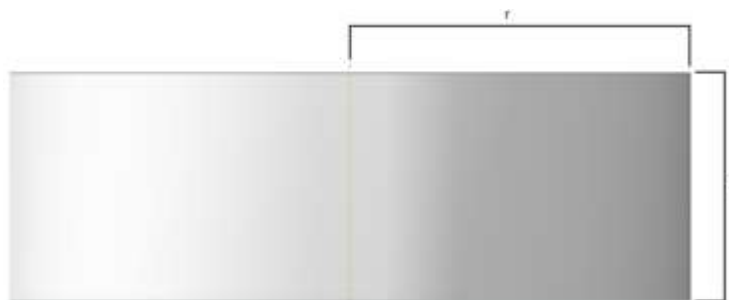


Imagen 3.8 Representación paramétrica de los cilindros usados para la asignación de material en el dominio euleriano.

La asignación del material mediante el uso del campo predefinido, la herramienta VFT requiere que el dominio euleriano y la pieza de referencia tenga una malla asignada, la definición de estas se trata en la sección 3.3.6. La aplicación de la herramienta VFT se observa con la pieza de referencia resaltada en color magenta y el dominio euleriano en rojo, mientras la asignación del material se observa como una sucesión de círculos naranjas en el contorno del dominio euleriano, es importante asegurar que la pieza auxiliar sea coaxial, que la cara inferior de esta se encuentre por encima del radio y el embudo tenga sobredimensionamiento de $1e-3$ [m] respecto al radio de la pieza de referencia, de esta forma se asegura la adecuada detección de la superficie euleriana, Imagen 3.9.



Imagen 3.9 Ensemble de la pieza auxiliar para la utilización de la VFT

Tabla 3.6 Resumen de las condiciones requeridas para la definición del comportamiento de ambos modelos

Restricción	Definición	Zona de aplicación
Cargas	Gravedad, $g = -9.81$ [m/s ²], en dirección vertical (Y)	Todo el modelo
Condiciones de frontera	Empotramiento de las dos piezas rígidas	Nodos de referencia de las piezas sólidas.
	$v_x = 0$ [m/s]	Caras del dominio euleriano definidas en el plano YZ, Imagen 3.10 a
	$V_y = 0$ [m/s]	Caras del dominio euleriano definidas en el plano XZ, Imagen 3.10 b
	$V_z = 0$ [m/s]	Caras del dominio euleriano definidas en el plano XY, Imagen 3.10 c ⁶
Campo predefinido	Inicialización de material mediante la VFT	Dominio euleriano

⁶ Todas las condiciones de frontera referidas a las caras del dominio euleriano evitan la pérdida de masa y energía del modelo (Tippman, 2009)



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

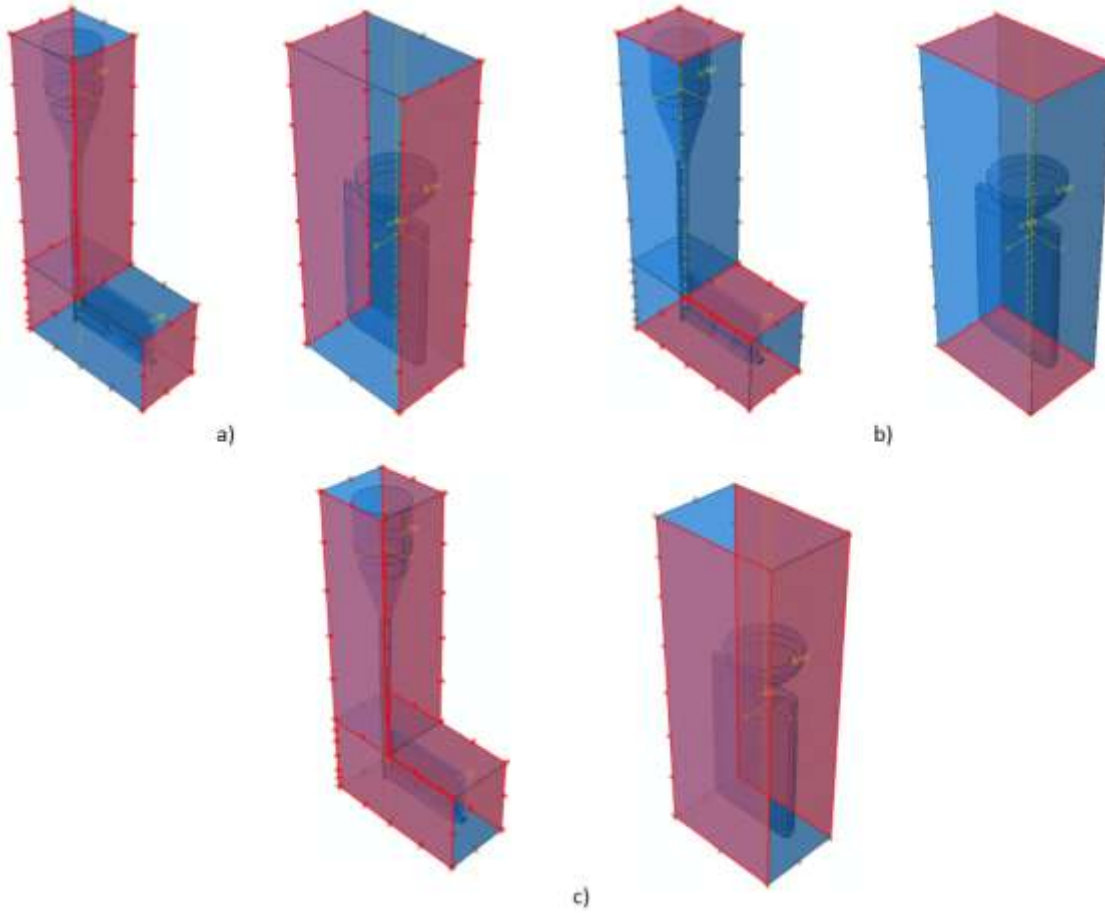


Imagen 3.10 Aplicación de la restricción de velocidad a las carcas del dominio euleriano para no perder material durante el cálculo.



3.3.6 Definición de mallas

Las mallas definidas para cada una de las piezas requieren definiciones diferentes por el tipo de geometría que presentan, necesidad de resolución en zonas de interés y tipos de elemento requerido por el tipo de definición realizada al momento de la generación de la pieza.

a) Embudos:

Estas piezas son muy similares entre si , por lo que se resumen las características en la *Tabla 3.7*.

Tabla 3.7 Tabla de definición de la malla usada para los embudos de cada modelo

Modelo	Geometría del elemento	Zona de aplicación	Tipo del elemento	Tamaño global del elemento [m]	Imagen de referencia
Lingotera para aleación Cu-Al-Ni	Cuadrilátero, generado mediante la técnica automática de barrido	Toda la pieza		1.5e-3	<i>Imagen 3.11</i>
Benchmark Test	Cuadrilátero estructurado	<i>Imagen 3.12-4</i>		2.5e-3	<i>Imagen 3.12</i>
	Cuadrilátero de barrido	<i>Imagen 3.12-1</i>	Estándar, familia discretamente rígido lineal de 4 nodos para modelos 3-D bilineal para cuadriláteros rígidos. R3D4		
	Cuadrilátero con técnica libre mediante el algoritmo "advancing front".	<i>Imagen 3.12-2</i>			
	Predominanteme cuadrilátero con técnica libre en el algoritmo "advancig front"	<i>Imagen 3.12-3</i>			

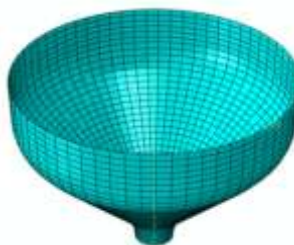


Imagen 3.11 Malla del embudo para el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni"



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

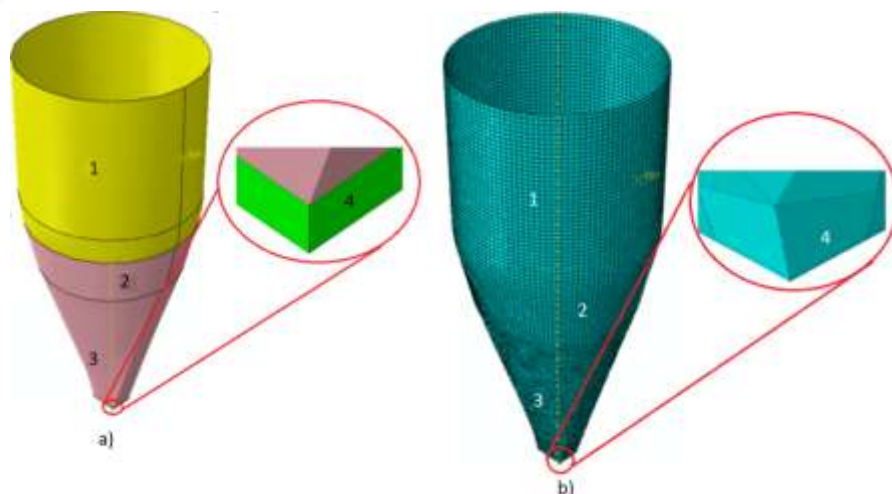


Imagen 3.12 a) Aplicación de las diferentes definiciones de malla usadas en el embudo para el modelo "Benchmark test", b) Malla resultante para el embudo del modelo "Benchmark test".

b) Piezas auxiliares:

Las piezas auxiliares son cilindros rígidamente discretos, aceptan las mismas condiciones de mallado, simplemente variando el tamaño global de elemento:

Se consideró el algoritmo automático de barrido con el tipo de elemento estándar de la familia discretamente rígido lineal con 4 nodos para modelos 3-D bilineal R3D4, geometría predominantemente cuadrilátero con un tamaño global para el modelo lingotera para aleación de "Cu-Al-Ni" de $1e-3[m]$ y el modelo "Benchmark Test" de $3e-3[m]$.

La aplicación de dichas condiciones generan el mismo perfil de malla, este se muestra en *Imagen 3.13*.

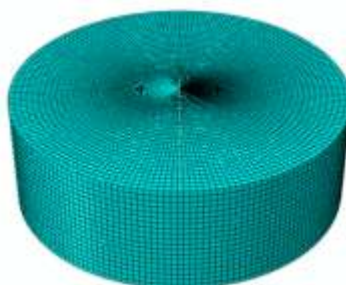


Imagen 3.13 Patrón de malla aplicado a los cilindros auxiliares de ambos modelos.

c) Moldes:

Cada uno de los moldes requiere la aplicación de una definición de malla distinta, debido a los requerimientos geométricos y de resolución que se tienen que asegurar. El algoritmo automático de mallado siempre se fija como estructurado, intentando que la mayoría de los elementos sean cuadriláteros (presentan mejor interacción con los dominios eulerianos).



El seguimiento de superficie euleriana y el algoritmo de reconocimiento de volumen de material asignado pueden causar "escurrimientos" en donde existen aristas, ya que el mapeo de volumen puede tener errores de aproximación a la geometría (Simulia, 2.3.1, 2012), y además en la zona de "traslape" disminuye el volumen al nivel donde se discrimina del cálculo, produce que se excluya del algoritmo "contacto general" causando que el dominio fluido atraviese al sólido llenando los elementos eulerianos que están interactuando parcialmente con el sólido, si el volumen externo es mayor que el interno y ahora con mas grados de libertad fluye de forma independiente, *Imagen 3.14*.

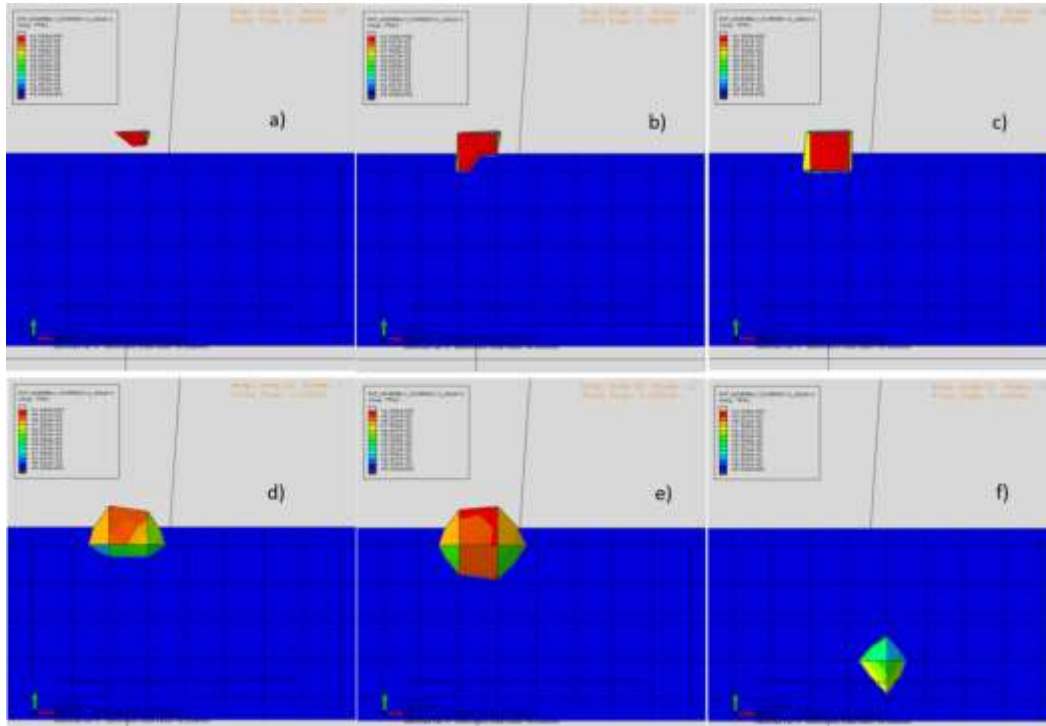


Imagen 3.14 a) detección de volumen dentro del sólido (gris), b) primer traspaso de los dominios debido a error de mapeo por falta de malla fina en la zona, c) llenado de los elementos que interactúan parcialmente con el sólido, d) interacción inadecuada de contacto por el error de mapeo propagado, e) último cálculo en que el nivel de volumen interactúa con el sólido, f) flujo libre por el seguimiento de la localización de mayor volumen.

El método de solución es conseguir una malla más fina para que no existan elementos eulerianos que interactúen parcialmente con los lagrangianos, pero la cantidad de elementos impacta el tiempo de cómputo, al tamaño de cálculo a realizar y a los archivos de salida, así que se opta por eliminar aristas donde existen reducciones severas y elementos que convergen a un solo nodo.

En el caso del molde para el modelo "Benchmark test" se aplican redondeos de $8e-4$ [m] en el pozo del bebedero y en la arista del final del canal de alimentación de $2e-3$ [m], en ambos redondeos se crearon particiones de forma tal que se generaran secciones con por lo menos 2 lados rectos y en las secciones curvas se asignaron 10 elementos, en la superficie restante de la pieza se asignaron particiones para hacer que la propagación de la malla sea regular y el algoritmo automático estructurado genere la malla de mejor calidad posible con un tamaño global, *Imagen 3.15*, el resultado de este mallado se observa en la *Imagen 3.16*.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

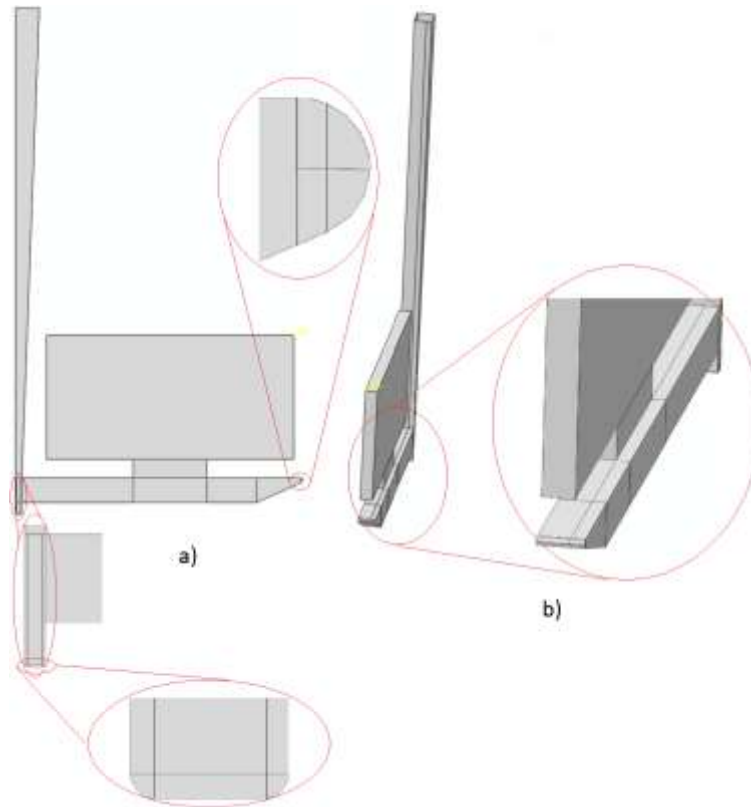


Imagen 3.15 Particiones aplicadas al molde del modelo "Benchmark Test", se muestran acercamientos a las particiones realizadas en los redondeos, a) particiones que tienen simetría en la cara frontal y posterior del molde y b) partición para regular la propagación de la malla por la ausencia de la cavidad principal.

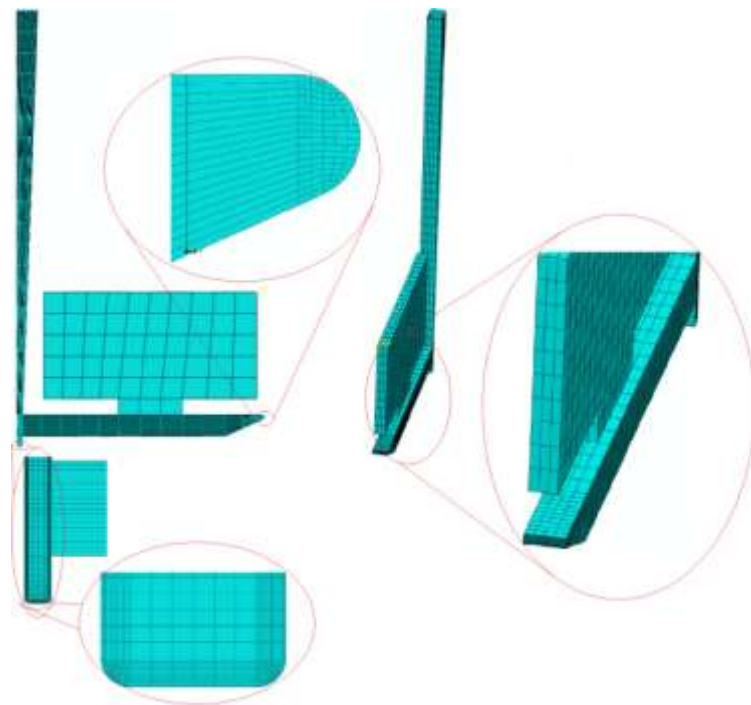


Imagen 3.16 Malla aplicada al molde del modelo "Benchmark"



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



El mallado del molde "Lingotera para aleación de Cu-Al-Ni" requiere de un redondeo en las seis aristas que conforman la zona de confinamiento del fluido con un radio de $2e-3$ [m], *Imagen 3.17 b*, y en las aristas de la sección inferior con un radio de $1e-2$ [m], *Imagen 3.17 b*, así como de las aristas que se generan por la intersección del cono de vaciado y la cara plana del molde, también con radio de $2e-3$ [m], *Imagen 3.17 c*.

