



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE MEZCLADO
DE UN DISPOSITIVO PARA ALEAR HIERROS
GRISES ASISTIDO POR MODELADO
NUMÉRICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

JOEL JOVANI PEREA ZURITA



MÉXICO, D.F.

2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Prof. Eusebio cándido Atlatenco Tlapanco

VOCAL: Prof. Carlos González Rivera

SECRETARIO: Prof. Marco Aurelio Ramírez Argáez

1er. SUPLENTE: Prof. Adrián Manuel Amaro Villeda

2° SUPLENTE: Prof. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica
Laboratorio de Solidificación y Simulación Matemática
Edificio D, Facultad de Química, UNAM.**

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

SUPERVISOR TÉCNICO:

M en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

SUSTENTANTE (S):

Joel Jovani Perea Zurita

INDICE.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes	3
1.1.1 Moldeo en verde	7
1.1.2 Horno de cubilote.....	8
1.1.3 Horno de inducción.....	10
1.2 Revisión bibliográfica	12
1.3 Objetivo	23
1.4 Hipótesis	23

2 MODELO MATEMÁTICO

2.1 Dispositivos mezcladores.....	24
2.2 Metodología de trabajo	25
2.3 Ecuaciones gobernantes.....	26
2.3.1 Ecuación de conservación de masa del marcador	26
2.3.2 Ecuación de conservación de movimiento del fluido	27
2.3.3 Modelo k- ϵ de turbulencia.....	27
2.3.4 Ecuación de conservación de especies químicas.....	28
2.4 Condiciones de frontera e iniciales	28
2.4.1 Condiciones iniciales y de frontera para el cálculo hidrodinámico	29
2.4.2 Condiciones iniciales y de frontera para el cálculo de trazador	30
2.5 Propiedades físicas.....	31
2.6 Solución	31
2.7 Obtención de curvas “C”	33

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS	
3.1 Mallas de los mezcladores	37
3.2 Patrones de flujo	38
3.3 Vórtices	42
3.4 Trayectorias y tiempos de residencia de partículas trazadoras sin fusión ...	45
3.5 Contornos de turbulencia	47
3.6 Evolución de la dispersión de soluto inyectado con un pulso a la entrada...	49
3.7 Curvas “C”	53
4 CONCLUSIONES	56
5 REFERENCIAS	58
6 INDICE DE FIGURAS	60
7 INDICE DE TABLAS	63
8 LISTA DE SIMBOLOS	64

1.- INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

Los hierros colados aleados son aleaciones base hierro, con carbono (2.7-3.8% en peso) y silicio (1.9 - 2.3 % en peso) y con otros aleantes como Cr, Mo, Cu, Ni, Mn, entre otros, con contenidos inferiores al 1% en peso. Podemos clasificar a estos hierros como hierros grises, hierros nodulares y hierros maleables.

La producción de los distintos tipos de hierro en el año 2011 son de 45, 870,050 toneladas métricas de hierro gris, 24, 782,540 toneladas métricas de hierro nodular y 1, 384,461 toneladas de hierro maleable [1]. **La Tabla 1**, muestra la producción de las principales aleaciones y metales por vía de fundición.

Producción mundial									
Hierro gris	Hierro ductil	Hierro maleable	Acero	Cobre	Aluminio	Magnesio	Zinc	Otros no ferrosos	Total
45,870,050	24,782,540	1,381,461	10342738	1,799,294	13197181	181931	505,614	532,313	98,593,122

Tabla 1. Producción total de las fundiciones en 2011.

Se puede apreciar que la producción de hierros colados representa casi el 65% de la producción mundial de todas las fundiciones.

La fabricación de estos hierros difiere en los elementos aleantes que se agregan y en el momento en el que se agregan, algunos de ellos son el ferrosilicio, el ferromanganeso, ferrocromo y ferróníquel entre otros.

La variación en la concentración de estos elementos aleantes es la que otorga una diferencia en las propiedades de las fundiciones de hierro.

Otras variables importantes en la producción de los hierros colados son la velocidad de enfriamiento, la temperatura de colada, los tratamientos del metal líquido como inoculación, y los tratamientos térmicos que se hacen en algunos casos.

Los hierros grises presentan una estructura formada por una matriz metálica conteniendo grafito precipitado en formas de láminas de diferentes tamaños y grosores o formas diferentes, la cantidad de grafito libre depende de los elementos grafitizantes, la rapidez de enfriamiento, el carbón equivalente y de las fases presentes en la matriz.

La fundición nodular o dúctil contiene en su estructura partículas de grafito en forma esferoidal. Para obtener este tipo de fundición se le agregan elementos como Magnesio, Cerio o elementos pertenecientes a las tierras raras. Estos elementos se añaden en forma de ferro aleación y a este tipo de tratamiento en el metal líquido se le denomina nodulización.

Tanto al hierro gris como al hierro nodular se le hace un tratamiento de inoculación con el cual se mejoran sus propiedades impactándolos de la siguiente manera: para el hierro gris la inoculación favorece la formación del carbón grafito hojuela, promueve la grafitización y abate el subenfriamiento, así como la mejora de las propiedades mecánicas.

El método de inoculación inicial se lleva a cabo al momento de vaciar el metal líquido del horno a la olla de colada, aunque se corre el riesgo de que parte del inoculante se quede en la superficie de la olla oxidándose y consecuentemente bajando su rendimiento o eficiencia.

Suele aplicarse también a estas fundiciones el método de post-inoculación, que se realiza generalmente cuando se vacía el metal líquido en los moldes. Este método presenta la ventaja de proveer un grado uniforme de nucleación y mejora el rendimiento del inoculante.

En el caso del hierro nodular la inoculación nos sirve para obtener una mayor cantidad de nódulos, así como una precipitación homogénea del grafito, abatir el subenfriamiento y obtener una mejora en las propiedades mecánicas, mientras que en el caso del hierro nodular la inoculación también se puede practicar de manera temprana o mediante la ya señalada post-inoculación en el molde.

Existen algunos tratamientos térmicos que se aplican a estos hierros con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas así como estabilizar la microestructura, aliviar tensiones internas y homogeneizar las propiedades. Algunos de estos tratamientos son:

- a) Recocido: Este tratamiento libera tensiones dentro del material, principalmente en fundiciones de formas o geometrías complejas. También se usa para disminuir la dureza al material un poco y mejorar la maquinabilidad de las piezas. Dependiendo el objetivo que se busque con el tratamiento, se selecciona la temperatura que se utiliza. Temperaturas en el rango de 870° a 930° C se asocian al recocido a alta temperatura, el recocido de media temperatura se realiza en un rango de temperaturas de 815°C a 870°C, y el recocido de baja temperatura se da entre 730°C y 790°C. En todos los casos tiene que haber una rapidez de enfriamiento muy pequeña para obtener una matriz de ferrita y grafito.

- b) Temple y revenido: Estos tratamientos generalmente se hacen en este orden. El temple consiste en calentar la fundición a una temperatura crítica que nos garantice que la estructura se transforme en austenita, Esta temperatura crítica se puede obtener del diagrama de equilibrio de fases conociendo la composición química de la fundición o bien con la fórmula de la **Ecuación 1** [2]:

$$Temperatura\ crítica(^{\circ}C) = 730 + 28(\%Si) - 25(\%Mn)$$

Ecuación 1.

- c) Posteriormente, la pieza es enfriada rápidamente para que transforme la austenita en martensita. El temple se realiza con el objetivo de hacer más dura una pieza y también aumenta su resistencia al desgaste aunque disminuye su resistencia a la tracción. La templabilidad de cada fundición depende en gran medida de sus elementos aleantes así como de la matriz que se tenga, los resultados que se obtienen dependen del medio de enfriamiento, de la rapidez de enfriamiento, de la composición química de la fundición y del espesor de esta. El revenido se hace cuando se desean obtener resistencias a la tracción elevadas o si se hace a temperaturas un poco más bajas se obtendrá una buena resistencia al desgaste. El revenido se lleva a cabo a una temperatura sub-crítica, con lo cual se ablandan las tensiones residuales del temple.
- d) Austemperizado: Este tratamiento se logra calentando la fundición hasta obtener una estructura cristalina homogénea de austenita, una vez que se tiene esta estructura en un horno con diferentes baños de sales se mantiene la fundición a una cierta temperatura con la finalidad de lograr que la austenita transforme a bainita, este tipo de tratamiento se da al hierro nodular, de esta forma se fabrican los hierros ADI (Austempered Ductile Iron) Y CADi (Carbide Austempered Ductile Iron).
- e) Normalizado: consiste en calentar la fundición a una temperatura a la cual se obtenga una estructura austenítica homogénea, esto asegura la disolución de carburos y luego es enfriada al aire, aunque en ocasiones tiene que utilizarse un ventilador dependiendo principalmente del tamaño y composición de la fundición. Este tratamiento se aplica para obtener una mejor resistencia a la tracción y una mejor maquinabilidad de las piezas [2].

La técnica de fusión para obtener las fundiciones en una forma general es la siguiente:

- 1.-Carga del horno.
- 2.-Fusión.
- 3.-Vaciado a la olla de colada y Tratamiento del metal líquido.
- 5.-Colada.
- 6.-Control de calidad.

Podríamos agregar un punto más que es el moldeo. El moldeo debe realizarse antes de la colada quizá a la par de la fusión o la carga del horno. Si se usan moldes de metal, la preparación de estos es corta, en comparación con la preparación de los moldes de arena.

1.1.1 Moldeo en verde.

Los moldes constan de 4 componentes, arena, bentonitas, agua y aditivos. A la arena la podemos definir como partículas de mineral entre 2 y 0.005 mm de diámetro y en el caso de las arenas de moldeo existen dos tipos: las naturales y las sintéticas. Las arenas naturales son las que se encuentran, como su nombre lo dice, en la naturaleza con grandes cantidades de arcillas aglomerantes, mientras que las arenas sintéticas son tamizadas y seleccionadas para su uso. Las arenas sílicas son usadas por su mayor abundancia y relativa facilidad de extracción, además de ser muy refractarias. Las arcillas son el aglutinante de las arenas de sílice y una forma general de expresar su composición química es mediante la siguiente fórmula química $n\text{SiO}_2.m\text{Al}_2\text{O}_3.x\text{H}_2\text{O}$. Las arcillas más utilizadas en fundición son las bentonitas y hay dos tipos de estas: la cálcica y la sódica. Las bentonitas proporcionan una buena cohesión y plasticidad de la mezcla y proveen la resistencia suficiente para poder conservar íntegra la forma del molde antes, durante, y después del vaciado.

La bentonita sódica como su nombre lo dice contiene un elevado número de iones de sodio, mientras que la bentonita cálcica tiene un mayor número de iones de calcio. La bentonita cálcica absorbe agua en menor proporción y se usa más para fundiciones no ferrosas.

La mezcla de agua con las arcillas determina en gran medida las propiedades de la arena. Así es como se obtiene la mezcla para poder fabricar un molde, aunque a esta mezcla se le puede agregar aditivos que mejoran o añaden nuevas propiedades a esta.

El primer paso para fabricar moldes de arena en verde es mezclar la arena, las arcillas y el agua en un molino, el cual desarrolla la función de mezclar y activar las arcillas para obtener un buen aglutinamiento de las partículas de arena a la hora de hacer el molde. Esta mezcla obtenida debe tener buena plasticidad, debe ser refractaria, debe tener permeabilidad para que los gases puedan fluir y debe presentar buena cohesión.

Al momento de hacer el molde se deben considerar ciertas tolerancias dimensionales, las cuales son por maquinado, por contracción, por pintura y por ángulos de salida entre otros.

Los hornos utilizados mayormente para la fundición de hierro son los de cubilote y los de inducción, siendo estos últimos los que han tenido un mayor uso y aceptación en la industria.

1.1.2. Horno de cubilote:

Los hornos de cubilote (**Figura 1**) son cilindros verticales cubiertos por una chapa de acero de 5 a 10 mm de espesor con un revestimiento interior de refractario de aproximadamente 250 mm de espesor. El horno descansa sobre cuatro columnas que le sirven de soporte. Los cubilotes modernos tienen compuertas abajo para extraer las escorias acumuladas, al frente y a nivel de fondo tienen agujeros con

canales igualmente recubiertos por refractario que sirven para la extracción del metal fundido, al lado posterior se tiene un agujero más que sirve para extraer la escoria y está a un nivel más alto que el agujero denominado piquera de colada.

Aproximadamente a 200 mm por encima de la piquera de escoria se tiene un plano de toberas para entrada de aire e inmediatamente por encima de este plano de toberas se encuentra una caja de aire que rodea el cubilote y distribuye el aire a las toberas, el cual es suministrado por un ventilador, a unos 3.5 a 4.5 m por encima de las toberas se encuentran las puertas de carga o tragante por donde se introducen los materiales. Los cubilotes modernos insuflan aire precalentado con la misma energía que se libera de la combustión de los gases en la fusión, las ventajas mas notables de este sistema es que se alcanzan temperaturas elevadas más rápido y se ahorra combustible [3].

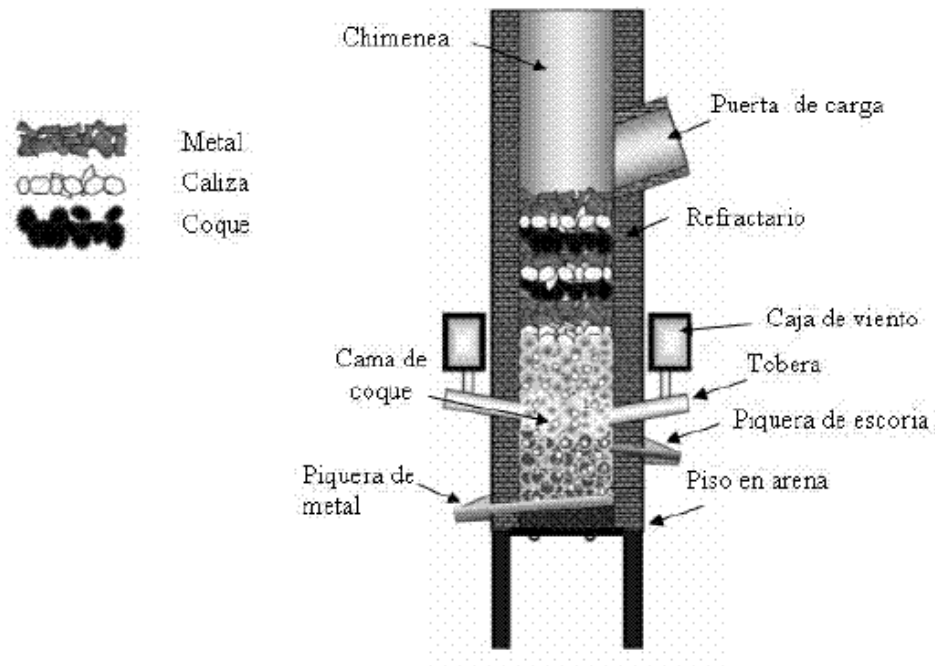


Figura 1. Esquema de un horno de cubilote.

1.1.3. Horno de inducción:

En los hornos eléctricos de inducción (**Figura 2**) el calor se genera por corrientes inducidas por una corriente eléctrica alterna, hay dos tipos de hornos de inducción:

a) Hornos de baja frecuencia. En estos hornos el calor se produce por el efecto Joule de la corriente inducida en el metal que se trata de fundir, que actúa como bobina secundaria de un transformador. Los primeros hornos de este tipo tenían un crisol en forma de anillo que constituía la espira secundaria de un transformador. Los más nuevos tienen el crisol conectado en el fondo con un conducto circular que forma la espira secundaria. El metal en el conducto se funde y comienza a desplazar su masa y a su vez esta conduce el calor hacia el resto del material.

b) Hornos de alta frecuencia. En los hornos de alta frecuencia el calor es producido por corrientes de Foucault. Estos hornos están formados por un crisol refractario que contiene al metal, rodeado por una bobina de tubo de cobre por el que circula una corriente de alta frecuencia que crea un campo magnético variable, calentándose la masa del metal por las corrientes de Foucault inducidas por este campo. El tubo de cobre de la bobina es enfriado por agua que circula dentro de él. En general las frecuencias para la alimentación de este tipo de hornos varían de los 300 a 30000 ciclos por segundo y son producidas por osciladores de tubos catódicos. Por la tanto, la temperatura del horno y la potencia se regulan controlando la frecuencia. Estos hornos tienen la ventaja de poder fundir bajo condiciones muy rigurosas. Dado que cierran herméticamente pueden funcionar con atmósferas controladas o al vacío. El inconveniente es su elevado costo de instalación [3].

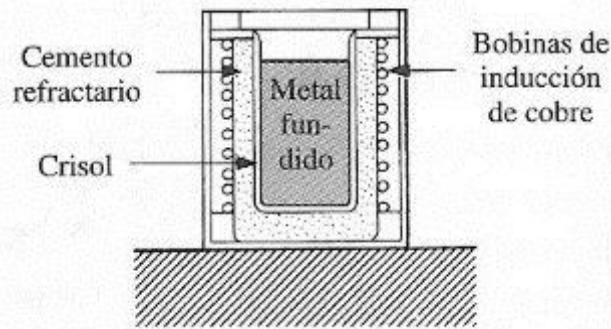


Figura 2. Esquema de un horno de inducción.

