

## INFORME DEL PROYECTO REF.SV-24-GIJÓN-1-22

Explotación de datos de proceso para el desarrollo de un gemelo digital de la colada continua de acero (DM-DT-CC)

---

### **Fechas inicial y final del proyecto:**

01 / 09 / 2024 al 31 / 12 / 2024

### **Investigador/a Principal:**

José Díaz Trapiella

### **Otros investigadores:**

María Manuela Prieto González

Inés María Suárez Ramón

### **Personal contratado:**

Alejandro Jiménez García

### **Fechas inicial y final de contratación:**

01 / 10 / 2024 al 31 / 12 / 2024

### **Empresas o instituciones colaboradoras:**

ArcelorMittal Innovación, Investigación e Inversión, S. L. U.

### **Redes sociales de investigadores y empresas:**

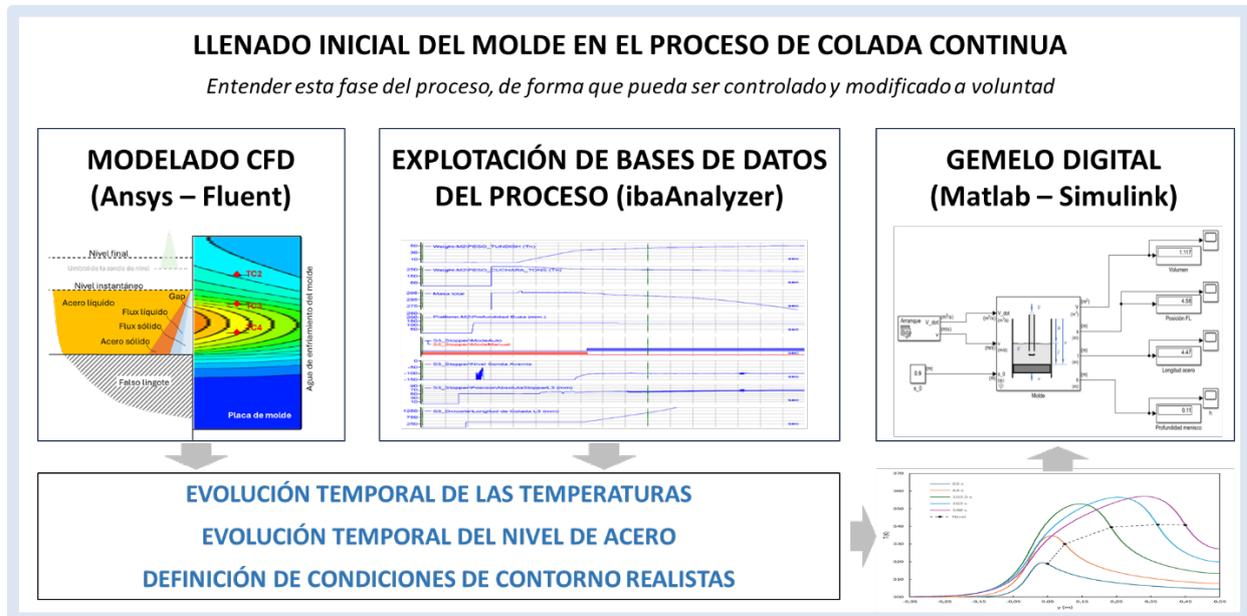
ArcelorMittal Global R & D Casting (David González & Akalya Raviraj)

[www.arcelormittal.com](http://www.arcelormittal.com)

Área de Máquinas y Motores Térmicos de UniOvi (José Díaz)

<https://portalinvestigacion.uniovi.es/investigadores/217127/detalle>

## Resumen Gráfico



## Memoria descriptiva del proyecto

### 1. Resumen ejecutivo

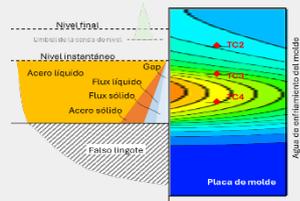
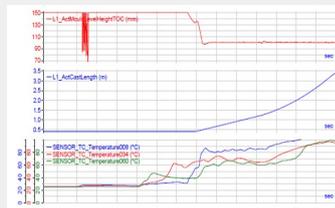
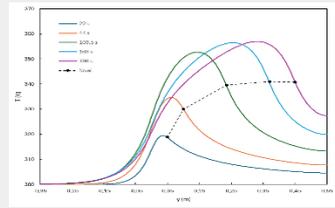
En el proyecto anterior (SV-23-GIJÓN-1-12: “Prueba de concepto de un gemelo digital para la colada continua de acero (PoC-DT-CC)”) se identificó la necesidad de una nueva línea de investigación para generar conocimiento sobre el proceso de arranque de la colada continua. Se analizó la fluidodinámica del llenado del molde mediante un modelo CFD y se extrajeron conclusiones relevantes acerca de los riesgos existentes en esta fase del proceso, tales como el arrastre de chatarra, la generación de proyecciones y la captación de aire u otras inclusiones.