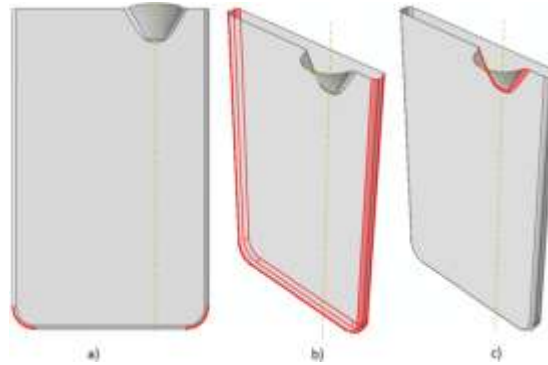


Imagen 3.17 a) Redondeo de las esquinas inferiores, b) Redondeo de las 6 aristas de la zona de confinamiento, c) redondeo de las aristas por la intersección del bebedero.

Se le asignan controles de malla triangulares estructurados en todas las piezas excepto en el cono del bebedero, en esta sección se asigna un control de mallado cuadrilátero libre mediante el algoritmo de eje medio de simetría y en el redondeo de la zona de intersección del molde y el bebedero, *Imagen 3.17 c*, se asigna un control cuadrilátero estructurado, fijando un tamaño global de elemento de $2e-3$ [m] y un tipo de elemento estándar de la familia discretamente rígido lineal de 4 nodos para modelos 3-D bilineal para cuadriláteros rígidos, R3D4, de lo cual se obtiene la *Imagen 3.18*.

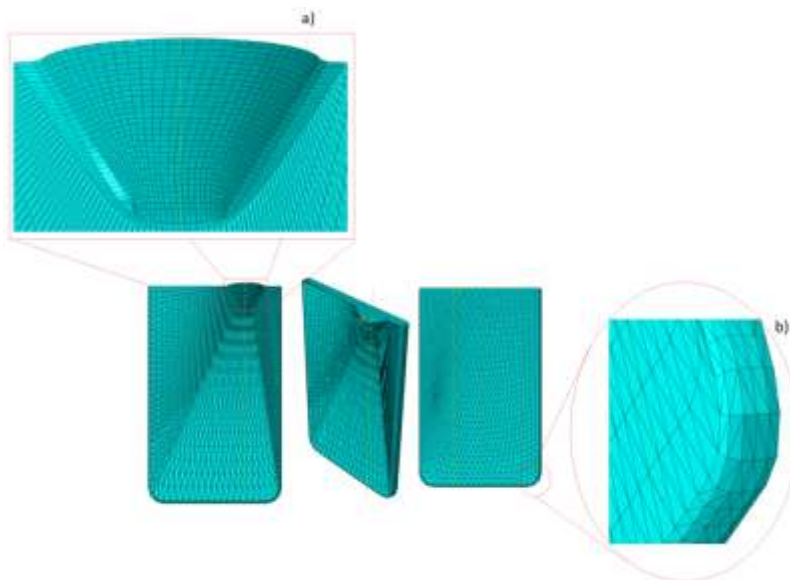


Imagen 3.18 Resultado de la aplicación de la malla definida al molde del modelo de "Lingotera para aleación de Cu-Al-Ni", a) acercamiento al mallado estructurado del vertedero del molde, b) acercamiento y giro de la esquina inferior derecha de la lingotera mostrando el mallado en los redondeos.



d) Dominios:

El mallado de los dominios acepta un único elemento, el EC3D8R que es un elemento con 8 nodos cubico euleriano, integración reducida y control "hourglass", explícito lineal de la familia euleriano, el control de mallado que se puede aplicar a este tipo de elementos son barrido, estructurado y manual. El primero se aplica en secciones de sección transversal variable (del tipo piramidal o cónica), el segundo en secciones de sección transversal constante (prismas regulares) y el tercero en secciones complejas no reconocidas por los algoritmos convencionales, ya que de esta forma se pueden crear progresiones y asignar controles por eje, cara o superficies específicos para lograr una malla regular con deformación de elementos cúbicos mínima.

En los modelos usados se definieron dominios regulares con secciones constantes, en base a esto se define un control de mallado estructurado, para el modelo "Lingotera para aleación de Cu-Al-Ni" se define un tamaño global de elemento de $1e-3$ [m], mientras que para el modelo "Benchmark test" el tamaño es de $3e-3$ [m], el tamaño es resultado de buscar una relación de elementos entre tres a cinco del dominio euleriano por cada uno del dominio lagrangiano (Latorre, 2012) optimizada, ya que para el modelo "Lingotera para aleación de Cu-Al-Ni" si se sigue la relación en su cota mínima se obtendría un tamaño de elemento para el dominio de $0.66e-3$ [m], para el modelo "Benchmark Test" siguiendo la misma regla que en el caso anterior da un resultado de tamaño global de elemento de $1e-3$ [m]. En ambos casos el tiempo de cálculo es aproximadamente un día para obtener el primer resultado observable, por lo que se aumento el tamaño de elemento a $1e-3$ [m] para el modelo "Lingotera para aleación de Cu-Al-Ni" y a $3e-3$ [m] para el modelo "Benchmark Test" con lo que se obtiene tiempo de cálculo con un avance aproximado al 60% del tiempo total de un paso en un día de cómputo.

El dominio del modelo "Benchmark test" requiere una partición para generar dos secciones con área transversal constante, esta se ve en la *Imagen 3.19*. Las condiciones anteriores generan por resultado las mallas como los de la *Imagen 3.19*.

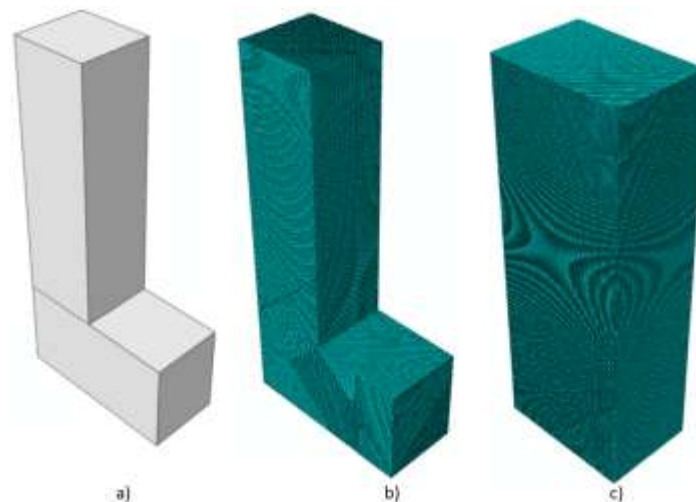


Imagen 3.19 a) Partición del dominio del modelo "Benchmark test, malla aplicada al dominio de b) "Benchmark test" y c) "Lingotera para aleación Cu-Ni-Al"



Capítulo 4 Resultados

4.1 Introducción

La visualización de los resultados en un dominio euleriano requiere del manejo de cortes en el modelo, para identificar la sección, planos y tipos de elementos que se requiere ver. Además requiere la interpretación de la forma en que ABAQUS® presenta la distribución de volumen del dominio euleriano y porque es que se comporta de una determinada manera.

La visualización de los resultados consiste en la presentación de lo obtenido del planteamiento del capítulo tres, comparación de los resultados que ya se han presentado del modelo "Benchmark test" y de visualizaciones reales obtenidas para el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni", mostrando la validez del modelo para determinados resultados y estableciendo bajo que situaciones es útil, necesario y aplicable la simulación FSI en ABAQUS®.

4.2 Análisis de la interacción FSI

4.2.1 Efecto de la condición de contacto y la onda de choque.

La definición de los modelos mostrados en el capítulo 3 produce que la simulación reconozca la existencia de fluidos (agua) y sólidos, produciendo que el agua tome el perfil de la forma con la cual interactúa, según lo esperado. Sin embargo la condición de "Rough", no deslizamiento, para el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni" produce que la onda de choque no propague libremente por el fluido, ya que la condición de contacto impuesta induce que ciertos nodos en la intercara de los dominios tengan velocidad nula causando que el fluido tenga un comportamiento adhesivo en algunos puntos, *Imagen 4.1*.

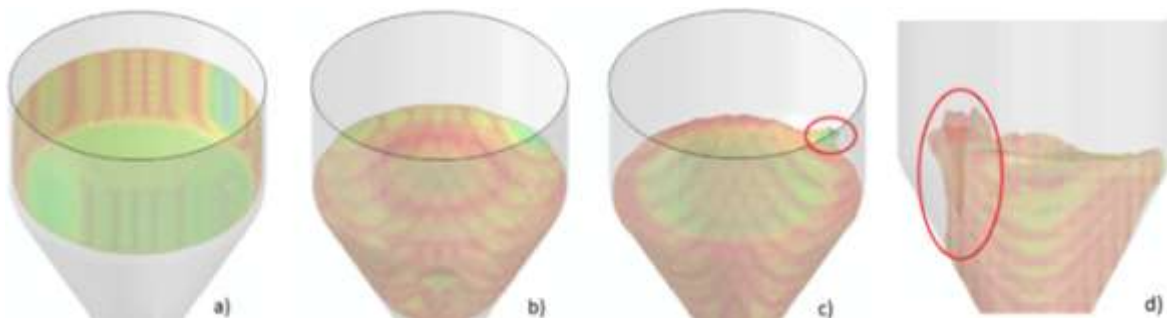


Imagen 4.1 Enfoque al embudo de la lingotera en vista isométrica, a) condición inicial, b) último resultado congruente obtenido, c) primer incremento con flujo no congruente (adhesión de material en rojo) d) último incremento calculado con deformación incongruente resaltada en rojo, vista frontal.

La incongruencia del flujo es comparable a la mostrada por el incremento de velocidad mostrada en la sección 3.3.3, pero en este caso está confinada a una sección y no es simétrica como lo mostrado en la sección mencionada lo que indica que es parte de una respuesta a la distribución



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



de energía cinética, además comienza en la misma zona donde se presenta la adhesión de material al embudo, *Imagen 4.1 c*, al ver el perfil de velocidad observado en dicha sección muestra un cambio súbito, lo que insinúa un "rebote", este cambio se muestra en la *Imagen 4.2 d*.

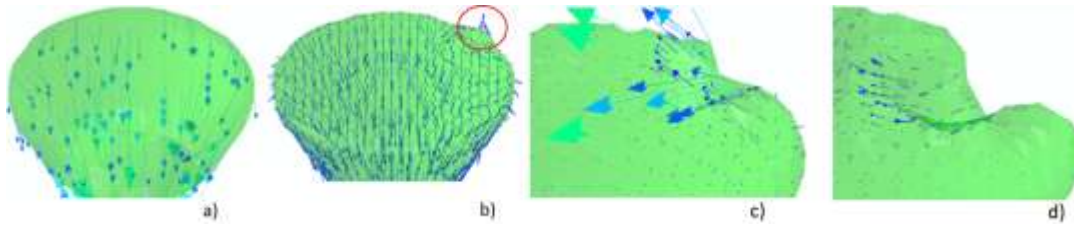


Imagen 4.2 a) último flujo homogéneo, b) inicio del rebote en la zona de adhesión, c) cálculo inmediato posterior al instante mostrado en Imagen 4.1 Enfoque al embudo de la lingotera en vista isométrica, a) condición inicial, b) último resultado congruente obtenido, c) primer incremento con flujo no congruente (adhesión de material en rojo) d) último incremento calculado con deformación incongruente resaltada en rojo, vista frontal. Imagen 4.1 c con acercamiento al perfil de velocidades, d) incremento sucesivo a c muestra ausencia de rebote pero un flujo inducido debido al estado anterior.

Los resultados de la *Imagen 4.2* indican que el comportamiento de rebote está presente en la zona de deformación inesperada, al revisar la información que el software provee durante el cálculo indica que el promedio de velocidad de propagación de onda es superior al soportado por el material en un tiempo menor al tiempo mínimo de incremento, lo que indica que el cálculo converge en valores superiores a los definidos en el material, por otro lado la única carga impuesta es la gravedad y el perfil global de velocidad indica un rango de velocidades comprendido entre 4 y 6 [m/s]. La zona de adhesión y la convergencia inadecuada del cálculo se presenta cuando el material comienza a dejar libre dicha zona y coincide con el momento en que la velocidad de propagación de onda superó el valor definido en el material (c_0), lo que indica que el modelo no converge adecuadamente.

La prueba siguiente se hizo agregando volumen al modelo para verificar si el error de convergencia y propagación de onda se debe a un efecto inercial o a las condiciones establecidas en el modelo. El volumen extra se agregó usando al embudo como pieza de referencia y disminuyéndola $1e-3$ [m] en sus radios mayor y menor, dejando las demás condiciones geométricas del embudo intactas, estableciendo $R = 29e-3$ [m] y $r = 3.36e-3$ [m], *Imagen 4.3 a y b*.

En la *Imagen 4.3 c y d* se muestran las zonas que sufren deformación debido a la propagación de la onda de choque, se detuvo el cálculo de el modelo puesto que presenta deformaciones como las observadas en el modelo con menor volumen. Por otro lado el perfil de velocidades muestra que la progresión de la onda de choque es más homogénea, pero no se evita el problema de algunos nodos con adhesión excesiva, *Imagen 4.3 d*.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

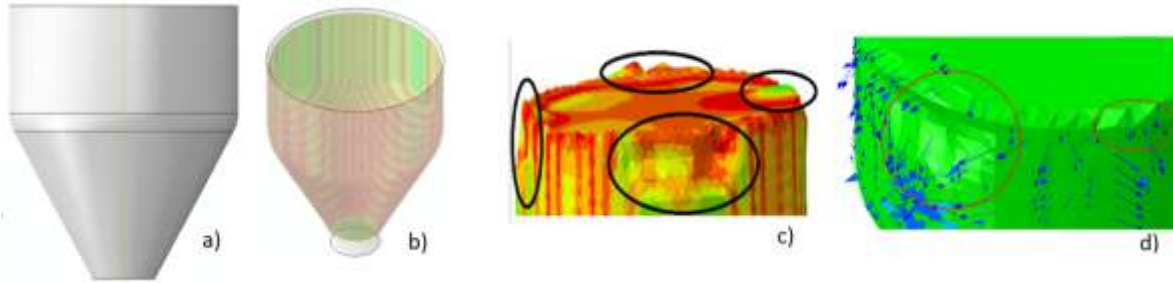


Imagen 4.3 a) embudo auxiliar para la asignación de volumen extra, b) Condición inicial del nuevo volumen definido, c) último incremento calculado se resaltan las deformaciones en el fluido en vista frontal y d) primera deformación en el perfil del fluido con velocidades entrantes y salientes (círculo rojo) y deformación adicional (ovalado rojo).

Con base a lo observado en la *Imagen 4.3* se determina que el efecto de rebote no se debe a una causa inercial, puesto que en dos configuraciones de volumen distintas se tienen resultados de distribución de volumen y perfil de velocidad muy similares; para la versión con mas volumen la deformación aparece en tiempos menores lo que indica que el problema se debe a errores numéricos causados por la definición de las otras condiciones impuestas, la gravedad, las restricciones de velocidad del dominio euleriano y los empotramientos en las piezas sólidas no interactúan en las zonas que presentan el error. La única condición que interactúa con ambos dominios es la de contacto "Rough" ya que se usa para forzar la condición de no-penetración entre dominios y asegurar la condición de no deslizamiento para flujos viscosos, esta produce que la onda de choque no se propague libremente y genere el resultado indeseable.

Bajo la hipótesis de que es un error numérico, se asume que el coeficiente infinito que se define en el método de contacto causa oscilaciones en la convergencia, el proceso a seguir sería probar diversos órdenes de magnitud en el coeficiente de fricción del método penalty (método usado por el algoritmo de contacto general), sin embargo el coeficiente de fricción no está físicamente definido para la FSI, pero las restricciones del contacto general usadas durante el método CEL son controladas mediante la maximización del parámetro "penalty stiffness" que obliga a que la propagación del contacto sea estable (Simulia, 14.1.1, 2012). Para que este algoritmo automático funcione se deja libre la restricción de contacto seleccionando el método de contacto "Frictionless" de esta forma se genera un contacto homogéneo y controlado por la viscosidad definida durante la creación del material para el dominio.

La prueba se realizó retomando el volumen original y la separación original para definir el efecto que tiene la modificación del contacto. Esta modificación causa que el fluido tenga contacto homogéneo y suave sobre toda la superficie del embudo, la distribución de volumen y de velocidades es homogénea, *Imagen 4.4 a*, en el instante en que el fluido entra en la reducción no existe rebote y la velocidad tiene el mismo perfil que adopta el fluido sobre la cara oblicua del embudo, el avance del agua muestra que el contacto idealizado permite al fluido moverse libremente sobre la superficie y acelerar debido a la reducción, esto se observa en la formación de un "vacío" en la *Imagen 4.4 b* izquierda y la *Imagen 4.4 b* derecha muestra vectores de mayor magnitud. Finalmente en el instante donde el agua alcanza el final del embudo el "vacío" es confinado por el fluido, mientras que el perfil de velocidades muestra un comportamiento



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



homogéneo, *Imagen 4.4 c*, esto indica que la velocidad en torno al "vacío" es constante y que el movimiento del dicha zona es independiente al comportamiento del material definido, es decir es una entidad independiente.

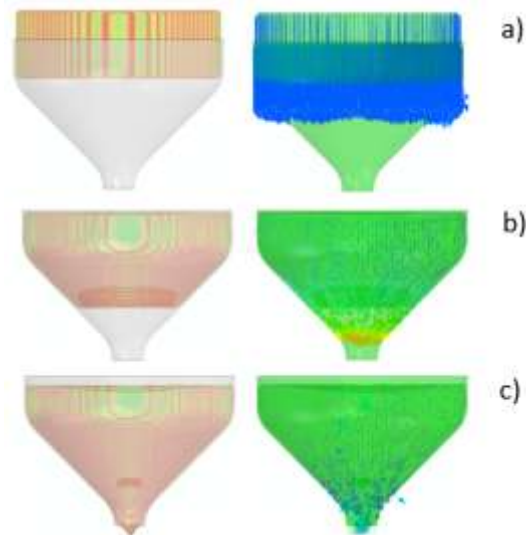


Imagen 4.4 Columna Izquierda muestra la distribución de volumen dentro del dominio euleriano. Columna derecha muestra el perfil de velocidades del agua. a) primer instante de la simulación en que acelera el fluido, b) aceleración del fluido debido a la reducción del embudo y formación del "vacío" y c) Instante en el que el fluido llega al final del embudo.

Para el caso del "Benchmark Test" se decidió dar una preforma al fluido a simular en el embudo y así disminuir el costo computacional que implica el cálculo de que el fluido adopte el perfil de reducción, además así se evita el impacto y el posterior efecto de "rebote". La pieza auxiliar definida para la inicialización de fluido se construyó a partir del cilindro definido en la sección 3.3.5, al cual se le agregó una sección cónica para que ajustara al embudo, el aumento de volumen no afecta al modelo puesto que el objetivo de este es que la cavidad se llene y que el fluido presente una respuesta lógica ante la presencia del sólido.

