



ANÁLISIS DE TRANSITORIOS DENTRO DEL TUNDISH EN LÍNEAS DE COLADA CONTINUA PARA LA FABRICACIÓN DE ACERO

[*] David Santamaría López, [**] Jesús Manuel Fernández Oro
[*] Alumno; [**] Tutor(es)

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.
Campus de Viesques, 33271. Gijón (Asturias), Spain.
UO168731@uniovi.es

RESUMEN

Actualmente, los procesos de colada continua en la fabricación del acero están muy condicionados por la producción de aceros de composiciones diferentes, lo que produce una gran cantidad de acero mezclado. Debido a los cambios en la demanda de los clientes, los productores se están viendo forzados a producir, cada vez más a menudo, tiradas cortas de aceros con composiciones muy distintas. Esto implica que los fabricantes necesitan desarrollar métodos prácticos que les permitan conocer donde comienza y acaba la región de acero mezclado, para poder clasificar de manera exacta la calidad del acero fabricado. El objetivo final es evitar tener que clasificar acero de alta calidad como de calidad media o baja por no conocer con fiabilidad las zonas de mezcla.

Los primeros estudios fueron realizados por Huang y Thomas, que introdujeron un modelo 1D que permite estimar la zona de mezcla durante la transición de un tipo de acero a otro. Este modelo obtuvo una notable popularidad gracias a su concepción, que permitía obtener datos en tiempo real, aunque asumiendo una condición de mezcla perfecta en el tundish. Recientemente, Cho y Kim han introducido una modificación en ese modelo para tener en cuenta el transitorio inicial anterior a la consideración de mezcla perfecta. Sin embargo, ninguno de los modelos resuelve los transitorios de operación que se producen durante el cambio de cuchara, y que pueden llegar a suponer variaciones de hasta el 25% del volumen de acero confinado en el tundish. Además, estos modelos se basan en parámetros característicos, función de la geometría y elementos de cada tundish que necesitan ser calibrados de manera experimental, normalmente a partir de modelos a escala en agua. De forma complementaria, otros investigadores han tratado de desarrollar modelos numéricos para estudiar el comportamiento del flujo en el interior del tundish, si bien normalmente en condiciones estables de funcionamiento, con

esquemas normalmente estacionarios y empleando hipótesis simplificadoras como son los modelos isotermos.

Se propone por tanto desarrollar un modelo CFD que caracterice el flujo del acero en el interior del tundish en condiciones estacionarias, calculando las curvas RTD características del mismo, simulando varios caudales de operación, así como imponiendo varios flujos de calor, para tener en cuenta las pérdidas térmicas que sufre el acero con el ambiente.

También se estudiará todo el proceso transitorio del cambio de cuchara, implementando un modelo bifásico que tenga en cuenta la disminución del nivel de acero y su posterior recuperación. A partir de las curvas de concentración obtenidas, se desarrollará un modelo que permita conocer el valor de la concentración de acero nuevo a la salida en tiempo real.

INTRODUCCIÓN

En los procesos de fabricación de acero por colada continua, el acero líquido proveniente del horno es normalmente vertido desde una cuchara intercambiable a un contenedor de estabilización denominado “tundish”. En este contenedor, el flujo de acero es distribuido hacia las bocas de salida, proporcionando acero a cada una de las líneas de moldes que componen el sistema de colada continua (Figura 1).

Tradicionalmente, la misión del tundish era únicamente de depósito de expansión, absorbiendo los transitorios en el suministro de acero que generan los cambios periódicos de las cucharas y poder distribuir el flujo hacia cada uno de los moldes. Actualmente, se aprovecha para que actúe como reactor de mezcla, consiguiéndose una mejor uniformización de las condiciones del acero a su salida [1]. El flujo de acero, la

distribución de temperaturas y la concentración de elementos de aleación a la salida del tundish es clave para el correcto devenir de la colada.

Además, si se consiguen tiempos de residencia altos del acero en el tundish, es posible que las inclusiones o impurezas arrastradas precipiten o se evaporen sin que se incorporen a la colada continua. Esto último dependerá de la química del acero (velocidades de reacción) pero en buena parte de la geometría del tundish y de sus parámetros de funcionamiento [2]. Por tanto, una buena homogeneización del acero líquido a la salida y un aseguramiento de los procesos metalúrgicos presentes en el tundish, serán tanto mejores cuanto más óptimo sea su diseño.

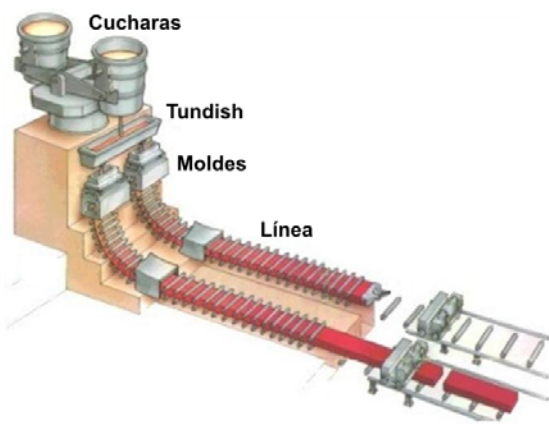


Figura 1. Esquema de colada continua

Salvo en los cortos periodos de tiempo en los que se produce el cambio de cuchara, el tundish opera con un nivel de acero prácticamente constante, suministrando un flujo estable de acero líquido a los moldes que se encuentran debajo. En el proceso de transferir el acero desde la cuchara hasta el molde, el acero líquido que pasa a través del tundish permanecería en su interior el llamado tiempo teórico de residencia, definido como el volumen del tundish dividido por el caudal volumétrico de acero que se vierte en el mismo.

Ese tiempo teórico de residencia se sitúa en torno a los 10 minutos en la mayoría de los tundish industriales, lo que permite que se lleven a cabo operaciones de separación de impurezas, control de temperaturas, etc. Sin embargo, ese tiempo teórico de residencia no es exactamente igual para todas las partículas, ya que unas tardarán más tiempo en atravesar el tundish que otras, por lo que se define la RTD o distribución del tiempo de residencia, que da idea del tiempo medio de residencia de cada partícula de acero en el tundish. La RTD es una curva estadística, por cuanto no todas las partículas hacen el mismo recorrido ni tardan el mismo tiempo en ir de la entrada a la salida del depósito. Obviamente, las dimensiones geométricas del tundish y todas aquellas barreras presentes juegan un papel primordial en la morfología de la curva.

Una forma de obtener experimentalmente la curva RTD en un tundish, es mediante técnicas de medida on-line, como son la colorimetría, conductimetría y la espectrofotometría [3]. Se inyecta un trazador en la entrada del tundish en el instante de tiempo inicial, $t=0$, y se mide la concentración del mismo a la salida del tundish de manera continua mediante una de las técnicas mencionadas. Se suele representar la concentración frente al tiempo, y en la mayoría de los estudios se representa de forma adimensionalizada, donde la concentración se normaliza con respecto a la concentración teórica alcanzada en una mezcla perfecta, y el tiempo se adimensionaliza con respecto al tiempo teórico de residencia.

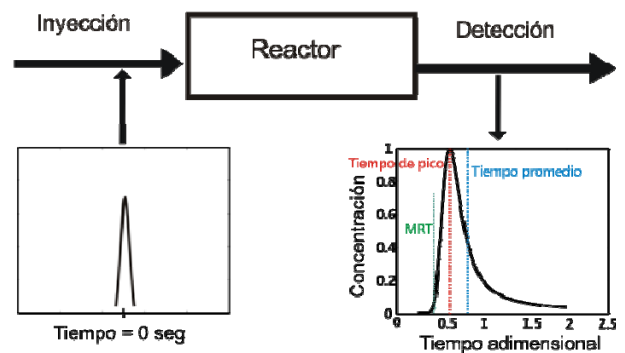


Figura 2. Determinación de la curva RTD

A partir de la curva RTD obtenida se puede conocer una serie de parámetros que caracterizan el comportamiento del acero en el interior del tundish, como son el tiempo mínimo de residencia (MRT), el tiempo de pico o el tiempo promedio de residencia, representados en la curva de la figura 2. El tiempo mínimo de residencia o MRT, se define como el tiempo adimensional en el que se alcanza una concentración a la salida de 0,1%. Valores altos de este parámetro significan un aumento de volumen sin mezclar (*plug volume*), lo que resulta interesante para un tundish que trabaje con aceros de muy distinta calidad, donde no interesa que se mezclen en la transición de uno a otro. El tiempo de pico se define como el tiempo adimensional en el que se alcanza la mayor concentración, e implica que si se tienen valores con un pico muy pronunciado, la mayor parte del volumen es de tipo *plug volume* (volumen sin mezclar). Por último el tiempo promedio de residencia se define como el tiempo adimensional que deja a cada lado de la curva el 50% del área subtendida por la distribución, y ofrece una idea de la cantidad de impurezas que se pueden evaporar o precipitar al fondo del tundish. Normalmente, es preciso llegar a un compromiso entre los tres valores, para obtener acero con pocas impurezas pero sin comprometer demasiado el grado de mezcla de distintos aceros.

Por otra parte, existe una notable cantidad de bibliografía que analiza el tipo de flujo que está presente en un tundish industrial. Dada la complejidad del fenómeno y de la existencia de metalurgia del acero, tradicionalmente se ha desacoplado la

fluidodinámica del proceso con respecto a las reacciones químicas y metalúrgicas presentes en el tundish.