La carga del horno para la fusión depende de la empresa, generalmente se usan chatarras de acero, retornos de fundición y recarburante. Dependiendo de la concentración de las materias utilizadas es la cantidad que se usa. Esto se hace mediante un balance de carga.

Ya que se tiene el balance se procede a la carga del horno la cual como se mencionó antes depende de la empresa y del tipo de horno. Se realiza la fusión y se procede a vaciar en una olla de colada en la cual se realizan las modificaciones necesarias para obtener tanto la composición deseada como el tipo de hierro. Entre estos tratamientos ya se mencionó anteriormente la inoculación o la nodularización. Una vez que se tienen las concentraciones de elementos aleantes deseadas se procede a la colada en los moldes.

Dado que el ajuste de la composición se hace en ocasiones en la olla de colada es necesario destacar que esto se hace agregando elementos aleantes comúnmente en forma de pellet, aunque en la literatura no hay muchas referencias de este proceso cabe mencionar que se han hecho estudios de la cinética de disolución con ayuda de modelos matemáticos de algunos sistemas metalúrgicos como el de las partículas de hierro esponja en hierro, de escorias de aluminio en aluminio y sales y de barras de titanio en hierro. A continuación se exponen algunos de estos casos ya mencionados.

1.2 Revisión bibliográfica.

Olaf Ehrich, Yun Ken Chuang y Klaus Schwerdtfeger, proponen el uso de las funciones de Green para resolver modelos matemáticos acerca de la fusión de partículas esféricas de hierro esponja en hierro fundido, ellos hablan de que en una primera instancia las esferas de hierro esponja son rodeadas por una capa que solidifica dada la diferencia de temperaturas entre la fundición y el pellet, esta capa puede tener las propiedades del pellet o no tenerlas, en el segundo caso habría que hacer una modificación en las ecuaciones para poder resolver el problema analíticamente. Por lo cual al tiempo de fusión del pellet es la suma del tiempo de solidificación y fusión de la coraza que se forma como se muestra en la **Figura 3.**

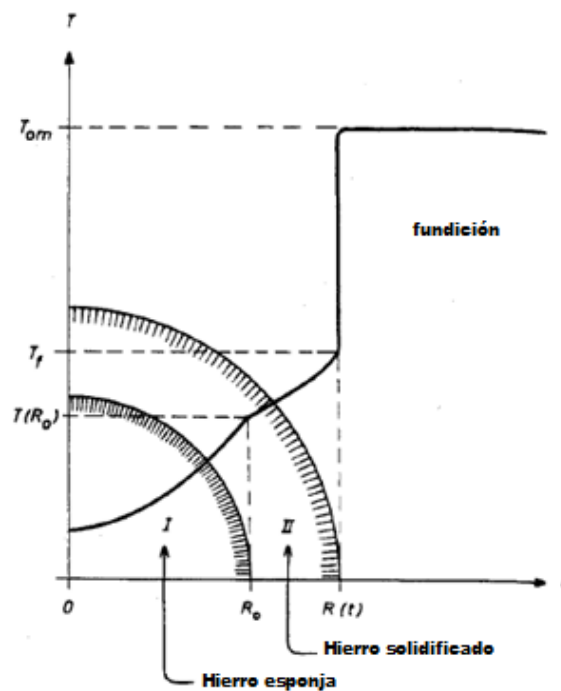


Figura3.- descripción del problema de flujo de calor, R_o es el radio de partícula, $R(t)$ es el radio que alcanza la coraza, $T(R_o)$ es la temperatura de la partícula, T_f es la temperatura que alcanza la coraza T_{om} es la temperatura a la cual se encuentra el líquido.

Las variables que ellos consideran son el radio de partícula así como su temperatura y la temperatura del hierro fundido y como ya se mencionó anteriormente ellos hacen uso de las funciones de Green para poder resolver el problema solo con condiciones de frontera y disminuir el tiempo de cálculo, obtienen resultados tanto numéricos como analíticos y de la comparación de estos concluyen que la rapidez de disolución de la partícula aumenta cuando disminuye el diámetro y aumenta la temperatura a la que ingresa [4].

En algunos casos en los que el sólido tiene un mayor punto de fusión que el líquido hay una propuesta de S. Argyropoulos y R. I. L. Guthrie, la cual consiste en que el contacto del sólido en el baño líquido promueve que el punto de fusión disminuya y de esta manera se funde un poco aunque sucede el mismo fenómeno que se menciona con anterioridad en el cual hay una formación de una coraza del material líquido, cabe señalar que ellos mencionan que existe una reacción exotérmica en la intercara sólido-coraza la cual disminuye el tiempo de fusión y disolución del sólido. Esto se muestra en la **Figura 4**.

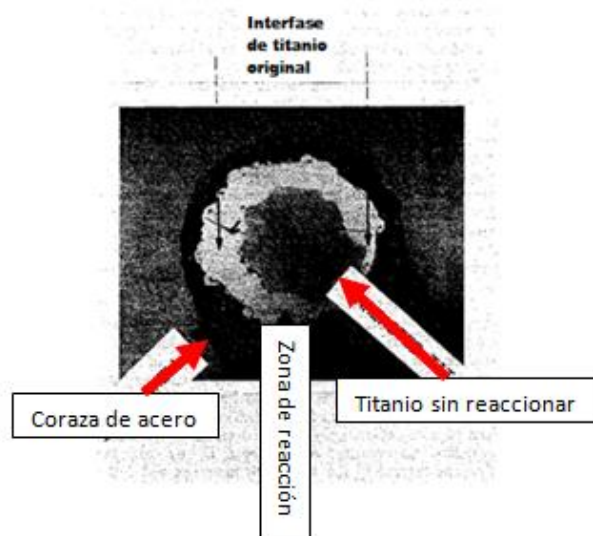


Figura 4.-Sección transversal de cilindro de titanio que muestra el titanio sin reaccionar, la coraza de acero y la zona de reacción entre estas dos.

Ellos experimentan usando cilindros de titanio de tres diámetros diferentes sumergiéndolos en un baño de acero fundido, obtienen resultados a distintos tiempos de formación de la coraza haciendo cortes transversales como el de la **Figura 4**. En una serie de experimentos colocan tres termopares, uno en el baño líquido, uno en la pared del cilindro y uno más en el centro del cilindro. También miden el peso del cilindro para conocer el tiempo en el que este se disuelve. Con ayuda de los termopares lograron identificar que la reacción que se da entre el titanio y el acero de la coraza es exotérmica. También sostienen que el tiempo total de disolución del sólido es la suma del tiempo de formación de coraza con el tiempo de fusión “libre” [5].

Con el uso de nuevas tecnologías para hacer este tipo de estudios sobre la disolución de partículas ha sido llevado a cabo con análisis en CFD por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics),

En los cuales son analizados parámetros como el tamaño de partícula, el tiempo de residencia, la temperatura del líquido. En estos también se pueden llevar a cabo estudios con modelos poblacionales tanto de partículas como de gotas del mismo líquido [6,7].

El estudio realizado por Bo Zhou y colaboradores [6] aborda la disolución de escoria de aluminio en baños de sales fundidas y de aluminio fundido con el motivo de recuperar el aluminio de la escoria.

En su trabajo analizan los efectos de la coraza de sal que se forma al momento de que la partícula atraviesa la capa de sales fundidas. Ellos ingresan la partícula con cierta velocidad dentro del baño líquido y mientras esta atraviesa el baño de sales, una capa solidifica en ella, y sigue su camino hacia el fondo del baño mientras se da todo el proceso anteriormente descrito de formación y fundición de coraza y de partícula. En este trabajo también desarrollan un modelo de balance poblacional para observar la distribución de la fase dispersa.

Ellos usan un análisis llamado TGA (Thermal Gravity Analysis) que está basado en la variación de las fuerzas boyantes durante la fundición de la escoria.

Con este trabajo encontraron que primero se forma la coraza de sal y al momento en el que llega al metal fundido se forma una segunda capa como se muestra en la **Figura 5**.

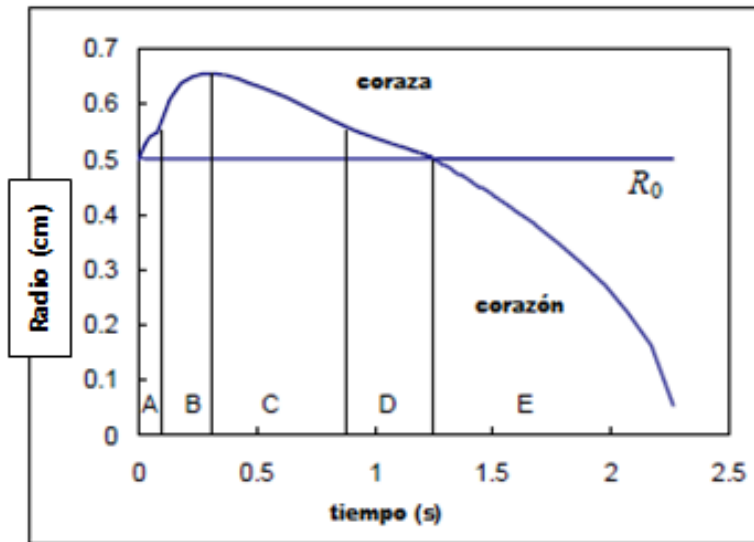


Figura 5.- Muestra el incremento del radio en función del tiempo.

Como podemos observar de la Figura 7, la región A es el tiempo en que se forma la coraza de sales mientras que la región B es el tiempo de máximo crecimiento de coraza metálica, la región C es el tiempo de fusión de la coraza metálica, la región D es el tiempo de fusión de la coraza de sal y por último la región E es el tiempo de fusión “libre” de la escoria.

Ellos comparan los resultados obtenidos mediante el método numérico de diferencias finitas con los obtenidos analíticamente y de esta forma concluyen que los factores que influyen en la disolución y fusión de la partícula son, la temperatura de precalentamiento de la partícula, la temperatura del metal líquido, el tiempo de residencia en el baño de sal, la velocidad a la que atraviesa el baño de sal, el tamaño de partícula, los tipos de sal, y la agitación del baño metálico.

En cuanto al trabajo realizado por J. W. Holbeach y M. R. Davidson [7], estudian la dispersión de partículas inyectadas en un baño sin movimiento así como los efectos de la disolución en la dispersión de las mismas. Esto lo realizaron con el método de volumen finito, en dos condiciones las cuales son las fuerzas boyantes negativas y fuerzas boyantes neutras. El modelo multifase que ellos utilizan acopla el flujo del sólido con la fase líquida.

Encontraron que las mismas partículas inyectadas en un baño sin movimiento pueden generar fuerzas de arrastre que crean un cierto movimiento en el líquido beneficiando la disolución de las partículas pero como ya se había mencionado, la influencia de las fuerzas boyantes en este fenómeno provoca una diferente dispersión de las partículas. En el caso de que no hubiera disolución el campo de velocidades resultante sería el que se muestra en la **Figura 6**, el cual corresponde al de las fuerzas boyantes negativas mientras que el campo de velocidades de la **Figura 7** corresponde al de las fuerzas boyantes neutras.

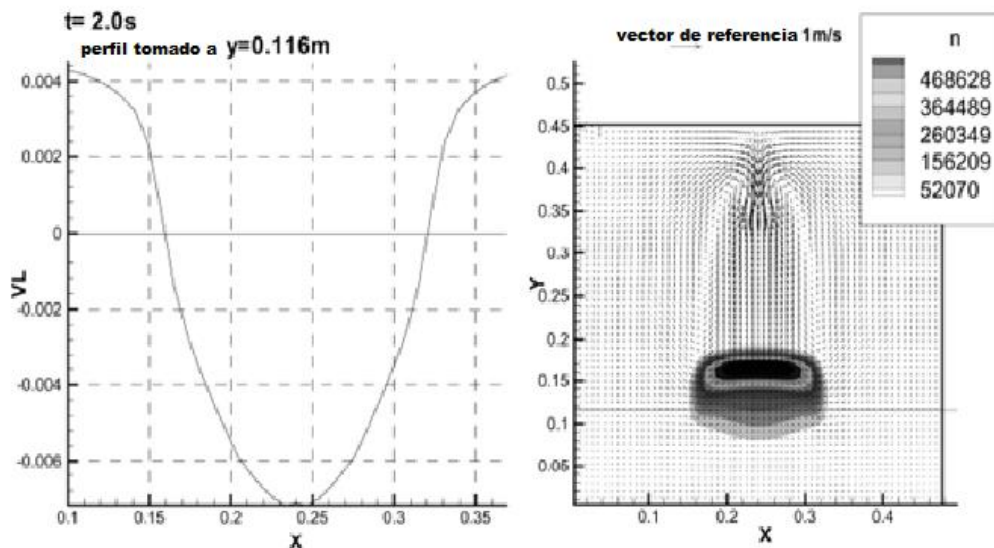


Figura 6.- muestra el campo de velocidades en el líquido y el campo de velocidades de la pluma así como su forma y dispersión sin disolución en el caso de fuerzas boyantes negativas.

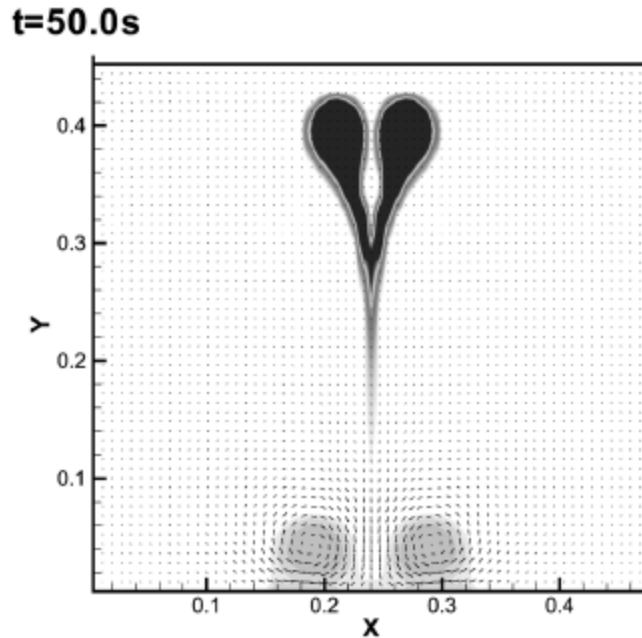


Figura 7.- muestra el campo de velocidades que se desarrolla con fuerzas boyantes neutras.

En base a estas dos imágenes podemos apreciar que las fuerzas boyantes negativas generan un campo a su paso pero no se dispersan sino que avanzan de cierta forma juntas mientras que en las fuerzas boyantes neutras el campo que se forma hace que se dispersen las partículas formando un lóbulo, un tallo y una “cabeza”, generando unos ciertos vórtices alrededor del tallo.

El efecto que se tiene considerando la disolución de las partículas es esencialmente el mismo solo que la formación de los campos de velocidades son menores a los obtenidos sin disolución por lo cual en el caso del lóbulo el tallo y la “cabeza” se da en un espacio más amplio y corto como lo muestran las **Figuras 8 y 9.**

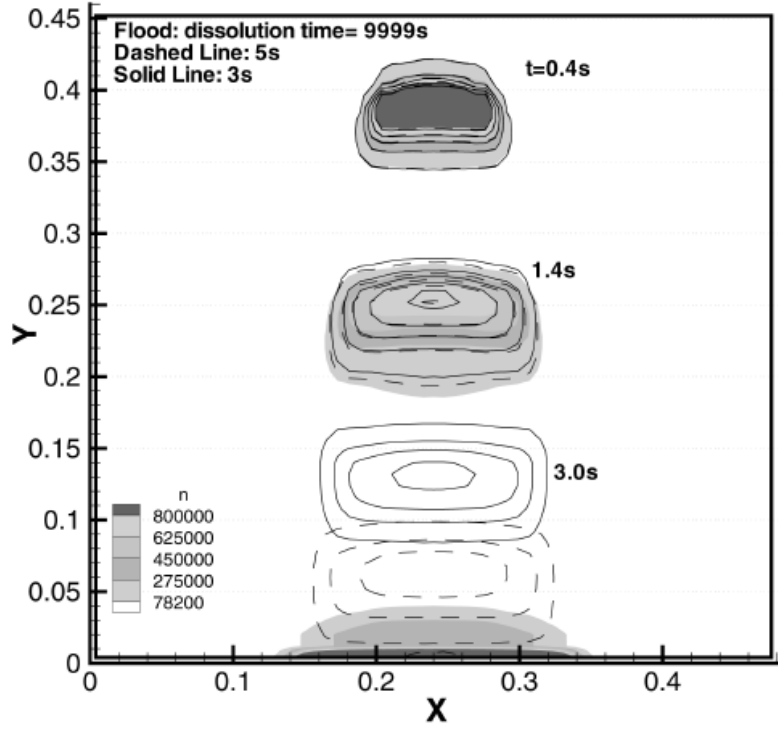


Figura 8.- Muestra el avance de la pluma cuando se tiene dispersión para el caso de fuerzas boyantes negativas.