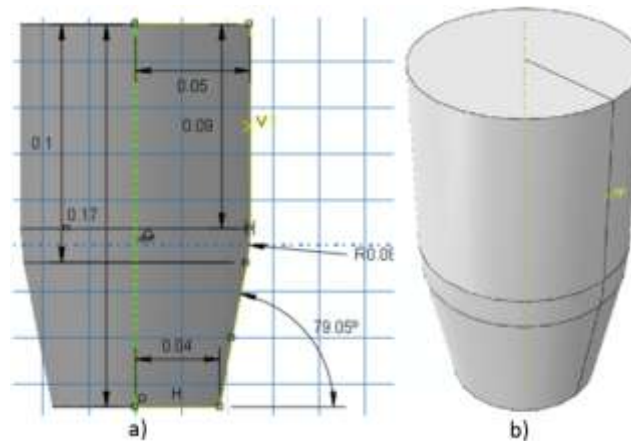


Imagen 4.5 a) medidas ingresadas en la paquetería para la creación de la parte auxiliar, b) vista isométrica del sólido modificado.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



La modificación del volumen induce que el contacto entre los dominios, se presente en menor tiempo, ya que el cono añadido esta casi en contacto con la zona donde empieza la sección progresiva, así al inicializar el fluido en el embudo no impacta, **Imagen 4.6 a**; al desplazarse el material adopta la forma del embudo, tal y como se esperaba, **Imagen 4.6 b**. Se observa que la onda de choque se propaga de forma homogénea y continua hasta alcanzar la superficie libre del material donde esta expande ligeramente en la dirección de la propagación, **Imagen 4.6 c** y la caída de dicha expansión produce oleaje visible en la superficie de contacto con el embudo, ya que se forman pequeñas elevaciones en el contorno indicando propagación de movimiento **Imagen 4.6 d**.

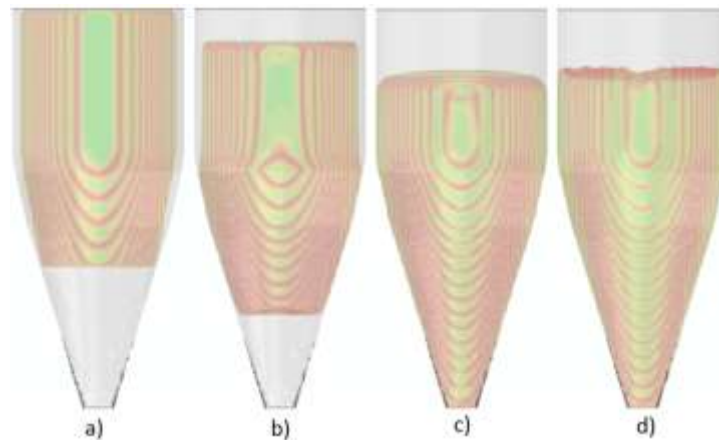


Imagen 4.6 a) inicialización del fluido, b) distribución homogénea del fluido debido al desplazamiento, c) onda de choque mostrando la formación de un menisco de fluido en la superficie libre y e) oleaje debido a la caída del menisco formado en c.

Los efectos más evidentes son que la superficie en contacto con el embudo no acelera respecto al material que fluye en capas interiores lo que produce un efecto de retención del material (no deslizamiento), **Imagen 4.6 b**, de esta forma el material colapsa sobre el que está siendo frenado y el impacto no existe, sin embargo la onda de choque es observable ya que tiene su origen en el movimiento de las capas superiores del material hacia abajo y el choque de estas con las paredes del embudo, **Imagen 4.6 c**, y no en efectos de impacto.

El perfil de velocidad muestra el efecto progresivo que tiene la carga por gravedad, en la **Imagen 4.7 a**, se muestra la inicialización del material y este no presenta velocidad alguna, mientras que en los eventos siguientes los vectores de velocidad aparecen y toman el perfil que presenta el material, es decir abultamiento en la zona media por acumulación de material y colapso de las capas superiores, por otro lado los vectores asociados a la zona donde la onda de choque se propaga muestran una dirección saliente indicado así que su origen es el colapso del material, **Imagen 4.7 b**, el perfil generado durante la etapa de formación del menisco muestra vectores con un ángulo positivo respecto al plano horizontal lo que indica que hay nodos elevándose, además el resto del material muestra un perfil estable y homogéneo de velocidad debido a la condición de contacto, **Imagen 4.7 c**. Finalmente el oleaje causado por el colapso del menisco muestra que los



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



nodos más cercanos a la pared del embudo al no poder desplazarse en el plano horizontal se elevan para disipar la energía cinética, *Imagen 4.7 d*.

En las visualizaciones se observa un cambio en el tamaño de los vectores de velocidad, esto se debe a que fracciones del material que salen del embudo aceleran al no tener más restricciones. La escala ofrecida en el entorno de visualización muestra que hasta este momento las velocidades asociadas al material dentro del embudo están comprendidas entre los 2.3 y 4.6 [m/s].

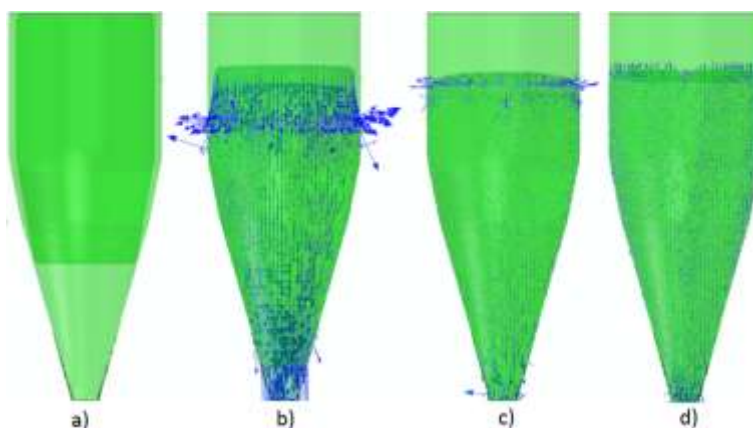


Imagen 4.7 a) Inicialización de material, b) distribución homogénea del material y velocidad en este, se observa la primera influencia de la onda de choque (zona media), c) Propagación de la onda choque no produce cambio en el perfil de velocidades general, solo en la zona donde la onda afecta el estado del material, d) disminución del efecto de la onda de choque en la superficie libre y e) estabilización del sistema y oleaje en la superficie libre.

Una observación más detallada de las zonas donde la onda de choque produce efectos visibles en la distribución del material muestra un perfil consistente entre los estados observados, en la *Imagen 4.8 a*, resaltado en rojo se observa un perfil de vectores con ángulo positivo respecto a la horizontal y otros con ángulo negativo, además muestra más claramente que ese perfil no es simétrico y tiende a presentar una distribución menos uniforme cuando el volumen que existe por encima de la zona de perturbación es poco, esta irregularidad se muestra en la *Imagen 4.8 c*, resaltando la zona de distorsión del perfil en rojo, dicha zona toma una forma deformada similar a las comentadas en el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni". El oleaje causado por el colapso del menisco de agua, presenta una pequeña deformación causada por el "desprendimiento" prematuro del material asociado a esos nodos respecto a los que rodean la zona, *Imagen 4.8 c*, pero en visualizaciones posteriores se observa que el perfil de velocidades converge en la misma dirección y mismo comportamiento que el resto, es decir colapsa hacia el centro al igual que el resto del material, *Imagen 4.8 d*, así como la superficie libre presenta un perfil más constante, lo que indica que se está asentando por acción de la gravedad, aun presenta cierta oscilación.

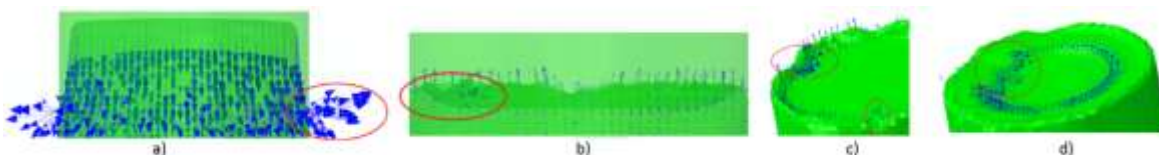


Imagen 4.8 Se muestran acercamientos de la zona asociada a la propagación de onda de choque a) inicio del colapso de material para ocupar todo el volumen del embudo, b) colapso del menisco y cambio de dirección en el perfil de velocidades, c) vista de la superficie libre con acercamiento al perfil de deformación, d) convergencia del perfil de velocidades hacia el centro.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Con base a los resultados anteriores, se determina que los modelos están entregando resultados congruentes, lógicos y el reconocimiento de ambos dominios se realiza de forma adecuada, por lo que se procede a aumentar el tiempo a simular para que las cavidades que se tiene como meta llenar, es decir la lingotera y el molde estandarizado para el "Benchmark Test", comiencen a interactuar con el fluido. Para visualizar la interacción entre los dos dominios de forma explícita se recurre a dos variables "CPRESS" y "RF", la primera es la variable que guarda la presión ejercida en la intercara de los dominios, y la segunda está asociada a la reacción con la que responden los sólidos para mantener su forma, posición y restricciones impuestas.

4.2.2 Fuerza de reacción

La fuerza de reacción es la variable que indica la oposición ejercida por la piezas sólidas para mantener la restricción que se impuso sobre ellas, en este caso el "Empotramiento", con esta variable se hace evidente la interacción con el sólido, puesto que el fluido provoca una respuesta del cuerpo con la que interactúa. La medición de la magnitud se midió en los nodos de referencia creados desde la definición de las piezas.

La medición de la magnitud de la fuerza de reacción muestra que el fenómeno en cortas escalas de tiempo es constante con determinadas oscilaciones, las cuales se presentan en los mismos instantes para ambos cuerpos $t_2 = 0.1$ [s] y $t_3 = 0.2$ [s], a excepción del primer pico del embudo que se presenta en $t_1 = 0.055$ [s], *Imagen 4.9*, el pico t_1 corresponde a la pérdida de carga en el fluido debida a la reducción, esta pérdida causa la reacción del embudo, además es congruente con la disminución de velocidad mostrado en la *Imagen 4.4 d*. También se muestra que los picos de t_2 y t_3 coinciden para ambas piezas y con el final del paso, esto sugiere que es una discontinuidad numérica causada por la existencia de pasos diferentes, esta discontinuidad no muestra efecto en el cálculo posterior, ya que en el incremento posterior la magnitud converge al valor constante anterior a la discontinuidad.

La curva de la lingotera muestra que en $t = 0$ [s] hay fuerza de reacción de aproximadamente 24 [N], así como para el embudo desde el mismo tiempo hay una fuerza de 6 [N] que coincide con el peso de las piezas, *Imagen 4.9*, ya que para este modelo se asignaron propiedades de hierro colado a la piezas sólidas, esto causa incremento en el tiempo requerido de cálculo y no se requiere análisis específico del sólido, por esto se omite la asignación del material en el modelo "Benchmark test" modelándolo únicamente bajo la condición de cuerpo rígido, bajo esta condición los cuerpos no son incluidos en la aplicación de gravedad, de esta forma el cálculo de incrementos es más rápido.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

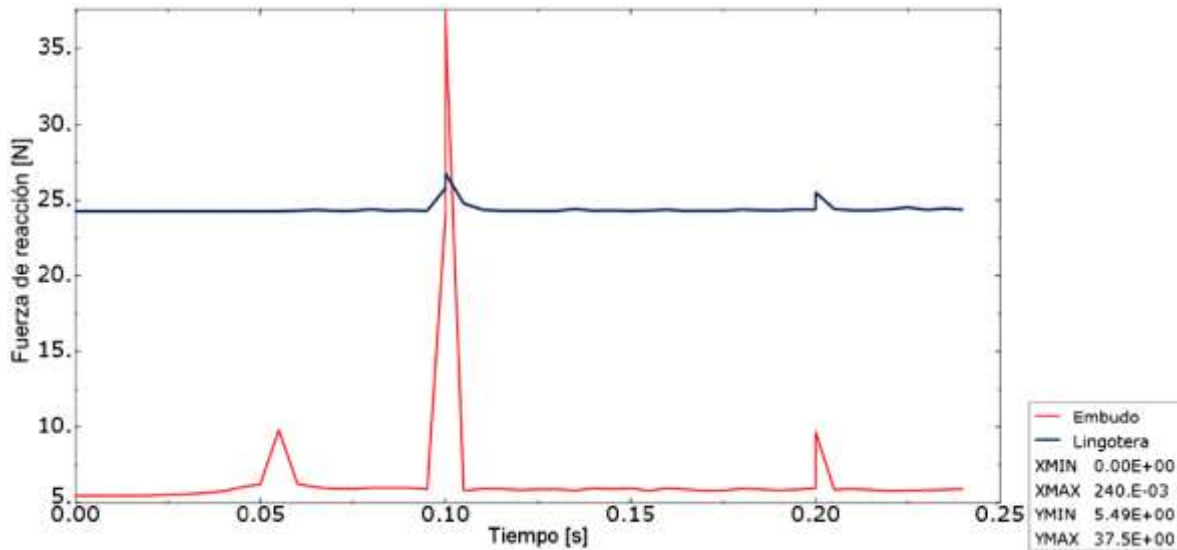


Imagen 4.9 Fuerza de reacción en ambas piezas del modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni"

La fuerza de reacción para el modelo "Benchmark test" muestra un comportamiento oscilatorio desde el inicio de la simulación, durante el cálculo del primer paso definido en el modelo el cual comprende básicamente el flujo del material en el embudo y la salida de este hacia el bebedero mostrando un recorrido muy corto del fluido dentro de este, la fuerza de reacción muestra una oscilación comprendida en el rango de 0.25 y 2.5 [kN].

Lo anterior indica que las piezas ejercen respuesta diferente prácticamente en cada incremento (carácter oscilante) debido a la condición de no deslizamiento. En cada incremento el fluido entra en contacto con nodos diferentes induciendo que el fluido iguale la velocidad de este generando una fuerza de reacción en la pieza ya que esta detiene el viaje del material, con el material detenido en el nodo, el material interno fluye libremente al estar aislado de la condición "Rough" lo que permite que la velocidad aumente y la fuerza de reacción aumente, al tocar el siguiente nodo se repite el proceso.

La visualización de la fuerza de reacción en el modelo y haciéndola específica al molde se observa que los instantes asociados con el fin y el inicio de los pasos no generan discontinuidades como en el caso del modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni", la discontinuidad numérica es eliminada por la interacción nodo a nodo con el material euleriano, ya que se conoce el valor de interacción de velocidad en cada nodo en contacto con material y esto asegura que la solución siempre tenga datos para iniciar el cálculo. Además el comportamiento de la fuerza de reacción sigue siendo oscilante, este resultado es esperado ya que al no haber definido material o inercia a las piezas estas deben responder exactamente igual al empuje del fluido, *Imagen 4.10*.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

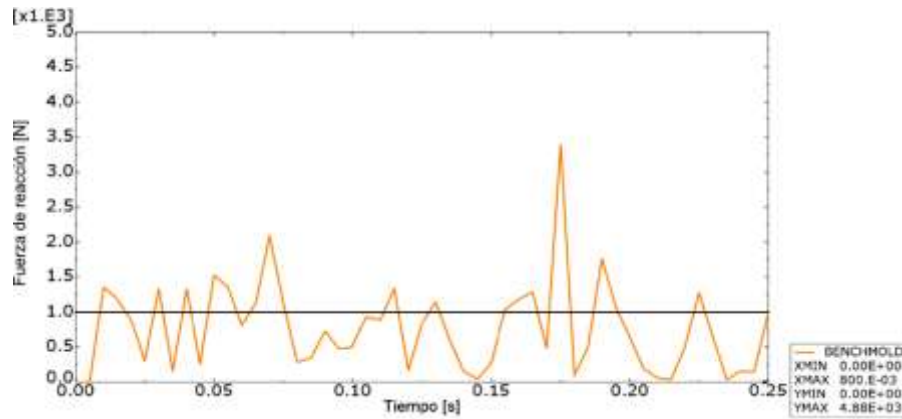


Imagen 4.10 Fuerza de reacción calculada en los dos primeros pasos definidos en el modelo "Benchmark test", la línea recta presenta el valor promedio durante el cálculo.

La visualización de la fuerza de reacción a lo largo de la simulación hasta el paso 35 muestra el mismo comportamiento, la visualización de los pasos posteriores no aporta mayor información. Lo que se confirma es el comportamiento oscilatorio y la condensación de datos cada $5e-3[s]$, por lo que se hace uso del filtro Butterworth (Simulia, 2011) para que muestre la tendencia de los datos y el comportamiento de los picos más representativos, esta herramienta demanda que los datos presenten crecimiento monótono en la variable independiente, esto se había asegurado desde la observación de la grafica de la Imagen 4.10. Se presenta la fuerza de reacción sin filtro en la Imagen 4.11 y la curva obtenida del filtro en la Imagen 4.12

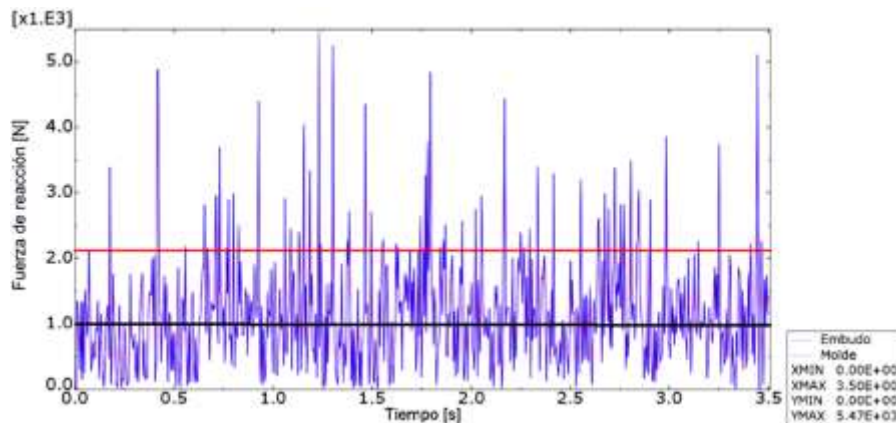


Imagen 4.11 Fuerza de reacción en ambas piezas del modelo "Benchmark test", línea rojo es el límite superior de la tendencia de datos y línea negra es el valor promedio de la variable

La curva obtenida del filtro muestra la tendencia que se observa desde las graficas previas, la aparición de los picos importantes, la tendencia hacia una banda más corta donde la fuerza fluctúa en las mismas secciones y muestra que la tendencia de datos aparece entre los valores 0 y 2.15 [kN], Imagen 4.12, este rango es aproximadamente el mismo que se observa en la Imagen 4.11 señalado por la línea roja y la línea negra es el valor medio calculado directamente del filtro, la cual coincide aproximadamente al valor medio de 1 [kN] de la Imagen 4.11 (línea negra). Con esto se determina que el uso de este filtro determinar correctamente la tendencia en el



comportamiento de la fuerza de reacción y también comprueba que los sólidos interactúan con el fluido.

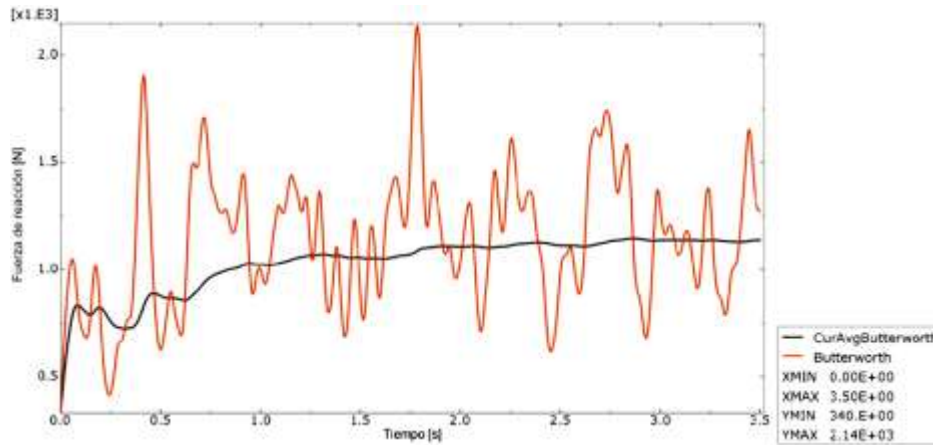


Imagen 4.12 Curva Fuerza de reacción tiempo obtenida del filtro Butterworth (cafe) y valor promedio calculado de la curva ya filtrada (negro) muestra que el valor promedio converge aproximadamente a 1[kN], presentando valores menores al inicio, la variación se debe a que muestra el valor promedio por incremento calculado.