Básicamente, la mayoría de estudios analizan las características del flujo, definiendo los patrones de flujo y los niveles de turbulencia. Se determinan los tiempos de residencia del acero en el tundish y se observan cómo diversos elementos secundarios (introducción de barreras, relaciones de aspecto, receptáculos intermedios, etc.) modifican la distribución de velocidades y la RTD. En este sentido, en [1] se hace una profunda revisión de las principales líneas de investigación y de las metodologías normalmente empleadas en estos estudios.

Existen dos líneas básicas de actuación: vía experimental y vía numérica. Las condiciones extremas de funcionamiento, con temperaturas superiores a 1500°C, obligan a que los ensayos experimentales se realicen sobre maquetas de agua, normalmente a escala. En ellos se estudian la influencia de números adimensionales como el Froude (superficie libre), el Peclet (difusividad de colorantes) o el Richardson (flotabilidad por gradiente térmico), [4-7]. También se analizan nuevos diseños, introduciendo elementos de control del flujo, como barreras, *dams*, *weirs*, *impact pads*, etc. (Figura 3), y se comparan las curvas RTD obtenidas para cuantificar las mejoras esperadas con esas modificaciones.

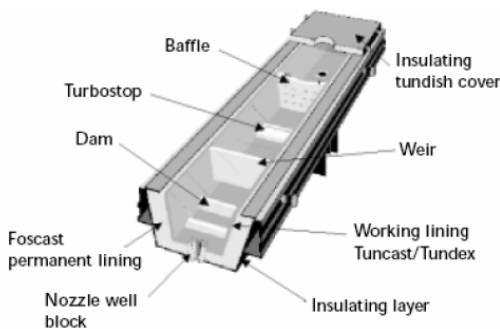


Figura 3. Dispositivos de control de flujo

A raíz de la mejora de los medios computacionales, la vía numérica ha experimentado un notable desarrollo en la última década. Básicamente, se plantea el análisis y resolución de las ecuaciones de flujo en el interior del tundish, obteniéndose la curva RTD y otros parámetros y variables. Los modelos que se emplean pueden ser de varios tipos, en función de la complejidad que se le quiera implantar a la modelización. Los más habituales son el modelo monofásico sin temperatura, [1-3], para un análisis puramente hidrodinámico, resolviéndose las ecuaciones de conservación de la mecánica de fluidos; el modelo monofásico con temperatura, [5] y [8], que permite tener en cuenta los efectos de flotabilidad por diferencias de densidades (hipótesis de Boussinesq); el modelo bifásico con superficie libre, [4] y [6], que calculan la superficie libre usando algoritmos específicos (VOF, SOLA-VOF/SURF), utilizado para observar el transitorio del cambio de cuchara; y

por último el modelo bifásico con temperatura, que apenas ha empezado a ser utilizado por su complejidad de implementación y la difícil contrastación experimental que valide su uso. Un nuevo aspecto que se está empezando a utilizar es el de transporte de partículas [9] y [10], donde se usan modelos eulerianos-lagrangianos que analizan el devenir de las partículas interaccionando con el flujo de acero líquido.

La práctica totalidad de estos estudios se hacen sobre modelos tridimensionales. Se ha constatado que las relaciones de aspecto de los tundishes (W/L), así como las posiciones relativas entre la entrada y las salidas, confieren una fuerte tridimensionalidad al flujo. Por tanto, modelizaciones longitudinales 2D no son capaces de recoger con fidelidad el comportamiento global del tundish, desaconsejando su uso, [2].

Finalmente, es habitual la utilización de una ecuación escalar de transporte no reactiva [2] y [8], que simule el efecto de un trazador inyectado a la entrada del dominio. A través de este sencillo postproceso, se puede evaluar a lo largo del tiempo la concentración del escalar a la salida del dominio. De esta forma indirecta, se obtiene la curva RTD si se simula la inyección de un pulso de trazador, o la conocida como curva de concentración o C-curve si se introduce trazador de forma continua, sirviendo ambas curvas como punto de partida para el análisis de mezclas en reactores. La curva de concentración se emplea para caracterizar la respuesta de un tundish ante la entrada de acero nuevo, ya que indica la evolución en el tiempo del acero nuevo en la salida, (Figura 6).

Reseñar que en la mayoría de los estudios mencionados, es práctica habitual combinar ambas tecnologías, numérica y experimental, con la doble finalidad de reducir el número de ensayos y las pruebas de laboratorio, así como de validar y contrastar los resultados numéricos conseguidos.

Los parámetros que más influyen en el comportamiento fluidodinámico del tundish son la propia geometría del tundish, el nivel de acero líquido, la posición del *shroud* (buza o inyector de entrada), los elementos intermedios existentes (*weirs*, *dams* o *impact pads*) y el flujo másico. En función de todos ellos, se dan en mayor o menor medida una serie de comportamientos del flujo que vienen recogidos en la literatura especializada, [4] y [8]. Las principales características y patrones de flujo en el interior del tundish son:

- Inyección del chorro desde la buza o *shroud*: el chorro impacta con el fondo del tundish, fluyendo acto seguido hacia la superficie, donde genera ondas y turbulencia. La expansión del chorro genera una depresión que hace disminuir la superficie libre alrededor del tubo inyector, pudiendo incluso romperse la capa protectora en esa zona. Aquí es crítico el nivel de acero y la presencia o no de inhibidores de turbulencia. Además, el impacto va generando erosión en la solera del depósito.
- Vórtices contrarrotantes: el chorro de acero inyectado genera un sistema de vórtices contrarrotantes que se van mitigando conforme el flujo avanza hacia la salida (SEN).

Este efecto hace aumentar notablemente el nivel de vorticidad en el tundish.

- Flujos en cortocircuito: aprovechando los laterales del tundish, parte del flujo evita las zonas de recirculación interiores, inducidas por los vórtices contrarrotantes, para desviarse rápidamente hacia el SEN, perdiéndose la homogeneización del flujo.
- Zonas muertas: sobre todo en las esquinas del tundish, donde se acumulan “volúmenes muertos” de fluido con tiempos de residencia muy altos.
- Vórtices en forma de embudo: bajo ciertas condiciones, es posible que la zona intermedia de recirculación amplifique el efecto de los vórtices contrarrotantes generando vórtices muy importantes en la superficie libre que rompan la capa protectora o que haga incluir parte de sus polvos en el flujo interno de acero.
- Vórtices de salida: es un efecto que viene determinado por Coriolis que se manifiesta a la salida del tundish (SEN). Este efecto limita el caudal de salida, por cuanto valores excesivos alteran la homogeneidad del flujo de entrada al molde.
- Turbulencia: de especial relevancia en la zona de entrada, por lo que se suelen incorporar dispositivos inhibidores de turbulencia, como son los *turbostoppers*.

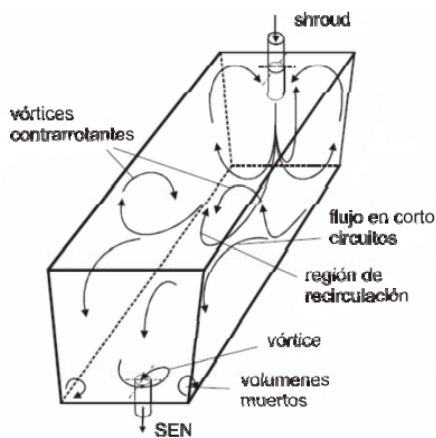


Figura 4. Tipología clásica del flujo para un tundish de una sola salida

Todas estas referencias indican que la mayoría de las simulaciones numéricas realizadas se centran en describir los patrones de flujo del acero en el interior del tundish. Sin embargo, a pesar de todas las variables e información que se puede obtener de las simulaciones, suponen unos costes computacionales en tiempo importantes, lo que impide que se puedan implementar on-line en los procesos de colada continua. Esto es particularmente crítico cuando se pretende determinar el grado de la mezcla y el estado en que se encuentra el acero que fluye por los moldes. Como consecuencia de esto, se han

desarrollado otras metodologías que permiten a los fabricantes conocer de una manera fácil e inmediata las condiciones de la mezcla a la salida del tundish. Así, en el año 1996 se desarrolló el primer modelo por Huang y Thomas [11] y [12], posteriormente modificado por Cho y Kim [13].

En la presente investigación se pretende desarrollar un nuevo modelo mejorado con respecto a los anteriores, que tenga en cuenta el efecto del transitorio producido por el cambio de cuchara en el vertido de acero nuevo. Para ello, primero se caracterizará el flujo estacionario dentro del tundish, obteniéndose las curvas RTD y los parámetros que de ellas se desprenden. Se estudiará la influencia del caudal de inyección sobre el flujo, realizándose 7 casos distintos, con caudales comprendidos entre 3.75 ton/min y 6.75 ton/min, que representan el 85% de las situaciones reales de operación del tundish estudiado. También se analizará la influencia de la convección natural dentro del tundish, determinando si las diferencias de densidad producidas por diferencias de temperatura son despreciables sobre un modelo no isoterma. Una vez se tengan todos los parámetros del flujo en el tundish, se desarrollará el modelo on-line modificado, que permita calcular el valor de la concentración de acero nuevo a la salida del tundish en cada instante de tiempo.

