

# INFORME DEL PROYECTO REF. SV-23-GIJÓN-1-12

Prueba de concepto de un gemelo digital para la colada continua de acero (PoC-DT-CC)

---

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

01 / 07 / 2023 al 31 / 12 / 2023

## **Investigador/a Principal:**

Dr. José Díaz Trapiella

## **Otros investigadores:**

Dra. María Manuela Prieto González

Dra. Inés María Suárez Ramón

## **Personal contratado:**

D. Jorge Alonso Ares

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

01 / 09 / 2023 al 30 / 12 / 2023

## **Empresas o instituciones colaboradoras:**

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

Innvel2 Consulting SL

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

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

Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Oviedo (Pedro García)

## Resumen Gráfico



## Memoria descriptiva del proyecto

### 1. Resumen ejecutivo

La siderurgia es una industria esencial a nivel global y muy importante para nuestra región. Aunque el proceso de colada continua ha progresado significativamente en las últimas décadas, el conocimiento técnico existente es aún incompleto y existen oportunidades de mejora en ciertas fases del proceso, como por ejemplo en el arranque de la instalación, donde los procedimientos de operación se basan en reglas fijas, orientadas a minimizar riesgos. Sin embargo, la creación de un control preciso para dicha fase choca con la dificultad de obtención de datos, debida a la opacidad intrínseca del proceso. Por tanto, se deben desarrollar modelos multifísicos que puedan ser integrados en un sistema de simulación y control avanzado.

Este proyecto busca generar conocimiento sobre el llenado inicial del molde de colada continua y sentar las bases para su integración en un gemelo digital de la instalación. Para ello se modelará mediante CFD (Computational Fluid Dynamics) el proceso de llenado del molde y se analizará la interacción del acero líquido con los sistemas de refrigeración empleados actualmente. El conocimiento extraído de las simulaciones deberá poder expresarse mediante modelos subrogados con el objetivo final de ser integrados en un gemelo digital. Se lanza una nueva línea de investigación que emplea una metodología organizada en cuatro líneas:

- Modelar mediante CFD diferentes estados de llenado del molde.
- Contrastar los resultados con datos de planta y de laboratorio.

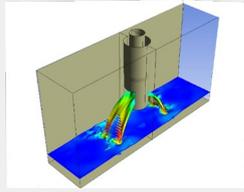
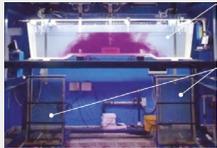
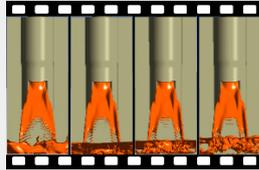
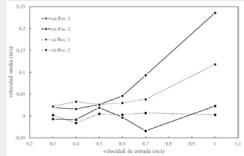
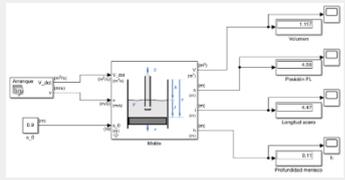
- Generar modelos sencillos y precisos que permitan simular el proceso.
- Integrar los resultados obtenidos en un gemelo digital de control.

El modelo CFD que se ha desarrollado mediante Ansys-Fluente ha permitido obtener los campos de velocidad en régimen transitorio para el flujo bifásico (acero líquido – aire) durante el llenado inicial del molde de colada continua. El análisis de los resultados del modelo ha permitido extraer conclusiones relevantes en relación con:

- El riesgo de arrastre de chatarra de refrigeración y otros materiales.
- El riesgo de proyecciones de acero líquido.
- El riesgo de captación de aire y otras inclusiones por el acero líquido.
- La identificación de las fases más sensibles a los riesgos anteriores.

Los resultados del estudio paramétrico para diferentes velocidades de alimentación del molde se han expresado de forma tal que pueden ser integrados en la estructura básica de gemelo digital que se ha creado mediante Matlab-Simulink.