4.3 Economía computacional

El requerimiento de tiempo e incrementos necesarios para los modelos, están en función de los nodos, elementos y variables que el modelo debe resolver, esto se reporta en la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Parámetros generados para cada modelo y los requerimientos usados para su solución.

Modelo	Nodos	Elementos	Número total de variables	Incrementos requeridos	Tiempo de cálculo	Tiempo simulado [s]	
Benchmark test	860,056	826,051	2,580,174	Restauraciones	Global: 668[hrs], 59[min], 36 [s]	Total: 5	
				Incrementos por restauración			
				Original	96,794	314,962 [s]	0.8
				Restauración	63,029	340,494 [s]	0.77
				Restauración1	23,254	182,674 [s]	0.36
				Restauración2	96,994	260,497 [s]	0.58
				Restauración3	19,192	97,374 [s]	0.22
				Restauración4	97,301	480,636 [s]	0.78
				Restauración5	97,018	250,442 [s]	0.5
Restauración6	71,898	261,148 [s]	0.57				
Restauración7	96,997	220,149 [s]	0.42				
Lingotera para aleación Cu-Al-Ni	2,376,895	2,319,195	7,149,822	1,20,385	139[hrs], 03[min],36[s]	0.24	

El efecto directo en la disminución de tiempo e incrementos es debido a la variación de asignación de propiedades a los sólidos, como se mencionó en la sección 4.2.2, ya que no se calcula la



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



integración de esfuerzo, desplazamiento o deformación en base a las propiedades mecánicas definidas, esas variables se eliminan de cada nodo y requieren menos capacidad de cálculo, la disminución global de esto se puede observar en la *Tabla 4.1* columna Elementos.

4.3.1 Escalamiento artificial de la velocidad

En base al tiempo de cómputo requerido para completar la simulación de ambos modelos, conocidas las posibilidades de aceleración de cálculo disponibles en un paso explícito, sección 3.3.3, se plantea el escalamiento de velocidad como acelerador e intentar obtener una simulación con un tiempo de cómputo menor sin afectar los resultados de esta.

Para observar el efecto sobre el modelo se hacen variaciones en la velocidad inicial del fluido definido mediante la aplicación de un campo predefinido sobre el todo el set de nodos de asignación de material euleriano, de esta forma se aplica una condición inicial que induce el movimiento del fluido de manera más rápida, y permite observar el efecto de la gravedad, ya que un campo predefinido varía según el cálculo global del modelo para un instante determinado, es decir cambia en cada incremento según el comportamiento de la simulación.

La primera variación de velocidad se establece con un valor de 10 [m/s] que es el orden de magnitud inmediato superior a las condiciones originales, y se hacen variaciones en orden de magnitud puesto que con cambios menores no presenta un cambio observable en el comportamiento de la simulación y no disminuye el tiempo de cómputo, ya que para que el fluido alcance el mismo desplazamiento se requiere aumentar la duración del paso, de este modo el número de incrementos requeridos y el tiempo aumenta. También se retira el molde para disminuir la cantidad de variables del modelo, puesto que el objetivo de estas pruebas no es el llenado del molde, solo evaluar el comportamiento del fluido bajo estas condiciones.

Las condiciones para las pruebas de aplicación de velocidad inicial realizadas se muestran en la *Tabla 4.2*.

Tabla 4.2 Efecto del escalamiento de la velocidad en el flujo de material

Imagen	Velocidad [m/s]	Incremento	Tiempo simulado [s]	Incrementos	Tiempo de cómputo [s]
<i>Imagen 4.13 b</i>	1000	4	1.4e-4	1,259	333
<i>Imagen 4.13 c</i>	100	15	6e-4	2,506	1,222
<i>Imagen 4.13 d</i>	10	20	0.105	87,300	210,062



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

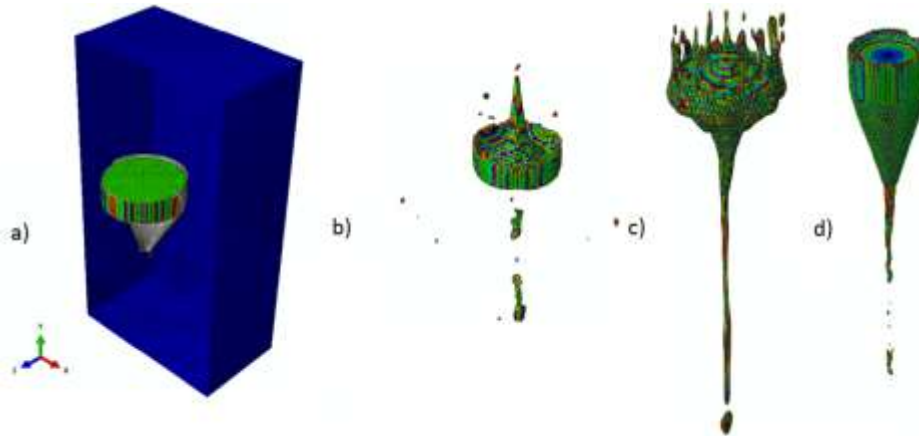


Imagen 4.13 Visualización del efecto de la aceleración artificial en el modelo, a) condición inicial de cálculo, Instante donde se observa claramente el rebote del fluido incrementó; b) $v_i = 1000$ [m/s], c) $v_i = 100$ [m/s], d) $v_i = 10$ [m/s].

La Imagen 4.13 a muestra el modelo "Benchmark test" sin molde y en las condiciones de prueba, se cambio el dominio por uno rectangular con las misma medidas que el descrito en el capítulo tres, en la Imagen 4.13 b se muestra el modelo con velocidad de 1000 [m/s], en el se observa que el rebote es casi instantáneo debido a que el fluido no puede ingresar a la cavidad asignada, Imagen 4.13 c se observa que el flujo se pudo iniciar y extender por una distancia determinada, sin embargo el fluido no adopta la forma del embudo, solo muestra un perfil irregular con similitudes al caso anterior sugiriendo la presencia del efecto de rebote, en la Imagen 4.13 d se observa que el flujo no alcanza la misma distancia recorrida que en el caso inmediato anterior, sin embargo el fluido adopta adecuadamente la forma del embudo y comienza a fluir el material de una forma coherente y consistente, pero en la superficie libre muestra un perfil de flujo hacia arriba, así como una pequeña porción del fluido se desprende como gota al frente de flujo, sin embargo no muestra un efecto importante en la disminución de tiempo de cálculo respecto al seccionamiento original de este modelo, *Tabla 4.1* tercer renglón.

Dados los resultados obtenidos se establece que para la definición de los modelos descrita en el capítulo tres el escalamiento artificial de velocidad no es una opción viable para disminuir el tiempo de cálculo requerido para la simulación y la verificación de los parámetros a dimensionales no sería válida.

4.3.2 Seguimiento del material por el dominio euleriano

En el esfuerzo por reducir el tiempo de cómputo y conociendo que el escalamiento de velocidad produce un comportamiento del modelo indeseable, se plantea el uso de las condición de frontera euleriana "mesh motion", descrita con detalle en la sección 2.5.2, que permite al dominio euleriano seguir al material y expandirse o contraerse según el comportamiento que esté presente durante la simulación, de esta forma se puede plantear un dominio que solo enmarque el volumen de fluido específico a usar en el modelo. Para observar cual es el efecto de la reducción de



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



elementos eulerianos en el modelo se escoge el que tenga mayor cantidad, es decir el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni", *Tabla 4.1* renglón 11.

La reducción del dominio se hizo generando una pieza cilíndrica de revolución en la misma forma que se genero la pieza de referencia para este modelo, sin embargo se cambio el tipo de pieza, dimensiones, elementos y mallado aplicados, estos cambios se resumen en la *Tabla 4.3*.

Tabla 4.3 Resumen para la generación del dominio euleriano reducido.

Módulo en la paquetería	Modificación
Geometría	Se define un sólido 3D euleriano de revolución con $r = 33e-3$ [m] y $22e-3$ [m]
Propiedades del material	Se asigna el material usado para el dominio original.
Ensamble	Se ubica concéntrico al embudo y con la base del cilindro alineada al punto medio del redondeo
Paso	Se define un solo paso de prueba con la características mencionadas en la sección 3.3.3, para definir la funcionalidad del dominio reducido
Interacciones	No sufre cambios
Cargas restricciones e inicializaciones	Aplica la VFT y se inicializa el material en el nuevo dominio en la misma forma que se menciona en la sección 3.3.5. Se agrega la condición de frontera de seguimiento, la forma se describe abajo.
Mallado	Se asigna el control de barrido mediante eje central y un tamaño global de elemento igual al modelo original

La generación de la condición de frontera de seguimiento inicia de forma tradicional, se selecciona el primer paso creado por el usuario (puede crearse en cualquier paso distinto al "Initial"), es del tipo "Otros - Eulerian Mesh Motion", se selecciona el dominio euleriano, se activa la opción de seguimiento de material y se selecciona el nombre del material a seguir, dejando las demás condiciones en su estado predeterminado, se confirma la acción y se deben visualizar cuadrados amarillos en todas las aristas del dominio euleriano.

La configuración con el dominio disminuido se compara con la configuración original para evidenciar el cambio en el número de elementos.

El dominio original cuenta con 1,773,750 elementos, mientras que el dominio reducido cuenta con 85,140, es decir que hay una disminución de 1,688,610 elementos, esto representó que el modelo con dominio reducido consiguiera el cálculo de un paso en un día en vez de solo un 60% del paso en el modelo original.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

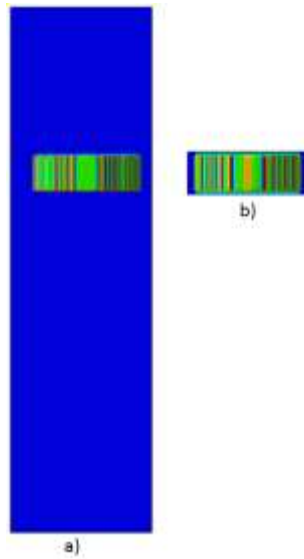


Imagen 4.14 Comparación de a) modelo original y b) modelo con dominio reducido.

El efecto de la condición de frontera evita que el tiempo disminuya tanto como se esperaba, según la cantidad de elementos disminuidos, ya que el cálculo del seguimiento de superficie genera requerimientos adicionales a la solución de ecuaciones, puesto que el seguimiento consiste en expandir el dominio, re-calcular la distribución de volumen en los nodos, asignar el perfil de la superficie libre en la nueva distribución de volumen y cambiar de posición la malla euleriana según requiera la nueva ubicación del material.

El efecto de la aplicación de esta condición de frontera genera que todo el volumen asignado se confine a una zona reducida de la malla, pérdida de resolución en las superficies libres del fluido y el cálculo del desplazamiento de las gotas generadas por la onda de choque.

En específico el efecto observado en las gotas es que la trayectoria que siguen no es parabólica como se espera de acuerdo a lo mostrado en el modelo original y el conocimiento a priori de cuerpos proyectados bajo la influencia de un campo gravitacional, solo se muestra elevación en dichas secciones de volumen separado de la masa principal.

La visualización del cálculo de flujo cuando la condición de seguimiento esta aplicada, muestra como la malla euleriana cambia su tamaño para evitar que algún fragmento de material salga del dominio y sea excluido del cálculo, *Imagen 4.15 a*, estado inicial del modelo con dominio reducido, en *b* primera deformación visible en el fluido y formación de la onda de choque, para *c* aparición de las gotas proyectadas por la onda de choque, marcadas en círculos rojos, en *d* separación de las gotas formando un perfil alargado, en *e* desaparición de gotas por la pérdida de resolución, en la zona marcada en rojo (comparada con *d*, zona en rojo), en *f* seguimiento de las gotas remanentes visibles que han perdido forma y definición, zona marcada en rojo.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

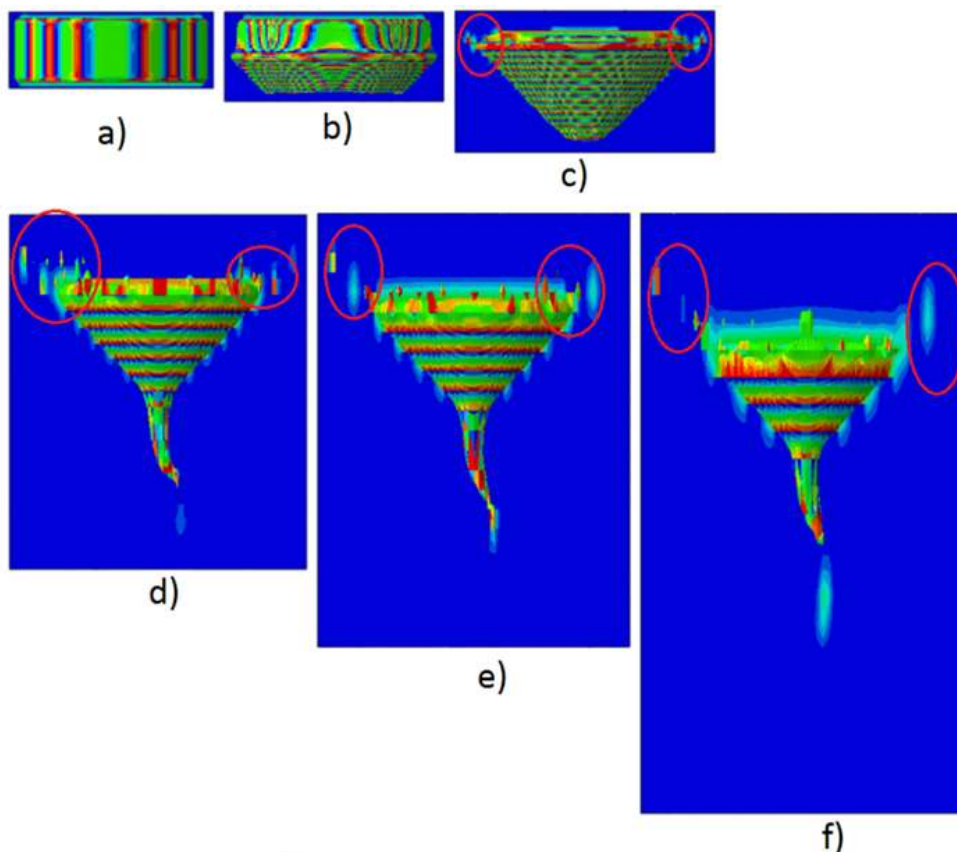


Imagen 4.15 Progresión de flujo con la aplicación de la condición de seguimiento a la malla euleriana.

Los instantes mostrados en la **Imagen 4.15 d** y **e**, zonas marcadas en rojo muestran que algunas gotas son excluidas de la visualización, se debe a que alcanzaron un volumen inferior al porcentaje mínimo considerado dentro del cálculo, el mínimo preestablecido es de 0.5, es posible modificarlo en la definición de la condición de seguimiento en la variable "Volume fraction treshold", el comportamiento detectado en pruebas preliminares no asociadas a estos modelos indica que el valor de 1 no discrimina ninguna partícula por pequeña que esta sea y en cero no muestra el material euleriano definido, por lo que la resolución de este control se debe probar para cada modelo planteado, en este caso la mejor visualización se encontró en el valor predefinido.

En el instante mostrado en la **Imagen 4.15 c** respecto al instante **a**, hubo una expansión de 100 por ciento del dominio euleriano, en dicho instante de cálculo se observa el perfil de fluido coincidente con el embudo, el efecto de las gotas debidas a la onda de choque, **Imagen 4.16 a**, señalada en rojo. Un acercamiento a las gotas muestra que presentan acumulación de volumen y perfil redondeado, que es aproximado a la forma conocida de una gota, **Imagen 4.16 b**.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

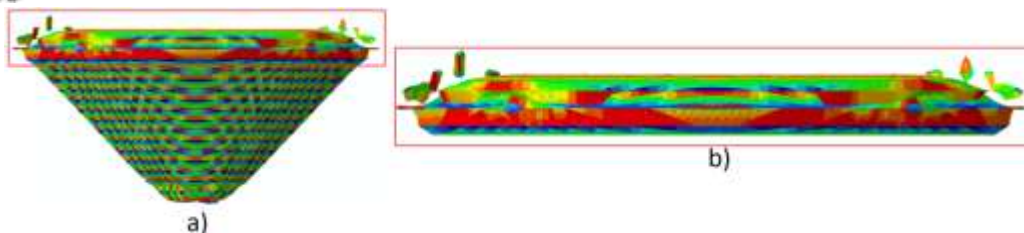


Imagen 4.16 a) último resultado donde el perfil mantiene definición de deformación y las gotas, mismo instante que en la Imagen 4.15 c, b) Acercamiento a las gotas marcadas en el rectángulo rojo.

4.4 Validación mediante el comportamiento de las superficies libres

Las superficies libres del fluido en el vertedero de ambos modelos presenta un comportamiento turbulento debido al impacto, este comportamiento genera formas y perfiles aleatorios que son controlados por las propiedades viscosas y de tensión superficial de cualquier fluido, como se mencionó en la sección 3.3.2 la forma de determinar dicho comportamiento es el módulo de compresibilidad calculado por el producto $\rho_0 c_0$ definido en la ecuación de Mier-Grüneisen.

Un efecto adicional de la reducción del embudo y la eliminación de la condición "Rough" en el contacto general del modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni" es que el fluido de las paredes crea una superficie cerrada por debajo del fluido de las capas centrales lo que produce una cavidad llena de material, sin embargo en el modelo no se definió ningún otro material, pero la definición del dominio euleriano mencionada en la sección 2.5.2 establece que este tipo de dominios están llenos con material void que no tiene ninguna propiedad definida y es el responsable del intercambio de material definido por el usuario a través de las celdas de la pieza euleriana.

La cavidad de material void o burbuja, *Imagen 4.17 a*, se comienza a cerrar en la parte inferior limitando el volumen de "void", en *b* el flujo del volumen confinado viaja hacia arriba respecto a la zona donde apareció lo cual es coincidente con el comportamiento de burbujas en fluidos reales, además el volumen parece menor ya que esta comprimido por el agua del entorno, en *c* se observa que el movimiento continua como en *b* y el volumen aumenta porque hay menos material que ejerza carga sobre el volumen confinado, este volumen produce una elevación de agua en la superficie libre.

Para el instante *Imagen 4.17 d* la burbuja sale del fluido propulsando el fluido hacia arriba, en el momento *e*, el fluido ha sido propulsado una determinada distancia hacia arriba, formando una columna de agua y un cono en la superficie libre del agua formado una estricción por debajo de un cumulo de agua o gota, en *f* el cono ha colapsado formando ondulaciones y la columna ha comenzado a caer por el efecto de la gravedad y esto causa que la gota original en el tope de la columna forme dos gotas, aumento del cono bajo la columna y oleaje en la superficie libre.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

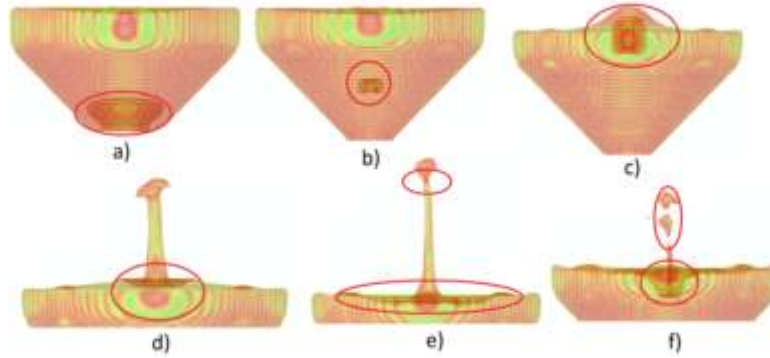


Imagen 4.17 Comportamiento de la burbuja atrapada en el embudo del modelo "Lingotera para Cu-Al-Ni"

El comportamiento de la superficie libre parece congruente pero la formación de las gotas a la velocidad que se presentan los resultados no es apreciable en la vida cotidiana, por lo cual se requiere comparar el perfil obtenido con videos o fotografías tomadas con resolución de tiempo comparable.