En el proyecto actual (SV-24-GIJÓN-1-22) se analiza la extracción de calor durante el vertido inicial de acero en el molde. Se propone un modelo bidimensional que describe la conducción de calor en régimen variable a través de las placas de cobre del molde. Se desarrolla el análisis necesario para definir condiciones de contorno realistas a la luz de los escasos datos existentes en la bibliografía y de los datos disponibles en las bases de datos de proceso.

Las simulaciones proporcionadas por el modelo facilitan la interpretación de los valores registrados por los termopares del molde durante el vertido inicial de acero. Esto permite entender el comportamiento de las temperaturas e inferir conclusiones acerca de lo que está ocurriendo en el molde. De esta forma, se aumenta el valor de la información proporcionada por la instrumentación de la planta.

Por otra parte, se analizan las diferentes variables disponibles en la base de datos con el fin de definir un método que permite estimar el nivel instantáneo a lo largo del periodo de llenado inicial, durante el cual el baño se encuentra fuera del rango de detección de la sonda de nivel existente.

## 2. Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Tipo	Objetivo	Imagen	Grado de consecución
Principal	Identificar, extraer y analizar series temporales de la base de datos del proceso de colada continua.		100%
Específico	Establecer condiciones de contorno adecuadas al modelo CFD existente.		100%
Específico	Identificar relaciones a partir de las variables de proceso que permitan estimar el nivel del molde durante el llenado inicial.		100%
Específico	Integrar los resultados obtenidos en el gemelo digital.		80%

## 3. Tareas realizadas:

ID	Descripción	MESES					
		1	2	3	4	5	6
<b>Fase 1</b>	<b>Comprensión del proceso y de los datos disponibles</b>						
Tarea 1.1	Formación en la herramienta ibaAnalyzer						
Tarea 1.2	Inventario y descripción de las variables existentes						
Tarea 1.3	Extracción de las series temporales de datos						
<b>Fase 2</b>	<b>Preparación de los datos para su uso</b>						
Tarea 2.1	Identificación de series temporales de interés						
Tarea 2.2	Filtrado y conciliación de los datos preparados						

Fase 3	Extracción de información útil						
Tarea 3.1	Modelado CFD para interpretación de los datos						
Tarea 3.2	Obtención de condiciones de contorno aplicables						
Tarea 3.3	Obtención de correlaciones entre las variables						
Tarea 3.4	Evaluación e integración en gemelo digital						

Figura 1. Planificación del proyecto.

#### 4. Resultados obtenidos:

La investigación se centró en la extracción de calor durante el vertido inicial de acero en el molde. Se trabajó de forma paralela en el **análisis de datos reales de proceso** y en el desarrollo de un **modelo CFD para la conducción de calor** en régimen variable a través de las placas de cobre del molde. Se obtuvieron los siguientes **resultados generales**:

- Las simulaciones permitieron la interpretación de los valores registrados por los termopares del molde, ayudando a entender lo que está ocurriendo en cada instante. Esto aumenta el valor de la información proporcionada por la instrumentación de la planta.
- Gracias a lo anterior y utilizando también los escasos datos existentes en la bibliografía, se logró definir un conjunto de condiciones de contorno realistas a aplicar en el futuro modelo de solidificación.
- Se extrajeron y analizaron las variables disponibles en la base de datos de proceso y se estudiaron diferentes métodos de estimación del nivel instantáneo de acero durante el periodo que se encuentra fuera del rango de detección de la sonda de nivel existente.