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

Tipo	Objetivo	Imagen	Grado de consecución
Principal	Generar conocimiento sobre el proceso de llenado del molde de colada continua		100%
Secundario/ Específico	Contrastar los resultados con datos de planta y de laboratorio		10%
Secundario/ Específico	Modelar mediante CFD diferentes estados de llenado del molde		100%
Secundario/ Específico	Generar modelos sencillos y precisos que permitan simular el proceso de llenado del molde		80%
Secundario/ Específico	Integrar los resultados obtenidos en un gemelo digital de control.		50%

### 3. Tareas realizadas:

De las tres fases previstas en el proyecto: 1-modelado, 2-validación y 3-integración, las tareas referidas a la contrastación con modelos físicos y mediciones en planta ha tenido que ser postpuesta al segundo trimestre de 2024 debido a la carga de trabajo del laboratorio colaborador. Se replanificó el trabajo aumentando el estudio paramétrico sobre el modelo CFD y ampliando el análisis de resultados. Por el mismo motivo, el desarrollo del gemelo digital se centró en la elaboración de los bloques y modelos necesarios en Simulink quedando sin completar la integración de modelos subrogados elaborados a partir de las simulaciones con CFD. En la Fig. 1 se resume la distribución temporal de las tareas realizadas.

ID	Descripción	MESES					
		1	2	3	4	5	6
<b>Fase 1</b>	<b>Modelado del proceso de llenado del molde</b>						
Tarea 1.1	Modelado del flujo bifásico: acero líquido - aire						
Tarea 1.2	Estudio de efectos hidrodinámicos en la interacción						
<b>Fase 2</b>	<b>Validación del modelo</b>						
Tarea 2.1	Contrastación con mediciones en planta						
Tarea 2.2	Contrastación con modelos físicos						
<b>Fase 3</b>	<b>Integración de conocimiento en gemelo digital</b>						
Tarea 3.1	Desarrollo de modelos subrogados						
Tarea 3.2	Integración de submodelos en gemelo digital Simulink						

Figura 1. Planificación del proyecto.

### 4. Resultados obtenidos:

El modelo CFD que se ha desarrollado en este proyecto ha permitido obtener los campos de velocidad en régimen transitorio para el flujo bifásico constituido por acero líquido y aire durante el llenado inicial del molde de colada continua. En este fase del proceso la geometría del molde es invariable y se consideraron caudales de acero constantes. Se plantearon seis casos de estudio, correspondientes velocidades de alimentación de acero  $u_{in}$  de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 y 1.0 m/s. Este rango de velocidades equivale a tiempos de llenado del molde comprendidos entre 36 y 130 segundos, que cubren los tiempos observados habitualmente en la práctica industrial.

La simulación completa del llenado del molde para el caso base de  $u_{in} = 0.5$  m/s mostró que los valores más altos de velocidad, y por tanto el mayor riesgo de arrastre de la chatarra de refrigeración, se producen en la zona media del semiancho del molde y en el período comprendido entre el inicio del vertido de acero líquido y hasta que la chatarra está completamente cubierta de acero, lo cual se corresponde con un nivel de unos 50 mm.

Se realizó una comparación de resultados entre los seis casos de estudio para el instante en el que se alcanza un nivel de acero en el molde de 50 mm. Los principales resultados del estudio son:

- Se identifican dos regímenes de salida del acero a través de la tronera, dependiendo de la de la velocidad de alimentación del molde (Fig. 2):
  - Chorro inestable con oscilación lateral, para  $u_{in} = 0.3 - 0.5$  m/s.
  - Chorro estable en forma de lámina horizontal que se divide en dos chorros individuales antes de alcanzar el fondo del molde, para  $u_{in} = 0.6 - 1.0$  m/s.
- En lo relativo a la generación de salpicaduras (Fig. 2):
  - No se detecta riesgo de proyecciones de acero líquido fuera del molde en todo el rango de velocidad de alimentación considerado.
  - Se observa riesgo de salpicaduras de acero líquido sobre las paredes del molde cuando la velocidad de alimentación se encuentra entre 0.3 y 0.5 m/s. El riesgo es máximo para 0,4 m/s, ya que se producen salpicaduras que, en caso de quedar adheridas a la pared del molde, permanecerían unos 30 s antes de ser alcanzadas por el baño líquido, lo cual podría favorecer la formación de incrustaciones permanentes.
  - Para velocidades de alimentación comprendidas entre 0.6 y 1.0 m/s no se observa riesgo de salpicaduras sobre las paredes del molde.
- En lo relativo al riesgo de arrastre de la chatarra de refrigeración (Fig. 3):
  - En posiciones alejadas de la buza se observa que ni la componente horizontal ni la vertical de la velocidad local dependen significativamente de la velocidad de alimentación, pudiendo tener tanto sentido positivo como negativo y con valores promedio normalmente inferiores a 0.03 m/s.
  - Por el contrario, en posiciones más cercana a la buza la velocidad local depende apreciablemente de la velocidad de alimentación, aumentando con ésta. Además, las componentes vertical y horizontal tienen sentido positivo, esto es, tienden a elevar la chatarra y a alejarla de la buza. La componente horizontal es siempre mayor, alcanzando valores de 0.1 y 0.24 m/s para velocidades de alimentación de 0.7 y 1.0 m/s, respectivamente.
- El riesgo de captación de aire y otras inclusiones se evaluó mediante el factor de vacíos, es decir, la fracción volumétrica de aire en un volumen de 40 mm de altura y mediante la velocidad superficial de la interfase acero-aire (Fig. 4):