Las imágenes con posibilidad de comparación son realizadas mediante la caída de gota en un cuerpo de agua grabadas en el rango de $5e3$ y $10e3$ fotogramas por segundo (fps), es decir se tiene una imagen o un resultado cada $2e-3$ y $1e-3$ respectivamente, esto garantiza que los instantes generados por la paquetería estarán presentes en la visualizaciones. La *Imagen 4.18 a*, muestra una perspectiva lejana de la formación de la elevación del fluido debido a la inercia del llenado del vacío causado por el impacto original de la gota por lo que muestra un cono, mientras que en la imagen b aparece la superficie plana con la elevación del fluido (menisco), en c se observa la misma formación del menisco y una superficie mas plana. En conjunto las tres imágenes muestran un perfil similar lo que indica que el cálculo de la superficie libre bajo efecto de impacto es aceptable.

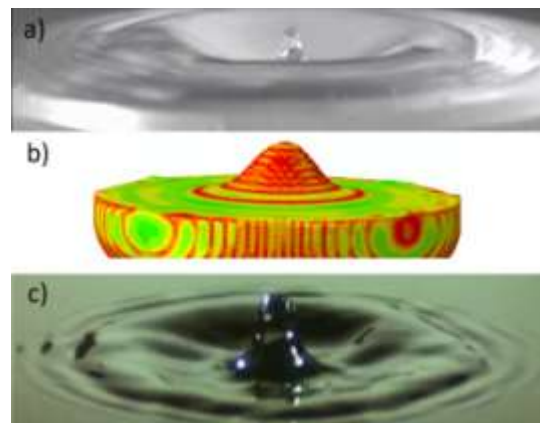


Imagen 4.18 a) generación del menisco de gota saliente debido a impacto grabado a 5000 fps (Olando, 2010), b) formación del menisco de gota saliente generado en ABAQUS®, c) formación del menisco de gota de agua saliente debido a impacto grabado a 10000 fps (MIT, 2010).

La formación de la columna de agua es comparable en las tres secciones de la *Imagen 4.19*, todas muestran la formación de una sección alargada que une una gota y la masa principal de fluido, la



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



formación de una estricción que permite la diferenciación de la gota superior y la sección alargada, la existencia de dos zonas en la superficie libre, una que presenta ondas que corresponde al cono, y otra que no presenta perturbaciones que se presenta al terminar la zona del cono. Comparando la *Imagen 4.19 a* y la *Imagen 4.19 b* se observa la formación del cono en la base de la columna de fluido, mientras que en *c* se aprecia la formación de un cono ascendente, lo que sugiere que el comportamiento de la superficie de agua ante impacto es aleatorio y se pueden presentar perfiles que difieren entre sí.

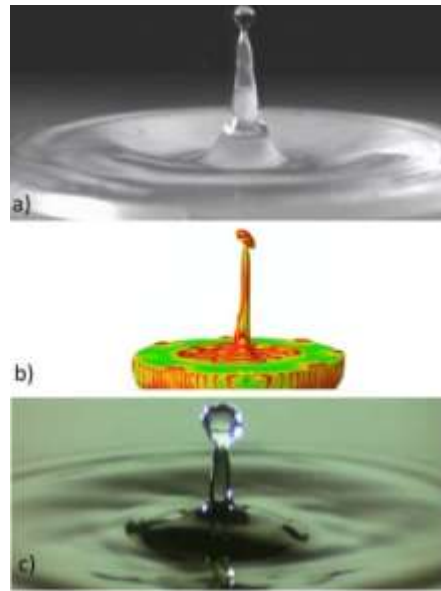


Imagen 4.19 Columna de agua debida a la inercia del colapso de agua en el vacío creado por el impacto de agua, a) imagen obtenida a 5e3 fps (Olando, 2010), b) columna calculada por la paquetería y c) imagen obtenida a 10e3 fps (MIT, 2010).

Con la imagen anterior se determinó que el cálculo entregado por la paquetería muestra las zonas comunes a las grabaciones de superficies de agua ante impacto, la formación de una columna, la estricción de esta para la formación de una gota superior, así como en la superficie libre la existencia de una zona turbulenta y una zona tranquila.

El colapso de la columna de agua es una comparación importante ya que al observar las imágenes obtenidas de la realidad muestra que el fluido se separa en gotas diferentes, lo que en un algoritmo de cálculo demanda que se definan como un cuerpo distinto y se calcule el comportamiento por separado. En la *Imagen 4.20* se muestra como en los tres eventos, se generan gotas, porque la inercia de cada cumulo de fluido es diferente y responde de una manera individual al mismo campo gravitacional, esto indica que el cálculo está generando resultados muy próximos a la realidad.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

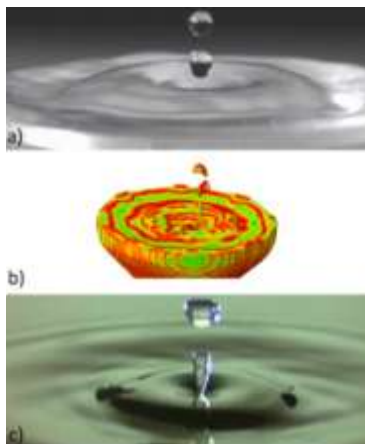


Imagen 4.20 Colapso de la columna inercial y formación de las gotas diferenciadas, a) imagen obtenida a 5e3 fps (Olando, 2010), b) colapso calculada por la paquetería y c) imagen obtenida a 10e3 fps (MIT, 2010).

La comparación de las gotas formadas durante los tres eventos, *Imagen 4.21*, confirma que el perfil, entidad y ubicación del volumen desarrollado en el cálculo dentro del software es adecuado. También muestra que los vértices están presentes en las gotas simuladas, esto se explica por el método de aproximación de la superficie de volumen usado en la paquetería, explicado en la sección 2.6 b), con lo que se confirma que el cálculo de superficies libres y distribución de volumen es acertado.

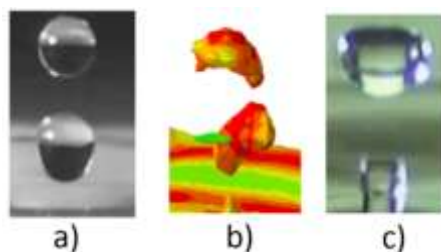


Imagen 4.21 Visualización en detalle de las gotas formadas durante el colapso de la columna de agua, a) imagen obtenida a 5e3 fps (Olando, 2010), b) gota calculada por la paquetería y c) imagen obtenida a 10e3 fps (MIT, 2010).

En el caso del modelo "Benchmark Test" la necesidad de usar una malla más grande comparada con el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni" causa que no exista resolución suficiente en seguimiento de la superficie libre del vertedero, sin embargo muestra el comportamiento global del fluido, esto se observa al comparar los modelos entre sí. La base lógica para comparar los modelos es que comparten la misma definición de piezas (variando la geometría), material, pasos de cálculo, simplificaciones, condiciones de frontera aplicadas y tipos de mallas; la única variación es la condición de contacto, la cual solo tiene efecto en el material que interactúa con la superficie sólida y la simulación se lleva a cabo en el mismo software con los mismos algoritmos, por lo que se puede asumir que si en el primer modelo el resultado es válido, y el segundo modelo presenta resultados comparables con el primero, el segundo también podrá considerarse adecuado.

En el modelo "Benchmark Test" no presenta el confinamiento del material "void" y no genera burbuja, pero el efecto de la onda de choque en la propagación del fluido, causa que cuando esta



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



alcanza la superficie libre crea oleaje y forma una concavidad, *Imagen 4.22 a*, al llenarse la concavidad con fluido el movimiento genera el menisco de agua, *Imagen 4.22 b*, que al ser comparado con c muestra el mismo comportamiento, la superficie se eleva al centro y forma un perfil curvo.

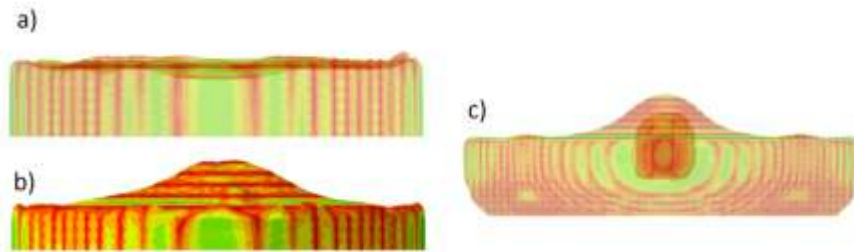


Imagen 4.22 a) origen del menisco de agua modelo "Benchmark Test", b) menisco formado modelo "Benchmark Test", c) causa y menisco con el modelo "Lingotera para Cu-Al-Ni"

El seguimiento del comportamiento de la superficie libre del vertedero en el modelo "Benchmark Test" muestra que el fluido se eleva de la misma forma que lo hace el otro modelo, pero la formación de la gota en la cima de la columna no se presenta ya que se eleva muy poco y el cono que la origina fue pequeño en comparación de las visualizaciones del impacto de gota anteriores o la salida de una burbuja, *Imagen 4.23*.

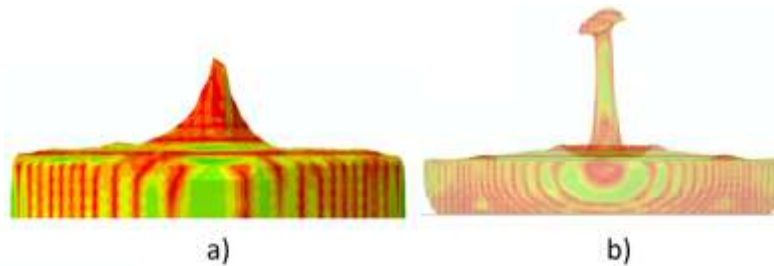


Imagen 4.23 Comparación de la formación de columna de agua por el oleaje en la superficie, a) "Bechmark test", b) "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni".

En los instantes que la columna de agua colapsa sobre la masa principal de fluido para ambos modelos se presenta la formación del cono o concavidad debido a la acción de reingreso del fluido de la columna, en la *Imagen 4.24*, al ser menor la del modelo "Benchmark test" es absorbida casi de inmediato por la masa principal de fluido.

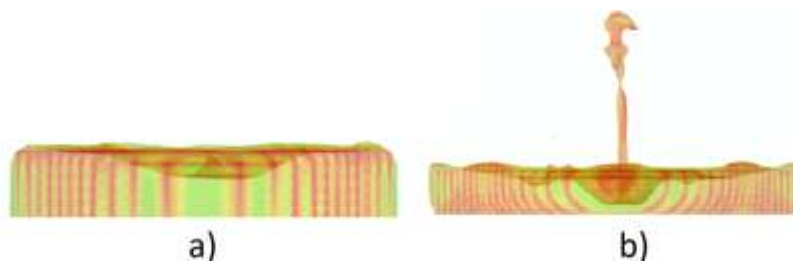


Imagen 4.24 Comparación del colapso de la columna de agua, a) "Bechmark test", b) "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni".



La comparación de los principales instantes entre ambos modelos revela que el comportamiento es consistente para la formación de la columna de agua que es resultado de la turbulencia, la formación de crestas y valles en la superficie libre debida al oleaje y la integración del fluido que cae sobre la masa principal de fluido. Con base a eso se puede decir que el modelo "Benchmark Test" es válido y adecuado para la visualización de la dinámica del fluido en la misma forma que el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni".

4.5 Llenado

Con base a los resultados, hasta ahora se ha determinado que la simulación de fluido ha entregado resultados congruentes con fenómenos reales como los mostrados en la sección 4.4 para la formación de columna de agua y gotas, esto permite obtener resultados del llenado de los moldes definidos para ambos modelos y compararlos con los datos publicados en la literatura mencionados en la sección 1.5 para el modelo "Benchmark Test" y con imágenes de llenado de recipientes tomadas a alta velocidad para el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni".

4.5.1 Llenado del modelo "Benchmark Test"

La visualización del llenado del modelo "Benchmark Test" se presenta de forma experimental cada 0.25 [s] de tres coladas diferentes para mostrar que el llenado del mismo molde genera perfiles de llenado diferentes (Campbell, 1996) estas visualizaciones se comparan con el modelo planteado con las condiciones del capítulo 3 (modelo base agua) en el momento que se presente el perfil de superficie mostrado en la radiografía, para comparar el comportamiento al interior de la cavidad principal, la distribución de material en las cavidades y la turbulencia mediante la observación del perfil de velocidad.

En la *Imagen 4.25 a* se muestra un llenado uniforme al final del canal de colada, el cual se usa para buscar el instante de comparación generado por la paquetería, circulado en rojo y comparado con *d*. En *b* muestra que el perfil del fluido tiene contacto la pared derecha la entra a la cavidad principal y el fluido es empujado a la izquierda; en la sección *c* se muestra que la zona donde hay menor volumen de fluido es la más próxima al pozo del bebedero, lo cual también se puede observar en el resultado obtenido señalado en rojo.

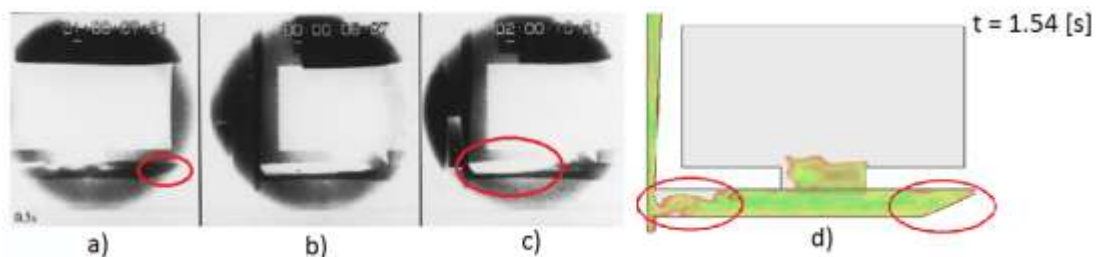


Imagen 4.25 En a, b y c de izquierda a derecha se muestra las tres coladas desarrolladas experimentalmente para cuando el final del canal de colada se llena completamente (Campbell, 1996) y d es el resultado comparable entregado por el software.



Las principales diferencias que se observan en las radiografías obtenidas y en el resultado presentado durante la simulación, *Imagen 4.25*, es el nivel de fluido requerido para que el final del canal de colada se llene por completo es mayor en comparación a la experimentación, esto se debe a que la condición "Rough" retiene el fluido en contacto con el sólido disminuyendo el flujo de material, otro resultado asociado a este comportamiento es el tiempo requerido de $t = 1.54$ [s] siendo casi el triple, ya que durante la colada real se alcanzo ese estado a los 0.5 [s].

En la *Imagen 4.26 a*, se observa que en la puerta de entrada hay flujo acumulado en el lado derecho debido al llenado tipo fuente, lo que permite que cierta cantidad de material caiga y forme un hueco (ovalo en rojo), mientras que otra porción de fluido quede sobre la cara horizontal izquierda de la cavidad principal, este mismo perfil de acumulación y colapso se presenta en *d*. En *b* y *c* se muestra que el flujo tiene comportamiento de fuente de una manera más evidente y un nivel de fluido bajo respecto a la altura del canal de alimentación (señalado en rectángulo), mientras que en *d* (recuadro rojo) se muestra que la falta de fluido se presenta en la parte baja del canal como resultado de turbulencia. En comparación con los diagramas expuestos en la sección 1.5.2 se determina que el modelo cumple con características de modelos turbulentos y altamente viscosos, lo que es de esperarse debido a la definición de la condición de contacto impuesta para evitar que el dominio euleriano traspase al lagrangiano.

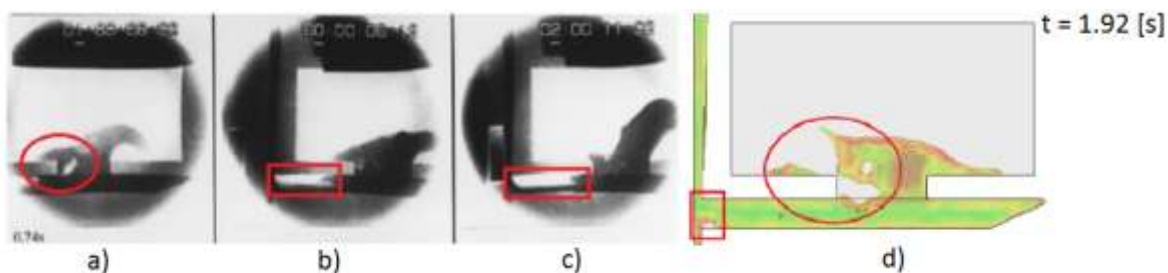


Imagen 4.26 En *a*, *b* y *c* se muestra el primer instante en que el fluido entra a la cavidad principal durante la experimentación (Campbell, 1996), *d*) resultado comparable obtenido durante la simulación.

El tiempo simulado cuando alcanzo dicho perfil es $t = 1.92$ [s] y en el experimento se alcanzo en 0.74 [s], en este caso no hay una relación de 1 a 3 en el tiempo porque una vez que el canal de colada se lleno la condición de no deslizamiento ya no tiene efecto en el flujo, ya que el material euleriano de las capas internas desliza sobre las capas superficiales. Sin embargo el tiempo requerido entre los estados par el caso real es de $\Delta t_e = 0.24$ [s] y para la simulación es $\Delta t_s = 0.42$ [s], esto indica que la simulación además es frenada por una condición distinta a la de contacto "Rough".

Los resultados de la *Imagen 4.27* muestran que la superficie libre la *a* y *d* son muy similares, ambas presentan acumulación de fluido en la esquina inferior derecha de la cavidad principal, elevación del material en contacto con la pared vertical derecha, a la izquierda un nivel curvo más bajo seguido de una elevación con superficie suave (recuadro), este perfil es resultado por el llenado tipo fuente que aún presenta efecto. También se observa la formación de burbujas en *a*, próximas a la entrada de la cavidad principal y la formación de una burbuja en una zona cercana a la



revelada por la radiografía **a** (óvalo); en **c**, se observa que la superficie del fluido del lado izquierdo presenta un nivel bajo y similitud con la misma zona en la imagen obtenida de la simulación, lo que indica que en volúmenes de material pequeños las superficie libre y comportamiento se calcula más eficientemente.

