

PROGRAMA ASTURIAS 2016-2017

**DESARROLLO DE UN NUEVO PROCESO DE MOLDEO POR
SUCCIÓN**

Nº Expediente: IDI/2016/000288

Entidad Beneficiaria:



Fecha inicio: 01/09/2016

Fecha fin: 30/05/2017

1. INTRODUCCIÓN

Todos los sistemas de colada y moldeo empleados hasta la actualidad en la fabricación de componentes metálicos para aplicaciones industriales implican la utilización de materiales refractarios, desde el recubrimiento de los hornos, piqueras o moldes. En los procesos convencionales resulta imposible evitar que se produzcan desprendimientos del material refractario en alguna de las etapas de fabricación de los componentes. Estos arrastres actúan como discontinuidades del metal y dan lugar a lo que se conoce como inclusiones exógenas, que en algunas aplicaciones de elevada responsabilidad resultan inadmisibles.

Las inclusiones exógenas procedentes del refractario del horno de fusión pueden eliminarse casi completamente mediante la utilización de crisoles prefabricados isostáticamente, pero los desprendimientos de refractario procedentes de los canales de sangrado, piqueras o moldes requiere desarrollar nuevos sistema de moldeo.

Fundación ITMA ha venido desarrollando en los últimos años una línea de trabajo encaminada al desarrollo de un nuevo proceso de moldeo por succión basado en la toma del caldo directamente desde el horno mediante una bomba de vacío a través de un tubo de cuarzo, evitando de esta forma el uso de materiales refractarios y la generación de arrastres que actúan como discontinuidades en los componentes producidos. El cuarzo es un material que presenta una elevada estabilidad térmica y dimensional, elevada resistencia al choque térmico y con un punto de fusión de 1710°C y que pierde su conocida fragilidad a temperatura ambiente cuando es calentado a temperaturas elevadas (superiores a los 600-700°C). Por todo ello resulta un material idóneo para ser utilizado como molde en este tipo de procesos. En las pruebas realizadas con anterioridad se consiguieron colar barras de hasta 1100 mm de longitud pero en todos los casos se producían defectos internos asociados a la solidificación del metal (rechupes).

La actuación que se plantea en esta propuesta busca, partiendo de los trabajos anteriores mencionados, obtener un proceso de moldeo por succión que elimine los arrastres de materiales refractarios. Para ello, se utilizarán como molde tubos de cuarzo evitando la generación de cualquier tipo de defecto exógeno en las piezas metálicas. Además será necesario desarrollar un proceso que reduzca los defectos de solidificación observados (rechupes). Esta solución es completamente innovadora al plantear la obtención de productos metálicos sin defectos procedentes del moldeo, al mismo tiempo que supone un ahorro energético y una reducción de generación de residuos. Se debe considerar también que este sistema podría ser aplicado en la fabricación de barras de cualquier aleación cuya temperatura de moldeo sea inferior a la temperatura de fusión del molde, por lo que su margen de aplicación es muy amplio.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta propuesta es el diseño y desarrollo de un nuevo sistema de moldeo por succión en el que se sustituyan los materiales refractarios de la ruta de colada por un tubo de cuarzo. En concreto los objetivos específicos son los siguientes:

- Construcción de un prototipo del sistema de colada que sea flexible para poder ser adaptado fácilmente a distintas geometrías (diámetro y longitud de molde).
- Diseño de un nuevo sistema de moldeo por succión para la obtención de barras metálicas sin defectos.

3. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

El proyecto se ha estructurado en dos hitos de trabajo, uno centrado en el desarrollo del prototipo y un segundo de puesta a punto del proceso de fusión y moldeo, realización de ensayos y conclusiones.

H1: DESARROLLO DEL PROTOTIPO PARA MOLDEO POR SUCCIÓN

Diseño y fabricación del prototipo (Tareas 1.1 y 1.2)

En lo que respecta al llenado de los tubos de cuarzo por succión, se utilizó una bomba de vacío rotativa conectada a un extremo de los mismos, sistema que requiere del control de las distintas variables de proceso:

I. Control de la velocidad de llenado:

Resultados previos al proyecto constataron que tiempos de llenado superiores a 15 segundos dan lugar a irregularidades en el acabado superficial de las barras obtenidas. Este fenómeno, que parece ser debido a la solidificación del metal líquido sobre la superficie de los tubos de cuarzo, se ve acentuado en los casos que la velocidad de llenado no es constante. Teniendo en cuenta esto, la velocidad de llenado ha sido considerada como una de las variables críticas en el diseño del prototipo de moldeo por succión.