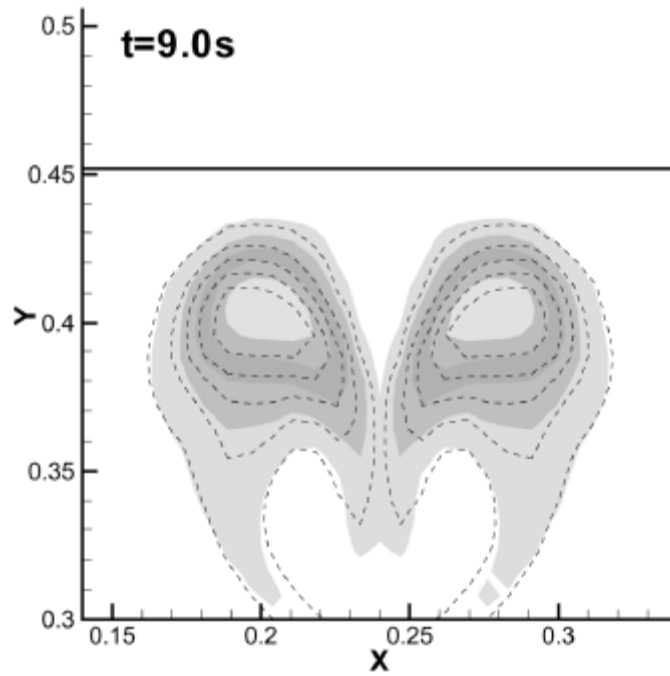


Figura 9.-Muestra la evolución de la pluma para el caso de las fuerzas boyantes neutras.

Estas últimas dos referencias son las más recientes y fueron hechas con ayuda de programas de cómputo capaces de resolver el flujo y trayectorias de partícula así como la disolución de la misma.

Existen otros esfuerzos realizados para el modelado de la cinética de fusión de partículas en baños de metales fundidas y que se presentan en la **Tabla 2**, en donde se indica el grupo que realizó el modelo, la ecuación utilizada, las condiciones estudiadas y el método de solución.

Autor	Material	Características particulares	Métodos Numéricos	Ecuación gobernante, condiciones de iniciales y de frontera
<i>Ehrich</i> [4]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en hierro ➤ DRI en DRI ➤ Hierro en hierro 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transforma las ecuaciones diferenciales en su forma a dimensional 	Funciones de Green	Ecuación gobemante: $\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$
<i>Seaton</i> [20]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en acero 			Condiciones de frontera: $1) \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0$ $2) \quad T = T_f, \quad r = R$ $3) \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_s - T_f) = \frac{dR}{dt} \rho \Delta H$
<i>Jiao</i> [21]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Escoria-escoria ➤ Al en Al ➤ DRI en Escoria ➤ Cu-Ni en Cu₂S 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Resuelve las ecuaciones en su forma adimensional. 	Diferencias finitas Método explícito	$1) \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0$ $2) \quad T = T_f, \quad r = R$ $3) \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_s - T_f) = \frac{dR}{dt} \rho \Delta H$
<i>Taniguchi</i> [22]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Al en Al ➤ Al en aleación de Al 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ No transforman las ecuaciones en ecuaciones a dimensionales. 		Condiciones iniciales: $R = R_0 \quad t = 0$
<i>Nauman</i> [23]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en escoria 			En la interface: $T_{1,R_0} = T_{2,R_0}$ $\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{1,R_0} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{2,R_0}$
<i>O'Malley</i> [24]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en escoria 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Difiere con la condición de frontera 2 en el nodo convectivo cuando $t > t_c$ $T_{int} = \frac{h \Delta r_{int,k} T_s + \lambda_k T_k}{\lambda_k + h \Delta r_{int,k}}$		

Autor	Material	Características particulares	Soluciones Analíticas	Ecuación gobernante, condiciones de iniciales y de frontera
Ehrlich [4]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en hierro ➤ DRI en DRI ➤ Hierro en hierro 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transforma las ecuaciones diferenciales en su forma adimensional 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ R_{max} ➤ t_c ➤ R en tiempo t 	Ecuación gobernante: $\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$
Zhang [25]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en hierro 	Condición de frontera 2 en $R = R_0$: $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} 4\pi R_0^2 - h(T_s - T_f) 4\pi R^2 = 4\pi R^2 \frac{dR}{dt} \rho \Delta H$ Suposiciones: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Desprecia la conducción de calor en la coraza ➤ Se compensa lo anterior cuando $4\pi R^2$ es remplazado por $4\pi R_0^2$ en la condición de frontera 2. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fo_{max} ➤ Fo ➤ Q_{tot} ➤ R 	Condiciones de frontera: 1) $\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0$ 2) $T = T_s, \quad r = R$ 3) $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_s - T_f) = \frac{dR}{dt} \rho \Delta H$ Condiciones iniciales: $R = R_0 \quad t = 0$ En la interface: $T_{1,R_0} = T_{2,R_0}$ $\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{1,R_0} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{2,R_0}$
Engh [26]	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Adiciones metálicas con menor punto de fusión que el baño líquido 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puede calcular la temperatura en cualquier tiempo cuando el perfil de temperatura se vuelve lineal. ➤ Establece relaciones entre el número de Biot y el tiempo a dimensional Fo_0. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ t_c ➤ t_{tot} ➤ R ➤ Fo ➤ Q_{tot} ➤ H 	Ecuación gobernante: $\alpha \frac{\partial^2 (rT)}{\partial r^2} = \frac{\partial (rT)}{\partial t}$ Condiciones de frontera: $\frac{rT}{RT_f} = \gamma \neq 1 \quad r = \gamma R$

Tabla 2. Estudios de modelado matemático de fusión de partículas.

Como podemos apreciar, la literatura especializada en la fusión/disolución de partículas sólidas en metales líquidos no está referida específicamente al caso de la adición de elementos aleantes para la fabricación de hierros colados. Sin embargo, los principios fundamentales que gobiernan la cinética de fusión/disolución aplican al caso de la incorporación de aleantes a los hierros colados en fundición.

En general, todos los trabajos acerca de fusión/disolución de partículas concuerdan en que además de controlar el tamaño y la temperatura del baño, la agitación es un elemento muy importante para poder lograr la perfecta incorporación de elementos aleantes sólidos. Existen desarrollos de dispositivos diseñados para facilitar la incorporación de aleantes sólidos a baños metálicos. Al respecto, se han propuesto soluciones de dispositivos mediante patentes de

reactores con diferentes métodos para acelerar la fusión/disolución de las partículas en el hierro, algunos de ellos cuentan con sistemas de agitación como el insuflado de gases inertes [11] o el caso del reactor que genera un vórtice [8-10, 12-13]. En cualquier caso de los dispositivos mencionados, las patentes carecen de una demostración clara del potencial que tienen los diseños propuestos para incorporar los elementos aleantes.

Se sabe, sin embargo, que un dispositivo de este tipo debe de presentar condiciones hidrodinámicas que maximicen el mezclado y los tiempos de residencia de las partículas sólidas para favorecer la incorporación de los aleantes.

En este trabajo se centra en simular el flujo de fluidos de un dispositivo diseñado para alear baños de hierro gris con formación del vórtice, mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) para predecir la eficiencia del mezclado, la formación del vórtice y los tiempos de residencia de las partículas sólidas.

Una manera de definir el comportamiento del mezclado de estos sistemas es mediante la medición cuantitativa de las edades de los paquetes de fluido, si el comportamiento que este presenta es un flujo pistón, no existe mezclado ni zonas donde el fluido se queda estancado denominadas zonas muertas. Por lo que si se mide la concentración a la salida del dispositivo la concentración detectada sería la misma que la de la entrada a un tiempo igual al tiempo promedio desde la inyección. Si se diera el caso de que el dispositivo mezclara todo al instante entonces la medición de concentración se observaría una parte del trazador y posteriormente se iría diluyendo hasta agotar el soluto en aproximadamente a un tiempo igual a dos veces el tiempo de residencia, el 100% en ambos casos se ve en las curvas de edades de fluidos mejor conocidas como curvas "C" ó RTD (Residence Time Distribution), en la **Figura 10**. Donde se grafica la concentración

a la salida de un reactor continuo en función del tiempo en escalas adimensionales.

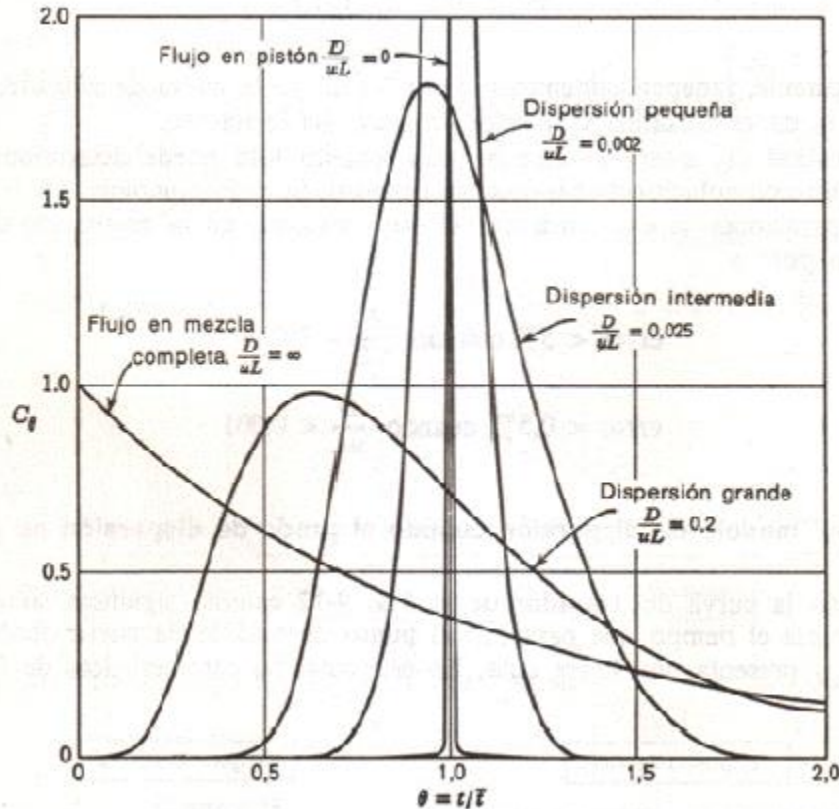


Figura 10.- Curvas “C” en recipientes cerrados y con flujo continuo para flujo pistón, flujo mezclado y para un caso intermedio de flujo que es el que aplica en la mayoría de los casos. [14].

En esta figura, θ , es el tiempo adimensional y C_θ es la concentración adimensional y se presentan adicionalmente dos casos intermedios al flujo totalmente pistón o mezclado, también se muestra un par de curvas con zonas muertas que son aquellas curvas que rebasan dos veces el tiempo adimensional. El tiempo de residencia promedio se calcula como el cociente entre el volumen del líquido en el dispositivo entre el flujo de un volumen que entra a él. Se puede apreciar que los pulsos de flujo pistón presentan un pico alto mientras que los flujos de mezclado presentan curvas dispersas.

1.3 Objetivo.

Hacer el estudio y análisis del flujo de fluidos con ayuda de un software CFD en dos dispositivos que se proponen para la fusión/disolución de partículas así como el estudio del tiempo de residencia en base a curvas RTD (Residence time distribution) o curvas C con el motivo de alear hierros rápidamente.

1.4 Hipótesis.

El estudio del flujo de fluidos en ambos dispositivos nos mostrará que la mayor generación de turbulencia aumentará el tiempo de residencia de las partículas.

El dispositivo que presente un mayor tiempo de residencia será el que tenga un mayor mezclado por lo cual tendría más probabilidad de fundir/disolver las partículas. *A priori*, el dispositivo con barrera parece ser mejor para mezclar que el que no tiene barrera.

El desarrollo de un vórtice dentro del reactor tiene una gran influencia tanto para el tiempo de residencia como para el mezclado y por lo tanto en la fusión/disolución.

2.-MODELO MATEMÁTICO.

2.1 Dispositivos mezcladores.

En la **Figura 11** se muestra un esquema de los dos dispositivos mezcladores propuestos que usan el vórtice, en donde se puede apreciar que la única diferencia que existe entre estos es la implementación de una barrera. Los dispositivos cuentan con una cámara de reacción que mide 30cm de diámetro (D), una sección troncocónica con un ángulo alfa (α) de 30° , una entrada que tiene una inclinación beta (β) de 45° , un diámetro de salida (d) de 4 cm, una altura de la salida de 11.4 cm (b) y en consecuencia una altura total de 48 cm (H). En el caso del dispositivo con barrera, la distancia del centro a la barrera (n) vale 3.814cm.

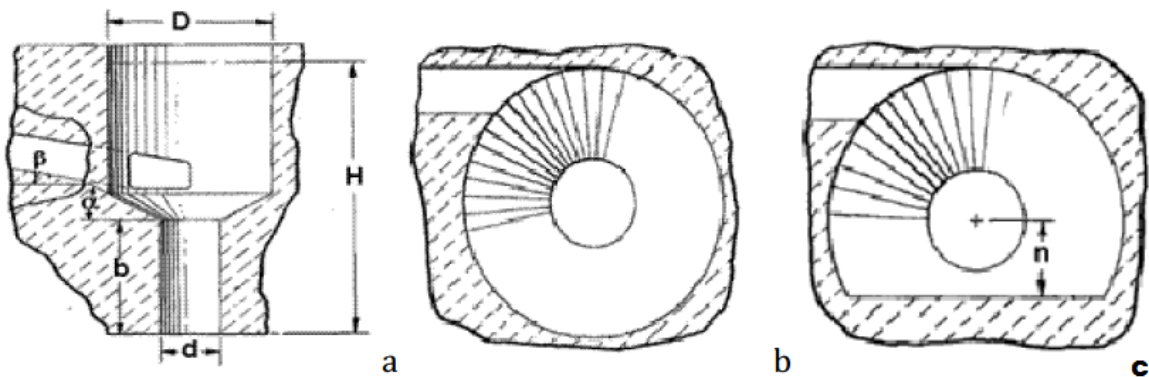


Figura 11. a) Esquema del dispositivo y sus dimensiones: β =ángulo de entrada, α =ángulo troncocónico, D= diámetro de la cámara de reacción, d= diámetro de salida, b= altura tubo de salida, H= altura del dispositivo. b) vista superior del dispositivo sin barrera. c) vista superior del dispositivo con barrera, n=distancia de la barrera al centro.

Estos dispositivos funcionan con un flujo de entrada constante el cual entra de forma tangencial a la cámara de reacción ayudando a la formación del vórtice sin tener que usar algún tipo de agitación ya sea mecánica o con gas, la aplicación de la barrera generaría una mayor turbulencia dado que el vórtice no se formaría libremente, y como hipótesis se plantea que una mayor turbulencia supone una

mayor agitación, la cual es de mucho beneficio para la disolución/fusión de las partículas que se van a agregar.

Aunque es necesario mencionar que en este trabajo no se toma en cuenta la transferencia de calor ni la disolución/fusión de partículas como tales, sino que se evaluará el desempeño de los dispositivos en base a su habilidad para maximizar el mezclado, que a su vez depende de la turbulencia generada y del flujo de fluidos, que se puede medir con la ayuda de curvas de tiempos de residencia (RTD) o curvas C. Consecuentemente, con este estudio no se garantiza la incorporación completa de las partículas aleantes.

2.2 Metodología de trabajo.

En este trabajo se desarrolló un modelo matemático para resolver el flujo de fluidos de los dispositivos con ayuda de un software comercial FLUENT. Con el cual se busca obtener la evolución de la superficie libre así como los patrones de flujo y la turbulencia generada por este y el tiempo de residencia de partículas inertes.

Las suposiciones bajo las que se lleva a cabo son las siguientes:

- a) El hierro fundido es un fluido newtoniano, isotérmico e incompresible, lo cual implica que no será considerado el transporte de energía y que la viscosidad y densidad del fluido serán constantes.
- b) Se considera estado transitorio desde la inyección del metal líquido con el dispositivo vacío hasta que se alcanza un estado quasi-estable.
- c) El vórtice se simulará con el algoritmo numérico VOF (Volumen Of Fluid) [14]. Que ha probado ser eficiente para la simulación de superficies deformables, siendo un cálculo bifásico en el que las fases de uso en este problema son el hierro gris líquido y el aire.
- d) La disolución/fusión de las partículas es despreciada y en su lugar se hace un análisis de mezclado con un soluto miscible en el hierro, el cual se

inyecta como un pulso en la entrada y se monitorea la concentración del soluto a la salida con lo cual es posible evaluar tiempos de residencia (curvas RTD).

2.3 Ecuaciones gobernantes.

Para modelar la hidrodinámica del sistema bifásico en la literatura se recomienda el uso del algoritmo numérico conocido como VOF (volumen of fluid) [15], el cual considera al sistema bifásico como una sola fase llamada marcador (ξ).

2.3.1 Ecuación de conservación de masa del marcador.

La forma de la ecuación de conservación de masa en el marcador está dada por la **(Ecuación 2)**.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + v * \nabla \xi = 0 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde t es el tiempo y v es el vector velocidad del fluido, en la técnica VOF las fracciones de volumen para cada fluido se determinan en cada celda, en este caso particular, con dos fluidos en el dominio el valor del marcador, ξ_{liq} es la fracción del volumen del líquido. En consecuencia la fracción de gas es $1 - \xi_{liq}$, ya que la suma de todas las fracciones de volumen debe ser uno. Si ξ_{gas} tiene un valor de uno, indica la presencia de gas en el nodo, mientras que un valor de cero indica la presencia de líquido, y un valor entre cero y uno define la mezcla de gas y líquido y en consecuencia la presencia de la superficie libre. Conociendo el valor de ξ de una de las dos fases en un nodo, las propiedades del fluido se pueden calcular como un promedio ponderado de las fracciones en volumen de cada fase. Por ejemplo la densidad promedio de la mezcla en un nodo, se puede calcular como **(Ecuación 3)**:

$$\rho = \rho_g(1 - \xi_{liq}) + \rho_{liq}\xi_{liq} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde ρ_g es la densidad del gas y ρ_{liq} es la densidad del líquido.