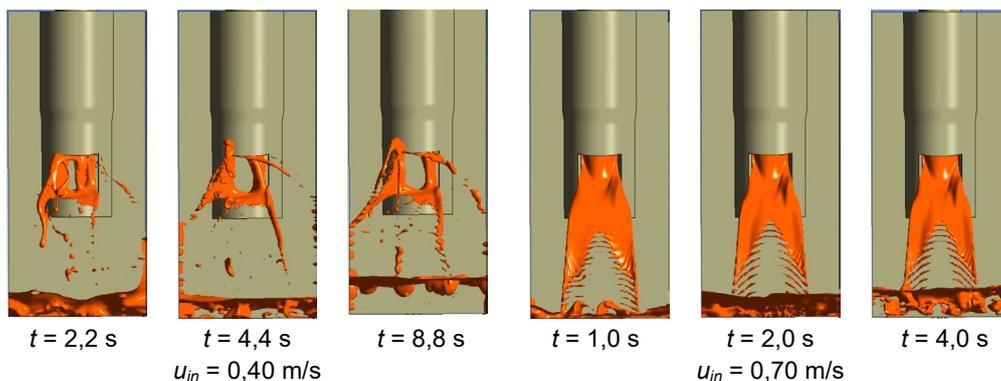


Figura 2. Vista de la interfase acero-aire en diferentes instantes para dos de los valores de velocidad de alimentación considerados en el estudio.

- En líneas generales, el factor de vacíos aumenta al aumentar la velocidad de alimentación, si bien se aprecia un cambio a partir de 0.6 m/s, posiblemente asociado a las características del chorro a la salida de la tronera.
- La velocidad superficial de la interfase también presenta una tendencia general creciente, aunque de nuevo se aprecia un cambio de tendencia para velocidades de alimentación en el entorno de los 0,5 - 0,6 m/s.

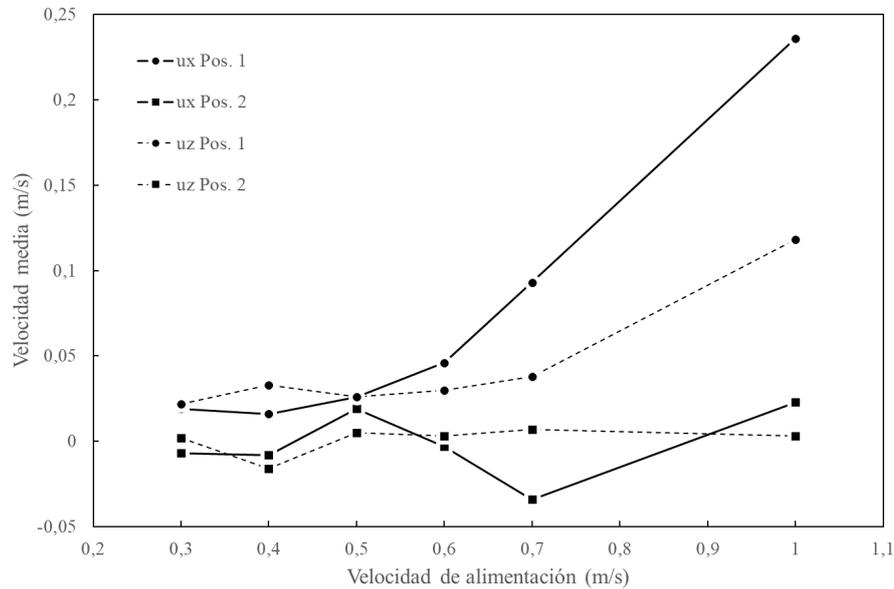


Figura 3. Valores promedio de las componentes horizontal,  $u_x$ , y vertical,  $u_z$ , de la velocidad en posiciones cercana y alejada de la buza en función de la velocidad de alimentación,  $u_{in}$  (Pos. 1: mitad del semiancho del molde, Pos. 2: tres cuartos del semiancho del molde).