GEOMETRÍA DEL TUNDISH Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN

La geometría del tundish corresponde con un depósito típico para este tipo de aplicaciones industriales, en particular, se han tenido en cuenta las dimensiones características del tundish de la línea LDIII que la empresa Arcelor-Mittal dispone en su factoría de Avilés.

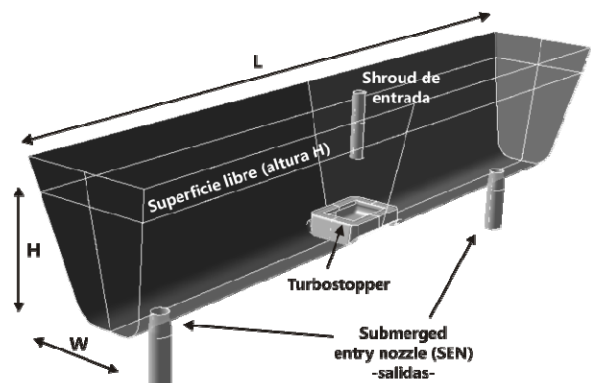


Figura 5. Geometría del tundish

El tundish presenta dos salidas simétricas, situadas aproximadamente a 3 metros respecto de la buza de entrada (Figura 5), así como un turbostopper comercial para reducir la turbulencia de entrada del chorro. La cantidad media aproximada de acero en el interior del tundish en condiciones estacionarias oscila entre 48 y 52 toneladas, lo que corresponde

a un nivel aproximado de 1.2 metros de acero. La tabla 1 resume las principales características geométricas del tundish.

Volumen total del tundish, V_T	11.67 m ³
Volumen nominal de acero, V_H	8.34 m ³
Relación de aspecto transversal, W/L	0.169
Relación de aspecto vertical, H/L	0.165
Sección transversal	1.108 m ²
Diámetro hidráulico, D_H	1.03 m
Diámetro de buzas, d_{SH}	102 mm
Diámetro de salidas, d_{SEN}	200 mm
Inclinación de las paredes	10°

Las condiciones de operación del tundish varían entre 3.75 y 6.75 ton/min de acero líquido, dependiendo de la sección del desbaste y de la velocidad de colada. En el presente estudio se han simulado siete caudales diferentes de operación del tundish, que representan aproximadamente el 85% de las situaciones habituales de funcionamiento del tundish. Para el caso de un caudal típico de 5.25 ton/min ($Q_N=0.012$ m³/s), los parámetros adimensionales que se obtienen son los representados en la tabla 2.

Tiempo característico, V_H/Q_N	670 s
Nº Reynolds según radio hidráulico, Re_{Dh}	12700
Nº Reynolds según radio del chorro, Re_{jet}	171000
Nº Richardson, Gr/Re^2_{Dh}	400
Nº Froude, u^2/gH	1×10^{-5}

Donde u representa la velocidad media en la sección transversal del tundish, calculada como el cociente entre el flujo volumétrico y la sección transversal.

MÉTODO NUMÉRICO

Se ha empleado el paquete comercial FLUENT 6.3 [11] para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes mediante la técnica numérica de volúmenes finitos, incluyendo el algoritmo Volume-of-Fluid (VOF), que permite calcular la evolución de la superficie libre en un esquema bifásico y así modelar la variación de nivel de acero en el tundish durante el cambio de cuchara.

Modelo matemático. El método de los volúmenes finitos se utiliza para discretizar las ecuaciones, pasándose de un dominio continuo a un espacio discretizado en pequeñas celdas. Las características básicas del modelo se pueden resumir en:

- Simulación a escala 1:1 del tundish, con un dominio doblemente simétrico (longitudinal y transversal) gracias a la geometría y a las condiciones de operación del tundish.
- Resolución no estacionaria, con dos fases implicadas, acero y aire, y cálculo de la variación del acero.
- Flujo confinado, estratificado (calculado gracias al algoritmo VOF), con superficie libre y gobernado por fuerzas de flotabilidad (gravedad).
- Flujo turbulento a la entrada, chorro de descarga de acero líquido.
- Resolución de una ecuación adicional de transporte de un escalar no reactivo, para determinar las curvas RTD y las condiciones de mezcla a la salida cuando se inyecta acero nuevo, mediante las curvas de concentración.

Las discretizaciones espaciales y temporales empleadas para el modelo han sido de segundo orden para la ecuación de momento, con esquema “*body-forced weighted*” para la presión y esquema CICSAM para la resolución del algoritmo explícito VOF, que se recomienda para flujos con altas relaciones de viscosidades entre las fases [11], incrementando la estabilidad numérica. El acoplamiento velocidad-presión se simuló mediante el algoritmo PISO (recomendado en simulaciones transitorias con flujos multifásicos), empleándose con discretizaciones de primer orden para los términos temporales y para la ecuación de transporte. A pesar de la difusividad asociada a estos esquemas de orden inferior, la óptima discretización espacial elegida, así como la adecuada elección de un paso temporal bajo, permite en todo momento tener controlada la difusividad numérica del modelo. Además, la mayoría de los factores de relajación de las ecuaciones tuvieron que reducirse a valores entre 0.2 y 0.5 para mejorar la convergencia.

En la formulación del algoritmo VOF, los campos de todas las variables y propiedades son comunes para las fases, siendo conocido el término de la fracción volumétrica de cada fase en cada celda. Para calcular la interfase se resuelve la ecuación de continuidad de la fracción volumétrica de una fase (en este caso del acero). Ésta ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (1)$$

Como no pueden existir regiones sin ninguna fase, las variables comunes y las propiedades de cualquier celda se calculan según las fórmulas:

$$\rho = \alpha \rho_s + (1 - \alpha) \rho_a \quad \mu = \alpha \mu_s + (1 - \alpha) \mu_a \quad (2)$$

Por lo tanto, sólo se resuelve una ecuación de momento, común a todas las fases, compartiendo un único campo de velocidades y presión.

Para tener en cuenta la zona de mezcla y la evolución del chorro a la entrada del tundish, dadas las condiciones del flujo en esa zona, es preciso introducir un modelo de turbulencia que simule las importantes inestabilidades y pérdidas de energía cinética del chorro en dichas zonas. De entre todas las posibilidades, se ha introducido un modelo de dos ecuaciones k-epsilon, tipo RNG, tal y como sugieren la mayoría de de las publicaciones encontradas en la literatura. Para resolver estas ecuaciones numéricamente, se ha empleado una discretización de segundo orden.

Mallado. Se ha empleado un mallado estructurado, con patrones progresivos para incrementar el número de celdas en la zona de la superficie libre, así como en las proximidades de la entrada y la salida del modelo, que es donde se producen mayores gradientes de las distintas variables del flujo. Se realizaron unos tests preliminares, empleando diversas densidades de malla en un modelo reducido 2D, para obtener una relación adecuada entre la discretización espacial del modelo y el coste computacional (en tiempo) de la simulación.

Ha de tenerse en cuenta que si la malla es extremadamente densa, las distribuciones espaciales obtenidas serán muy buenas, pero será necesario emplear pasos temporales muy bajos y se requerirán muchas iteraciones para obtener la solución final convergida. Por el contrario, mallas muy bastas pueden proporcionar descripciones espaciales muy pobres e incluso derivar en malas predicciones o incluso en soluciones no realistas.

Para el estudio de sensibilidad se probaron cuatro densidades de malla diferentes, con el número total de celdas oscilando entre 5000 y 50000. En todos ellos se definió un patrón progresivo, concentrándose las celdas más pequeñas en la zona de la entrada, en la superficie libre y en la zona de salida, asegurando también un valor de y^+ superior a 30 en los contornos sólidos.

El efecto de la densidad de malla en la predicción del flujo en el tundish se evalúa en la figura 6. Para todos los mallados testados, y con un caudal de operación de 5.25 ton/min, se utiliza el flujo estacionario para resolver la ecuación de transporte de un escalar no reactivo que se introduce desde la entrada. Este escalar, que representa la concentración de acero nuevo, se monitoriza a la salida en todos los casos para estudiar la influencia de la malla en el resultado. Se observa una cierta independencia del comportamiento del escalar con respecto a la densidad de malla. De todas formas, para mallas más gruesas, se observa un mayor número de irregularidades e inestabilidades en la predicción de la concentración, especialmente según se aproxima a la zona asintótica. Como consecuencia de esto, se ha determinado que una malla de tipo intermedio, correspondiendo a 20000 celdas, ofrece un comportamiento óptimo entre precisión y ahorro computacional para predecir la evolución de acero a la salida.

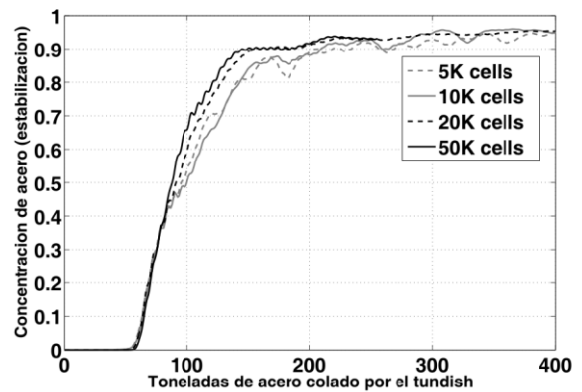


Figura 6. Estudio 2D de sensibilidad del mallado

Con el tamaño de celda proporcionado por el estudio de la densidad de malla, se construyó el mallado final sobre la geometría tridimensional doblemente simétrica (Figura 7). En particular, se utilizó la malla bidimensional elegida y se extruyó transversalmente para cubrir el eje Z. Para evitar que el número final de celdas se elevase en demasía, se empleó también una malla progresiva transversalmente, dando lugar a una celda cada 30 mm aproximadamente. Por tanto, el número de celdas final es de unas 150000. Con esta discretización, se obtuvo un valor aproximado de y^+ de 30 en todos los contornos.