2.3.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento del fluido.

En forma vectorial, la ecuación de conservación de movimiento para un fluido newtoniano se puede escribir como (**Ecuación 4**).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla(\rho V) = -\nabla(P) + \nabla[\mu \nabla(V)] + \rho g \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde P es la presión, g es la constante gravitacional y μ es la viscosidad media (calculada para cada nodo de forma similar al cálculo de densidad de la **Ecuación 3**).

2.3.3 Modelo k- ϵ de turbulencia.

Para describir la turbulencia del sistema, se utilizó el modelo de dos ecuaciones k- ϵ estándar [16], el cual involucra dos ecuaciones de conservación para la energía cinética turbulenta, k, y su rapidez de disipación ϵ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla * (\rho v k) = \nabla * \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \nabla k \right) + \rho(g - \epsilon) \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla * (\rho v \epsilon) = \nabla * \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + \rho \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \epsilon) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde G de las ecuaciones 5 y 6 se refiere a la generación de energía cinética turbulenta [16], μ_{eff} es la viscosidad efectiva definida como:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (\text{Ecuación 7})$$

Siendo μ_t , la viscosidad turbulenta, definida como:

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho K^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Los valores de las constantes C_1 , C_2 , σ_ε , σ_k , y C_μ son 1.44, 1.92, 1.3, 1.0 y 0.9 respectivamente [16].

2.3.4 Ecuación de conservación de especies químicas.

Para predecir el poder mezclador del dispositivo, se plantea la obtención de las curvas RTD, para lo cual se tiene que resolver la ecuación de conservación de la especie química que representa un soluto, C. Una vez que se ha alcanzado el estado estable en el patrón de flujo dentro del dispositivo, se añade un pulso de la concentración del trazador en fase líquida y en ese instante empieza el cálculo de mezclado que va después del cálculo hidrodinámico. La dispersión del trazador está gobernada por la ecuación de conservación de especies químicas, mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla * (vC) = \nabla * (D_{C,l} \nabla C) + \nabla * \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla C \right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

En donde $D_{C,l}$ es el coeficiente de difusión molecular del trazador en la fase líquida y Sc_t es número de Schmidt turbulento tomándolo con un Valor de 1.0 para este trabajo.

2.4 Condiciones de frontera e iniciales.

La **Figura 12**, presenta un dibujo del dispositivo, donde se muestran las dimensiones del dispositivo y donde también se presentan de manera gráfica las fronteras del sistema. Las fronteras comprenden las paredes del dispositivo, la entrada de metal, la salida de metal y la superficie abierta del sistema.

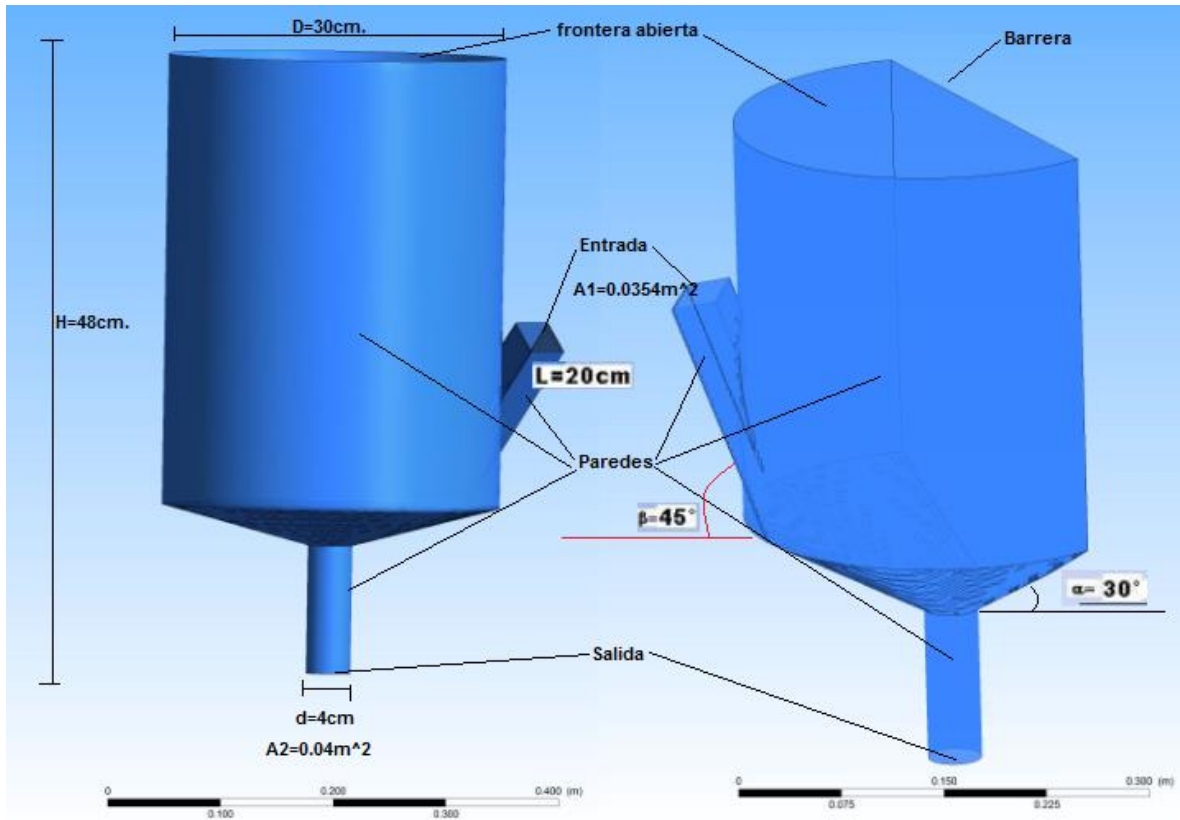


Figura 12.- dibujo del dispositivo mostrando dimensiones del dispositivo y las fronteras.

2.4.1 Condiciones iniciales y de fronteras del cálculo hidrodinámico

Las condiciones iniciales para el cálculo hidrodinámico son un dispositivo lleno de aire estático (fracción de gas igual a uno y valor cero de todas las componentes de las velocidades en todo el dominio). También los parámetros turbulentos son cero en estos casos.

Las condiciones de frontera implican condición de no deslizamiento para las componentes de las velocidades paralelas a la pared y de impermeabilidad para las componentes de velocidad perpendiculares a cada pared (Valor cero de todas las velocidades), mientras que la transición de flujo laminar (cerca de las paredes) al núcleo turbulento del sistema se da a través de las denominadas funciones pared (Wall functions) [17].

En la entrada de metal, la velocidad es constante dada por el caudal dividido entre el área transversal al flujo y la fracción del líquido es uno, mientras que la del gas es cero. Las propiedades turbulentas a la entrada (k y ϵ) se tratan como el caso de una entrada en una tubería [18].

En las superficies abiertas a la atmósfera (parte superior del dispositivo y salida de metal) la presión se fija al valor de la presión atmosférica.

2.4.2 Condiciones iniciales y de frontera del cálculo de mezclado.

El cálculo de mezclados se realiza cuando se ha establecido un patrón de flujo en estado estable y por ende, ya no se resuelven las ecuaciones de conservación de masa ni de conservación de cantidad de movimiento (ecuaciones 2 a 4), ni el modelo de turbulencia k - ϵ (ecuaciones 5 a 8). Únicamente se resuelve la ecuación de conservación de especies químicas en estado transitorio (ecuación 9).

La condición inicial es valor cero de la concentración del trazador en todo el dispositivo. Luego, justo empezado el cálculo, se inyecta un pulso de soluto, C , en la entrada de metal por 0.05 segundos. Todas las paredes del sistema presentan cero flujo de soluto, mientras que por la parte superior tampoco sale soluto y por la parte inferior o salida del soluto. El flujo de soluto está dado por la convección del chorro que deja el dispositivo.

2.5 Propiedades físicas.

La **Tabla 3**. Muestra las propiedades físicas de los fluidos involucrados en el sistema de estudio y algunos parámetros utilizados.

SUSTANCIA	DENSIDAD (Kg/m ³)	VISCOCIDAD (Kg/ms)	COEFICIENTE DE DIFUSIÓN (m ² /s)
HIERRO	6530	6.935E-10	-----
AIRE	1.225	1.7894E-5	-----
SILICIO (Solute)	2000	1.72E-5	3.5E-9

Tabla 3.- Propiedades físicas de los fluidos involucrados.

2.6 Solución

El conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describe los fenómenos de flujo de fluidos y de transferencia de masa, sujetas a las condiciones de fronteras, no poseen solución analítica por lo que se debe obtener una solución numérica. Para este propósito se usó el software Comercial FLUENT ANSYS versión 14, donde se resolvieron todas las ecuaciones gobernantes descritas anteriormente sujetas a las condiciones de frontera e iniciales ya mencionadas.

Para resolver el problema se ha realizado un primer cálculo en estado transitorio de 15 segundos para obtener un patrón de flujo de fluidos desarrollado y formas del vórtice, este cálculo se realiza utilizando las ecuaciones 2 a 8. (Que en una computadora con 4 núcleos, un procesador Intel® Xeon® CPU E 31245 3.30 GHz tarda en promedio 4 días), posteriormente se realiza un cálculo de mezclado, que sólo resuelve la ecuación 9 de dispersión de soluto en estado transitorio por el tiempo necesario para la salida de soluto considerando el campo de turbulencia estable en las condiciones obtenidas del primer cálculo (este cálculo tarda aproximadamente 2 días en la misma computadora anteriormente mencionada).

El método numérico denominado elemento finito, consiste en dividir el espacio de cómputo (dispositivo mezclador) en una serie de elementos discretos sin traslape a los que se les denomina nodos. También el tiempo total de cómputo se discretiza en una serie de elementos sin traslape que se denominan deltas de tiempo. Mientras más pequeños son los elementos discretizados la representación es más exacta, pero esto implica un aumento en el tiempo de cómputo. Por eso, se requieren mallas finas.

Una vez que se ha hecho esto, se procede a resolver las ecuaciones de conservación en cada elemento para satisfacer los principios de conservación involucrados y a la solución que cumple con este requisito se le denomina solución convergida. Este proceso de converger el sistema de ecuaciones requiere de ensayos de prueba y error variando las discretizaciones de tiempo y espacio y varios parámetros numéricos que promueven la convergencia.

Para poder resolver las ecuaciones correspondientes y aplicar las respectivas condiciones de frontera e iniciales es necesario dibujar la geometría del sistema que se utilizara, el software ANSYS 14.0 tiene un programa llamado "DESIGN MODEL" que permite el dibujo de la geometría que se necesite, en este caso la de ambos dispositivos mezcladores, así mismo tiene la capacidad de importar geometrías de otros software de dibujo asistido por computadora. Una vez hecha la geometría se procede a mallar el volumen del sólido en cuestión, esto se realiza con el software "DRAW MESH" que también es parte del ANSYS 14.0. También ahí se hace la identificación de las fronteras como los son, entradas, paredes y salidas. La calidad de la malla se mide en función de la ortogonalidad de la misma dado el método que se utiliza para el mallado. Es importante mencionar una vez más que un mayor número de elementos implica un mayor tiempo de cómputo.

Ya que se tiene la geometría y el mallado del mezclador, se procede a usar el "solver" que es en sí el software FLUENT que también es parte del ANSYS 14.0. En este punto se procede a definir los modelos (ecuaciones) y los términos que se

usarán durante el cálculo como lo son el estado estable ó transitorio, los materiales que se van a utilizar, así como las condiciones de frontera e iniciales. También se modifica el paso de tiempo para hacer el cálculo, que en este caso fue de 1E-3 segundos para conseguir convergencia en la solución de las ecuaciones. Aquí mismo se puede seleccionar cada cuanto se quiere guardar un dato de la simulación. También, para cuestiones del análisis de resultados se genera una gran cantidad de datos aunque para los casos de mezclado se parte del último dato generado por el cálculo de la hidrodinámica del mezclador. Una vez definidos todos los parámetros se realiza el cálculo donde se itera la solución y en este caso cada paso de tiempo se alcanza la convergencia hasta que se alcanza el tiempo final de cálculo. Una vez convergida la solución, se pasa a un post-procesamiento donde se obtienen las imágenes y animaciones de los resultados obtenidos para poder hacer el análisis. Esto se hace en el software CFD-post.

2.7 Obtención de curvas “C”.

Para hacer el análisis del mezclado del dispositivo se realizan curvas RTD que se obtienen a partir de la inyección de un trazador en la entrada del dispositivo y la medición de este en la salida, en estas curvas se grafica concentración adimensional contra tiempo adimensional, los cálculos necesarios para normalizar estas curvas son los siguientes.

Tiempo medio de residencia

El tiempo medio de residencia \bar{t} para el flujo de fluidos en el mezclador se calcula con la **ecuación 10**.

$$\bar{t} = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde V es el volumen del mezclador ocupado por líquido en m^3 y Q es el flujo volumínico en m^3/s .

Tiempo adimensional

Para el estudio de los dispositivos mezcladores es conveniente medir el tiempo en función del tiempo medio de residencia \bar{t} , obteniendo el tiempo adimensional θ con la **ecuación 11**.

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde t es el tiempo al que fue medida la concentración.

Concentración media.

Así como se realizó la adimensionalización del tiempo, también se realiza un procedimiento para hacerlo con la concentración. Por medio de la **ecuación 12** se calcula la concentración media.

$$\bar{c} = \frac{m_t}{V} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde m_t es la masa del trazador y V es el volumen de líquido en el mezclador.

Concentración adimensional.

La concentración adimensional C_θ se calcula con la **ecuación 13**.

$$C_\theta = \frac{c}{\bar{c}} \quad \text{Ecuación 13.}$$

Donde c es la concentración de trazador a la salida del dispositivo a cualquier instante de tiempo, t .

Porcentajes de volumen pistón, volumen mezclado y volumen muerto.

Una vez que se tienen los valores adimensionales de tiempo y concentración se tiene que normalizar la curva RTD haciendo que el área bajo la misma sea igual a la unidad.

Para la caracterización de este fluido mediante la obtención de la curva RTD, se utiliza el procedimiento de cálculo propuesto por Sahai y Emi [19], en donde el

volumen del mezclador está distribuido en tres fracciones, volumen pistón, volumen de mezclado y volumen muerto. Es necesario mencionar que el modelo que ellos proponen es de mayor uso en distribuidores de colada continua para acero, sin embargo, pensamos que es válido este procedimiento para este tipo de mezcladores. El cálculo de las fracciones de volumen pistón, mezclado y muerto, se hace de la siguiente manera:

El área bajo la curva debe ser igual a la unidad por lo que se utiliza la **ecuación 14**.

$$\sum_{\theta=0}^{\infty} C_t \Delta\theta = 1 \quad \text{Ecuación 14.}$$

Donde C_t es la concentración adimensional a un determinado tiempo y $\Delta\theta$ es el incremento de tiempo adimensional.

El tiempo medio de residencia adimensional $\bar{\theta}$ para la curva entera esta dado por la **ecuación 15**.

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{\theta=0}^{\infty} C_i \theta_i}{\sum_{\theta=0}^{\infty} C_i} = 1 \quad \text{Ecuación 15}$$

El tiempo medio de residencia hasta $\theta=2$ definido como $\bar{\theta}_c$, se calcula con la **ecuación 16**.

$$\bar{\theta}_c = \frac{\sum_{\theta=0}^2 C_i \theta_i}{\sum_{\theta=0}^2 C_i} \quad \text{Ecuación 16.}$$

El área bajo la curva hasta $\theta=2$ Q_a/Q , que se considera como la fracción de volumen activo que es la suma de las fracciones de volumen pistón con el volumen de mezclado se calcula con la **ecuación 17**.

$$\frac{Q_a}{Q} = \sum_{\theta=0}^2 C_i \Delta\theta \quad \text{Ecuación 17.}$$

Volumen muerto.

La fracción de volumen muerto V_d/V se calcula con la **ecuación 18**.

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \bar{\theta}_c \quad \text{Ecuación 18.}$$

Volumen pistón.

Ya que se ha calculado la fracción de volumen muerto se procede a realizar el cálculo de fracción de volumen pistón V_p/V el cual es igual al tiempo adimensional de la primera aparición de trazador en la salida del mezclador correspondiente a la **ecuación 19**.

$$\frac{V_p}{V} = \bar{\theta}_{min} \quad \text{Ecuación 19.}$$

Donde $\bar{\theta}_{min}$ es el tiempo adimensional en el cual se detecta el trazador por primera vez en la salida del mezclador,

Volumen de mezclado.

La fracción de volumen de mezclado V_m/V , se calcula sabiendo que la suma de las tres fracciones debe ser igual a uno, asumiendo que se conocen las fracciones de volumen muerto y volumen pistón, el cálculo de la fracción de volumen mezclado se hace con la **ecuación 20**.

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \left(\frac{V_d}{V} + \frac{V_p}{V} \right) \quad \text{Ecuación 20.}$$

3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS.