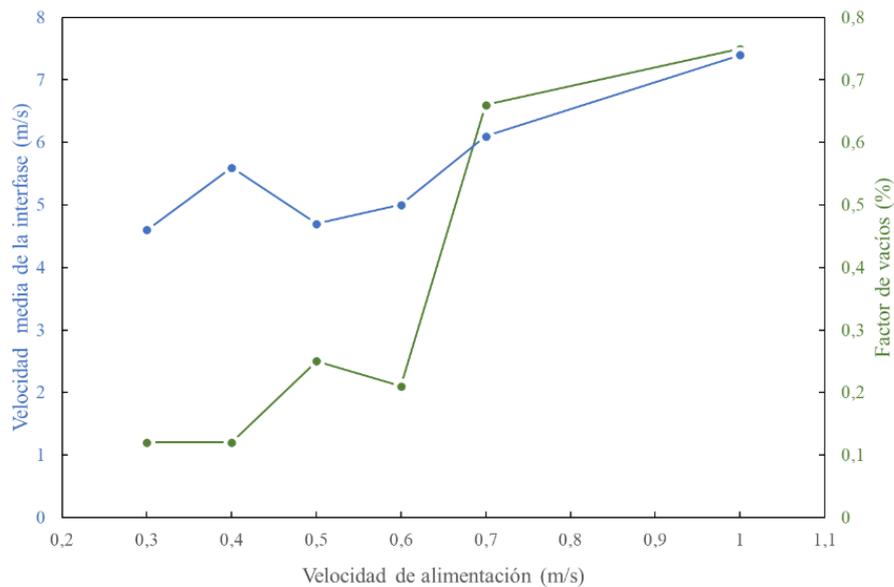


Figura 4. Velocidad de la interfase y factor de vacíos en función de la velocidad de alimentación  $u_{in}$ .

## 5. Trabajos o necesidades futuras

Como continuación del proyecto nos gustaría desarrollar con medios propios un modelo físico de agua del proceso de llenado del molde, para reducir así la dependencia de laboratorios externos colaboradores y de la explotación de datos de planta que no son de fácil acceso. Esperamos que este montaje experimental pueda servir también para la elaboración de un gemelo digital del modelo físico. En este sentido disponemos de un remanente de materiales y presupuesto de otros proyectos y esperamos solicitar un nuevo proyecto IUTA para la próxima convocatoria de 2024.

## 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 un congreso nacional o internacional, aún por determinar a lo largo del próximo año.

Título	Autores	PTT	Congreso	Lugar y fecha
<i>Prueba de concepto de un gemelo digital para la colada continua de acero</i>	Jorge Alonso Ares José Díaz Trapiella M <sup>a</sup> Manuela Prieto González Inés M <sup>a</sup> Suárez Ramón	Com. Oral	<i>Jornadas de Proyectos IUTA</i>	Gijón (Spain), 2024
<i>Generación de conocimiento sobre el llenado del molde de colada continua mediante modelos CFD.</i>	Jorge Alonso Ares José Díaz Trapiella Pedro García Regodeseves	Com. Oral	<i>Por determinar</i>	<i>Por determinar</i>

### Memoria económica:

#### 1. Gastos:

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	4.800 €
Fungibles	0 €
Amortización	0 €
Otros (Desplazamientos, Inscripciones a Congresos, etc)	0 €
<b>TOTAL GASTOS</b>	<b>4.800 €</b>

#### 2. Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA	Ayuda IUTA: Contratación de personal	4.800 €



Otras entidades / empresas financiadoras		0 €
Financiación propia		0 €
<b>TOTAL INGRESOS</b>		<b>4.800 €</b>