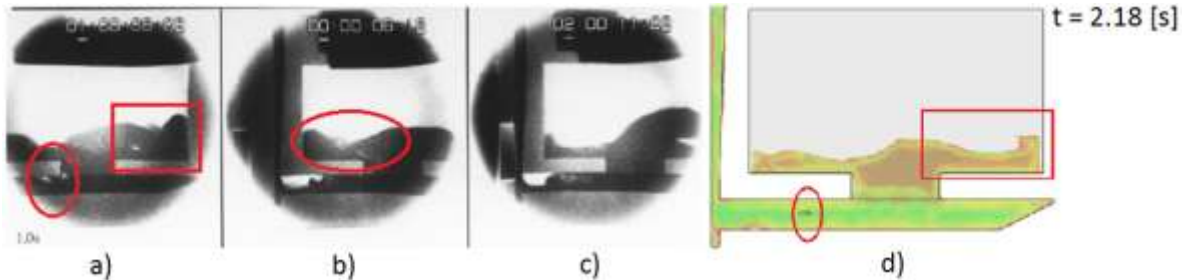
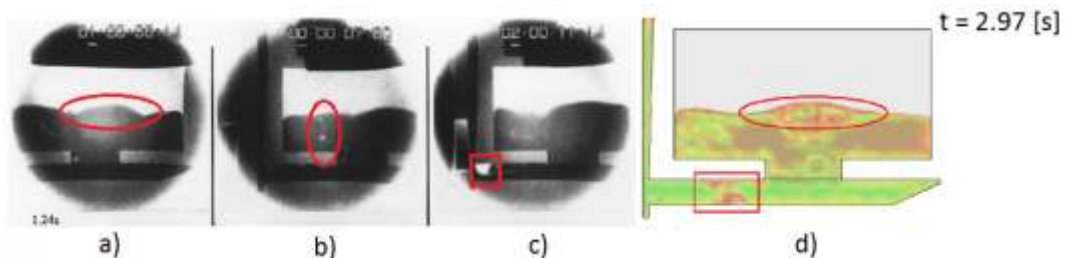


Imagen 4.27 En a, b y c se muestra el asentamiento del fluido dentro de la cavidad, en d se muestra el perfil comparable de la simulación.

El instante en que las radiografías fueron obtenidas es $t = 1$ [s], el resultado comparable de la simulación se obtuvo para $t = 2.18$ [s], estableciendo que el periodo requerido para pasar del estado de la *Imagen 4.26* y la *Imagen 4.27* en la simulación es, $\Delta t_s = 0.26$ [s], que muy próximo al tiempo definido en la experimentación para la obtención de imágenes, esto indica que cuando el flujo solo interactúa con material euleriano es consistente con la realidad.

La siguiente radiografía se tomó cuando la cavidad se llenó aproximadamente a un 40%, el perfil comparable obtenido de la paquetería muestra un llenado ligeramente menor, sin embargo la superficie del fluido al interior de la cavidad muestra un perfil muy parecido, en el ovalo rojo en la *Imagen 4.28 a y d* se muestra elevación de material al centro que es respuesta del flujo de llenado, así como al lado derecho se muestra una curva ascendente hacia la pared de la cavidad, que en la simulación está presente pero con menor elevación. En la imagen **c**, en el ovalo, se muestra la presencia de burbujas que indica un perfil turbulento en la zona, en la simulación se observa un perfil de distribución de volumen entre rojo (elemento lleno) y verde (elemento al 50%) que indica que hay zonas con más material que otra, esto significa que el fluido viaja de manera no homogénea entre los elementos eulerianos; este efecto se observa en el recuadro de la imagen **c y d**, en la primera el hueco formado por falta de llenado se observa a la entrada del canal de alimentación, y en la segunda la turbulencia aparece en una sección más próxima a la puerta de entrada a la cavidad, la diferencia de ubicación se debe a la condición de contacto que provoca que el desprendimiento de material de las paredes se presente después de un recorrido mayor.





Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Imagen 4.28 En a, b y c se muestra el llenado de la cavidad al 40%, en d se muestra el perfil comparable de la simulación.

El tiempo en el cual se alcanzó el estado comparable es $t = 2.97$ [s], mientras que en la experimentación solo se requiere $t = 1.24$ [s], que es el esperado con base a los resultados previos pues ya se tiene el tiempo acumulado por el efecto de la condición "Rough" y una condición aun sin verificar, pero conociendo el comportamiento del material "void" mencionado en la sección 4.4 es posible pensar que el ser una cavidad cerrada y no intercambiar el "void" con el exterior este tenga que usar el mismo camino que usa el fluido para entrar, representando un flujo contrario y retrasando el flujo, sin embargo no hay burbujas visibles más que en la imagen *Imagen 4.27 d*.

El siguiente instante registrado corresponde aproximadamente al llenado de 70% de la cavidad, en la *Imagen 4.29 a* se muestra que ese instante tiene un perfil superficial estable y casi horizontal, mientras que en b se muestra que el perfil presenta oleaje y burbujas, ovalo rojo, que se compara con lo obtenido en la simulación, la cual muestra oleaje en la superficie del fluido y muestra turbulencia en la entrada a la cavidad principal, así como a la entrada del canal de alimentación, que son las zonas con vértices más agudos.

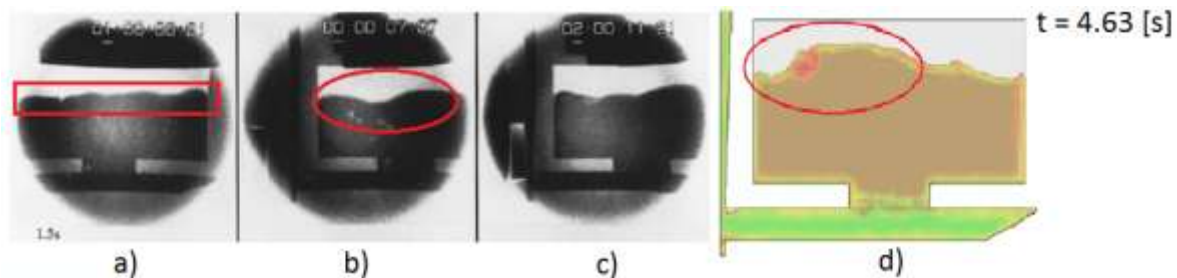


Imagen 4.29 En a, b y c se muestra la colada cuando llega a un 70% aproximadamente, en d se muestra el perfil comparable de la simulación.

La superficie en ninguna de las tres radiografías presenta el mismo perfil, por lo que en *Imagen 4.29 b y c* se presenta oleaje, en b se presenta con elevación de fluido ligeramente más al centro que en c pues en esta la acumulación de fluido está hacia la derecha, mientras que en d, la ola principal aparece hacia el lado izquierdo, en conjunto las 4 imágenes denotan que la superficie en ese instante no es estable y es difícil de predecir el perfil de esta.

Para este evento se presentó el mayor retraso, debido a que el fluido entró en contacto con mucha más área del molde que en otras secciones del molde, además esta sección del llenado lucha contra la gravedad pues ya tiene suficiente material sobre la puerta de entrada y la carga por gravedad permanece activa.

El tiempo adicional se puede explicar mediante la hipótesis de que el material "void" interactúa con el material euleriano al intercambiar posición en los elementos del dominio, es el mismo efecto al descrito en la formación de la burbuja en el modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni", pero en este modelo la superficie a la cual el material "void" puede liberarse está alejada del lugar donde está interfiriendo con fluido. El efecto de salida de "vacío" se puede observar en la *Imagen 4.30*.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



El efecto de la salida del material "void" causa irregularidades en la distribución de material euleriano, por lo que la simulación también calcula el asentamiento de la distribución del fluido que fue alterado, los eventos mostrados en la imagen *Imagen 4.30*, son posteriores al mostrado en la *Imagen 4.28*. En **a** se observa como el material "void" al no tener propiedades definidas no fluye de manera constante, si no que causa perturbaciones en el material de forma aislada, pero en una trayectoria congruente.

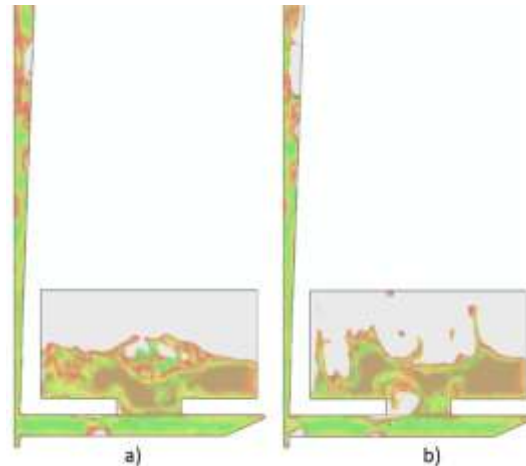


Imagen 4.30 a) efecto de la salida del material "void" a través de elementos que ya había sido ocupados por fluido, b) Instante posterior a la salida de material "void" que deja a la superficie con turbulencia y fracciones de fluido propagado al interior de la cavidad principal.

Una vez que el fluido que fue propagado por el movimiento del "void" se ha asentado, la convergencia de la simulación es adecuada, ya que se presentan perfiles que pueden ser comparados con las radiografías obtenidas durante la colada experimental (Campbell, 1996), tal y como se presentaron en la *Imagen 4.29*.

La última radiografía experimental presentada donde hay perfil de fluido para comparar se observa el llenado a un nivel aproximado de 95%, el perfil y llenado comparable obtenido en la simulación se basó en el porcentaje de llenado, sin embargo se observan ciertas diferencias, en la *Imagen 4.31 b*, muestra el perfil más plano de las tres radiografías, en comparación con **d** se puede afirmar que el volumen de fluido esta acumulado a la derecha, pero presenta un perfil prácticamente horizontal. Las tres radiografías muestran que el llenado es homogéneo y que todas las secciones del molde a excepción de la cavidad principal están llenas, lo cual también es observable en **d**, solo que en esta aparece un pequeño hueco cerca de la entrada al canal de alimentación, si se considera en conjunto la superficie aplanada y la hipótesis de la interacción del material euleriano con el "void" se explica porque la superficie del fluido presenta dicha forma.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito

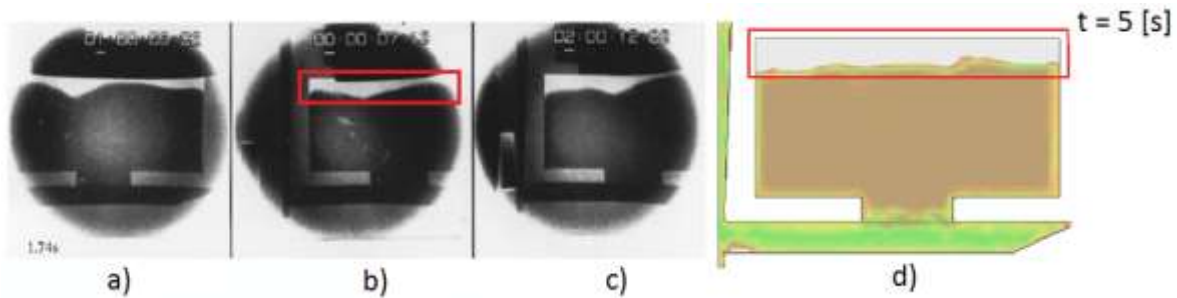


Imagen 4.31 En a, b y c se muestra la colada cuando llega a un 95% aproximadamente, en d se muestra el perfil comparable de la simulación.

La inferencia de de la interacción entre el material "void" y el fluido se ve respaldado por el comportamiento para $t = 5.14$ [s] en el cual parece un comportamiento similar al mostrado en la *Imagen 4.30*, formándose discontinuidades de fluido en el bebedero y en la esquina inferior izquierda de la entrada a la cavidad principal, *Imagen 4.32 a*, mientras que un cálculo mostrado después no solo estas discontinuidades aumentan si no que aparece una nueva indicando que la propagación del efecto es progresiva.

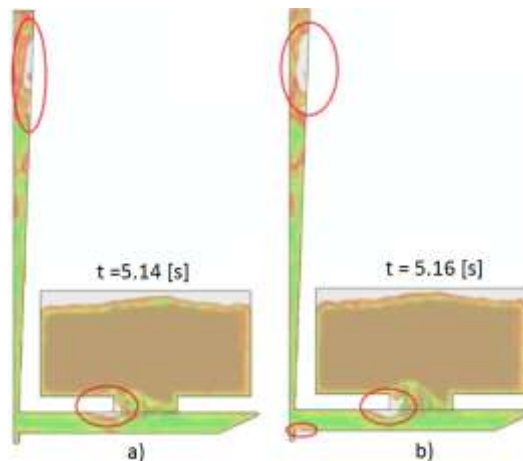


Imagen 4.32 a) primer cálculo en que se observa el comportamiento de salida del material "void", se hace notorio en los óvalos rojos al observarse huecos en la continuidad del fluido, b) incremento inmediato posterior al de a) que muestra crecimiento en la zonas ya indicadas y la aparición de una nueva cerca del pozo del bebedero.

Las obtención de distribución de material, perfil de superficies y comportamiento a lo largo del llenado y su comparación con las radiografías obtenidas, se establece que la simulación es válida para las variables mencionadas, de este modo al obtener el perfil de velocidades y determinar si el comportamiento el lógico y compatible con los resultados anteriores se puede extraer el perfil de velocidades para establecer los lugares donde hay mayor probabilidad de defectos en la pieza solidificada.

El perfil de velocidades se obtiene de los mismos instantes en los que se generaron las visualizaciones de volumen para la comparación, en la escala ofrecida por la paquetería indica que la velocidad global del fluido a lo largo de la simulación tiene valores entre $v_{\min} = 1.67e-1$ [m/s] y $v_{\max} = 4$ [m/s] y usando la Ecuación 1.5, usando la altura indicada en la *Imagen 1.8* $\Delta h = 450e-3$ [m]



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



y considerando que el fluido parte del reposo, se obtiene una velocidad a la entrada del bebedero que es muy aproximada a lo mostrado en la *Imagen 4.33*.

$$v_2 = \sqrt{2g\Delta h + v_1^2} = \sqrt{2 * (9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right]) * (450e - 3[m])} = 2.97 \left[\frac{m}{s}\right]$$

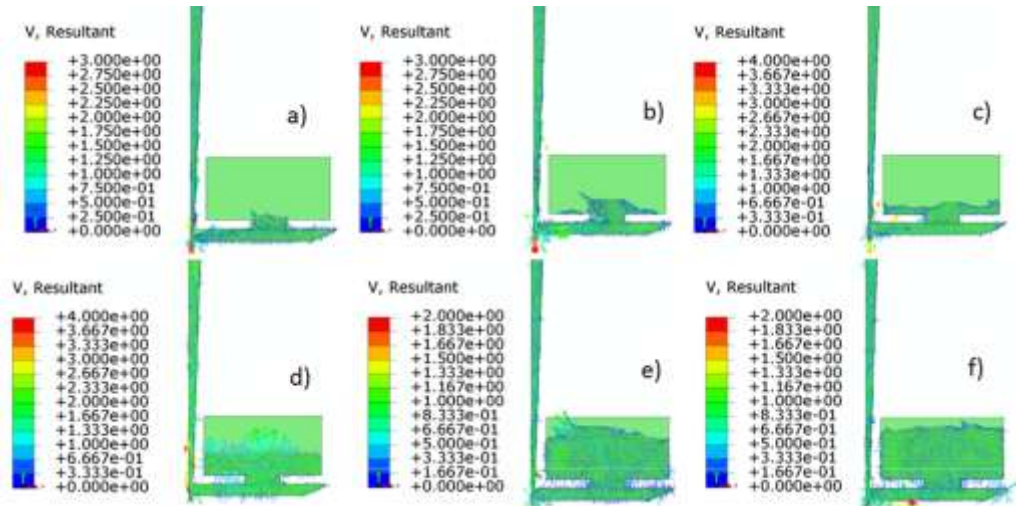


Imagen 4.33 Perfil de velocidad de todos los instantes analizados durante la comparación con las radiografías, en donde se puede apreciar el rango en la que la magnitud de la velocidad varía.

Se realiza un análisis más detallado de la velocidad en el pozo del bebedero cuando se presenta el cambio de magnitud en el límite superior de la escala, porque son los momentos en los que se puede comparar con la Ecuación 1.5, ya que esta no considera pérdidas por fricción ni efectos viscosos, es decir sobre estima la velocidad promedio y en dichos instante la velocidad es resultado del flujo más libre, pues el material euleriano solo viajó por capas internas sin el efecto de la condición "Rough" y hay muy poco material después del frente de flujo para que lo detenga.

En la *Imagen 4.34* a, hay un máximo de $v = 3$ [m/s] que es prácticamente la misma que predice la ecuación usada, mientras que para b el máximo es de 4 [m/s] pero los colores de los vectores indican que el valor está comprendido entre $v = 2.667$ [m/s] y $v = 3$ [m/s], los cuales se mantiene próximos al valor predicho, lo que indica que la dinámica del fluido está siendo simulada de manera adecuada.

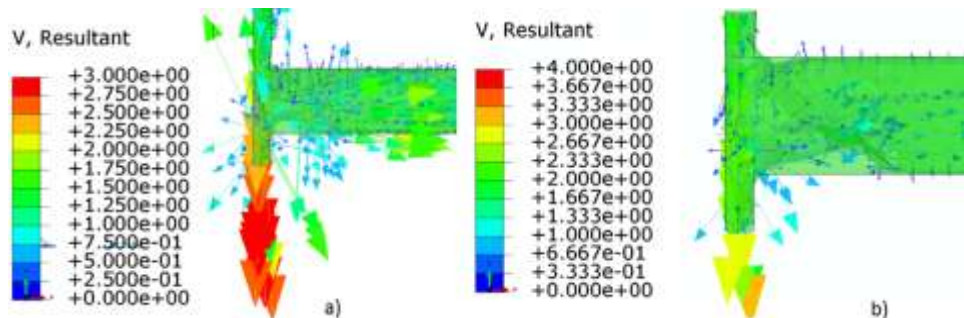


Imagen 4.34 Acercamiento al pozo del bebedero para a) $t = 1.92$ [s] y b) $t = 2.18$ [s], que son los momentos en los que se presenta el máximo de velocidad de los instantes analizados.



En la *Imagen 4.35 a*, se observa que el perfil de velocidad con mayor magnitud aparece en el pozo del bebedero, que es un resultado esperado pues es donde el fluido recorre mayor distancia y en las visualizaciones anteriores se presenta la turbulencia, en el canal de colada se presenta un perfil homogéneo y con vectores apuntando a hacia abajo por efecto de la gravedad actuando sobre el fluido que ya se asentó en el fondo del canal de colada, así como se observa que la dirección de la velocidad en el final del canal de colada apuntan hacia afuera lo que indica que hay presión casi homogénea por el empuje del fluido, en la entrada a la cavidad principal se observa recirculación justo donde se acumula a la derecha. En la *Imagen 4.35 b* el perfil de velocidad muestra la misma zona con el nivel máximo, en el material entrando a la cavidad principal se puede apreciar que los vectores de velocidad muestran colapso de material y el flujo de las capas superiores sobre el material asentado y en la zona donde ya se había analizado el colapso de fluido la velocidad muestra que la separación de la fracción de volumen propulsa material hacia arriba.