3.1. Mallas de los mezcladores propuestos.

Las mallas obtenidas para ambos casos de los mezcladores cuentan con un número de elementos mayor a los 160,000 nodos. Estas mallas fueron realizadas después de un extensivo y comprensivo estudio de fabricación de mallas, en donde se ponderó un aumento en la ortogonalidad promedio de la malla, minimizando los segmentos tetrahédricos y dándole preferencia a los elementos hexahédricos y al mismo tiempo evitando segmentos con ángulos agudos que provocan divergencia. Como ya se mencionó antes, el aumento en el número de elementos provoca un aumento en el tiempo de cálculo. Ambas mallas cuentan con un mayor número de elementos hexaédricos y la ortogonalidad de ambas mallas en promedio es mayor a 0.98, y el mínimo de ortogonalidad que se presenta nunca es menor 0.2. Esto se muestra en las **Figuras 13a y 13b**.

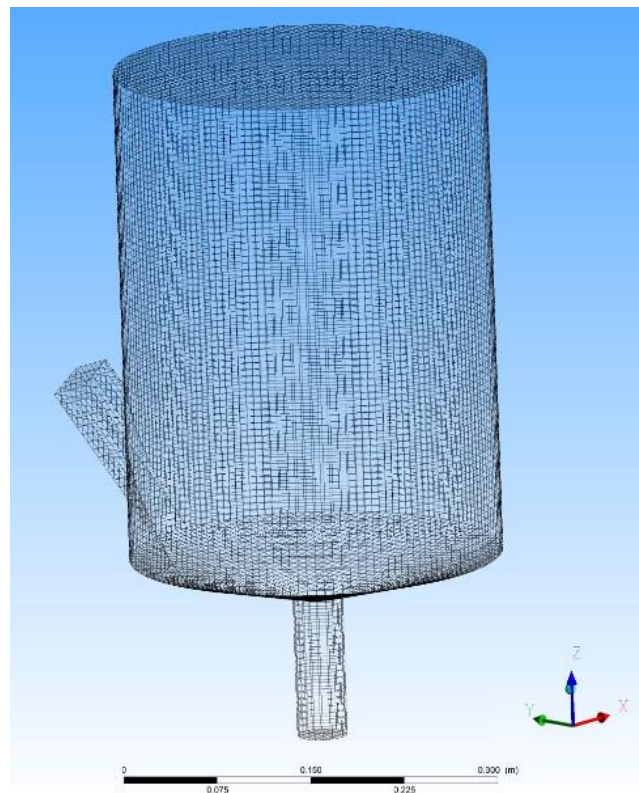


Figura 13 (a). Malla del mezclador sin barrera.

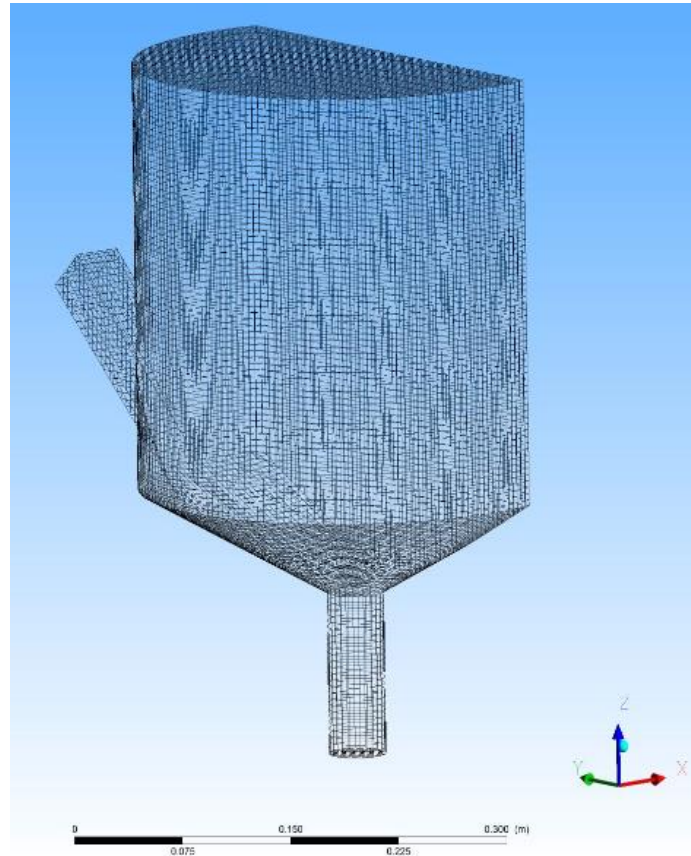


Figura 13 (b). Malla del mezclador con barrera.

3.2 Patrones de flujo.

Los vectores de velocidad para los dos mezcladores se presentan en la **Figura 14(a) y 14(b)**, los cuales fueron obtenidos a los 15 segundos de cálculo, siendo este tiempo el suficiente para desarrollar un patrón de flujo estable. En la **Figura 14**, se observa la vista superior y frontal de los vectores de velocidad del mezclador sin barrera.

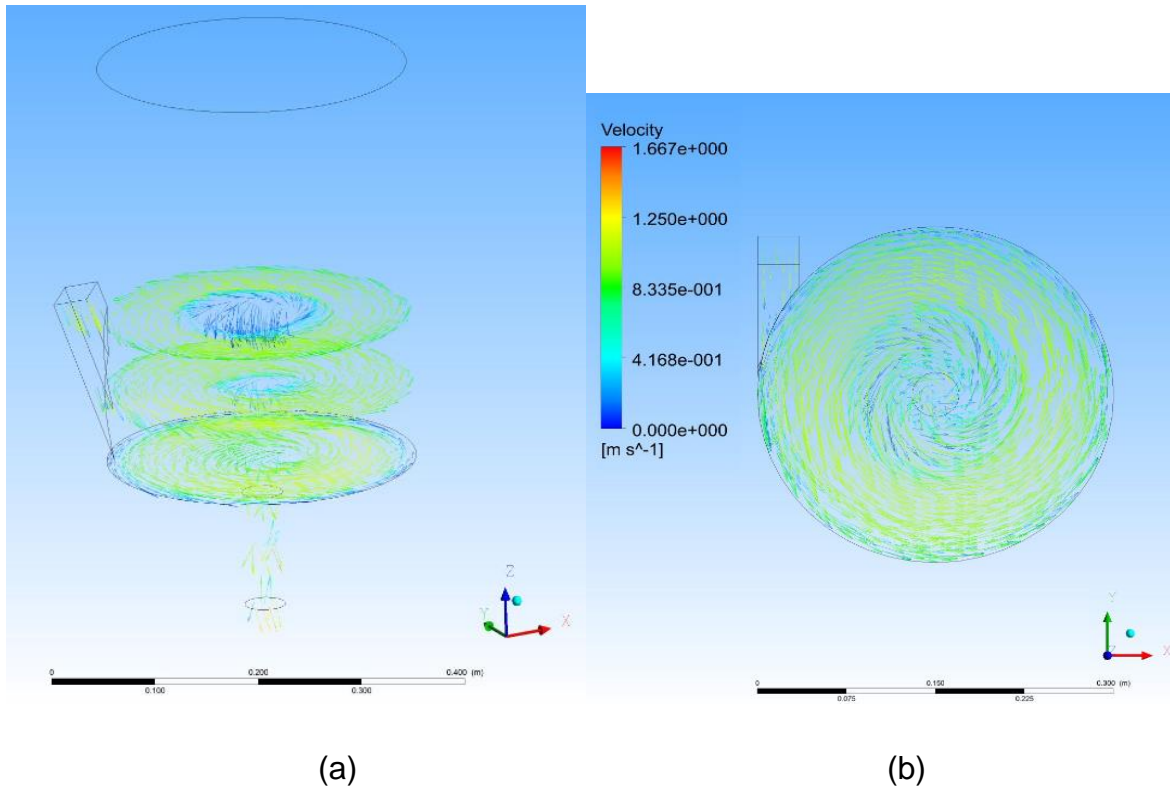


Figura 14. (a) Vista frontal de los vectores de flujo del mezclador sin barrera, (b) vista superior de los vectores de flujo del mezclador sin barrera.

Como se puede observar es claro el patrón de flujo angular que se tiene. Asimismo, se observa un incremento en la velocidad del fluido a partir de las paredes del vórtice hacia las paredes del reactor, aunque al llegar a estas la velocidad se vuelve cero por la condición de no deslizamiento impuesta en las paredes sólidas estáticas. A la salida del dispositivo se aprecia que la velocidad aumenta debido al adelgazamiento de la sección transversal del tubo de bajada y que hace que las velocidades en esta zona sean independientes del flujo de metal a la entrada.

Los patrones de flujo no tienen un apreciable flujo angular en el caso del mezclador con barrera lo cual se muestra en la **Figura 15**, en donde se aprecia que la barrera provoca patrones de flujo caóticos con mucha turbulencia y dirigidos hacia arriba o hacia abajo y sin seguir el movimiento angular que se aprecia cuando el dispositivo no cuenta con la presencia de una barrera.

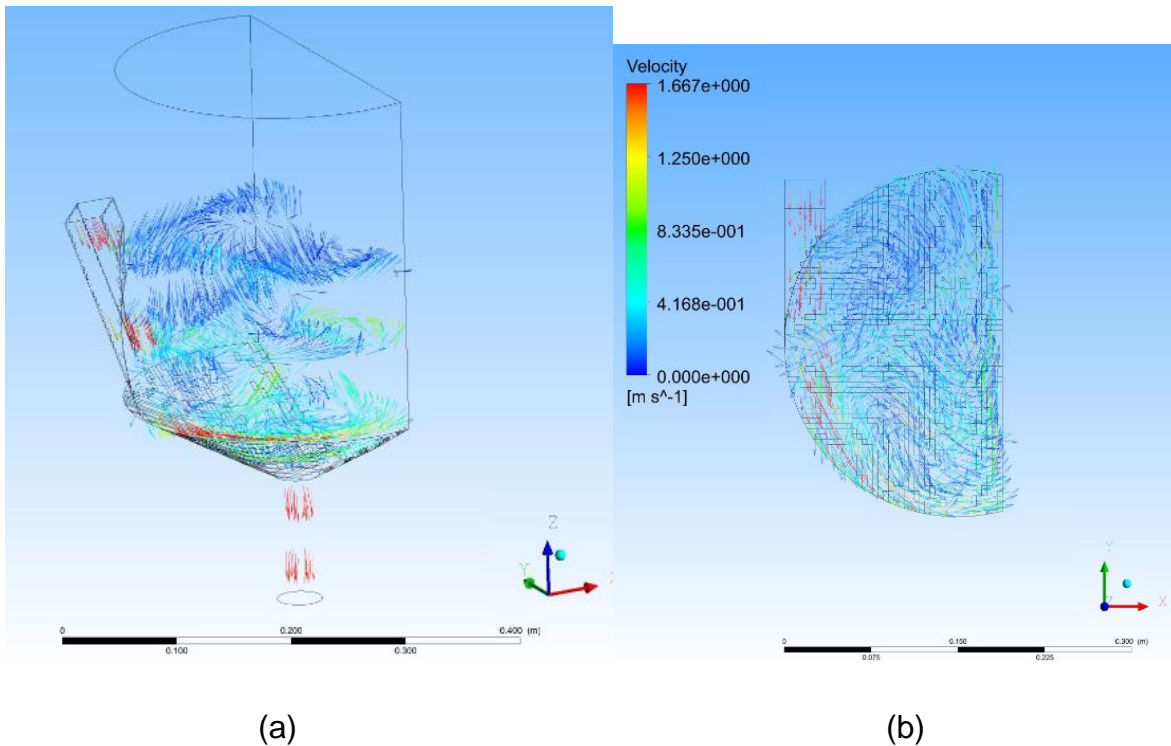


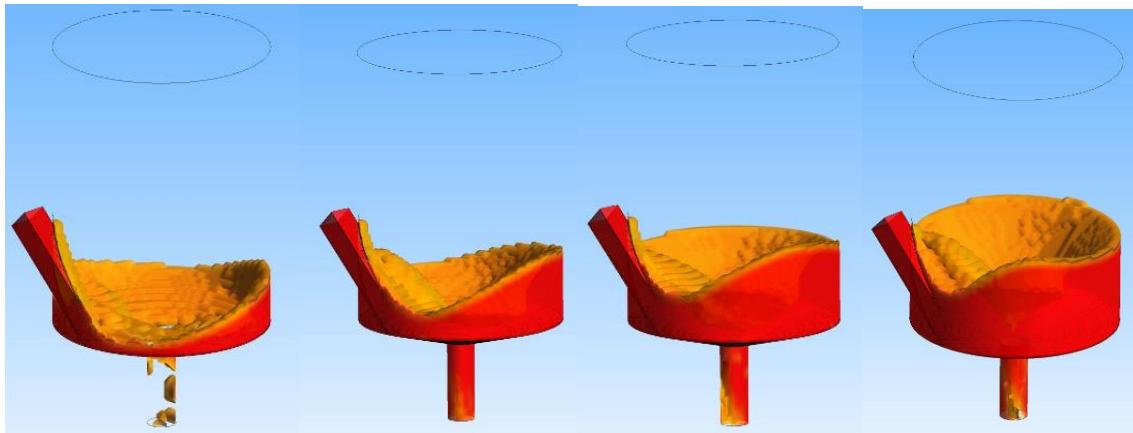
Figura 15. (a) Vista frontal de los vectores de velocidad en el mezclador con barrera, (b) vista superior de los vectores de velocidad en el mezclador con barrera.

No hay un patrón de flujo desarrollado mostrando una dirección definida como tal, dado que podemos observar los vectores de velocidad apuntando en diferentes direcciones. Esto se puede explicar por una falta de generación del vórtice, el cual es afectado por la incorporación de la barrera en el diseño de este mezclador. En la vista superior se aprecia el mismo comportamiento con vectores de velocidad apuntando en diferentes direcciones, pero también se observa que este mezclador

genera una mayor velocidad en la salida. Entonces, se puede afirmar que la velocidad con la que sale el metal del dispositivo está gobernada por la altura que alcanza el líquido en ambos dispositivos mezcladores. Los valores mayores que alcanza la velocidad en el vórtice del dispositivo sin barrera son del orden de 1 m/s, mientras que para los dispositivos con barrera en la cámara de reacción son de menores a 1 m/s aunque se ven zonas de velocidad muy heterogéneas e incluso parece haber un corto circuito, es decir, hierro que entra al dispositivo, se mueve por la pared del fondo, choca con la barrera y baja inmediatamente a la salida con tiempos de residencia muy cortos y que serían no muy benéficos para el desempeño del dispositivo mezclador. En este sentido, se aprecia un patrón de flujo más estable, con tiempos de residencia más largos y uniformes con el dispositivo sin barrera en relación al dispositivo con barrera, lo que hace suponer un mejor desempeño del mezclado sin la presencia de barrera.

3.3 Vórtices.

En la **Figura 16** se presenta una secuencia de formación de vórtice en el dispositivo sin barrera desde el primero (**Figura 16a**) hasta el segundo 15 (**Figura 16h**) cada dos segundos.

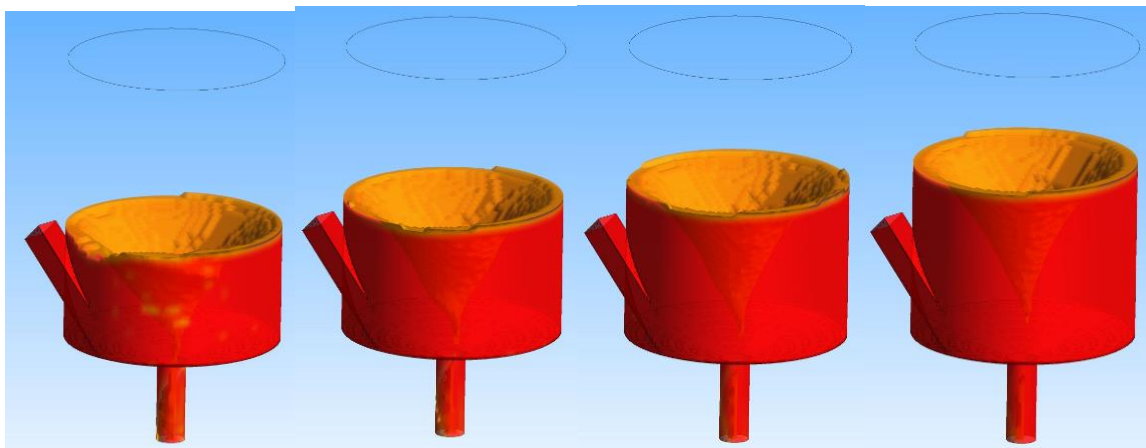


(a)

(b)

(c)

(d)



(e)

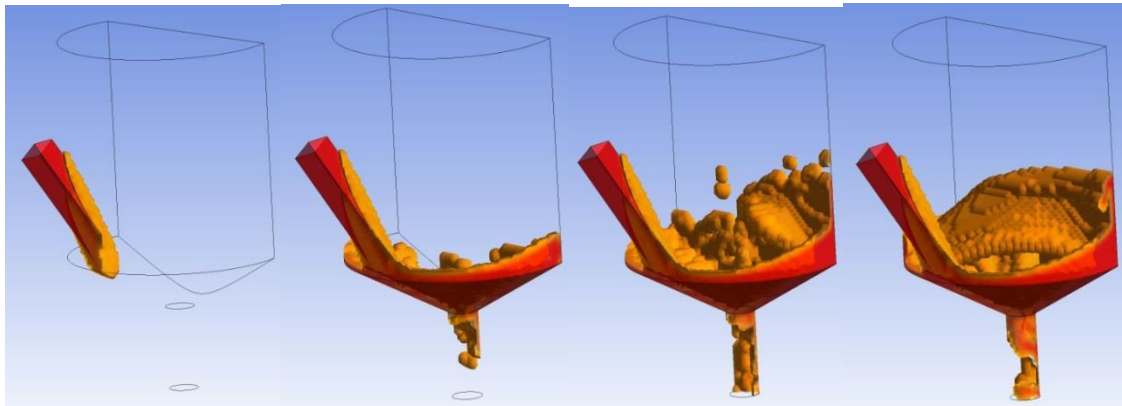
(f)

(g)

(h)

Figura 16.- Evolución con el tiempo del vórtice en el dispositivo con barrera a los: (a) 1 segundo, (b) 3 segundos, (c) 5 segundos, (d) 7 segundos, (e) 9 segundos, (f) 11 segundos, (g) 13 segundos y (h) 15 segundos del inicio de la alimentación.