En cuanto al **análisis de datos de proceso**, se puso en funcionamiento la herramienta ibaAnalyzer®, que permite la sincronización y extracción de señales de planta registradas por la red de PLCs, que controlan y monitorizan la instalación de colada continua. Gracias a esto:

- Se analizaron datos relativos a la Colada 2 de la acería LDA en el entorno de las fases de arranque de colada. Se logró agregar dos bases de datos: una relativa a los termopares de los moldes y otra dedicada al resto de variables de campo.
- Se pudieron identificar los principales eventos del proceso de arranque de colada, tales como la introducción del falso lingote, el aumento del peso de tundish, la detección de nivel al final del llenado o el inicio de extracción del falso lingote.
- Se descubrió que no es posible determinar el nivel instantáneo del molde a partir de las variables directamente relacionadas con el llenado. En primer lugar, porque la sonda de nivel sólo registra los últimos 20-30 mm de llenado. En segundo lugar, la determinación del nivel a partir de un balance de masa en el conjunto cuchara-tundish sólo permitiría estimar un nivel promedio de las líneas. En todo caso, la precisión de los registros de peso conllevaría un error inasumible, ya que el acero vertido antes de la extracción supone menos del 1% de la masa total inicial del conjunto cuchara-tundish.

➤ Se pudieron analizar los registros de los termopares del molde situados en el centro de las placas y se cruzaron con las curvas correspondientes a la posición del stopper, el nivel del molde y la longitud de colada. Se observó que los termopares detectan una elevación de temperatura desde el inicio exacto del vertido. A pesar de la lógica irregularidad de la señal de temperatura y de errores de lectura en algún termopar, se descubrió que los tres termopares situados en una misma vertical registran una evolución cualitativamente similar de la temperatura.

El análisis de datos mostró la conveniencia de interpretar la evolución de la temperatura de los termopares a la luz de las predicciones de un **modelo CFD**. Para ello se desarrolló un modelo 2D en régimen variable de la transmisión de calor en las placas:

- Se consiguieron representar de forma realista las condiciones de contorno de la placa del molde. Para ello, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 2, se definió una condición de contorno mixta conducción-radiación, variable con el tiempo y el espacio.
- Las simulaciones realizadas con el modelo permitieron, tal como se muestra en la Figura 3, obtener los campos de temperatura de las placas en cada instante, para cualquier velocidad de llenado del molde.
- El modelo permitió simular la evolución de la señal de temperatura en los termopares para diferentes velocidades de llenado e identificar el instante y el nivel instantáneo del molde al que se corresponden los puntos singulares (inflexión y máximo) de las curvas, tal como se indica en la Figura 4.
- Gracias a las simulaciones se pudieron estudiar diferentes métodos de estimación del nivel instantáneo en el molde a partir de la información de los termopares. Tal como se ilustra en la Figura 5, se demostró que la determinación del nivel a partir del punto de inflexión en la curva de temperatura de los termopares superiores (TC2 y TC3) proporcionaba un error inferior al 5% para tiempos de llenado superiores a 70 s, e inferior al 2% para tiempos de llenado superiores a 100 s. La estimación del nivel a partir del punto máximo en la curva de temperatura de los termopares inferiores (TC3 y TC4) también proporcionaba un error inferior al 2% para tiempos de llenado inferiores a 100 s, pero daba lugar a errores superiores al 5% si el tiempo de llenado era igual o inferior a los 70 s.

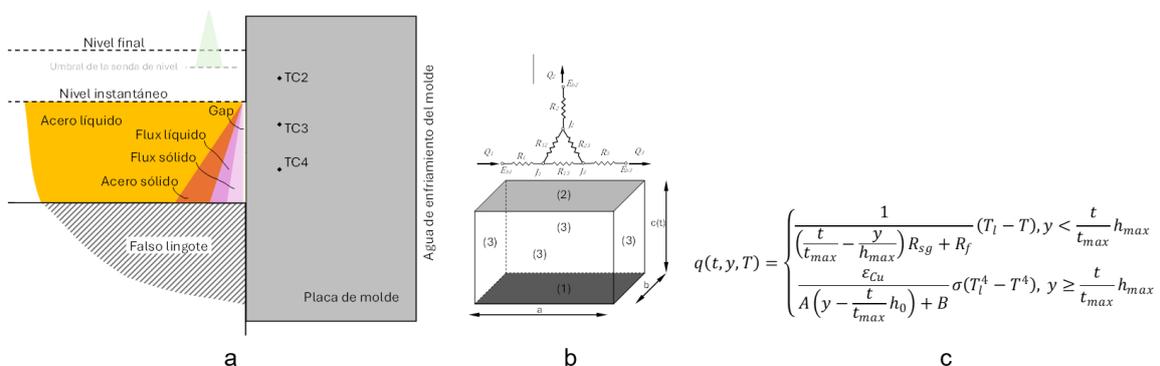


Figura 2. El análisis de la conducción (a) y la radiación (b) en la cara caliente del molde permitió definir una condición de contorno de tipo mixto (c) realista.