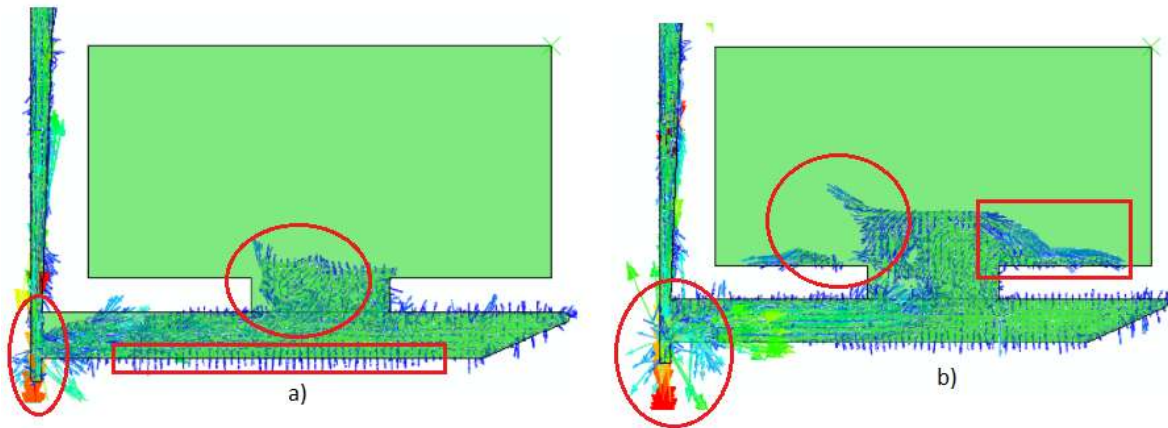


Imagen 4.35 Perfil de velocidad capturado para a) $t = 1.54$ [s] y b) $t = 1.92$ [s]

En la *Imagen 4.36 a* el perfil de velocidad más representativo está en la pared derecha de la cavidad principal que muestra como el material acumulado al aumentar colapsa nuevamente sobre la masa principal, así como sobre la superficie del fluido se visualiza como se aleja de la zona de entrada, así como los vectores apuntan hacia la derecha de la puerta de entrada a la cavidad principal, lo cual es consistente con las visualizaciones experimentales y de distribución de volumen. En *b*, se observa dispersión en el perfil de velocidad ya que es un instante donde se presenta turbulencia en secciones diferente, así como la presencia de burbujas en las visualizaciones experimentales, la dispersión mostrada coincide con la elevación central mostrada y la turbulencia en el canal de colada de la *Imagen 4.28*, indicando que se puede asociar que los perfiles de velocidad poco homogéneos se pueden asociar a defectos en la pieza solidificada.

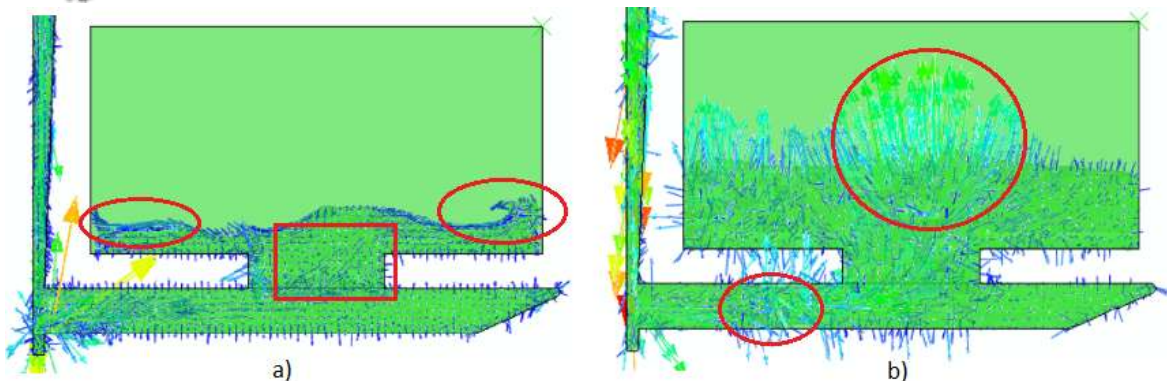


Imagen 4.36 Perfil de velocidad capturado para a) $t = 2.18$ [s] y b) $t = 2.97$ [s]

Los perfiles presentados en la *Imagen 4.37* se mantienen los perfiles del canal de colada, del final del canal de colada y la entrada de la cavidad principal, pero con el avance del llenado se muestran dos zonas importantes en las que se ve circulación de material, en **a**, es coincidente con la zona de burbujas marcada en la *Imagen 4.29 b* y en el centro se observa la acumulación de vectores como producto de un "rebote" la pared derecha de la puerta de entrada a la cavidad principal y el perfil de torbellino en las laterales de esta concentración. En **b** con el 95 % del llenado se observa como la recirculación es más evidente por el flujo de entrada constante y como la turbulencia de la superficie es producida por la existencia de dichas zonas.

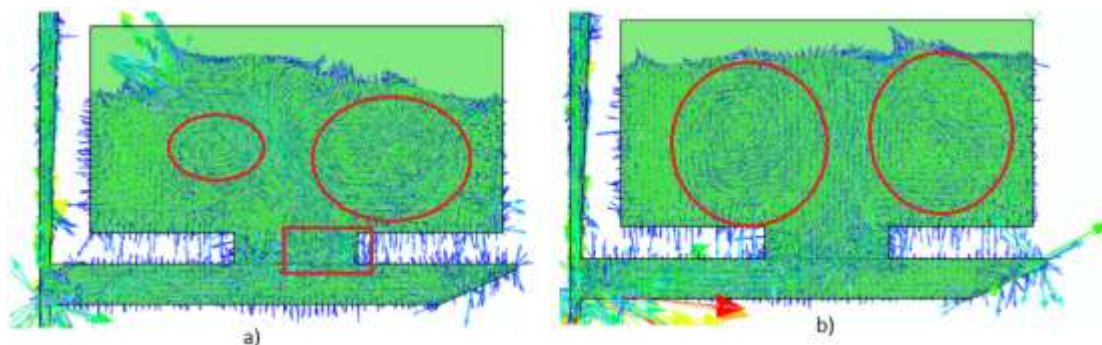


Imagen 4.37 Perfil de velocidad capturado para a) $t = 4.63$ [s] y b) $t = 5$ [s]

Con los resultados anteriores y en base a lo encontrado en la revisión de literatura de la sección 2.3.2, el resultado del perfil de velocidades vectorial es como se esperaba por lo que se puede usar para establecer que zonas son más propensas a presentar defectos.

4.5.2 Llenado del modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni"

El llenado de la lingotera definida en este modelo se compara con un lingote obtenido, ya que no se cuentan con radiografías para observar el comportamiento progresivo como en el caso del llenado anterior. Sin embargo el lingote es suficientemente delgado como para que observar los defectos y comparar dichas zonas con los perfiles de velocidad, de esta forma se verifica si el tipo de perfiles que se asociaron a defectos en el modelo anterior coinciden de forma precisa.



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



El llenado global de la lingotera hasta $t = 0.24$ [s] se presenta una secuencia que muestra el comportamiento del fluido, en la *Imagen 4.38* a, se muestra el primer contacto con el molde y la adopción de la forma del sólido por el fluido, en b, se ilustra la propagación del fluido sobre la pared de la lingotera formando una capa y la aparición de gotas a los laterales por la propagación que induce las aristas del bebedero, en c, aparece el mismo perfil de propagación con un mayor volumen en la capa que es coincidente con el comportamiento de llenado que se ve en la vida cotidiana.

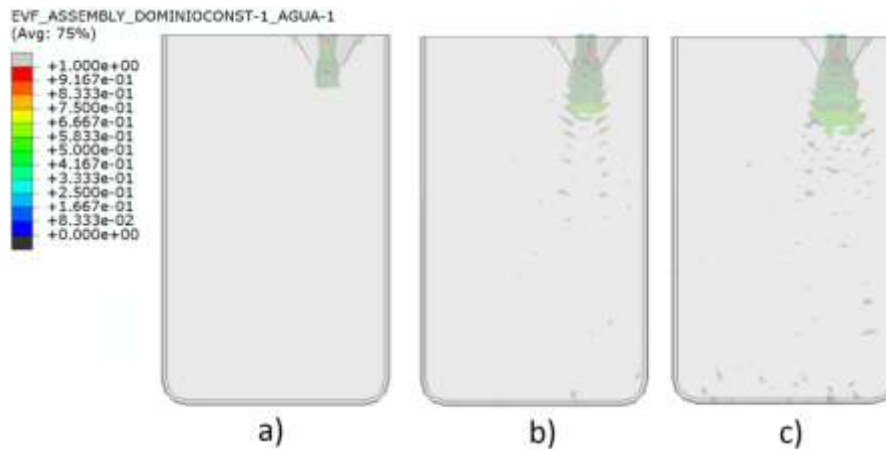


Imagen 4.38 Llenado de la lingotera para tres eventos característicos de la simulación en el primer paso, a) $t = 0.06$ [s], b) $t = 0.095$ [s] y c) $t = 0.12$ [s].

En la *Imagen 4.39* a, la capa aumenta de tamaño y la propagación de gotas es mayor, en el instante **b**, la capa de fluido mantiene el tamaño que se alcanzó en **a** pero la propagación de fluido al fondo se ve como se acumula y las gotas aumentan por la entrada de fluido de forma constante, para el momento mostrado en **c**, aparece el mismo perfil de capa de fluido en la zona del bebedero y distribución de gotas, pero el comportamiento en el fondo muestra la acumulación de fluido y la clara tendencia a la acumulación en el lado izquierdo inferior del molde inducida por el lugar donde ingresa el fluido al molde.

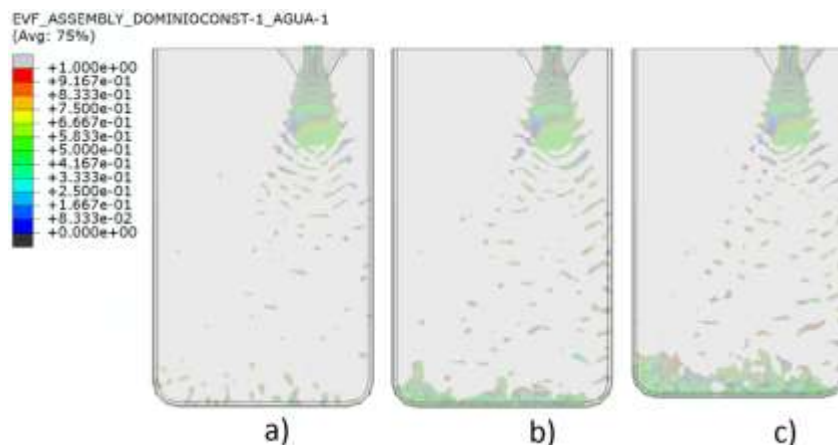


Imagen 4.39 Llenado de la lingotera para tres eventos característicos de la simulación en el primer paso, d) $t = 0.145$ [s], e) $t = 0.195$ [s] y f) $t = 0.24$ [s].



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



En la *Imagen 4.40* se presenta el perfil de velocidades para los mismos instantes analizados anteriormente sin la visualización de las piezas sólidas para visualizar adecuadamente los vectores de velocidad. En **a**, se presenta el perfil de velocidades en acercamiento a al bebedero del molde, este presenta un perfil de propagación como resultado de la interacción del molde que varía entre 1 [m/s] y 5.668 [m/s] según la escala de colores presentada, el perfil pasa de ser homogéneo hacia abajo a un estado con mayor magnitud y mayor ocupación de área, para **b**, el perfil de propagación se ve de forma global a lo largo de la extensión de la lingotera debido a la poca restricción que sufren las gotas en ese instante pues tiene un viaje libre, la variación de magnitud va desde 6.298×10^{-1} [m/s] a 4.408 [m/s]; en **c**, la mayor cantidad de fluido en el molde genera la aparición de mayor cantidad de vectores e induce que mayor cantidad de material interactúe con el sólido y por el efecto viscoso se detienen las partículas por ello se presenta un perfil de forma de abanico y una disminución de magnitud que coincide en el máximo de crecimiento y contacto con el sólido dejando la velocidad comprendida en el rango de 6.298×10^{-1} [m/s] y 1.889 [m/s].

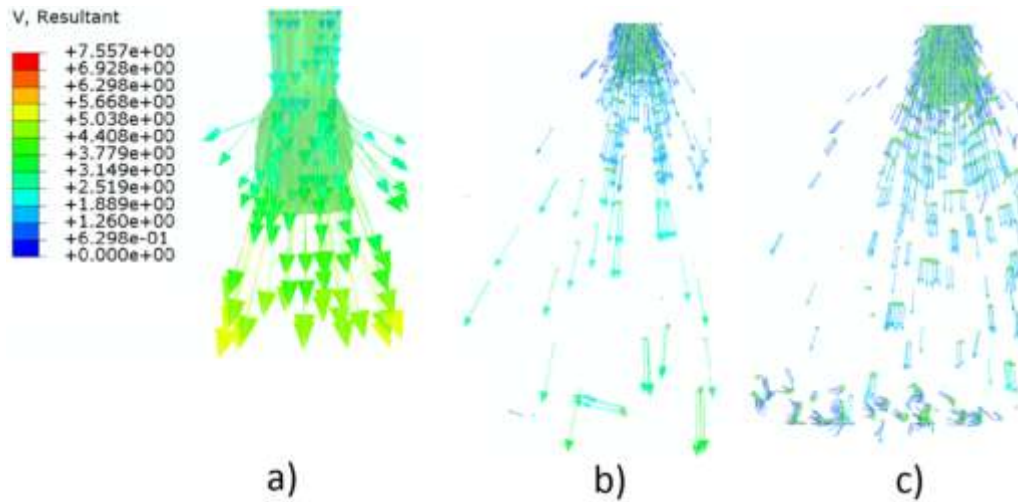


Imagen 4.40 Perfil de velocidades para los instantes ya analizados, a) $t = 0.06$ [s], b) $t = 0.095$ [s] y c) $t = 0.12$ [s].



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



Para los instantes mostrados en la *Imagen 4.41* se muestra el perfil de velocidades cuando el fluido entra en contacto con la base del molde y el fluido sufre un "rebote", en **a**, la evidencia de rebote es más clara pues los fragmentos de fluido muestran vectores hacia arriba y a la izquierda, en el momento **b**, se observa como la acumulación de fluido induce un perfil de velocidad más homogéneo pues el "rebote" ya no está presente y el fenómeno pasa a ser de flujo de material euleriano inducido por la caída, en **c**, el efecto de flujo es más marcado y se puede ver incluso la circulación del fluido cuando llega suficiente a las paredes del molde y este colapsa sobre la masa entrante. Tanto en **b** como en **c** la velocidad oscila entre $6.298e-1$ [m/s] y $1.889e-1$ [m/s].

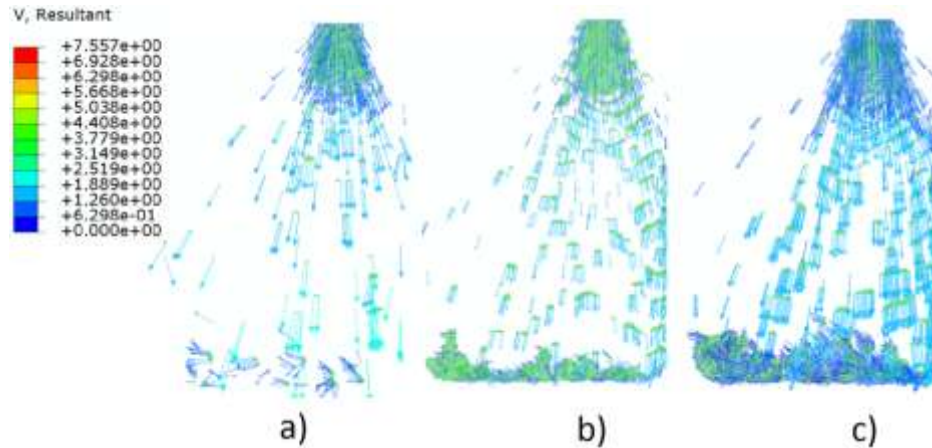


Imagen 4.41 Perfil de velocidades para los instantes ya analizados, d) $t = 0.145$ [s], e) $t = 0.195$ [s] y f) $t = 0.24$ [s].

El efecto del flujo en el fondo desde el instante mostrado en la *Imagen 4.41 c* se hace cíclico con el progreso de la simulación, en la *Imagen 4.42* se muestra el perfil de velocidades en el instante para cuando $t = 0.3$ [s], se puede observar en la esquina inferior derecha hay menos fluido acumulado por el flujo del material entrante, en la esquina inferior izquierda está la mayor acumulación de fluido y se observa el perfil descendente, así como en el óvalo se observa cómo se forma un choque de material, ya que se ve una tendencia de viaje hacia la izquierda de un perfil que sube, que puede ser respuesta de la interacción con la pared izquierda del molde. En el centro se puede observar como existe turbulencia causada por el flujo de material y las gotas que caen sobre el fluido ya acumulado, el perfil central muestra turbulencias y huecos que podrían indicar formación de defectos.

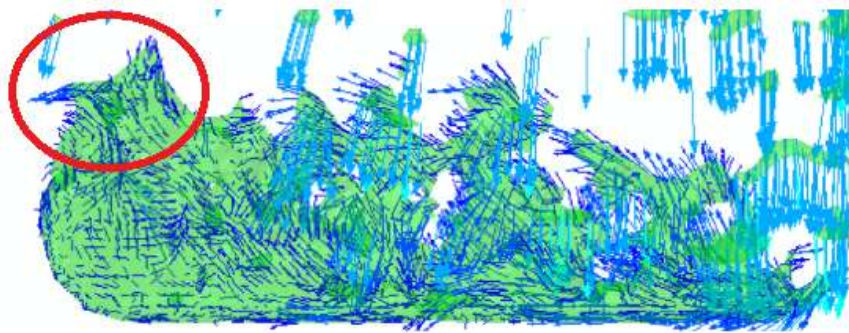


Imagen 4.42 Perfil de velocidades para $t = 0.3$ [s]



El llenado de la lingotera presenta la misma tendencia de llenar por el lado derecho, acumular el fluido del lado izquierdo, generar el cambio de flujo en la interacción con las paredes de la lingotera, adoptar adecuadamente la forma del sólido y presentar en la zona central recirculación y huecos. En la *Imagen 4.43* en la esquina inferior izquierda se observa el flujo encontrado que se forma como respuesta al presencia del límite del molde, la cual se observó desde la *Imagen 4.42*, en el centro identifica la formación de remolinos por los tren flujos que aparecen, el de llenado y los de interacción con el sólido, lado izquierdo y fondo del molde.

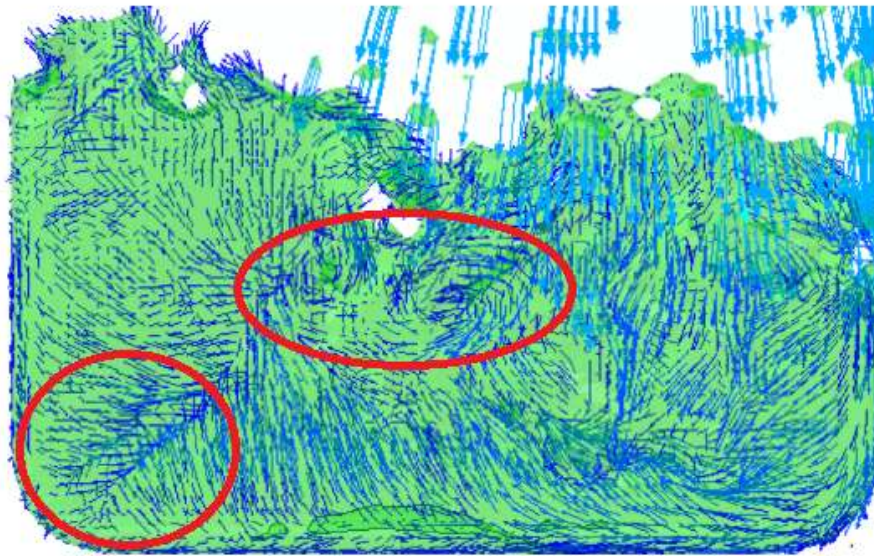


Imagen 4.43 Perfil de velocidades en el instante en que $t = 0.655$.