En la **Figura 17** se presenta una secuencia de formación de vórtice en el dispositivo con barrera desde 0.1 segundos (**Figura 17a**) hasta el segundo 14 (**Figura 17n**).

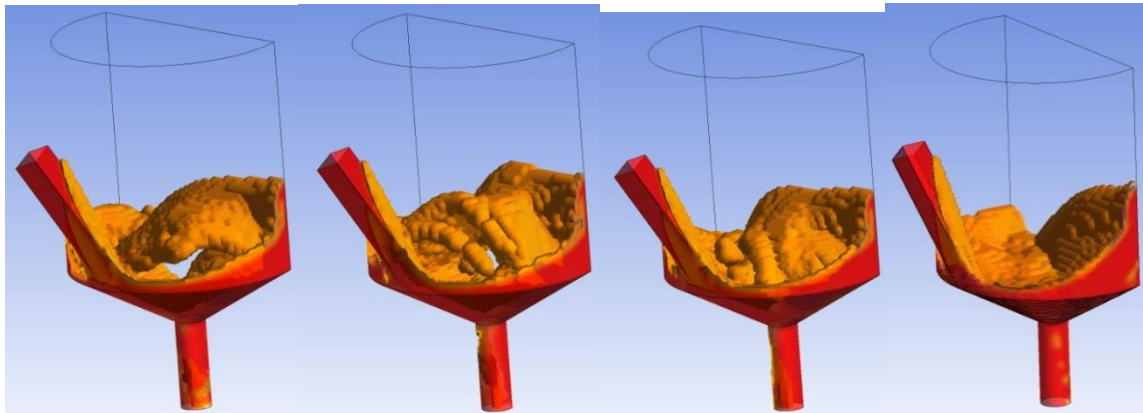


(a)

(b)

(c)

(d)

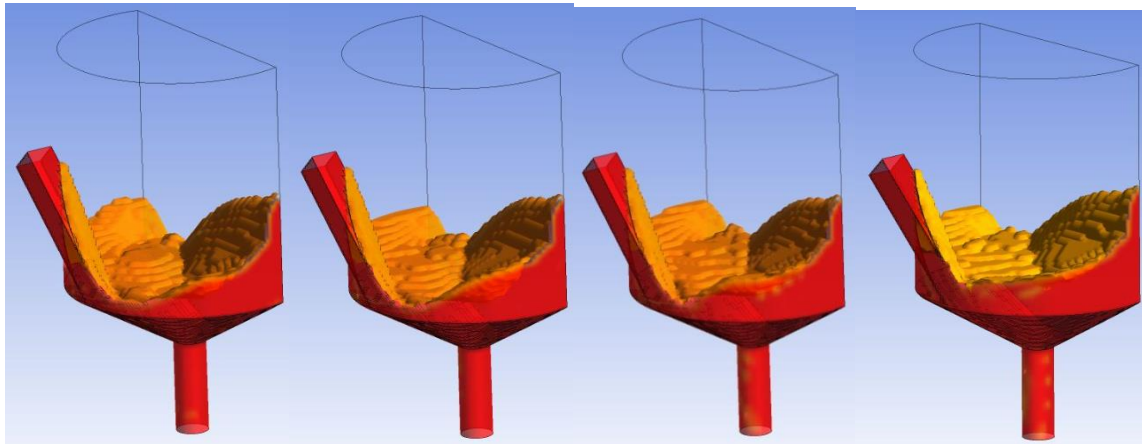


(e)

(f)

(g)

(h)

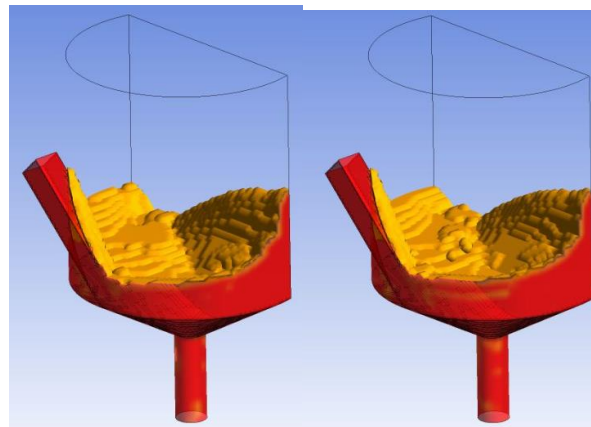


(i)

(j)

(k)

(l)



(m)

(n)

Figura 17.- Evolución del vórtice del fluido en el mezclador con barrera a los: (a) 0.1 segundos, (b) 0.2 segundos, (c) 0.3 segundos, (d) 0.5 segundos, (e) 0.7 segundos, (f) 0.9 segundos, (g) 1 segundo, (h) 2 segundos, (i) 4 segundos, (j) 6 segundos, (k) 8 segundos, (l) 10 segundos, (m) 12 segundos, (n) 14 segundos.

En las secuencias de imágenes de las **Figuras 16** y **17**, se puede apreciar la evolución del fluido en ambos dispositivos mezcladores. En el dispositivo sin barrera se observa la formación de un vórtice bien definido y que con el paso de los segundos va aumentando su altura, hasta alcanzar una altura que ya no cambia con el tiempo desde los 15 segundos. El vórtice se observa estable y

bastante simétrico. La formación del vórtice de hierro en el dispositivo, podría sugerir que fomenta un tiempo de residencia suficientemente grande para la fusión/disolución de las partículas, aunque esto no implicaría necesariamente un mezclado total de las partículas dado que si estas no se alimentan en un punto correcto, podrían llegar rápidamente al vórtice sin la posibilidad de fundirse y el mismo vórtice las arrastraría hacia el fondo, el cual desemboca casi en la salida del dispositivo. Por otro lado, con el dispositivo con barrera no se aprecia este comportamiento por parte del fluido, el cual al chocar con la barrera genera una especie de “ola” que no permite la formación del vórtice. Con el paso del tiempo se aprecia bastante agitación o mucha turbulencia. Al paso de los segundos y conforme se llena el dispositivo, el fluido aunque no genera un vórtice si genera un comportamiento con mucha turbulencia que se genera en este dispositivo. Un aspecto negativo de la barrera, es que ésta envía al metal hacia abajo provocando tiempos de residencia menores.

3.4. Trayectorias y tiempos de residencia de partículas trazadoras sin fusión.

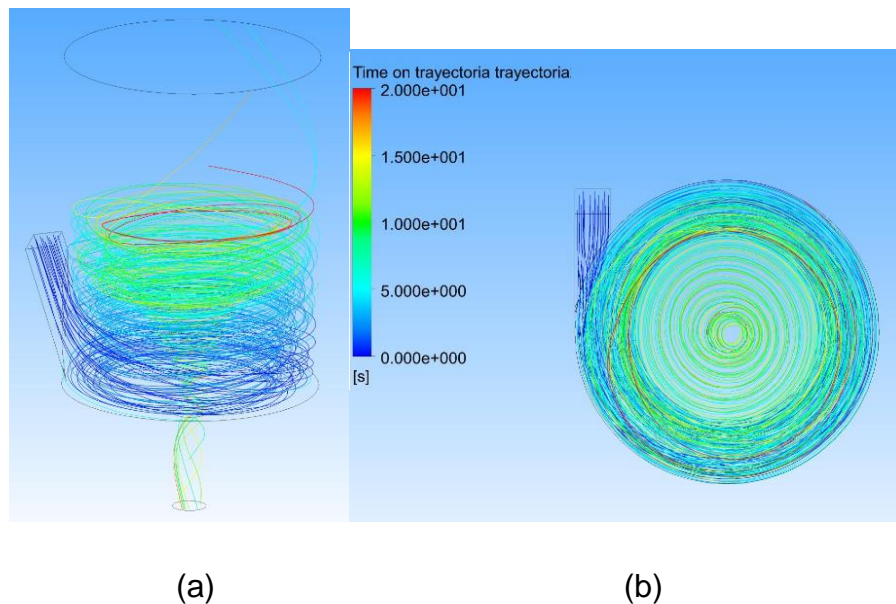
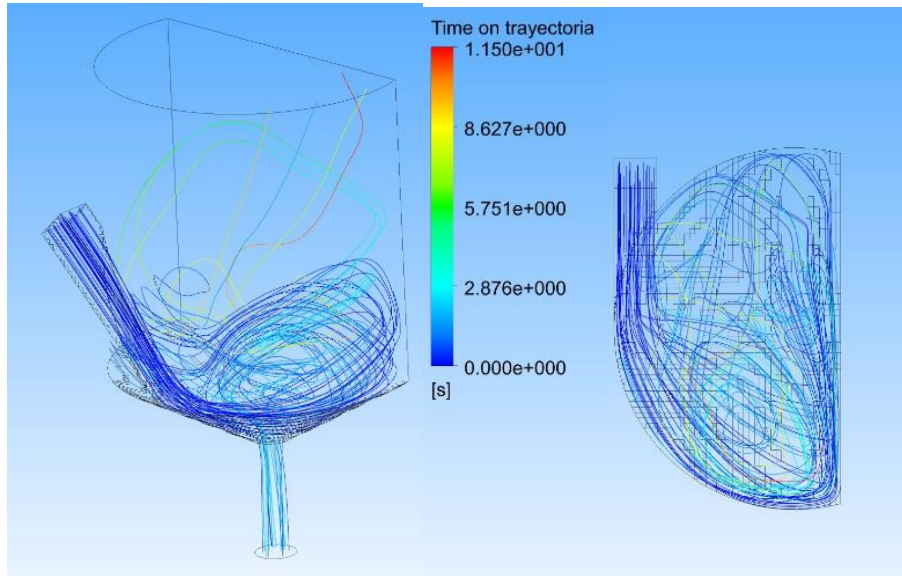


Figura 18.- Trayectorias de partículas trazadoras sin fusión en el dispositivo sin barrera, (a) vista frontal de las trayectorias, (b) vista superior de las trayectorias.



(a)

(b)

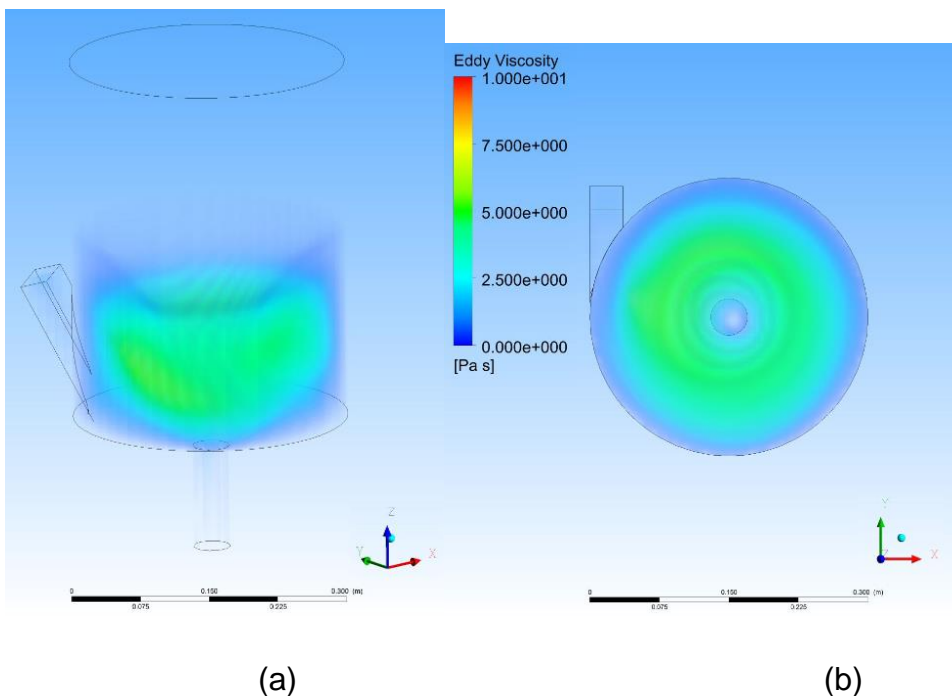
Figura 19.- trayectorias de partículas trazadoras sin fusión en el dispositivo con barrera, (a) vista frontal de las trayectorias, (b) vista superior de las trayectorias.

Partículas trazadoras que siguen la trayectoria del fluido y que se alimentan justo en la entrada del dispositivo, se presentan para los dispositivos sin barrera (**Figura 18**) y con barrera (**Figura 19**). Las trayectorias de las partículas solidas que se observan en la **Figura 18** muestran el movimiento angular que se desarrolla dentro del fluido que se mencionó anteriormente para el mezclador sin barrera, aunque también se observa que hay partículas que saldrían disparadas del dispositivo lo cual seria un problema dada la temperatura que adquieren, esto podría ser por la velocidad que adquieren dentro del fluido y las fuerzas que actúan sobre ella como la centrifuga generada en parte por el vórtice. Las trayectorias mostradas por las partículas en el dispositivo con barrera no tienen el movimiento angular si no que es un movimiento caótico pero al igual hay algunas partículas que aparentemente salen disparadas, lo cual podría ser por el movimiento que tiene el fluido. Los tiempos de residencia para estas partículas son de 20 segundos para el dispositivo sin barrera y de 11 segundos para el

mezclador con barrera, lo que indica una clara superioridad del dispositivo sin barrera, ya que el mezclador sin barrera sería mejor para la fusión/disolución de adiciones de aleantes sólidos, dado que las partículas tendrían un mayor tiempo en el hierro.

3.5. Contornos de turbulencia.

En la **Figura 20** se presentan los resultados de la turbulencia generada a los 15 segundos después de introducir el flujo de metal en los mezcladores. La turbulencia se asocia con la llamada “Viscosidad de Eddy” (Eddy viscosity en inglés) que se calcula con la ecuación 8 del capítulo 2 y que de acuerdo al modelo de turbulencia k- ϵ estándar es directamente proporcional al cuadrado de la energía cinética turbulenta (k) e inversamente proporcional a su rapidez de disipación (ϵ). Por lo tanto, esta viscosidad depende de la posición dentro del dispositivo y vemos que en el caso del dispositivo sin barrera se presenta mayor intensidad turbulenta entre el centro del vórtice y las paredes del dispositivo y que esta es más o menos simétrica en la dirección angular. Por otro lado, en el dispositivo que presenta la barrera se presentan mayores valores de viscosidad de Eddy o turbulenta, pero se ha perdido la homogeneidad de la estructura turbulenta.