Se planteó desde el inicio del proyecto que la succión se realizase a través de un depósito con presión negativa que a modo de pulmón permitiese regular la velocidad de llenado, especialmente en los primeros segundos del proceso y no fuese así necesaria su regulación manual. La velocidad de llenado en el instante inicial queda determinada por la depresión utilizada en el depósito en el instante inicial y de su volumen, pero también del caudal de aire que sea capaz de evacuar. El depósito incluye dos válvulas de aguja, a la entrada y a la salida, para conseguir así una mayor flexibilidad y mejorar la regulación de la velocidad de llenado.

II. Control del nivel de llenado:

Otro de los elementos clave del prototipo es el sistema de control del nivel de llenado. Este sistema automático controlado por electroválvulas permite evitar las irregularidades y efectos de descuelgue que ocurrían cuando se llevaba a cabo el llenado de forma manual.

En la siguiente figura se muestra una imagen del depósito pulmón, sistema de válvulas de aguja y electroválvulas para el control de la velocidad y nivel de llenado. El diseño e implementación de ambos sistemas se llevó a cabo en la anualidad 2016.

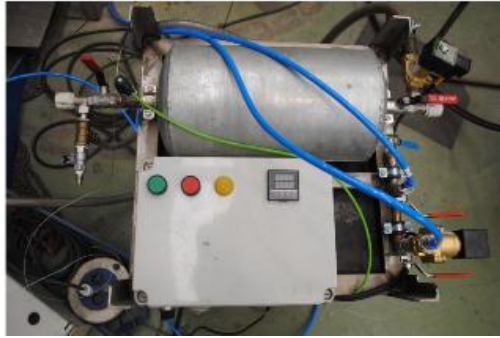


Figura 1: Dispositivo para el control del nivel y velocidad de llenado.

III. Temperatura de precalentamiento del molde/sistema de calentamiento por resistencias:

Para evitar el rechupe central en las barras, uno de los principales problemas a solventar en este proyecto, se diseñó un sistema de precalentamiento que favoreciese el llenado de los tubos y al mismo tiempo permita controlar la localización y tamaño de los rechupes.

Tras analizar varias posibilidades a lo largo de 2016, se decidió utilizar un horno de kanthal A1 (aleación Fe-Cr-Al) que proporciona una temperatura máxima de trabajo de hasta 1200°C y una elevadísima resistencia térmica (ha de tenerse en cuenta que la temperatura del horno aumenta significativamente cuando se produce el llenado del molde de cuarzo). En la siguiente figura se muestra un detalle del horno de resistencias instalado.

Concretamente, a lo largo de 2017 se llevó a cabo la implementación del horno tubular de Kanthal A1 con una zona de calentamiento útil de 600 mm en el que se instalaron dos “cartuchos” de resistencias que permite el control independiente de la temperatura (Z1 y Z2 en la figura 2). Se optó por este diseño para poder controlar, si fuese necesario, la secuencia de solidificación en función de la temperatura del metal fundido en cada una de las zonas del horno.

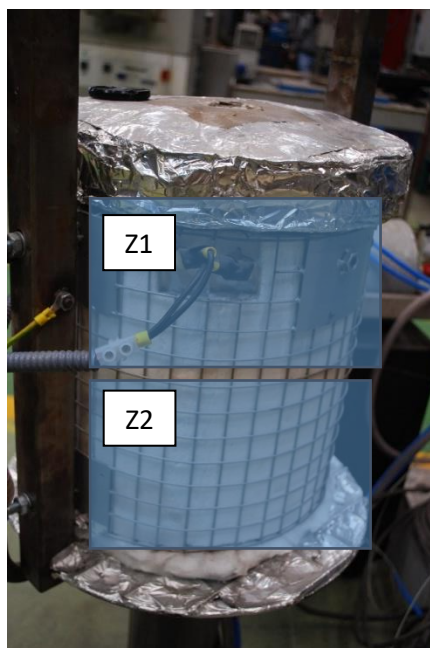


Figura 2: Horno de kanthal A1 con dos zonas de control de la temperatura (Z1 y Z2) para controlar la velocidad y secuencia de solidificación de las barras.