En la figura 7 se observa el mallado progresivo, junto con las condiciones de contorno utilizadas, explicadas a continuación. También se muestra un detalle del interior del mallado, observándose el turbostopper, la buza de entrada y la boquilla de salida.

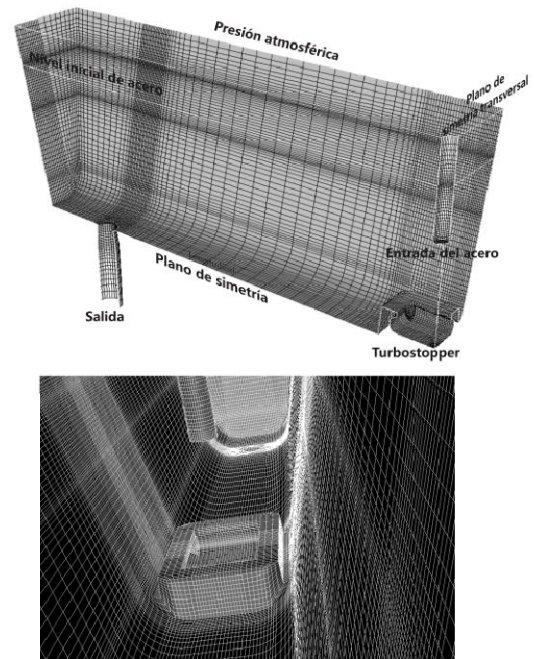


Figura 7. Mallado de 1/4 de la geometría. Detalle del interior del mallado

Condiciones de contorno. Las distintas condiciones de contorno utilizadas se representan en la figura 7. Se define una condición horizontal de presión (atmosférica) para la superficie superior del modelo, por donde debe entrar el aire en el dominio cuando esté descendiendo el nivel de acero, y salir cuando se recupere. Esta condición ha de ser horizontal para poder dar un valor constante de presión. A la entrada de acero, se ha definido una velocidad uniforme que se corresponde con el caudal de simulación. Además, se han definido las magnitudes turbulentas típicas (k y ϵ) a la entrada, como valores constantes y relacionados con la velocidad de entrada, según se sugiere en [2] y [14].

$$k = 0.01 \cdot v_{\text{entrada}}^2 \quad \epsilon = \frac{2R^{1.8}}{D_{\text{entrada}}} \quad (3)$$

En la superficie de salida también se define una velocidad uniforme pero de valor negativo, indicando que el flujo es saliente del dominio. El resto de contornos son definidos como pared, lo que supone una condición de velocidad tangencial nula en la superficie, a lo que se añade una ley logarítmica standard, para tener en cuenta el efecto de la capa límite en los diversos contornos sólidos del tundish.

En las simulaciones en las que se resuelva la ecuación de la energía, se fijan unos flujos de calor en las paredes, que simulan el enfriamiento que sufre el acero desde que se vierte desde la cuchara hasta que se distribuye a los moldes. Se configuraron varios casos con flujos de calor variables, incluyendo los referenciados en la bibliografía ([15], [16]).

Procedimiento numérico y estabilidad. La resolución del modelo se inicial calculando el estado del tundish en régimen permanente, cuando opera con un flujo de entrada y nivel del acero constante. Para obtener esa solución inicial, se definen las celdas con presencia de acero y se resuelven las ecuaciones, empleando un modelo implícito de primer orden en los términos temporales. No se empleó directamente una simulación estacionaria debido a una excesiva difusión numérica asociada a la definición de la interfase en los esquemas implícitos.

Obtenido el régimen estacionario, se comienza el cálculo del transitorio debido al cambio de cuchara. Este transitorio, que se resuelve usando un esquema explícito de primer orden, se divide en tres etapas diferentes (Figura 8).

La primera etapa debe resolver el descenso del nivel de acero en el tundish mientras se hace el cambio de cuchara. Para ello, se anula la entrada de acero al tundish pero manteniendo constante el caudal a la salida. Se debe iniciar con pequeños pasos temporales, del orden de 10^{-3} segundos, para ir progresivamente en aumento. Esta primera etapa o Fase 1 dura exactamente 150 segundos, correspondientes al tiempo necesario para realizar el cambio de cuchara.

Una vez completada esta fase, se inicia una segunda etapa o Fase 2 en la que se resuelve la ecuación de transporte para el

escalar, ya que el acero que se comienza a introducir corresponde al tipo de acero nuevo. Esta segunda fase se hace inyectando caudal de acero a una tasa de 9 ton/min, siempre superior al valor de salida en el tundish, garantizando de esta forma que se recupere el nivel lo antes posible. La duración de esta fase depende de la diferencia entre el caudal de relleno con respecto al caudal de salida (variable entre 3.75 y 6.75 ton/min según el caso simulado), normalmente entre 100 y 450 segundos de simulación, hasta que se recupere el nivel inicial de acero.

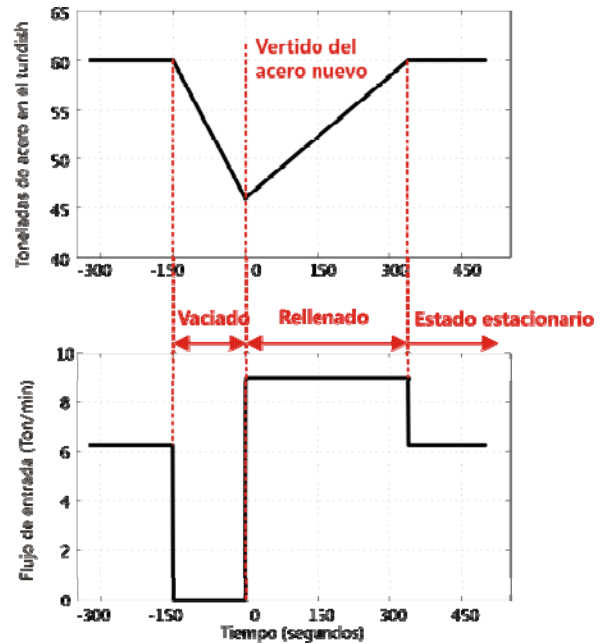


Figura 8. Fases de operación del tundish durante el cambio de cuchara

Finalmente, se completa la simulación, volviendo a fijar el caudal de entrada al mismo valor que el de salida una vez recuperado el nivel. Esta fase 3 se simula hasta alcanzar los 2000 segundos aproximadamente, para que el valor de concentración del acero nuevo a la salida presente valores superiores a 0.9 (90%) y se pueda considerar que se alcanza de nuevo el régimen estacionario. En total, el proceso de simulación de cada caudal estudiado precisó de unas 250 horas de cálculo para completar la secuencia entera con cambio de cuchara.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Patrón de flujo del acero y análisis térmico. Esta primera parte se centra en caracterizar el patrón de flujo en el interior del tundish para la situación estacionaria, previa al cambio de cuchara. Un análisis detallado del flujo revela que los resultados obtenidos en la simulación numérica predicen correctamente el comportamiento general mencionado en la literatura, es decir, se confirma la existencia de la típica

estructura de vórtices contrarrotantes derivados del impacto y posterior apertura del chorro de acero, la formación de pasillos laterales o cortocircuitos, con flujo de acero a alta velocidad, y la generación de una zona central de recirculación, que bloquea el flujo y crea una zona de estancamiento frente a la salida.

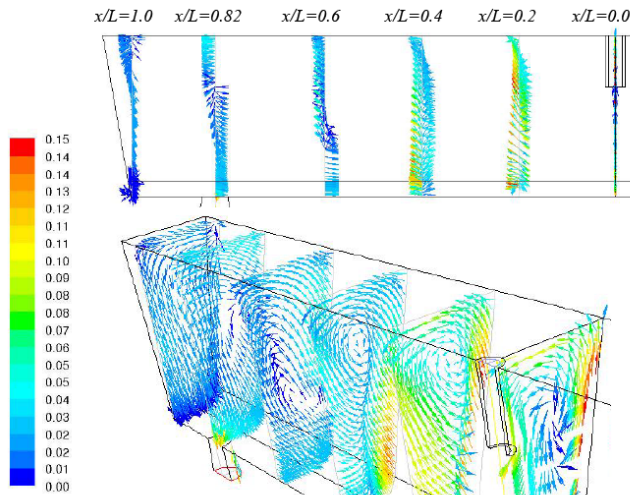


Figura 9. Vectores de velocidad en diversos planos transversales (m/s)

Algunos autores, [5] y [14], han señalado que la convección natural producida por las fuerzas de flotabilidad dentro del tundish se puede despreciar si el número de Richardson es menor de 6. En el tundish estudiado, las diferencias de temperatura que se alcanzan entre la entrada del acero caliente proveniente de la cuchara, y el acero a la salida del tundish se sitúan entorno los 35-50° C. Para un coeficiente de expansión térmica típico, $\beta \approx 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, esto supone un valor de $Gr/Re^2 \approx 4.9\Delta T$, por lo que las fuerzas de flotabilidad pueden ser relevantes. Para analizar este efecto, se consideraron 4 casos en los que se simuló un flujo de calor saliente del dominio, que reproduce la transferencia de calor del acero hacia el exterior del tundish. Ésta pérdida de energía térmica se produce sobre todo por radiación (la temperatura a la que se inyecta el acero líquido en el tundish es de 1600° C), por lo que la condición de contorno que se impone en las paredes es la de flujo de calor, que permite considerar tanto el efecto de radiación como el de convección.