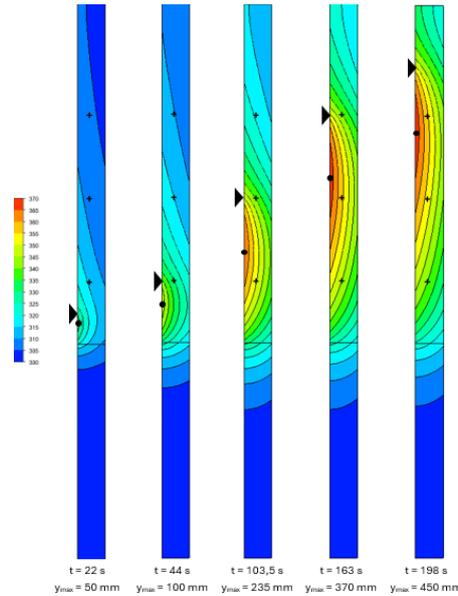


Figura 3. Campo de temperatura en la placa del molde en diferentes instantes, correspondiente a un tiempo de llenado de 198 s. Se muestran la ubicación de los termopares (cruz), c de acero en el molde (flecha) y el punto de máxima temperatura superficial (círculo).

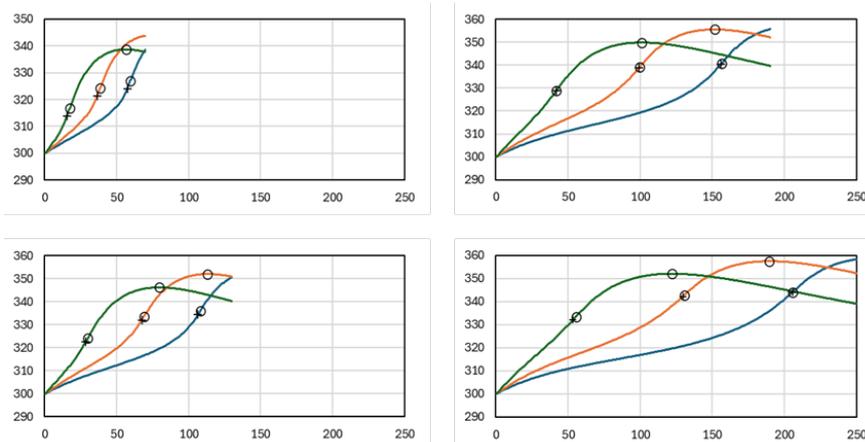


Figura 4. Simulación de la evolución de la temperatura en los termopares para diferentes tiempos de llenado del molde, e identificación de puntos singulares.

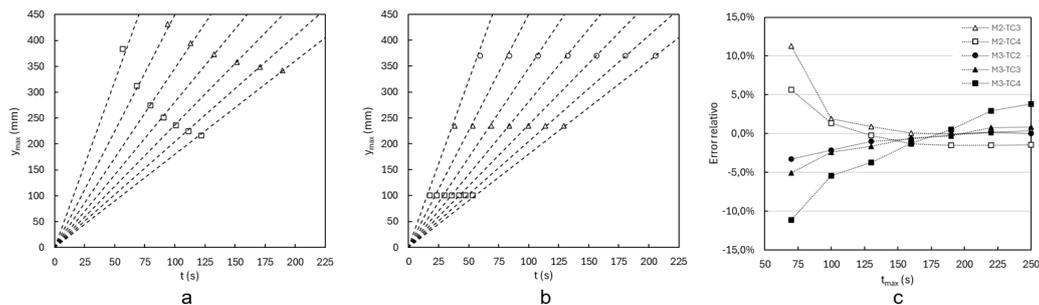


Figura 5. Comparación entre el nivel real y el nivel estimado basado en el máximo (a) y en el punto de inflexión (b) de la curva de temperatura de los diferentes termopares y comparativa del error cometido en cada caso para diferentes tiempos de llenado (c).

## 5. Trabajos o necesidades futuras

Como continuación del proyecto se está desarrollando un modelo físico del proceso de llenado del molde y se continuará con la simulación de la transferencia de calor en el baño líquido, incluyendo solidificación.