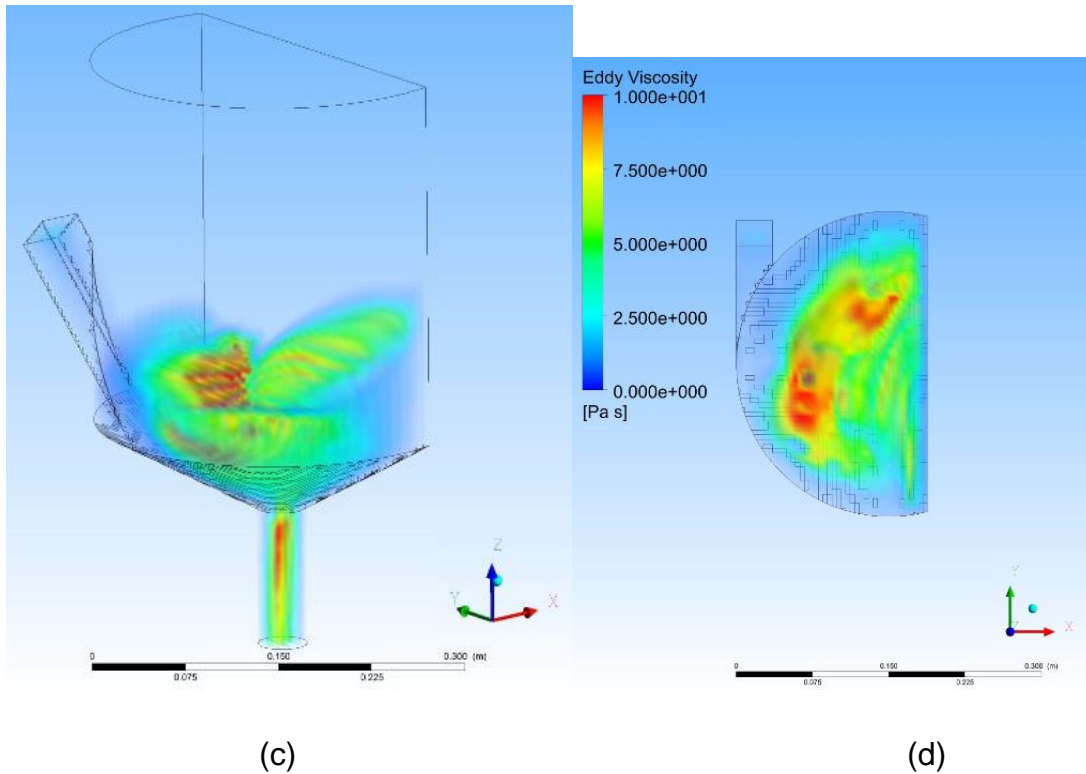
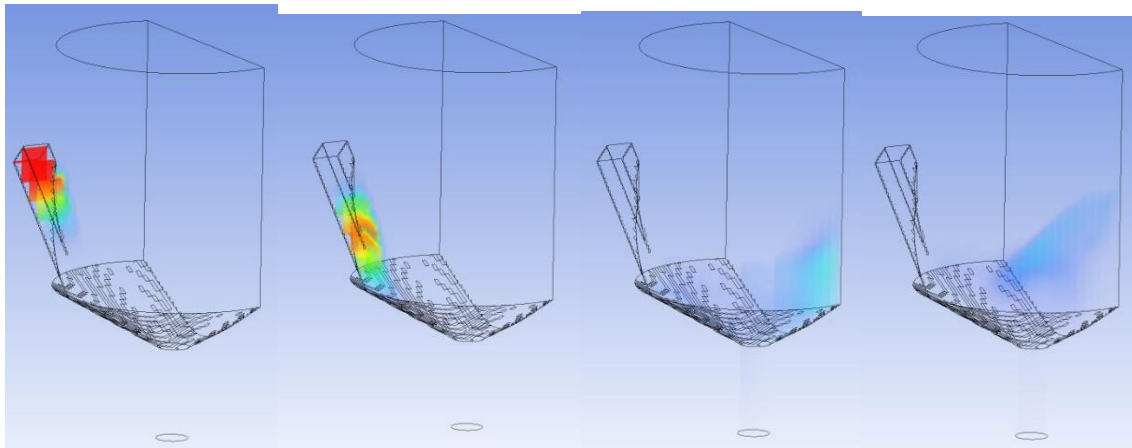


Figura 20. (a) Vista frontal de los contornos de turbulencia (Eddy viscosity) calculados a los 15 segundos en el mezclador sin barrera, (b) Vista superior de los contornos de turbulencia en el mezclador sin barrera, (c) vista frontal de los contornos de turbulencia en e mezclador con barrera, (d) vista superior de los contornos de turbulencia en el mezclador con barrera.

Los valores máximos en el dispositivo sin barrera andan por los 5 Pa s, mientras que en el dispositivo con barrera son de casi 10 Pa s, es decir, el doble. La barrera en el dispositivo genera una mucho mayor turbulencia, por lo cual vemos nuevamente que tiene una gran influencia en como se desarrolla el flujo, por que aun que el vórtice generado crea una pequeña turbulencia, esta no tiene la misma magnitud que la del dispositivo con barrera a pesar de que este dispositivo con barrera no cuente con un vórtice desarrollado. Nuevamente, el dispositivo sin barrera parece ofrecer mejores condiciones para el mezclado, que aunque presenta en ciertas secciones la mitad de la intensidad turbulenta que el

dispositivo con barrera, su distribución en mucho más uniforme, lo cual implicaría un mejor desempeño en el mezclado.

3.6 Evolución de la dispersión de soluto inyectado con un pulso a la entrada.

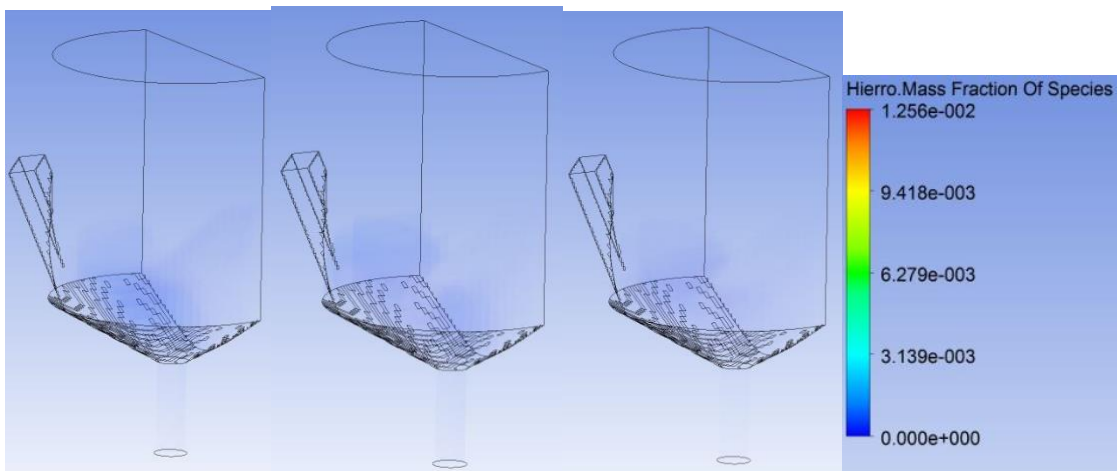


(a)

(b)

(c)

(d)



(e)

(f)

(g)

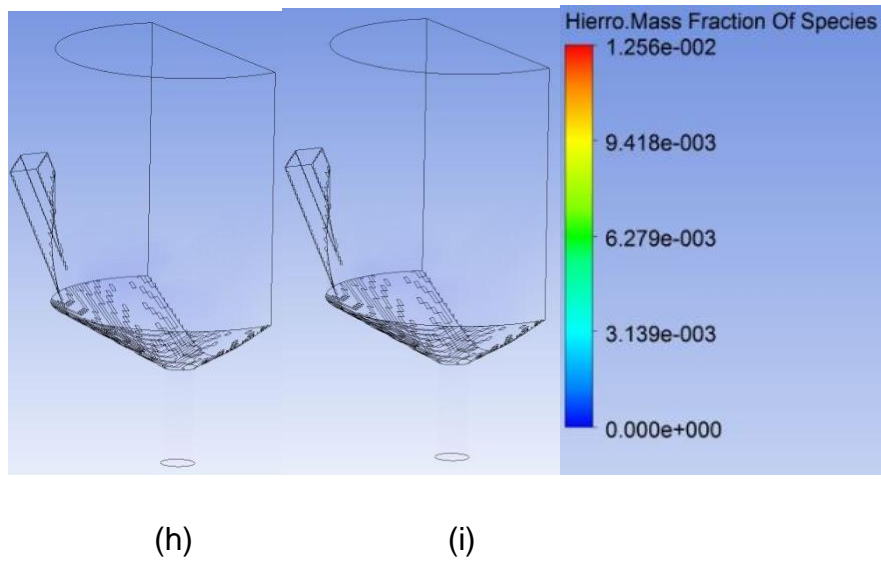
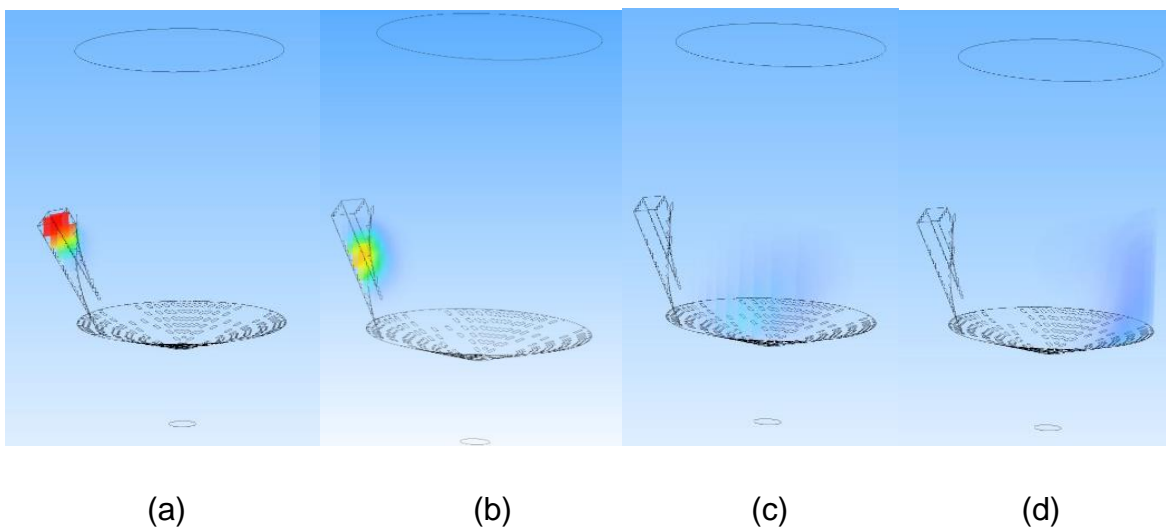
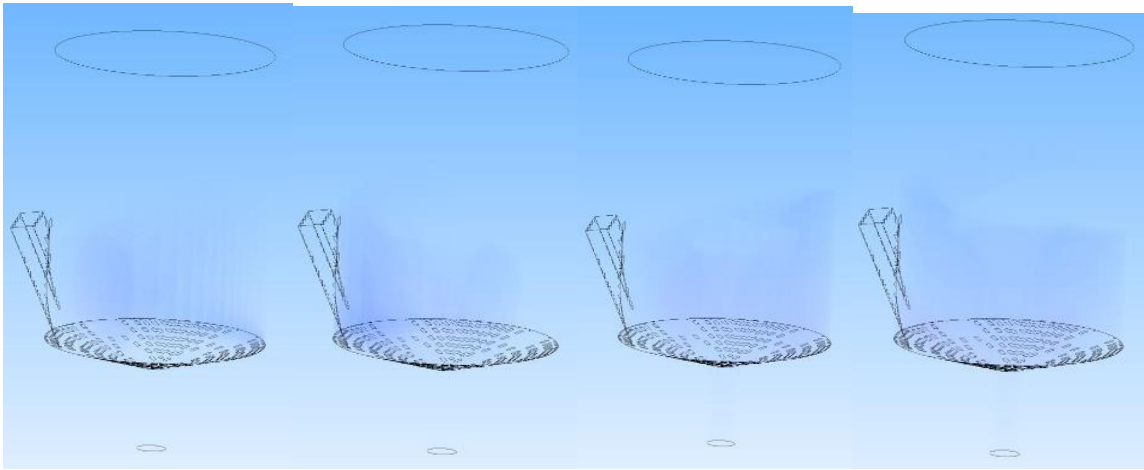


Figura 21.- Evolución con el tiempo de la concentración del soluto inyectado en un pulso a la entrada del dispositivo mezclador con barrera, (a) 0.05 segundos, (b) 0.1 segundos, (c) 0.3 segundos, (d) 0.5 segundos, (e) 0.7 segundos, (f) 0.9 segundos, (g) 1.4 segundos, (h) 1.8 segundos e (i) 2 segundos después de la inyección de trazador.



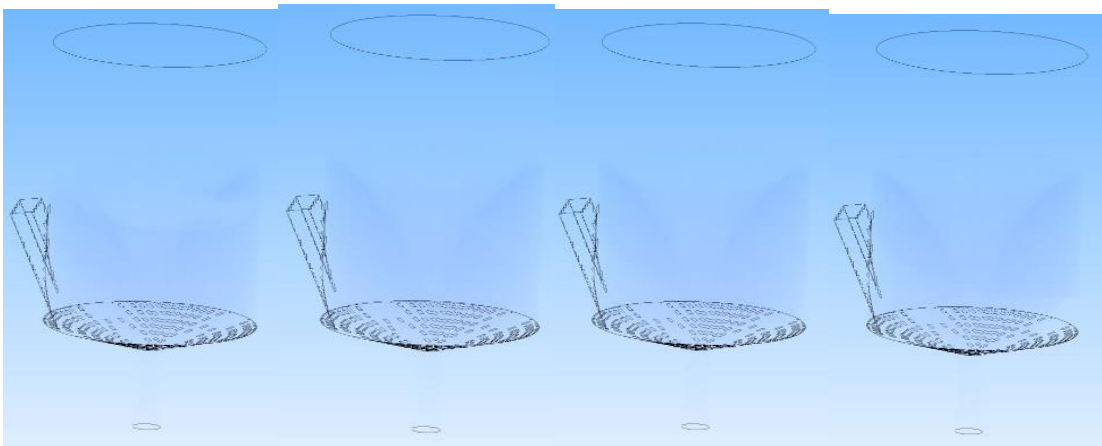


(e)

(f)

(g)

(h)

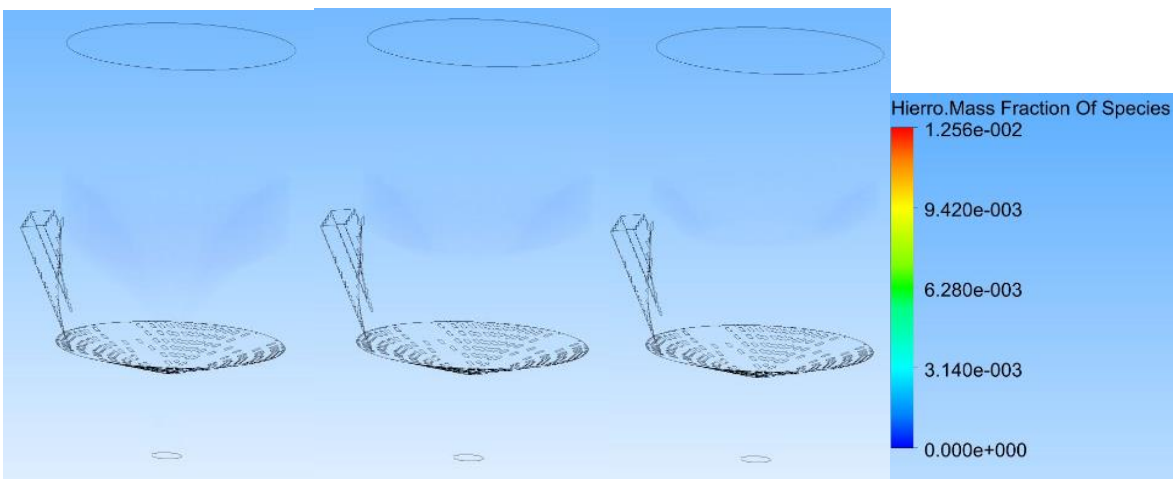


(i)

(j)

(k)

(l)



(m)

(n)

(o)

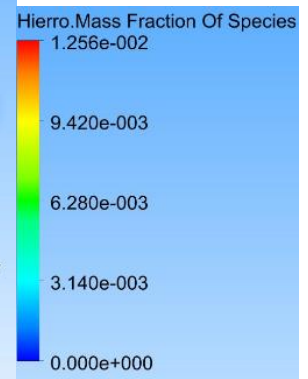


Figura 22.- Evolución con el tiempo de la concentración del soluto inyectado en un pulso a la entrada del dispositivo mezclador sin barrera, (a) 0.05 segundos, (b) 0.1 segundos, (c) 0.3 segundos, (d) 0.5 segundos, (e) 0.7 segundos, (f) 0.9 segundos, (g) 1.4 segundos, (h) 1.8 segundos, (i) 2.4 segundos, (j) 3.4 segundos, (k) 4.6 segundos, (l) 6 segundos, (m) 8 segundos, (n) 9 segundos y (o) 10 segundos después de la inyección de trazador.

En estas dos secuencias de imágenes de las **Figuras 21 y 22**, se aprecia la evolución del soluto inyectado en un pulso en la corriente de hierro en la entrada del metal líquido del dispositivo con y sin barrera respectivamente. Anteriormente, se discutió que el movimiento de partículas sin fusión en el dispositivo con barrera tienen un menor tiempo de permanencia del soluto mientras que el dispositivo sin barrera lo mantiene por un periodo más amplio (sección 3.4). Entonces, nuevamente el dispositivo sin barrera parece ser más apto y tener más potencial para la fusión de estas partículas. Una forma más cuantitativa de medir el potencial de mezclado de cada dispositivo es con las curvas “C” que se obtienen de este “reactor continuo” o dispositivo aleador de hierros.

3.7.- Curvas "C".

Curva "C" mezclador con barrera

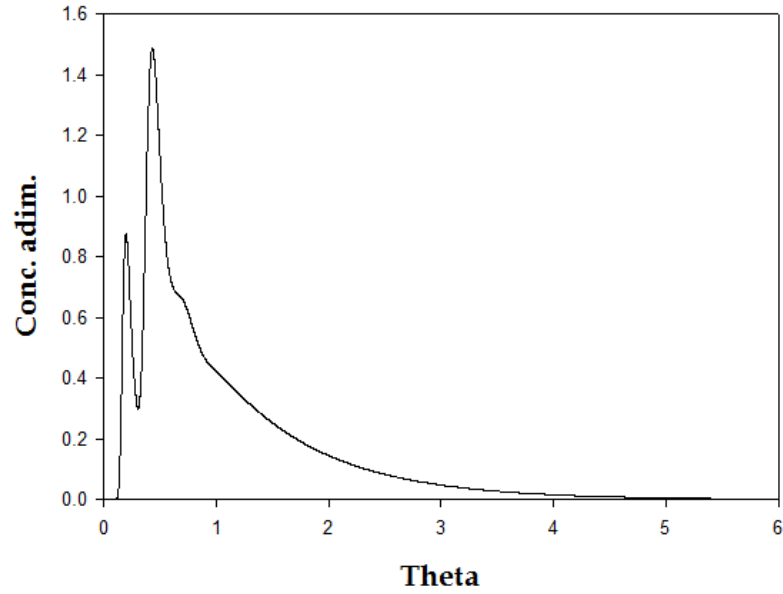


Figura 23.- curva "C" o curva RTD del mezclador con barrera.