IV. Control del descuelgue del acero fundido.

Otro de los aspectos críticos del proceso de moldeo por succión que se pretendía solucionar en este proyecto era el efecto de descuelgue del metal fundido una vez se produce la solidificación completa de una sección del molde. Si no se toman medidas especiales la solidificación se inicia a unos 400-500 mm del extremo inferior del molde ya que la zona próxima al metal fundido en el horno de inducción posee una temperatura muy elevada y no solidifica.

En lo que respecta a los sistemas para controlar el descuelgue del metal, inicialmente se plantearon tres posibilidades:

- Forzar el inicio de la barra de solidificación en el parte inferior del molde mediante un sistema de refrigeración.
- Sellado mecánico mediante sistema hidráulico o neumático.
- Presurizar el caldo mediante una cámara.

En 2016 se trabajó en el sistema de refrigeración, diseñándose un casquillo de acero de unos 35 mm de altura con agujeros interiores que presenta una mayor capacidad de enfriamiento que los sistemas utilizados en trabajos previos (espira de cobre con agujeros en su parte interior).

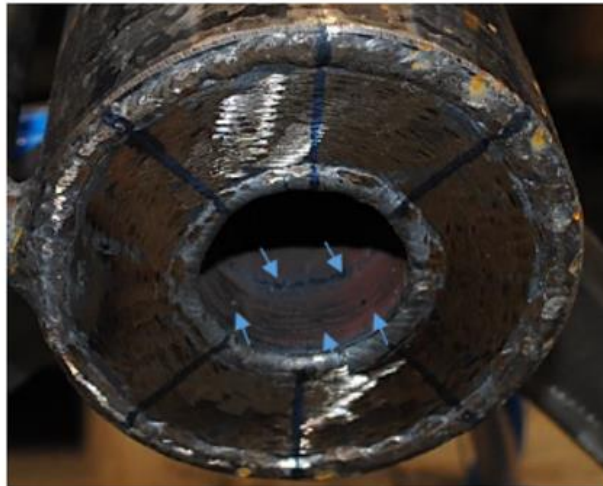


Figura 3: Sistema de refrigeración para evitar el descuelgue del metal fundido (flechas azules agujeros mecanizados en el interior de la corona).

En 2017, los trabajos se centraron en analizar la implementación de los otros dos mecanismos planteados para el control del descuelgue:

- Sellado mecánico mediante pinza hidráulica: empleo de unas pinzas hidráulicas que actuaran sobre un accesorio que a su vez presione el tubo de cuarzo. Esta opción fue finalmente implementada para validar su comportamiento, tal y como se detalla en la Prueba nº4 que se describe más adelante. Si bien el sistema funcionó correctamente obteniéndose la deformación necesaria para sellado del extremo inferior del tubo, se produjeron problemas con el aislamiento térmico entre la pinza hidráulica y el molde de cuarzo. Como consecuencia de ello se quemaron los retenes de la pinza hidráulica.

- Sistema presurizado: este sistema se basaría en una campana de acero con una camisa refrigerada que se colocaría sobre la boca del horno. Este sistema necesitaría utilizar juntas refrigeradas y aisladas con refractario a través de las cuales se introduciría el tubo de cuarzo en la cámara. Con este dispositivo se podría presurizar el horno para que el acero líquido alcanzase así la altura requerida. No obstante, este sistema se descartó por su complejidad constructiva y por los riesgos asociados a la combinación de metal fundido y presión. Además, los resultados obtenidos con el sellado mecánico y especialmente con el sistema de refrigeración fueron lo suficientemente satisfactorios para obviar esta opción.

V. Diseño de la junta molde/sistema de succión.

Otro aspecto a destacar es el diseño de la junta que permite la conexión entre la manguera de succión y los tubos de cuarzo, pues introducir un horno eléctrico en la parte superior del molde con el objeto de dirigir la solidificación y reducir el rechupe central, requiere de precauciones especiales en la junta entre el molde de cuarzo y la manguera de vacío.