En [15] y [16] se estima que la pérdida de energía térmica por la superficie libre es de 15 kW/m², mientras que por las paredes es de tan solo 3 kW/m². En dicho estudio, la caída de temperatura del acero desde la entrada hasta la salida es de 3° C, por lo que se han simulado tres casos más, elevando los flujos de calor hasta los 200 kW/m², para conseguir el enfriamiento de 35-50° C que ocurre en el tundish real

analizado. Los cuatro flujos de calor estudiados son los siguientes: 15, 50, 130 y 200 kW/m² evacuados por la superficie superior, mientras que 3, 15, 25 y 60 kW/m² respectivamente evacuados por las paredes laterales y solera. Además, en [17] se suponen despreciables las pérdidas térmicas por las paredes, y solo se consideran las que se producen por la superficie libre, estimándose en 75 kW/m². Esto demuestra la falta de acuerdo en la estimación de dichas pérdidas, ya que dependen del aislamiento de las paredes de cada tundish, y del tipo de capa protectora de la superficie libre, que ofrecen distintos comportamientos en la evacuación del calor.

Para resolver la ecuación de la energía, se acopla el término de Boussinesq ($\rho g \beta \Delta T$) en la ecuación del balance de momento en la dirección vertical. De este modo se tienen en cuentas las fuerzas de flotabilidad producidas por las diferencias de densidad del acero, más denso cuanto más frío esté, lo que produce fenómenos de convección natural. En la figura 10 se aprecia la distribución de temperaturas que provocan los dos casos extremos simulados, el de flujo térmico por la tapa de 15 kW/m² y el de 200 kW/m² una vez alcanzado el estado estacionario.

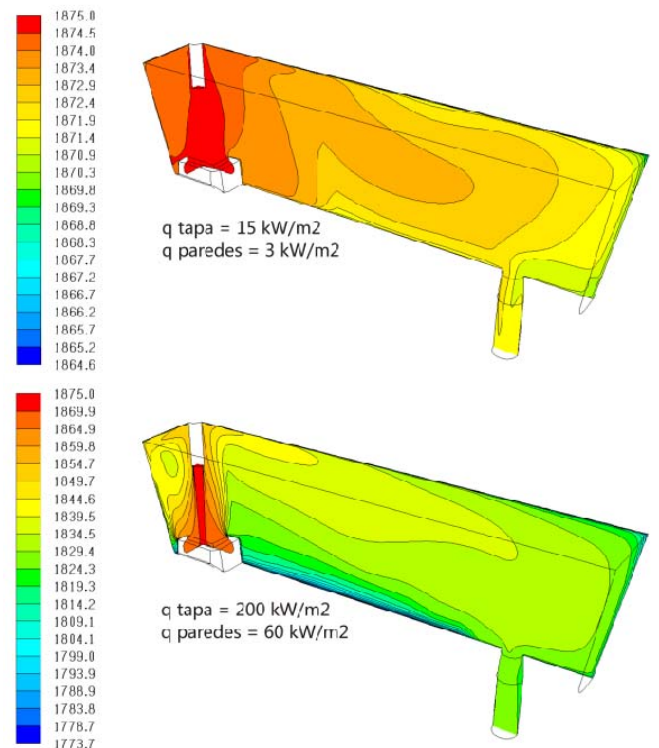


Figura 10. Distribución de temperaturas para los flujos máximos y mínimos de transferencia de calor

En la distribución se observa un claro gradiente longitudinal de temperatura desde la entrada a la salida así como una estratificación vertical por efecto de la flotabilidad de las masas calientes. Este efecto se incrementa notablemente

para el caso de mayor enfriamiento. Como era de esperar, la zona de menor temperatura se establece en las esquinas superiores, donde hay un mayor estancamiento de masas de acero. También es importante el estancamiento del flujo en la parte inferior del tundish, justo en la pared final: la salida hace una especie de bloqueo, atrapando las líneas de corriente y creando un volumen muerto entre la SEN y la pared inclinada. Éste comportamiento se puede describir cuantitativamente por medio de las curvas RTD de la figura 11.

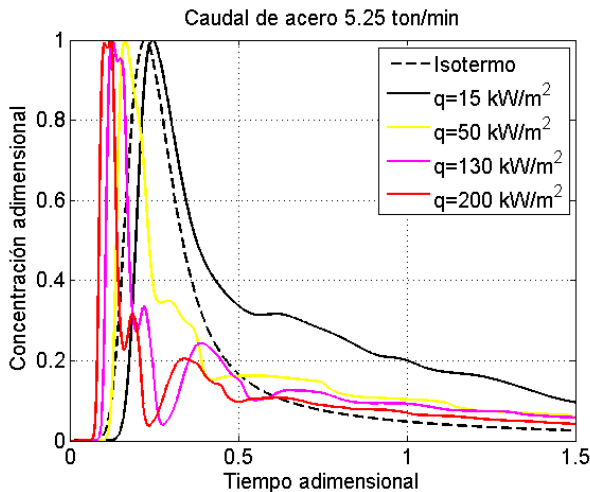


Figura 11. Curvas RTD para varios flujos de calor

Así, comparando la curva RTD del modelo isotermo, curva negra a trazos, con la de la referencia [15] y [16], curva negra continua, se observa que los tiempos de pico son prácticamente iguales, aunque presentan distinto comportamiento a partir de $\theta=0.5$. A partir de ese punto, la curva discontinua se vuelve más ancha con respecto a la isoterma, lo que indica que se produce una mayor mezcla de acero y un aumento en el porcentaje de volumen muerto. Si se sigue aumentando el flujo de calor, el comportamiento se invierte: disminuyen los tiempos de pico y la forma de la curva se estrecha notablemente, es decir, hay un

mayor porcentaje de volumen sin mezclar, lo que favorece el vertido de aceros con composiciones distintas. Al aumentar el flujo térmico extraído, cada vez un mayor porcentaje de acero frío se acumula en la solera del tundish, lo que provoca que se establezcan volúmenes de acero más fríos y compactos, de ahí la forma de la curva, típica de volúmenes sin mezclar. Sin embargo, atendiendo a los valores aportados por la bibliografía, curva negra a trazos, y los resultados isotermos, las curvas presentan el mismo tiempo de pico y una forma muy parecida para los instantes iniciales e intermedios del proceso de mezcla, si bien para tiempos largos el comportamiento difiere en la proporción de volúmenes mezclados.

El efecto de flotabilidad de ciertas masas de acero se muestra de forma cualitativa en la figura 12, en la que se compara el caso isotermo con el caso del enfriamiento mínimo. Observando la segunda figura se aprecia que el flujo que supera la zona central de recirculación por los pasillos laterales más rápidos, no tiende a bajar hacia la salida (efecto de estratificación de temperaturas), sino que se pega más a la superficie libre, para luego descender a lo largo de la pared vertical hacia la salida.

A la vista de estos resultados, la similitud en los tiempos de pico y la forma de las curvas RTD del modelo isotermo y la del flujo de la referencia [15] y [16], justifican emplear un modelo isotermo para la simulación bifásica, a pesar de que las fuerzas de flotabilidad causadas por los gradientes de densidad si provocan resultados diferentes para tiempos largos, superiores a $\theta=0.5$. Además, se tiene que tener en cuenta que la introducción de la ecuación de la energía junto con el modelo bifásico VOF limitaría en gran medida el coste computacional (en tiempo) de toda las simulaciones. Dicho modelo se centrará por tanto en los efectos de las oscilaciones de la masa de acero que se producen por las variaciones del nivel de la interfase durante el proceso de cambio de cuchara. En trabajos futuros sí resultaría interesante realizar una simulación no isotermo multifásica, con unos flujos de calor adaptados para cada tundish y enfriamiento en concreto.