Curva "C" mezclador sin barrera

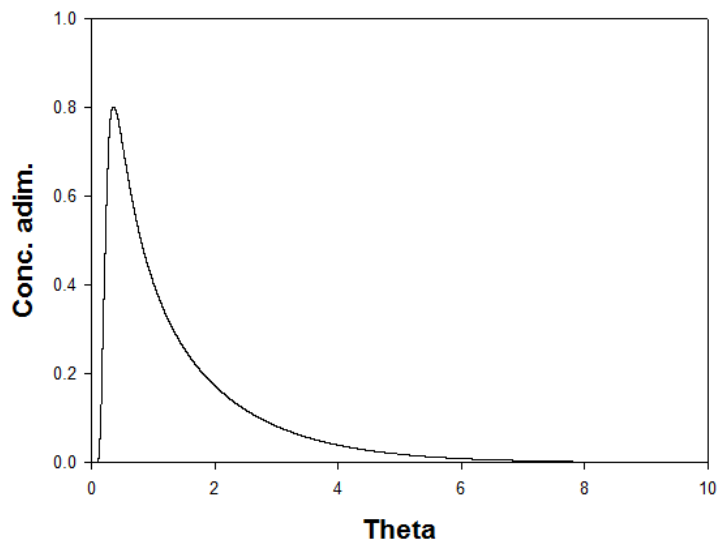


Figura 24.- Curva "C" o curva RTD del mezclador sin barrera.

Mezclador	% Volumen pistón	%Volumen muerto	%Volumen mezclado
con barrera	10.98	1.35	87.67
Sin barrera	9.29	0.000037	90.71

Tabla 4.-Porcentajes de volumen pistón, muerto y de mezclado.

En las **Figuras 23 y 24** se presentan las curvas “C” calculadas para los dispositivos con y sin barrera respectivamente. En el capítulo 1 se ha explicado que el comportamiento de estas curvas nos da información de cómo se mueve y se mezcla el soluto inyectado en los dispositivos. Estas curvas nos arrojan resultados de la proporción relativa de 3 tipos de flujos: flujo pistón, mezclado y muerto. En nuestro caso nos interesa que los dispositivos tengan poco flujo pistón y se maximice el flujo mezclado junto con el muerto, ya que en este caso no hay zonas muertas, por lo que el soluto que tarda más de dos veces el tiempo de residencia en salir, representaría una característica positiva del dispositivo. En la curva “C” del dispositivo con barrera que se muestra en la **Figura 23**. Se observan 2 picos: el primero provocado por el cortocircuito que surge porque la barrera lanza fluido hacia abajo cuando éste choca con la barrera. Este cortocircuito que se aprecia en la formación del vórtice y en la secuencia de dispersión de soluto y en la trayectoria de partículas, no es benéfica. Después de este primer pico se observa un segundo pico separado un cierto tiempo y que correspondería al soluto que escapa al dar ciertas vueltas en el dispositivo. Finalmente, el soluto va desalojándose poco a poco del dispositivo de manera asintótica. El análisis de los resultados arroja un porcentaje de volumen pistón de 10.98, un porcentaje de flujo muerto de 1.35 y un porcentaje de volumen mezclado de 87.67.

Por el contrario, en la curva “C” del dispositivo sin barrera mostrada en la **Figura 24**, se observa un solo pico menos pronunciado y luego la concentración comienza a disminuir lentamente con el tiempo. Recordemos que el comportamiento que tiende a tener el fluido dentro de este dispositivo es que

comienza a desplazarse un tanto hacia arriba durante la formación del vórtice para comenzar a bajar. Por eso, en este dispositivo el trazador tiene un recorrido muy parecido antes de ser detectado, mostrando un mayor tiempo de residencia al igual que se observó con el comportamiento de las partículas trazadoras sin fusión. El análisis de los resultados arroja un porcentaje de volumen pistón de 9.29, un porcentaje de volumen muerto de 0.000037 Y un porcentaje de volumen mezclado de 90.71. Es decir, mayor flujo mezclado y menor flujo pistón que el dispositivo con barrera, lo que confirma la superioridad de este dispositivo comparado con el dispositivo que si tiene barrera, estos resultados son mostrados en la **Tabla 4**.

4. CONCLUSIONES.

Se desarrolló un modelo matemático de la dinámica de fluidos en dos sistemas mezcladores de aleantes por el método del vórtice para hierros grises. Los dos dispositivos tienen las mismas dimensiones, pero uno de ellos tiene una barrera que se pensó inicialmente que favorecía el mezclado. El modelo se basa en resolver los principios de conservación de masa y momentum, así como la conservación de especies químicas sujetas a las condiciones de frontera adecuadas y el sistema de ecuaciones diferenciales parciales resultante se resolvió de manera numérica empleando el software CFD comercial FLUENT ANSYS 14 y el algoritmo numérico VOF. La estrategia de solución se planteó en dos etapas, en la primera se resolvió la dinámica de fluidos y en la segunda se hizo una simulación de mezclado para obtener las curvas RTD.

De dichas simulaciones se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La incorporación de una barrera en el dispositivo crea una mayor turbulencia además de modificar muy considerablemente los patrones de flujo dado que ya no se desarrolla un movimiento angular del líquido. Por esta distorsión en los patrones de flujo, no se puede desarrollar un vórtice, y esto propicia una disminución en el tiempo de residencia de las partículas, en bajar el mezclado del dispositivo y aumentar el flujo pistón, así como disminuir el volumen del hierro dentro de la cámara de reacción.
2. El vórtice que se desarrolla dentro del dispositivo sin barrera permite un movimiento angular dentro del dispositivo lo que favorece la formación estable del vórtice, propicia un mayor tiempo de residencia de las partículas trazadoras y del soluto, lo cual indicaría que tiene mayor potencial para poder hacer la fusión de los elementos aleantes.
3. La turbulencia generada en el dispositivo con barrera no beneficia el mezclado dentro del dispositivo como se esperaba, esto es en consideración de las curvas RTD obtenidas en las cuales el dispositivo sin barrera tiene un porcentaje de volumen de mezclado más alto.

4. Mediante los resultados que arrojaron ambas simulaciones (tanto de hidrodinámica como la del mezclado de soluto trazador) se afirma que el dispositivo sin barrera tiene un mayor potencial mezclador que el dispositivo con barrera.

REFERENCIAS.

- 1.-“46th Census Of World Casting Production”, Modern Casting. December 2012
- 2.- Apraiz, José. Fundiciones, Dossat, Madrid, 1963, p.p. 166.
- 3.-<http://www.calderasdelnorte.com.mx/pdf/Hornos.pdf>
- 4.-Olaf Ehrich, Y.-K.C.y.K.S., The melting of metal spheres involving the initially frozen shells with different material properties. Heat and Mass Transfer, 1976. Vol. 21(3), p. 341-349.
- 5.- S. Argyropoulos and R. I. L. Guthrie, The dissolution of Titanium in liquid steel, Metallurgical Transactions B, 1984, Vol. 15B: p. 47.
- 6.- B. Zhou , Y. Yang, and M. A. Reuter, “Modelling of melting behaviour of Aluminium metal in molten salt and metal bath, TMS (The minerals, metals & materials society).
- 7.- J. W. Holbeach and M. R. Davidson, Modelling the dispersion of dissolving spherical particles, Progress in Computational Fluid Dynamics, 2004, Vol. 4 (2), P. 78-91.
- 8.- Patente US 8,246,715 B2 (2012)
- 9.- Patente EP2100975A1 (2009)
- 10.- Patente WO 01/70382 AI (2001)
- 11.- Patente ES2089246T3 (1993)*
- 12.- Patente US 4, 484,731 (1984)
- 13.- Patente US 4, 298,377(1981)
- 14.- Octave Levenspiel, “Ingeniería de las Reacciones Químicas”, Editorial Reverté, Barcelono 1986, pp. 304.
- 15.- C.W Hirt, B.D Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics, Volume 39, Issue 1, January 1981, Pages 201–225.
- 16.- B.E. Launder, D.B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 3, Issue 2, March 1974, Pages 269–289.

- 17.- J. Szekely, "Fluid Flow Phenomena in Metal Processing", Ed. Academic Press, New York, 1979.
- 18.- Fluent Documentation, Chapter 6 "Boundary Conditions", Section 6.4: Velocity Inlet Boundary Condition".
- 19.- Y. Sahai y T. Emi: "Melt flow characterization in continuous casting tundishes". ISIJ international, vol. 36 (1996). 667
- 20.- Seaton Carlos E., R.A.A., Gonzalez Manuel y Manrique Milton, *The rate of dissolution of pre-reduced iron in molten steel*. Iron and Steelmaking, 1981. 23(14): p. 14 - 20.
- 21.- Q. Jiao, N.J.T., *Mathematical modelling of heat transfer during the melting of solid particles in a liquid slag or metal bath*. Canadian Metallurgical Quarterly 1993. 32(1): p. 75-83
- 22.- Shigeji Taniguchi, Shinji Ishiura, Munekazu Ohmi, A hot model study on the effect of gas injection upon the melting rate of solid sphere in a liquid bath. Transactions ISIJ, 1983, Vol. 23, p. 571 - 577.
- 23.- Nauman, J.D., *Analysis of heat transfer in silicate slags*, in *Department of Materials Science and Engineering*. 1972, Massachusetts Institute of Technology: Massachusetts. p. 238.
- 24.- O'Malley, R.J., *The heating and melting of metallic DRI particles in steelmaking slags*, in *Department of Materials Science and Engineering*. 1983, Massachusetts Institute of Technology: Massachusetts. p.368.
- 25.- Zhang, L., Modeling on melting of sponge iron particles in iron-bath. Steel Research, 1996. Vol. 67(11), p. 466-474.
- 26.- T. Abel Engh, C.J.S., Olle Wijk,, *Principles of metal refining*. 1 ed, ed. O.S. Publications. 1992. 344-374

INDICE DE FIGURAS.

CAPÍTULO 1.

Figura 1. Esquema de un horno de cubilote.

Figura 2. Esquema de un horno de inducción.

Figura 3.- descripción del problema de flujo de calor, R_o es el radio de partícula, $R(t)$ es el radio que alcanza la coraza, $T(R_o)$ es la temperatura de la partícula, T_f es la temperatura que alcanza la coraza T_{om} es la temperatura a la cual se encuentra el líquido. [5]

Figura 4.-Sección transversal de cilindro de titanio que muestra el titanio sin reaccionar, la coraza de acero y la zona de reacción entre estas dos.

Figura 5.- Muestra el incremento del radio en función del tiempo. [6]

Figura 6.- muestra el campo de velocidades en el líquido y el campo de velocidades de la pluma así como su forma y dispersión sin disolución en el caso de fuerzas boyantes negativas. [7]

Figura 7.- muestra el campo de velocidades que se desarrolla con fuerzas boyantes neutras. [7]

Figura 8.- Muestra el avance de la pluma cuando se tiene dispersión para el caso de fuerzas boyantes negativas. [7]

Figura 9.-Muestra la evolución de la pluma para el caso de las fuerzas boyantes neutras. [7]

Figura 10.- Curvas “C” en recipientes cerrados y con flujo continuo para flujo pistón, flujo mezclado y para un caso intermedio de flujo que es el que aplica en la mayoría de los casos.[14]

CAPÍTULO 2.

Figura 11. a) Esquema del dispositivo y sus dimensiones: β =ángulo de entrada, α =ángulo troncocónico, D = diámetro de la cámara de reacción, d = diámetro de salida, b = altura tubo de salida, H = altura del dispositivo. b) vista superior del dispositivo sin barrera. c) vista superior del dispositivo con barrera, n =distancia de la barrera al centro.

Figura 12.- dibujo del dispositivo mostrando dimensiones del dispositivo y las fronteras.

CAPÍTULO 3.

Figura 13 (a). Malla del mezclador sin barrera.

Figura 13 (b). Malla del mezclador con barrera.

Figura 14. (a) Vista frontal de los vectores de flujo del mezclador sin barrera, (b) vista superior de los vectores de flujo del mezclador sin barrera.

Figura 15. (a) Vista frontal de los vectores de velocidad en el mezclador con barrera, (b) vista superior de los vectores de velocidad en el mezclador con barrera.

Figura 16.- Evolución con el tiempo del vórtice en el dispositivo con barrera a los: (a) 1 segundo, (b) 3 segundos, (c) 5 segundos, (d) 7 segundos, (e) 9 segundos, (f) 11 segundos, (g) 13 segundos y (h) 15 segundos del inicio de la alimentación.

Figura 17.- Evolución del vórtice del fluido en el mezclador con barrera a los: (a) 0.1 segundos, (b) 0.2 segundos, (c) 0.3 segundos, (d) 0.5 segundos, (e) 0.7 segundos, (f) 0.9 segundos, (g) 1 segundo, (h) 2 segundos, (i) 4 segundos, (j) 6 segundos, (k) 8 segundos, (l) 10 segundos, (m) 12 segundos, (n) 14 segundos.

Figura 18.- Trayectorias de partículas trazadoras sin fusión en el dispositivo sin barrera, (a) vista frontal de las trayectorias, (b) vista superior de las trayectorias.

Figura 19.- trayectorias de partículas trazadoras sin fusión en el dispositivo con barrera, (a) vista frontal de las trayectorias, (b) vista superior de las trayectorias.

Figura 20. (a) Vista frontal de los contornos de turbulencia (Eddy viscosity) calculados a los 15 segundos en el mezclador sin barrera, (b) Vista superior de los contornos de turbulencia en el mezclador sin barrera, (c) vista frontal de los contornos de turbulencia en el mezclador con barrera, (d) vista superior de los contornos de turbulencia en el mezclador con barrera.

Figura 21.- Evolución con el tiempo de la concentración del soluto inyectado en un pulso a la entrada del dispositivo mezclador con barrera, (a) 0.05 segundos, (b) 0.1 segundos, (c) 0.3 segundos, (d) 0.5 segundos, (e) 0.7 segundos, (f) 0.9 segundos, (g) 1.4 segundos, (h) 1.8 segundos e (i) 2 segundos después de la inyección de trazador.

Figura 22.- Evolución con el tiempo de la concentración del soluto inyectado en un pulso a la entrada del dispositivo mezclador sin barrera, (a) 0.05 segundos, (b) 0.1 segundos, (c) 0.3 segundos, (d) 0.5 segundos, (e) 0.7 segundos, (f) 0.9 segundos, (g) 1.4 segundos, (h) 1.8 segundos, (i) 2.4 segundos, (j) 3.4 segundos, (k) 4.6 segundos, (l) 6 segundos, (m) 8 segundos, (n) 9 segundos y (o) 10 segundos después de la inyección de trazador.

Figura 23.- curva "C" o curva RTD del mezclador con barrera.

Figura 24.- Curva "C" o curva RTD del mezclador sin barrera.

INDICE DE TABLAS.

CAPÍTULO 1.

Tabla 1. Producción total de las fundiciones en 2011.

Tabla 2. Estudios de modelado matemático de fusión de partículas.

CAPÍTULO 2.

Tabla 3.- Propiedades físicas de los fluidos involucrados.

CAPÍTULO 3.

Tabla 4.- Porcentajes de volumen pistón, muerto y de mezclado.

LISTA DE SIMBOLOS.

C, concentración de especie química.

\bar{c} , concentración media.

C_θ, concentración adimensional.

D, diámetro de la cámara de reacción. (cm)

D_{c,l}, coeficiente de difusión del trazador en la fase líquida.

d, diámetro de salida. (cm)

g, constante gravitacional. (m/s²)

G, generación de energía cinética turbulenta.

H, altura total (cm)

k, energía cinética turbulenta

L, longitud de canal de entrada. (cm)

m_t, la masa del trazador.

P, presión

Q, flujo volumétrico. (m³/s)

Sc_t, número de Schmidt turbulento.

t, tiempo (s)

\bar{t} , tiempo medio de residencia. (s)

v, vector velocidad del fluido (m/s)

V volumen del mezclador ocupado por líquido (m³)

V_d/V, fracción de volumen muerto.

V_p/V , fracción de volumen pistón.

V_m/V , volumen de mezclado.

α , ángulo de la sección troncocónica.

β , ángulo de la entrada a la cámara de reacción.

ϵ , rapidez de disipación de la energía cinética turbulenta.

Θ , tiempo adimensional.

$\Delta\theta$, incremento de tiempo adimensional.

$\bar{\theta}$, tiempo medio de residencia adimensional.

μ , viscosidad media. (Kg/ms)

μ_{eff} , viscosidad efectiva. (Kg/ms)

μ_t , viscosidad turbulenta. (Kg/ms)

ξ , fracción de volumen de marcador.

ξ_{liq} , fracción del volumen del líquido.

ξ_{gas} , fracción del volumen de gas.

ρ_g , densidad del gas. (Kg/m³)

ρ_{liq} , densidad del líquido. (Kg/m³)

σ_ϵ , σ_k , números de Prandtl turbulentos para k y ϵ respectivamente.