Inicialmente se planteaban 2 posibilidades para la refrigeración de esa zona de unión, aunque solo se estimó fiable la solución de refrigeración por aire. Por ello, finalmente se fabricó una conexión que consta de un record de cobre y una junta tórica refrigerada mediante aire comprimido. El sistema de refrigeración consta de una cámara (indicada con una flecha de color rojo en la figura 4b) formada por dos tubos concéntricos a través de los cuales pasa el aire comprimido. Además en la nueva conexión fue necesario implementar un soporte que proporcione suficiente rigidez al tubo de cuarzo (indicado con una flecha verde en la figura 4b). En la figura 4b se muestra la nueva configuración y se compara con la utilizada previamente consistente en un inserto de cobre sellado con una manguera termo-retráctil.



Figura 4: Amarre del molde al sistema de succión. a) Diseño inicial. b) Diseño optimizado.

VI. Modificación del aislamiento térmico del molde.

Para poder controlar la secuencia de solidificación, que como ya se ha comentado debe iniciarse en la zona inferior del molde (zona más próxima al horno de inducción), es necesario calentar el extremo superior del molde colocando el horno de kanthal A1 y aislar térmicamente la zona del molde de cuarzo que se encuentra fuera del horno eléctrico. El objetivo de estas actuaciones es dirigir y retrasar la solidificación para reducir así el riesgo de que se produzcan rechupes centrales.

Para ello se diseñó un nuevo dispositivo con una camisa de acero que ha sido rellena con fibra de vidrio, que además de eliminar desviaciones en el grado aislamiento entre los distintos moldes y evitar el contacto directo con la fibra de vidrio, aumentará la capacidad aislante del

sistema (mayor espesor de aislante) y proporcionará las medidas de seguridad requeridas para evitar el riesgo de quemaduras por contacto y sobre todo la proyección de trozos de cuarzo desprendidos durante la solidificación de las barras.

En la figura siguiente se muestra una fotografía de conjunto del prototipo desarrollado en 2016 y 2017, con todos los elementos antes descritos integrados:

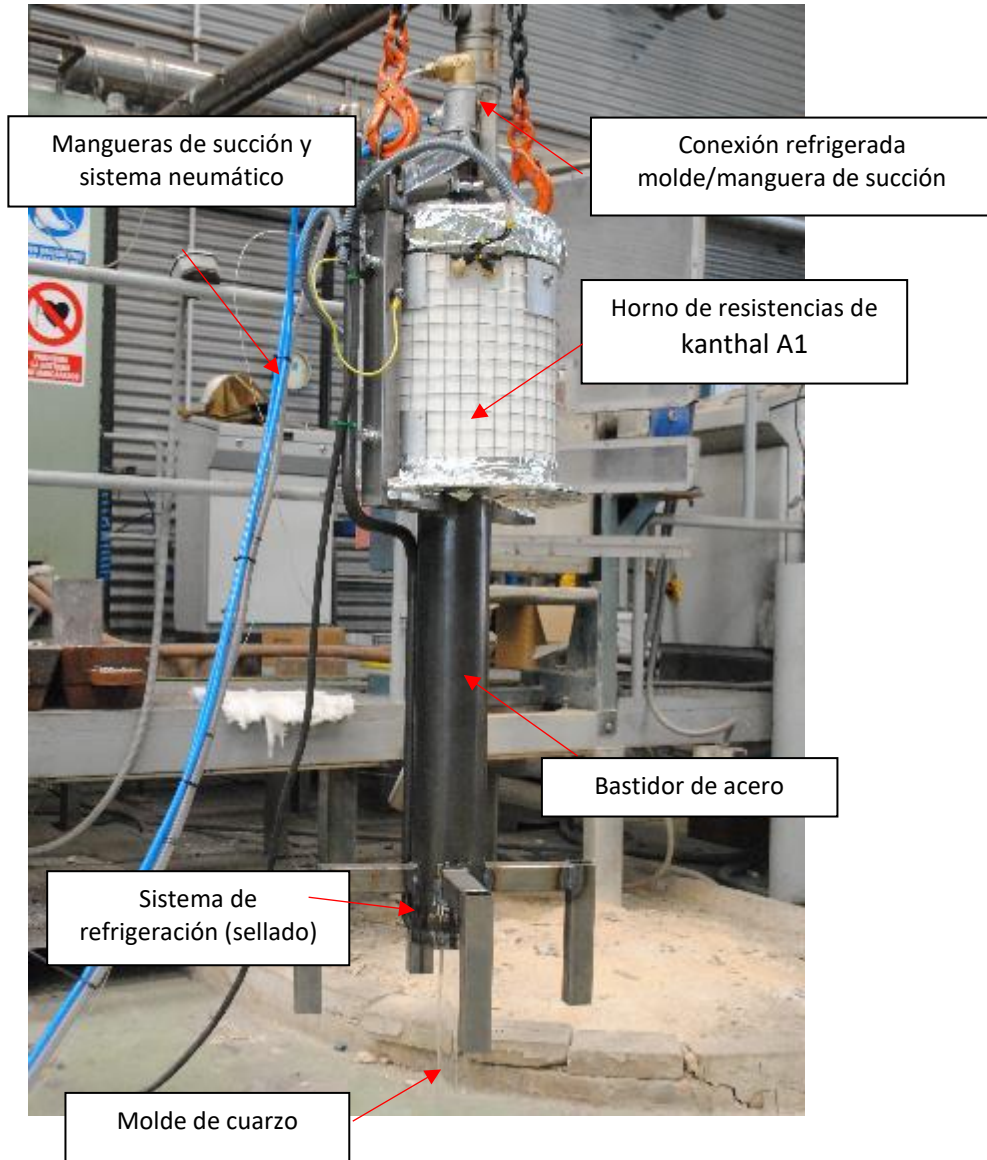


Figura 5: Imagen del prototipo desarrollado.

HITO 2: PUESTA A PUNTO DEL PROCESO DE FUSIÓN Y MOLDEO

El objetivo de este hito consistía en la puesta a punto de un procedimiento de fusión y moldeo que permitiese la obtención de barras de acero libres de defectos internos de longitudes cercanas a los 1000 mm.

Definición de los parámetros de moldeo y caracterización de las barras (T.2.1 y T.2.2))

Para la puesta a punto del nuevo proceso de moldeo y la definición de sus principales parámetros se realizaron coladas experimentales en horno de fusión a partir de las cuales se obtuvieron las barras objeto de estudio. Posteriormente, sobre las barras generadas, se llevaron a cabo pruebas de caracterización para determinar la bondad del proceso, centradas principalmente en pruebas para determinar defectos de rechupe o porosidad.

Las pruebas se realizaron con la aleación Ni-Span-C Alloy 902 cuya composición química se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición en % en peso de la aleación Ni-Span-C Alloy 902.

C	Fe	Ni	Cr	Ti	Al
≤ 0.06	47.0	41.0 - 43.5	4.90 - 5.75	2.20 - 2.75	0.3 - 0.8

Como punto de partida fue necesario el desarrollo del procedimiento de fusión de dicha aleación, así como la determinación de la temperatura de fusión. En la tabla 2 se muestra un resumen de la secuencia y las operaciones a realizar en la fusión de dicha aleación.

Tabla 2. Procedimiento de fusión de la aleación Ni-Span-C Alloy 902.

OPERACIÓN	ETAPA	DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN	T objetivo
Carga inicial en horno	1	Añadir: Chapa Férrica, Níquel y Cromo	1600 °C
Muestra de Horno	2	Alcanzar la Temperatura de Desescoriado Cubrir el caldo con desescoriente Desoxidar con 0.1% Mn y 0.2% Si	1.600 °C
Desoxidación en horno	3	Alcanzar la Temperatura de moldeo Retirar la escoria 3 minuto antes del moldeo, añadir: Titanio y Aluminio	1.640-1650 °C

Se realizaron 14 pruebas de fusión en el que se analizaron, entre otros parámetros, la influencia de la velocidad de llenado y la temperatura de precalentamiento del molde en el horno eléctrico en la calidad de las barras coladas por succión.

Prueba 1

Objetivo de la prueba: Al tratarse de la primera prueba con el nuevo dispositivo, el objetivo principal de esta primera colada fue analizar el correcto funcionamiento de los distintos componentes, la capacidad de regulación en la velocidad de llenado del molde, el

funcionamiento del sistema de detección de la altura de llenado del molde (presostato y electroválvulas) y el sistema de enfriamiento localizado para evitar el descuelgue del metal fundido.