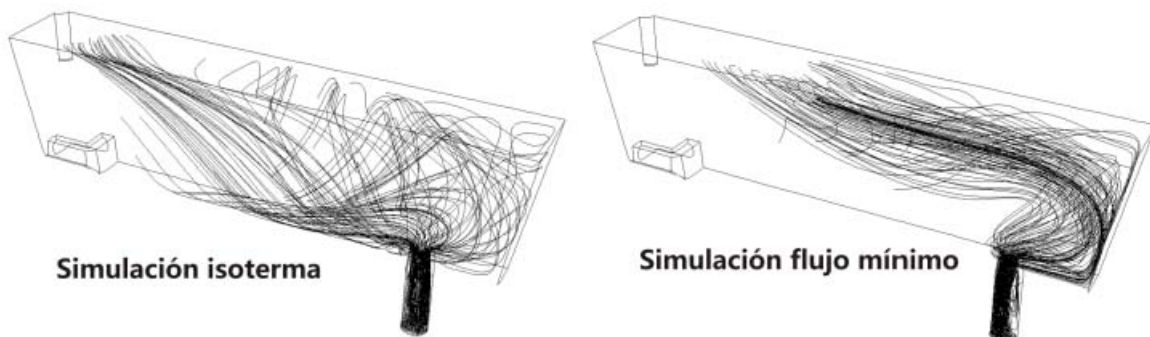


Figura 12. Líneas de corriente para el caso isotermo y el caso con flujo de calor mínimo, coloreadas en función de la temperatura

Análisis cualitativo y cuantitativo del flujo no estacionario durante el cambio de cuchara. Una vez caracterizado el patrón del flujo del acero en una situación estacionaria, se activó el modelo bifásico y se resolvió todo el proceso transitorio de cambio de cuchara. Una vez resuelta la primera fase, descenso del nivel de acero en el tundish, se resuelve la fase de relleno, monitorizando la evolución de la concentración de acero nuevo que es inyectado, tanto el valor medio de todo el tundish (concentración media), como el valor de la concentración instantánea a la salida (concentración a la salida).

En la figura 13 se muestra la concentración a la salida para cuatro caudales. El origen de tiempo se adopta justo al inicio de la fase 2, es decir, cuando comienza a inyectarse acero nuevo al tundish. El punto rojo representa, para cada caso, el final de la etapa de relleno y el comienzo de la última fase. Puesto que en todos los casos se ha asumido el mismo tiempo de operación para hacer el cambio de cuchara (2.5 minutos), el momento en que se alcanza el final de la fase de relleno varía en función del caudal simulado. En otras palabras, la fase de relleno se inicia con distinto nivel de acero en cada caso, siendo más pequeño cuanto mayor es el caudal de colada en el tundish. Como consecuencia, a mayores caudales se retrasa el inicio de la fase 3, lo que implica una mayor importancia de la fase de relleno y sus patrones de flujo. Inversamente, a caudales bajos, la gran diferencia entre la velocidad del chorro en la fase de relleno y la posterior fase asintótica produce la aparición de un decaimiento en la concentración a la salida cuando el flujo de entrada de acero nuevo se ralentiza. Este efecto es más acusado cuanto más bajo es el caudal de funcionamiento del tundish.

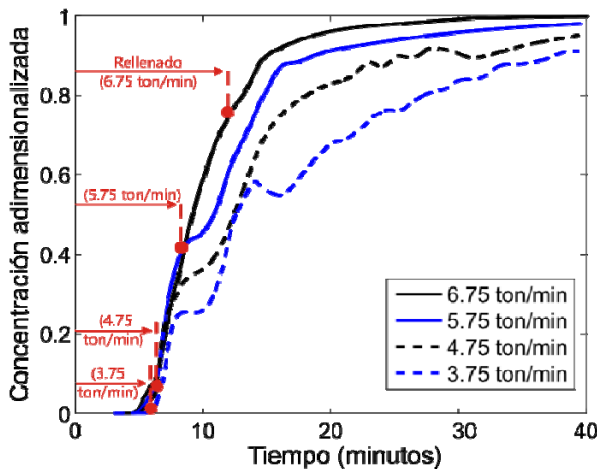


Figura 13. Concentración de acero nuevo a la salida a lo largo del tiempo en función del flujo másico

Si se analizan las situaciones extremas, para el caso de 6.75 ton/min, la fase de relleno se extiende hasta los 7.5 minutos cuando la concentración de acero nuevo a la salida roza ya el 80%. Se puede apreciar como la pendiente en la evolución

cambia a partir del punto rojo, merced a la ralentización del flujo de entrada. Por el contrario, con el caudal de 3.75 ton/min, cuando el flujo se ralentiza aparece una zona intermedia que conserva cierta inercia en la que prevalecen las condiciones de impulso del chorro a gran velocidad y que se manifiestan en la concentración de acero a la salida. En este caso, la fase de relleno es muy corta (apenas 2 min) y aunque la concentración a la salida sube rápidamente, al cabo de 5 minutos se produce un severo bloqueo que posteriormente se recupera cuando la fase 3 ya está bien establecida. En el caso del caudal de 3.75 ton/min, se pueden observar las inestabilidades que se producen entorno a los 10-20 minutos, debidas a los movimientos residuales que provocó la etapa de relleno. Existen investigaciones recientes que estudian este tipo de oscilaciones de larga duración y que se producen incluso en condiciones estacionarias [18], no solo en la etapa de relleno.

Además, se ha monitorizado la concentración media en todo el tundish para desarrollar un nuevo modelo posteriormente. En la figura 14 se reproduce la concentración de acero nuevo para dos instantes de tiempo, en los planos de simetría longitudinal y transversal. El primer gráfico, $t=6$ minutos, corresponde con la etapa de relleno casi finalizada, donde se puede observar una concentración muy baja (valores cercanos a 0.2) en la zona superior a la salida, y concentraciones elevadas en la parte inferior (niveles de 0.8), lo que indica que existen regiones de cortocircuito en la solera del tundish, creándose zonas muertas en las partes superiores.

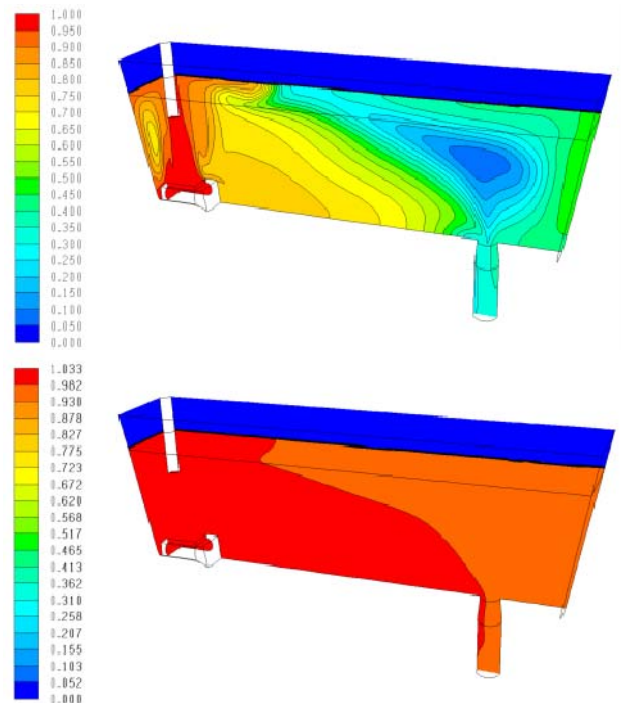


Figura 14. Distribución de la concentración de acero nuevo en distintos instantes de tiempo para un caudal de 5.25 ton/min

A los 15 minutos, se observa que la región de bajas concentraciones ha desaparecido, consecuencia de la reorientación de las líneas de flujo que se produce por la inyección del mayor caudal de recuperación del nivel (9 ton/min). Esto elimina prácticamente los volúmenes muertos, dejando solamente concentraciones con valores mínimos de 0.7 en las esquinas superiores. Más allá de los 20 minutos, se observa la misma tendencia, es decir, concentraciones cada vez más altas, llegándose a un valor de 0.9 a los 1500 segundos aproximadamente, donde la renovación del acero se encuentra prácticamente completada.

Modelos para la predicción del grado de mezcla. Para obtener una estimación del valor de la concentración de acero nuevo a la salida del tundish, es práctica habitual plantear un modelo de mezcla utilizando un análisis por volúmenes de control dentro del mismo. Básicamente, se trata de plantear la evolución en el tiempo de la ecuación de continuidad, en la que la variación de masas en el interior del tundish es función de los caudales máxicos de entrada y salida al tundish, y relacionarla con la ecuación de transporte del escalar (la concentración de acero nuevo), cuyo valor promedio también depende de la cantidad de acero nuevo que entra y sale. En resumen, ambas ecuaciones quedarían expresadas de forma diferencial como:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (4)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q_{in}}{V}(C_{in} - C) - \frac{Q_{out}}{V}(C_{out} - C) \quad (5)$$

donde el caudal de entrada es conocido, Q_{in} , y se fija la concentración de entrada de acero nuevo al valor 1 (al acero viejo se le da el valor 0). La resolución de este sistema de dos ecuaciones y tres incógnitas, el volumen de acero en el tundish que varía en los cambios de cuchara, V , la concentración media de acero nuevo en el mismo, C , y la concentración a la salida, C_{out} , necesita de una relación adicional entre las variables, normalmente entre C y C_{out} . En función de qué tipo de relación se adopte se podrá plantear un tipo de modelo u otro.

La simplicidad de este tipo de modelos basados en volúmenes de control permite una resolución en tiempo real de las ecuaciones de gobierno. Puesto que las variables únicamente dependen del tiempo sólo es necesario hacer una discretización temporal de las ecuaciones (normalmente implícita para favorecer la convergencia), con lo que es muy sencillo resolver el modelo en tiempo real. La relación entre C y C_{out} está íntimamente ligada a las principales características geométricas del tundish (ancho, largo y distribución de las troneras), lo que la hace fundamental para una buena precisión del modelo.