## 6. Divulgación de los resultados

Además de la presentación de los resultados generales del proyecto en las próximas Jornadas de IUTA, se prevé la presentación del trabajo realizado sobre modelado CFD en la próxima convocatoria del congreso STEELSIM.

Título	Autores	PTT	Congreso	Lugar y fecha
<i>Explotación de datos de proceso para el desarrollo de un gemelo digital de la colada continua de acero</i>	Alejandro Jiménez García José Díaz Trapiella	Com. Oral	<i>Jornadas de Proyectos IUTA</i>	Gijón (Spain), 2025
<i>Knowledge Building in the start-up phase of continuous casting</i>	Jorge Alonso Ares Alejandro Jiménez García José Díaz Trapiella	Com. Oral	<i>STEELSIM 2025</i>	<i>Trinec (Chequia)</i> 2-5 sept 2025

### Memoria económica:

#### 1. Gastos:

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	2.900 €
<b>TOTAL GASTOS</b>	<b>2.900 €</b>

#### 2. Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA	Ayuda IUTA: Contratación de personal	2.900 €
<b>TOTAL INGRESOS</b>		<b>2.900 €</b>

**Bibliografía:**

1. Mazumdar, D.; Evans, J.W. Elements of Mathematical Modeling. In Modeling of steelmaking processes; CRC Press: Florida, USA, 2009; pp. 139–173 ISBN 1-4398-8302-5.
2. Cramb, A.W.; Foundation, A.S. The Design of Flat and Long Products Casters. In The Making, Shaping and Treating of Steel: Casting Volume; AISE Steel Foundation, 2003 ISBN 978-0-930767-04-4.
3. Choudhary, S.K.; Mazumdar, D. Mathematical Modelling of Fluid Flow, Heat Transfer and Solidification Phenomena in Continuous Casting of Steel. *Steel Research* 1995, 66, 199–205, doi:10.1002/srin.199501112.
4. Yang, J.; Xie, Z.; Meng, H.; Hu, Z.; Liu, W.; Ji, Z. 3D Transient Heat Transfer Simulation and Optimization for Initial Stage of Steel Continuous Casting Process. *ISIJ Int.* 2023, 63, 862–869, doi:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-479.
5. Chen, J.; Zhang, L.; Zhang, J.; Cui, P.; Luan, G.; Wang, F. Hydraulic Jump Behavior during Filling Process of Cast Start I. *Metals* 2022, 12, 1489, doi:10.3390/met12091489.
6. Chen, J.; Zhang, L.; Cui, P.; Zhang, J.; Luan, G.; Wang, F. Hydraulic Jump Behavior during Filling Process of Cast Start II. *Metals* 2022, 12, 1703, doi:10.3390/met12101703.
7. Wang, Y.; Zhang, L. Transient Fluid Flow Phenomena during Continuous Casting: Part I—Cast Start. *ISIJ International* 2010, 50, 1777–1782, doi:10.2355/isijinternational.50.1777.
8. Wang, Y.; Zhang, L. Transient Fluid Flow Phenomena during Continuous Casting: Part II—Cast Speed Change, Temperature Fluctuation, and Steel Grade Mixing. *ISIJ International* 2010, 50, 1783–1791, doi:10.2355/isijinternational.50.1783.
9. Jin\*, X.; Chen, D.F.; Zhang, D.J.; Xie, X.; Bi, Y.Y. Water Model Study on Fluid Flow in Slab Continuous Casting Mould with Solidified Shell. *Ironmaking & Steelmaking* 2011, 38, 155–159, doi:10.1179/030192310X12706364542902.
10. Loza, A.V. Hazard Reduction in Continuous Casting of Steel. *Steel Transl.* 2015, 45, 584–587, doi:10.3103/S0967091215080094.
11. Shishkin, V.V.; Loza, A.V.; Rassokhin, D.A. Improving the Dummy Bar in Continuous Slab-Casting Machines. *Steel Transl.* 2017, 47, 201–204, doi:10.3103/S0967091217030135.
12. Avdonin, V.Yu.; Bulanov, L.V.; Busygin, V.V.; Kulikov, V.I.; Yurovskii, N.A. Innovations in the Construction and Reconstruction of Continuous-Casting Machines. *Steel Transl.* 2007, 37, 614–617, doi:10.3103/S0967091207070145.