Parámetros de la prueba: Con el objeto de poder observar la evolución del llenado del molde, se utilizó el soporte disponible con anterioridad a la realización de este proyecto (sin horno eléctrico de precalentamiento) ya que el aislamiento del nuevo sistema y la protección metálica imposibilita observar el llenado del molde. Se utilizó una presión inicial del calderín de -0.2 atm, una apertura de las válvulas de aguja de 1 vuelta y una temperatura de colada de 1650 °C.

Resultados de la prueba: Se obtuvo un llenado del molde en unos 15 segundos y a velocidad homogénea hasta que el calderín alcanzó la presión de consigna (-0.6 atm). En este instante se interrumpió el llenado automáticamente (se alcanzó la presión de consigna del presostato) y se activó el sistema de refrigeración para evitar el descuelgue del metal succionado. Todos los sistemas funcionaron correctamente.

Tras el llenado y solidificación de la barra se produjo la rotura del molde de cuarzo cayendo la barra al horno de inducción, lo que imposibilitó su caracterización.

La rotura se produjo exactamente en la sección alcanzada por el metal líquido en la que se puede observar una reducción de espesor del molde como consecuencia de la fusión parcial del tubo de cuarzo (zona indicada con flechas en la figura 6).

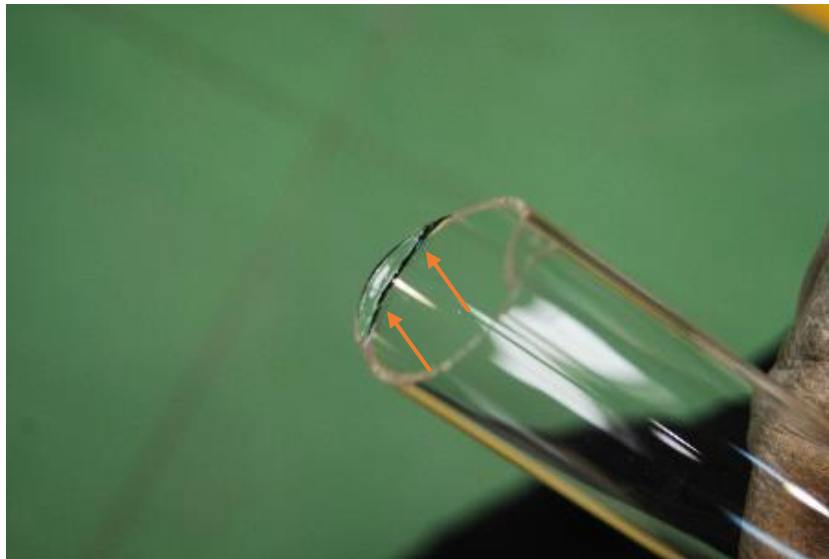


Figura 6: Zona de rotura del molde. Fusión parcial del cuarzo.

Prueba 2

Objetivo de la prueba: Evaluar la influencia del horno eléctrico en los defectos internos de solidificación.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 600 °C y una velocidad de llenado del molde equivalente a la utilizada en la prueba 1 (unos 15 segundos).

Resultados de la prueba: No se produjeron incidencias en el llenado del molde pero al igual que en la primera prueba el molde se rompió antes de retirarlo de encima del horno de fusión por

lo que la barra cayó en el caldo. Esto imposibilitó, como en el caso anterior, la caracterización de la barra obtenida.

Prueba 3

Objetivo de la prueba: Influencia de la refrigeración por aire comprimido de la junta molde/manguera de succión en la rotura de los moldes.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 600 °C, un llenado del molde en 15 segundos y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm.

Resultados de la prueba: En este momento del desarrollo se sospechaba que una posible causa de la rotura de los moldes podría ser debido al choque térmico producido por el caudal de aire comprimido utilizado para refrigerar la junta entre el molde y la conexión a la bomba de vacío. En la configuración utilizada hasta el momento el aire utilizado para la refrigeración de la junta fluía verticalmente por lo que tras refrigerar la junta, este tendía a introducirse en el horno de resistencias. Para limitar la posible influencia de este caudal de aire en la rotura de los moldes de cuarzo, se mecanizó un deflector (indicado con flechas verdes en la figura 7) que se colocó en la salida del aire de refrigeración de la junta. El objetivo de este deflector es limitar el flujo de aire hacia el interior del horno de resistencias (flujo del aire indicado con flechas azules). A pesar de la instalación del deflector el molde rompió nuevamente en una zona equivalente.