El primer modelo desarrollado es el de Huang y Thomas [19] y [20], en el que se resuelven las ecuaciones (4) y (5) suponiendo la condición final de mezcla perfecta en el interior del tundish, esto es, $C_{out}=C$. Aunque es un modelo muy extendido en la actualidad, hay que tener en cuenta que solo

tiene validez cuando ya se ha colado mucho acero nuevo, por cuanto la renovación de acero en el tundish está prácticamente completada. Por el contrario, en los instantes iniciales es una suposición completamente errónea ya que supone que el acero nuevo ya puede estar saliendo del tundish (a una tasa reducida pero saliendo), algo que es físicamente imposible porque el acero nuevo aún está comenzando a entrar en el tundish (y lejos de las troneras de salida). Lógicamente, cuando mayor sea la longitud del tundish y más pequeño el flujo de entrada, más inadecuada es esta hipótesis. En la figura 15 se representa la concentración a la salida en función de la concentración media para un caudal de 5.25 ton/min, donde se puede observar la condición de mezcla perfecta de este primer modelo mediante la curva roja.

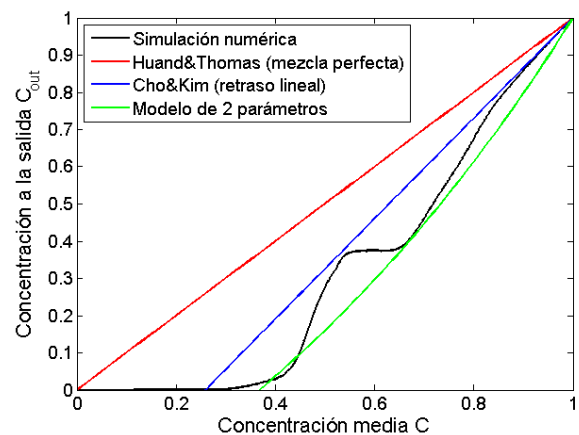


Figura 15. Relaciones entre C y C_{out} en los diversos modelos

Recientemente, en 2006, Cho y Kim [13] propusieron una pequeña modificación a la hipótesis de mezcla perfecta supuesta por Huang y Thomas. Básicamente, su contribución se resume en la introducción de un factor de retardo f que regula una relación lineal entre la concentración de salida y la concentración media en el interior del tundish. Matemáticamente, su relación viene expresada por:

$$C_{out} = fC + (1 - f)C_{in} \quad (6)$$

donde el valor f es necesario determinarlo para cada tundish, pues está íntimamente relacionado con el número de salidas, la presencia de turbostoppers y la relación de aspecto del tundish. Realmente, este parámetro permite tener en cuenta el tiempo de retardo que transcurre desde que el acero nuevo es inyectado en el tundish hasta que comienza a alcanzar alguna de las salidas. En este caso, la limitación viene por el carácter lineal que se le da a la relación entre la concentración a la salida y la concentración media del tundish, la cual además se mantiene así durante todo el proceso de mezcla. Según los resultados obtenidos en la simulación, el valor de f que más se ajusta es el de 1.35, como se puede observar en la figura 15.

Como mejora de ese modelo, se propone incorporar un parámetro adicional que modifique la relación lineal entre C y C_{out} propuesta por Kim y Cho. Así, a la vista de los resultados, se adoptó un modelo exponencial inspirado en la resolución de la ecuación diferencial convectiva-difusiva 1D, suponiendo que los patrones de flujo longitudinales son predominantes frente a los posibles flujos transversales secundarios.

$$C_{out} = f \left(\frac{e^{kC} - 1}{e^{kC_{in}} - 1} \right) + (1 - f) C_{in} \quad (7)$$

El valor de f hace referencia al retardo que sufre el acero nuevo desde que se inyecta hasta que alcanza la salida, igual que en el modelo anterior, mientras que el parámetro k depende fuertemente del valor de caudal de trabajo del tundish, observándose que se cumple una relación cuasi-lineal para el tundish estudiado, expresada según la ecuación (8):

$$k = 0.5 \cdot Q_{out} - 1.625 \quad (8)$$

Esta expresión exponencial implica que en los instantes iniciales, cuando la concentración media en el interior del tundish es baja, la concentración a la salida también tiene que ser consecuentemente baja; mientras que al final, cuando la concentración promedio es alta, la concentración a la salida también lo es y además convergiendo asintóticamente hacia la condición de mezcla perfecta ($C=C_{out}$).

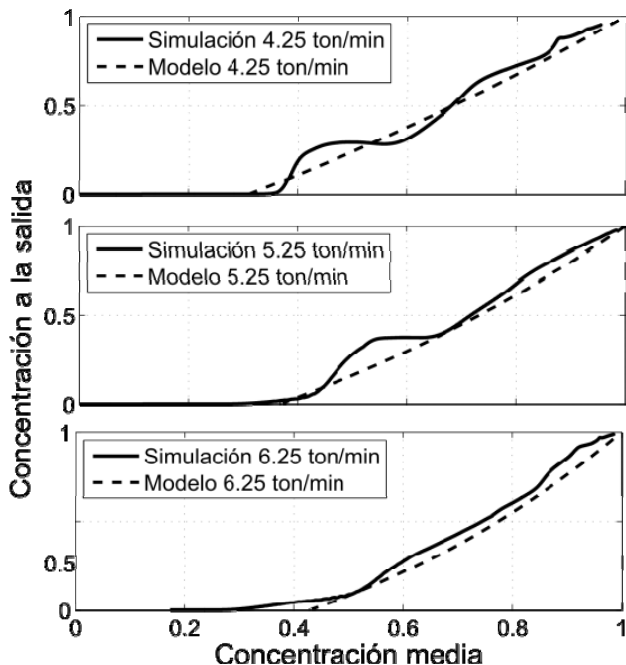


Figura 16. Simulación numérica y modelo de dos parámetros para tres caudales distintos

En la figura 15, se observa cómo la ley de dos parámetros, curva verde, retarda aún más la llegada de acero nuevo a la salida, mientras que la acelera en los instantes finales, cuando la condición de mezcla perfecta comienza a estar perfectamente consolidada.

En la figura 16 se observa el ajuste que se obtiene para los caudales de 3.75, 5.25 y 6.75 ton/min con el modelo propuesto.

Una vez conseguida una relación entre los valores de la concentración media y la concentración a la salida que se ajuste a los resultados numéricos obtenidos, hay que resolver las ecuaciones (4) y (5) para calcular en el proceso on-line el valor de la concentración a la salida en cada instante y para cualquier caudal de acero. Se resuelve por tanto el sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas mediante una discretización temporal y se obtienen los resultados de la figura 17. Para todo el proceso del cambio de cuchara, se puede conocer el volumen en cada instante de acero que se encuentra en el tundish, así como el valor de la concentración media, y por último y más importante, el valor de la concentración del acero nuevo a la salida.

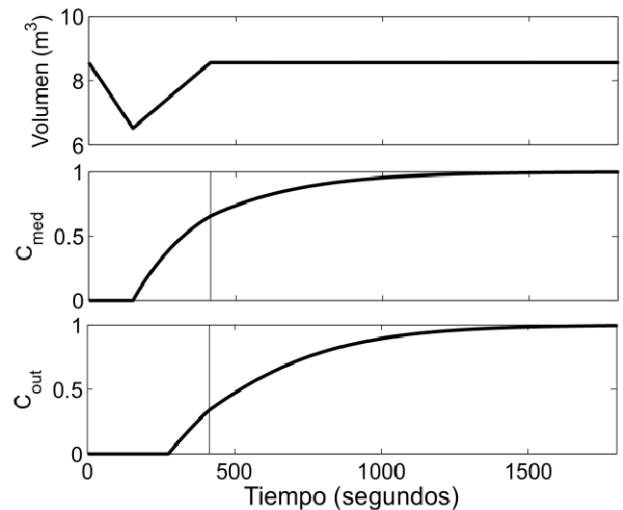


Figura 17. Resultados del modelo on-line: variación del volumen de acero, concentración media del acero y concentración a la salida en función del tiempo

Se puede observar cómo el volumen calculado se ajusta al predicho en la figura 8, es decir, desciende cuando se está cambiando de cuchara, acto seguido empieza a recuperar a una tasa de 9 ton/min y finalizada la fase de rellenado, se mantiene un nivel constante igual al volumen inicial durante toda la fase 3. En la curva de la concentración media se observa cómo comienza a incrementarse su valor en el instante en que se inyecta acero nuevo, mientras que la concentración a la salida presenta un retraso desde que se inyecta acero nuevo hasta que comienza a salir, retraso cuantificado por el valor de f en la ecuación del modelo.

En la figura 18 se representan los resultados obtenidos con el modelo: concentración de acero nuevo a la salida para tres de los 7 caudales simulados, donde se observa la buena similitud entre el modelo propuesto y los resultados numéricos que simulan el proceso real.