La visualización de perfil de velocidad indica que las zonas de formación de defectos son las esquinas inferiores y el centro por que estas zonas son las que presentan la distribución menos homogénea de flujo. En la superficie hay caos en la distribución de fluido y se presentan huecos visibles, pero la superficie se va asentando con la entrada de material y se homogeniza con el fluido ya atrapado en el molde por lo que no se puede determinar si se presentan defectos en la zona o si produciría que la formación de óxido se distribuyera en toda la aleación, para ello se requiere hacer una análisis de la estructura de la pieza solidificada, lo cual no es parte del propósito de este proyecto.

Como se determino en el modelo "Benchmark test" la distribución grafica de volumen de una forma poco homogénea también puede ser asociada a la formación de defectos, por lo que la comparación de las porosidades de la pieza solidificada con la distribución de volumen simulada es necesaria.

Del otro modelo se estableció que el cambio brusco en la escala de color de la distribución de volumen se puede asociar a la presencia de defectos, en la *Imagen 4.44* para ambos casos se muestran las zonas de relevancia, en a, los óvalos indican donde hay la menor homogeneidad en la



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



escala de colores, estas zonas coinciden con las predichas por el perfil de velocidades, en **b** se muestran las zonas donde hay mayor cantidad de porosidades. En ambas imágenes las zonas coinciden y son la zona donde impacta primero el fluido y en la pared izquierda de la lingotera, así como en el fondo, que son las zonas donde aparecen los flujos encontrados.

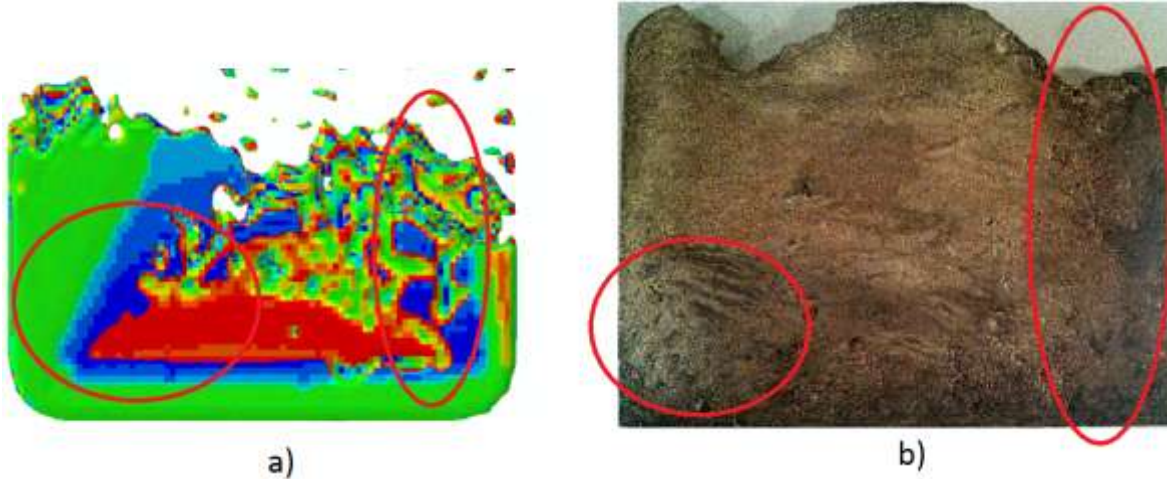


Imagen 4.44 Comparación de la a) la distribución de volumen simulada con b) la pieza solidificada.

La turbulencia de la superficie no muestra claramente si hay defectos o no, pero muestra que es un perfil irregular, aparece la acumulación de fluido de lado derecho tanto en la simulación como en la pieza solidificada y un nivel de material menor del lado donde entra el fluido a la cavidad del molde.



Capítulo 5 Conclusiones

Se puede simular satisfactoriamente el flujo de material de una cavidad a otra mediante la aplicación de una sola carga, la cual es la gravedad. Así como la obtención de superficies libres en régimen turbulento y formación de gotas mediante la aplicación de tamaño de elemento adecuado.

El planteamiento descrito en este trabajo permite hacer interactuar de forma adecuada dos dominios en un mismo ambiente de simulación, esto se sabe por qué no existen fugas en ninguno de los moldes, el dominio euleriano permite al material definido adoptar la forma del dominio lagrangiano sin inconvenientes, la separación de fracciones de volumen de la masa principal y su posterior integración sin que existan problemas de cálculo o definición de entidades.

La variable que permiten identificar que la interacción entre los dominios lagrangianos y eulerianos se presenta es la RF o fuerza de reacción, ya que estas variables miden la influencia del fluido en el sólido mediante la reacción del este para mantener las condiciones estáticas impuestas.

El contacto del fluido con los sólidos genera una respuesta con ruido en la variable fuerza de reacción por el golpe constante de las gotas, en especial cuando se plantea el modelo de forma tal que entregue resultados en unidades de tiempo muy cortas, de esta manera registra cada oscilación. Para obtener una visualización más clara de esos datos la paquetería permite el uso de filtros que recortan los datos fuera de la tendencia central, así se observa el comportamiento general de la variable y el rango en que varía la magnitud de la fuerza de reacción de la zona de mayor concentración de datos.

El uso de elemento CEL y la definición para fluidos semi-compresibles mediante el modelo de Mier-Güneisen permite modelar la dinámica de un fluido de manera precisa, el comportamiento de superficies libres en condiciones de turbulencia y en instantes en el que el fluido permanece como una entidad. Cuando el fluido se separa de la masa principal pierde resolución de los bordes debido a que el comportamiento cohesivo de los fluidos y tensión superficial solo es aproximado, sin embargo los resultados obtenidos para el flujo y comportamiento de las partículas con el sólido y en la conglomeración de estas al interactuar son adecuados.

La respuesta al incremento artificial de la velocidad causa un comportamiento "elástico" en el fluido causando un rebote que propaga el material en sentido contrario al flujo definido, sin embargo este impacto cambia según el área de contacto y la cantidad de "deformación" del fluido, si esta es elevada el efecto de "rebote" es más severo y no acepta aceleración alguna, si se le da una preforma al material, por lo que la deformación inicial es menor, y además existe mayor volumen de fluido que amortigüe la propagación de onda de choque se puede aplicar una condición inicial de velocidad que permita un flujo aceptable. La velocidad que permite un flujo



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



aceptable no representa una mejora en el tiempo y recursos de cómputo usados para el cálculo por lo que es preferible modelar bajo condiciones más apegadas a la realidad.

El modelo tal y como se definió es muy sensible al escalamiento de velocidad debido a la descripción del material mediante ecuación de estado, pues esta es función de la velocidad de las partículas; esto indica que la simulación a bajas velocidades o en condiciones de impacto moderadas converge a una solución más homogénea.

La expansión de la malla hasta de un 100% no afecta la resolución y el cálculo de la superficie libre, después de ese límite se pierde resolución en la superficie euleriana ya que se calcula en cada incremento, la pérdida de resolución es porque el volumen asignado originalmente a varios elementos se reasigna a un número menor ya que estos son más grandes.

Las posibles soluciones a la pérdida de resolución son asignar un dominio completo que contenga todo el flujo del material euleriano, evitar que exista expansión de la malla activando solo el seguimiento de la malla, deberá tener el tamaño suficiente para evitar la pérdida de material. En las opciones de la condición de frontera limitar el máximo de expansión y la velocidad de esta (buffer size) a un valor menor al preestablecido y este depende del valor de c_0 que se haya usado en la definición de material; si no es necesaria la resolución es posible determinar el porcentaje de volumen mínimo que se incluye en cálculo para que las partículas desprendidas no afecten la expansión y seguimiento de la malla euleriana.

La definición de contacto "Rough" permite inducir el efecto de no penetrabilidad entre los dominios, pero produce una distribución de volumen incorrecta cuando hay poco fluido modelado como en el caso del modelo "Lingotera para aleación Cu-Al-Ni", como también afecta el tiempo predicho de flujo del material por la interacción en las paredes sólidas, tal y como se vio en el modelo "Benchmark Test". Esto se puede evitar definiendo el contacto idealizado "frictionless" permitiéndole así al programa calcular la interacción como función de las propiedades del material, sin embargo esta interacción de contacto genera que en los vértices haya salida de material que se soluciona con radios como los usados en la pieza "lingotera" o forzando un contacto adhesivo mediante el método "penalty" con un factor de fricción, sin embargo se debe encontrar una forma de determinar cómo ingresarlo en el software ya que es definido para interacción entre dos superficies sólidas y como última opción modificar la viscosidad del fluido ajustándola con mayor precisión para modelar en más detalle el comportamiento del material.

El material "void" predefinido en el dominio euleriano que no es afectado por la inicialización de material intercambia lugar con el material definido, según lo establecido en la programación de la paquetería y además parece que interactúa con los sólidos como un material con propiedades, pero no genera cálculo de variables, ya que si está en una superficie cerrada a la cual entra material euleriano, el material "void" sale por las aberturas que estén en contacto con él afectando el estado del fluido. Para determinar esto se sugieren pruebas de llenado en condiciones diferentes, con materiales eulerianos sólidos que entren a cavidades para observar si el "void" muestra algún efecto y definir piezas sólidas deformables con cavidades confinadas en un



Simulación del proceso de colada por gravedad mediante paquetería de elemento finito



dominio euleriano y deformar la geometría de forma tal que el volumen de la cavidad se reduzca lo suficiente para observar si el "void" presenta algún comportamiento.

Los modelos predicen con suficiente confiabilidad las zonas donde se producen defectos, mediante el análisis de la distribución de volumen y perfil de velocidad en el fluido, esto se puede indicar solo si ambas variables presentan poca homogeneidad en la misma zona. Si solo una variable presenta esta condición, no existe la confiabilidad suficiente para predecir defectos, puesto que los resultados simulados son instantáneos y es posible que el asentamiento de la fundición real evite la formación de estos.

Con todo lo que ya se conoce del comportamiento de los modelos y de las variables que se aplicaron se sabe que los dominios eulerianos no pueden predecir el cambio de fase ni solidificación, aun que se puede aproximar generando una función tabular de cambio de densidad como función de la temperatura. El uso de piezas discretamente rígidas mejora el tiempo de cómputo a costa de crear ruido en la variable de salida "RF" o fuerza de reacción, sin embargo la aplicación de un material mejora mucho la estabilidad de la dicha variable.

Los efectos de la capacidad de mojar una superficie no se aprecian de forma clara, ya que la ecuación de estado usada solo describe un comportamiento macroscópico y esta capacidad responde interacciones microscópicas, pero se puede aproximar usando la condición de velocidad normal a la superficie cero, ya que por un incremento el fluido en contacto detiene el movimiento y el material euleriano interactúa como otro del mismo tipo, esto se calcula únicamente con las propiedades viscosas definidas y se hace elemento a elemento.

La idealización del material para los modelos interfiere con los perfiles formados, ya que la solidificación produce que el flujo cambie, en especial para tiempos de llenado largos. Pero las desviación observable sería en las superficies del fluido al interior de la cavidad principal ya que la densidad del fondo cambiaría y el flujo de material en la parte baja disminuye generando una superficie real diferente a la simulada.

Finalmente el uso de el mismo dominio euleriano podría albergar tanto las piezas sólidas como fluidas, aprovechando la capacidad de este dominio de aceptar varios materiales simultáneamente, lo que elimina la posibilidad de escape de material y no requiere más que la definición simple del algoritmo de contacto general para controlar la interacción entre las piezas, de esta forma se pueden eliminar variables y elementos del modelo general, lo que indicaría menos recurso de cómputo. Esta tipo de pruebas se dejan para trabajos posteriores ya que requieren validación y un cambio sustancial en el planteamiento del problema.



Bibliografía

- 1 Alameda E., "Modelado del proceso de forjado orbital mediante paquetería de elemento finito", Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010
- 2 Barkhudarov, M.R. y Hirt, C.W., "Casting Simulation: Mold Filling and Solidification— Benchmark Calculations Using FLOW-3D," JOM, 48, pp. 935-946, 1996.
- 3 Beddoes J., Bibby M.J., "Principes of Metal Manufacturing Processes", Elsevier, Ed. 1, 1999.
- 4 Campbell, J. "Castings". Butterwort-Heinemann. 2ª edición. 2003.
- 5 Campbell, J., Holliday, M., Sirrel, B., "Benchmark Testing the flow an solidification modeling of Al castings", JOM (Journal of Materials), 48, pp 20-23, 1996.
- 6 Cherne, F.J. y Deymier P.A. "Calculation of Viscosity of Liquid Nickel By Molecular Dynamics Methods". Script Materialia, Vol 39, No. 11, pp. 1613-1616. Elsevier Science Ltd. 1998
- 7 DesPlaines, Il. "Basic Principles of Gating and Risering" American Foundry Society & Cast Metals. 1973
- 8 Domanus, H.M. et al., "Computer Simulation Using CAPS of an Aluminum Plate Casting," JOM, 48, pp. 947-954, 1996.
- 9 Falkovich, G. "Fluid Mechanics, a short course for physicists". Cambridge. University Press, 2011.
- 10 Fan, L. Peiran D. Steve S. et al., "Coupled Fluid/Structure Interaction Simulation Using Abaqus CEL", Dassault Systemes Simulia Corp, 2009.
- 11 Figueroa P., J., "Modelado del proceso de extrusión inversa mediante software de elemento finito", Tesis Para obtener el título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- 12 Groover, Mikell. "Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, Procesos y Sistemas". Pearson Education. 4ª edición. 2010.
- 13 Hufnagel W. "Manual del aluminio Vol. I". Reverte 2ª edición. 2004
- 14 Kalpakjian, S., Schmid S.R. "Manufactura, Ingeniería y Tecnología". Pearson Education. 4ª edición. 2002.
- 15 Latorre, X., Marijuan, P., Viñas J., "Road Restraint Systems in ABAQUS®", IDIADA Automotive Technology S.A., 2012.
- 16 Layton, M.A. et al., "Modeling of Mold Filling and Solidification" JOM, 48, pp. 975-982.
- 17 Lewis, R.W., Ravindran, K., and Tran, V., "Finite Element Simulation of the Bench Mark Mold Filling Problem," JOM, 48, pp. 955-962.
- 18 López R., Joaquín. "Fundamentos de Conformación por fusión de Metales". Área de Ingeniería de los procesos de Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena. 2011.
- 19 Martin, J. C., and Moyce, W. J., "An Experimental Study of the Collapse of Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 244, no.882, pp. 312–324, 1952.



Simulación del proceso de colada por gravedad
mediante paquetería de elemento finito



- 20 Martínez, R., "Comportamiento Macro y Micro Mecánico de aleaciones con memoria de forma del tipo Cu-Al-Ni con manganeso y niobio bajo tensión uniáxial", Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencia e Ingeniería en Materiales, Instituto de Investigación en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012
- 21 Mott, R. L., "Mecánica de fluidos", Pearson Education, 6° ed. 2006.
- 22 Nuñez R, Abbaschian G J, Abramowitz H. et al. "ASM Metals Handbook: Casting". ASM International® The Materials Information Company, Vol. 15, 9° edición, 1992.
- 23 Ohnaka, I. and Zhu, J.D., "Computer Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer of the Bench Mark Test by 'DFDM/3DFLOW,'" JOM, pp. 971-974, 1996.
- 24 Reza, C. "Flujo de fluido en válvulas, accesorios y tuberías". División de Ingeniería de CRANE. 2ª edición. McGraw-Hill. 2000.
- 25 Rigaut, C., et al., "Round Robin Bench Mark Exercise for Mold Filling and Solidification," in JOM, 48, pp. 1007-1014, 1996.
- 26 Schey, Jhon A. "Procesos de manufactura". McGraw-Hill. 3ª edición. 2000.
- 27 Simulia ABAQUS®6.12, "Defining contact in Eulerian-Lagrangian models", ABAQUS® Abaqus/CAE User's Manual, sección 28.3, 2012.
- 28 Simulia ABAQUS®6.12, "Defining Eulerian boundaries", ABAQUS® Abaqus/Analysis User's Manual, sección 14.1.2, 2012.
- 29 Simulia ABAQUS®6.12, "Defining Eulerian Mesh Motion Boundary Condition", ABAQUS® Abaqus/CAE User's Manual, sección 16.10.22, 2012.
- 30 Simulia ABAQUS®6.12, "Defining general contact interactions", ABAQUS® Abaqus/Analysis User's Manual, sección 35.4.1, 2012.
- 31 Simulia ABAQUS®6.12, "Equation of state", ABAQUS® Analysis User's Manual, sección 25.2.1, 2012.
- 32 Simulia ABAQUS®6.12, "Eulerian analysis of a collapsing water column", ABAQUS® Abaqus Benchmarks Manual, sección 1.7.1, 2012.
- 33 Simulia ABAQUS®6.12, "Eulerian Analysis", ABAQUS® Analysis User's Manual, sección 14.1.1, 2012.
- 34 Simulia ABAQUS®6.12, "Eulerian Mesh Motion", ABAQUS® Abaqus/Analysis User's Manual, sección 14.1.3, 2012.
- 35 Simulia ABAQUS®6.12, "Eulerian surface definition", ABAQUS® Abaqus/Analysis User's Manual, sección 2.3.5, 2012.
- 36 Simulia ABAQUS®6.12, "Impact of a water-filled bottle", ABAQUS® Abaqus Examples Problems Manual, sección 2.3.2, 2012.
- 37 Simulia ABAQUS®6.12, "Restarting an analysis", ABAQUS® Analysis User's Manual, sección 9.1.1, 2012.
- 38 Simulia ABAQUS®6.12, "Rivet forming", ABAQUS® Abaqus Examples Problems Manual, sección 2.3.1, 2012.
- 39 Simulia ABAQUS®6.12, "Shell Element: Overview", ABAQUS® Analysis User's Manual, sección 29.6.1, 2012.
- 40 Simulia ABAQUS®6.12, "Smoothed particle hydrodynamic analysis", ABAQUS® Abaqus/Analysis User's Manual, sección 15.1.1, 2012.



- 41 Simulia ABAQUS®6.12, "Specifying frictional behavior for mechanical contact property options", ABAQUS®/CAE User's Manual, sección 14.14.1, 2012.
- 42 Simulia ABAQUS®6.12, "Surface definition", ABAQUS® Abaqus/Analysis User's Manual, sección 2.3, 2012
- 43 Simulia ABAQUS®6.12, "The volume fraction tool", ABAQUS® Abaqus/CAE User's Manual, sección 28.5, 2012.
- 44 Simulia Dassault Systemes, "Fluid-Structure Interaction Simulations with Abaqus/Explicit®", Abaqus Technology Brief, 2007.
- 45 Simulia Dassault Systemes, "Water Landing of Space Flight Re-entry Vehicles using Abaqus/Explicit", Abaqus Technology Brief, 2011.
- 46 Tippmann, J., Prasad, S., Shah, P., "2-D Tank Sloshing Using The Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) Capability of ABAQUS®/Explicit", Dassault Systemes Simulia Corp, 2009.
- 47 White, Frank M. "Mecánica de Fluidos". McGraw-Hill. 6ª edición. 2008.
- 48 Xu, Z.A., y Mampaey, F., "Mold Filling and Solidification Simulation of the Bench Mark Casting," JOM, 48, pp. 963-970, 1996.

Mesografía

- 1 Olando, S. "Droplet Hitting Pool of Water - High Speed". Publicado 13/07/2010
<http://www.youtube.com/watch?v=3U3FMCGfEa0> (Consultado 31/10/2013)
- 2 Instituto Tecnológico de Massachusets (MIT). "From the Discovery Showcase: Invisible Worlds In the Water.". Publicado 18/11/2010
<http://www.youtube.com/watch?v=6KKNnjFpGto> (Consultado 31/10/2013)