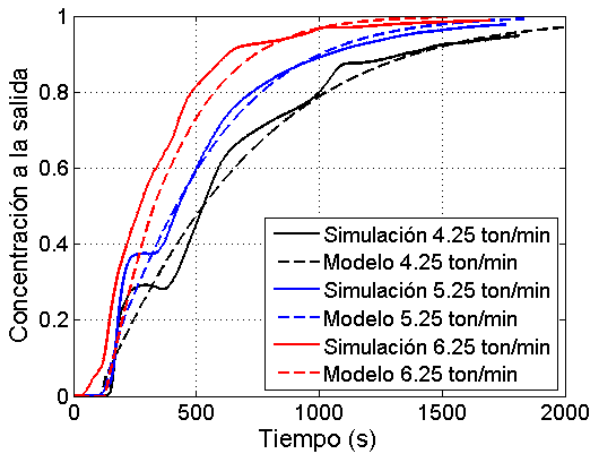


Figura 18. Comparación de los resultados numéricos con el modelo propuesto

CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un análisis mediante técnicas numéricas de las condiciones de mezcla de distintos aceros en un tundish industrial típico empleado en los sistemas de colada continua. Se empleó una metodología tridimensional en régimen transitorio combinada con una formulación bifásica para simular el cambio de cuchara que se produce para introducir acero nuevo en el tundish. Con este procedimiento, es posible calcular la superficie libre acero-aire del interior del tundish durante toda la secuencia, y cuantificar el impacto del nivel de acero sobre la evolución de la concentración a la salida. Para monitorizar la evolución del acero nuevo que se introduce, se calcula una ecuación de transporte para un escalón no reactivo, y se observa su evolución tanto en el interior del tundish como en la superficie de salida. De este modo, es posible obtener las curvas de concentración que indican el estado del acero nuevo conforme avanza el tiempo. Además, se analizaron distintos flujos de caudal para ver su influencia con respecto a los resultados del caudal nominal.

Como punto de partida, se calculan los patrones del flujo del acero para el caso estacionario, previos al cambio de cuchara. Se obtienen las curvas RTD que caracterizan el comportamiento fluidodinámico del tundish. También se describen algunos fenómenos relacionados con las distintas condiciones de operación, así como la influencia que tiene considerar un modelo no isoterma, respecto a uno térmico que sí considere la transferencia de calor con el ambiente. Se observó que la curva RTD isoterma, y la curva de los valores aportados por la bibliografía, presentan el mismo tiempo de

pico y una forma similar para los instantes iniciales e intermedios del proceso de mezclado.

Finalmente, se analizó la influencia del cambio de cuchara sobre la concentración de acero nuevo a la salida, fenómeno no considerado en los estudios previos hasta la fecha. Se propuso un nuevo modelo on-line, capaz de reproducir los estados transitorios del cambio de cuchara y predecir el estado del acero a la salida como función únicamente de dos parámetros, f y k , que dependen de la geometría del tundish y del caudal de operación. Los resultados confirman que el modelo de Huang y Thomas y el de Cho y Kim predicen bastante bien el comportamiento de la concentración de acero en un estado asintótico, sin embargo, en el estado inicial, cuando se comienza a colar el acero nuevo, se cometen errores importantes. El modelo propuesto corrige dichos errores, y permite establecer una metodología on-line mucho más precisa desde el inicio de la colada, y no sólo en la zona final de mezcla perfecta.

Como trabajo futuro se propone acoplar la ecuación de la energía en el modelo bifásico del cambio de cuchara, para incorporar el efecto térmico, que sí parece tener relevancia para tiempos largos de mezcla.

NOMENCLATURA

ΔT	=	Incremento temperatura (K)
C	=	Concentración media
CICSAM	=	<i>Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes</i>
D_h	=	Diámetro hidráulico (m)
d_{SEN}	=	Diámetro de la boquilla de salida (m)
d_{sh}	=	Diámetro del <i>shroud</i> o buza de entrada (m)
f	=	Parámetro del modelo de Cho et al.
g	=	Gravedad (m/s^2)
Gr	=	Número de Grashoff
H	=	Nivel del acero líquido (m)
k	=	Parámetro del modelo propuesto
k	=	Energía cinética turbulenta (m^2/s^2)
L	=	Longitud del tundish (m)
MRT	=	<i>Minimum Residence Time (s)</i>
PISO	=	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
Re_{Dh}	=	Reynolds basado en el diámetro hidráulico
RNG	=	<i>Renormalization Group</i>
RTD	=	<i>Residence Time Distribution</i>
SEN	=	<i>Submerged Entry Nozzle</i>
Q, Q_N	=	Flujo volumétrico, flujo nominal (m^3/s)
t	=	Tiempo (s)
u	=	Velocidad característica (m/s)
v	=	Velocidad (m/s)
V, V_H	=	Volumen del tundish, volumen de acero (m^3)
VOF	=	<i>Volume of Fluid</i>
W	=	Anchura del tundish (m)
y^+	=	<i>Wall y-plus</i>

Letras griegas

α	=	Fracción volumétrica
β	=	Coefficiente de expansión térmica (K^{-1})
ε	=	Disipación turbulenta (m^2/s^2)
θ	=	Tiempo adimensional
ρ	=	Densidad (kg/m^3)
μ	=	Viscosidad (Pas)

Subíndices

a	=	Aire
in	=	Entrada
jet	=	Condiciones del chorro
s	=	Steel, acero
sh	=	Shroud
out	=	Salida

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al apoyo recibido por parte del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo, y en especial, al tutor del proyecto, D. Jesús Manuel Fernández Oro, por todo el asesoramiento y el saber recibido.

REFERENCIAS

- [1] Mazumdar, D., Guthrie, R.I.L., 1999, "The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Tundish Systems". *ISIJ International*, **39** (6), pp. 524–547.
- [2] Mazumdar, D., Koria, S.C., Kumar, A., 2004, "An Assessment of Fluid Flow Modelling and Residence Time Distribution Phenomena in Steelmaking Tundish Systems". *ISIJ International*, **44** (8), pp. 1334–1341.
- [3] Gardin, P., Brunet, M., Domgin, J.F., Pericleous, K., 1999, "An Experimental and Numerical CFD Study of Turbulence in a Tundish Container". Proceedings of the 2nd International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 6-6 December, 1999.
- [4] Odenthal, H-J., Bölling, R., Pfeifer, H., 2002, "Numerical and Physical Simulation of Tundish Fluid Flow Phenomena". Proceedings of the 11th Japan-Germany Seminar on Fundamentals of Iron and Steelmaking, Düsseldorf, Germany, 17-18 Septiembre, 2002.
- [5] Morales, R.D., Barreto, J. de J., López-Ramírez, S., Palafox-Ramos, J., Díaz-Cruz, M., 2002, "Mathematical Simulation of the Influence of Bouyancy Forces on the Molten Steel Flow in a Continuous Casting Tundish". *Modelling Simulations in Materials, Science and Engineering*, **8**, pp. 781-801.
- [6] Fan, C.M., Shie, R.J., Hwang, W.S., 2003, "Studies by Mathematical and Physical Modelling of Fluid Flow and Inclusion Removal Phenomena in Slab Tundish for Casting Stainless using various Flow Control Device Designs". *Ironmaking and Steelmaking*, **30** (5), pp.341–347.
- [7] Crowley R.W., Lawson, G.D., Jardine, B.R., 2002, "Cleanlines Improvements using a Turbulence-suppressing Tundish Impact Pad". *Communications of FOSECO, Steel*.
- [8] De Kock, D.J., Craig, K.J., Pretorius, C.A., 2003, "Mathematical Maximisation of Minimum Residence Time for Two Strand Continuous Caster". *Ironmaking and Steelmaking*, **30** (3), pp. 229-234.
- [9] Ranegger, G., Meile, W., 2002, "The effects of Melt Flow on Particle Separation and Deposition in Continuous Casting Tundishes". *Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung, Suiza*.
- [10] Schwarze, R., Obermeier, F., Janke, D., 2001. "Numerical Simulation of Fluid Flow and Disperse Phase Behaviour in Continuous Casting Tundishes". *Modelling Simulations in Materials, Science and Engineering*, **9**, pp. 279-287.
- [11] FLUENT Inc., 2003, *FLUENT® User's Guide-Release 6.1*. FLUENT Inc. Lebanon, NH, USA.
- [12] Martin, A.D., 2000, "Interpretation of Residence Time Distribution Data". *Chemical Engineering Science*, **55**, pp. 5907-5917.
- [13] Cho, M.J. and Kim, I.C., 2006, "Simple Tundish Mixing Model of Continuous Casting during a Grade Transition". *ISIJ International*, **46** (10), pp. 1416–1420.
- [14] Jha, P.K., Ranjan, R., Mondal, S.S., Dash, S.K., 2003, "Mixing in a tundish and a Choice of Turbulence Model for its Prediction". *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, **13** (8), pp. 964-996.
- [15] Chakraborty, S., Sahai, Y., 1992, *Ironmaking Steelmaking*, **19**, 479.
- [16] Chakraborty, S., Sahai, Y., 1993, *Metal. Trans.*, **24B**, 153.
- [17] Joo S., Guthrie, R.I.L., 1991, *Can. Metall. Q.*, **30**, 261.
- [18] Schwarze, R., Klostermann, J., Brücker, C., 2008, "Experimental and Numerical Investigations of a Turbulent Round Jet into a Cavity". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **29**, pp. 1688-1698.
- [19] Huang, X. and Thomas, B.G., 1996, "Intermixing Model of Continuous Casting during a Grade Transition". *Metallurgical Transactions*, **27B** (4), pp. 617-632.
- [20] Thomas, B.G., 1997, "Modelling Study of Intermixing in Tundish and Strand during a Continuous-Casting Grade Transitions". *Iron and Steelmaker (ISS Transactions)*, **24** (12), pp. 83-96.