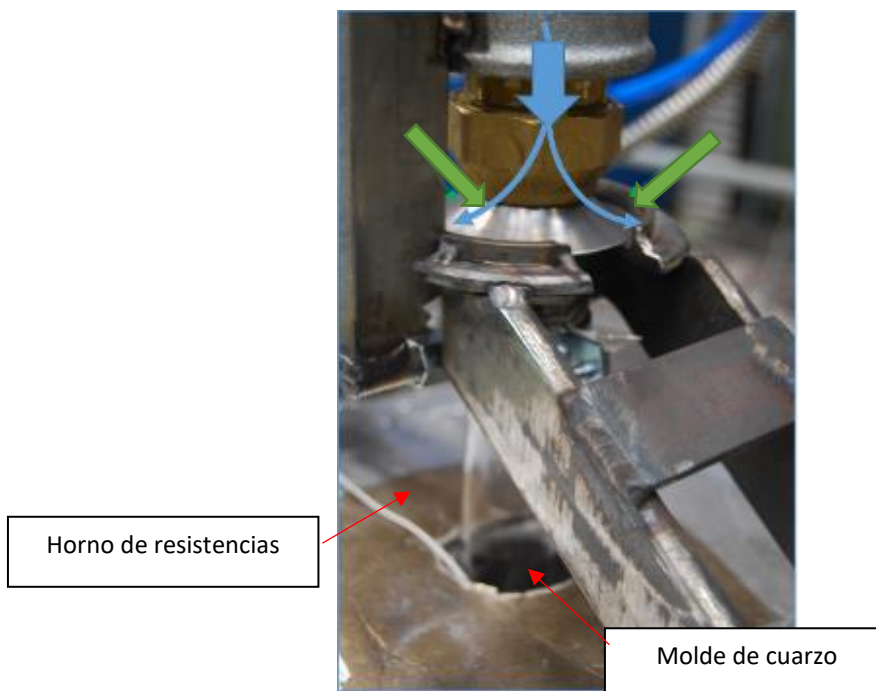


Figura 7: Deflector de aire en la junta molde/manguera de succión.

Si se tiene en cuenta que en ninguna de las pruebas realizadas con configuraciones previas a este proyecto se había producido este tipo de rotura de los moldes y que con esta prueba se ha descartado que esta sea debida a choque térmico producido por la refrigeración de la junta de la manguera de vacío, se puede pensar que la única variable introducida y no analizada es el

nuevo sistema de amarre del molde a la manguera de succión. Como no se puede mantener la unión mediante el inserto de cobre (la junta termo-retráctil utilizada se quemaría al estar dentro del horno de resistencias) se decidió construir un amarre en el extremo inferior del molde. El amarre consta de una brida metálica aislada del molde mediante lana de vidrio (véase la figura 8). Esta configuración permitió reducir significativamente la rotura de los tubos.



Figura 8: Amarre del molde en la parte inferior del bastidor.

Prueba 4

Objetivo de la prueba: Análisis del funcionamiento del sistema hidráulico utilizado para evitar el descuelgue del metal succionado.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 600 °C, un llenado del molde en 15 segundos y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm.

Resultados de la prueba: Una vez finalizado el llenado del molde se esperó unos 10 segundos hasta accionar la pinza hidráulica colocada en la sección inferior del molde (sellado mecánico del descuelgue). Al producirse el accionamiento de la pinza hidráulica se vertió una pequeña parte del acero líquido al producirse la rotura parcial del molde de cuarzo. Esto, junto los desperfectos sufridos en la pinza hidráulica al quemarse los retenes (insuficiente aislamiento térmico de la pinza) supuso que se desestimase su utilización.

Como se puede observar en la figura 9 se obtuvo una deformación significativa del molde y se evitó el descuelgue del metal. En esta prueba no se produjo la rotura de la barra una vez colada por lo que en todas las pruebas posteriores se utilizará el amarre mecánico del molde anteriormente descrito.

Para el análisis de la barra obtenida, de 3.5 kg de peso y unos 850 mm de longitud, se realizaron cortes cada 100 mm. Tal y como se puede observar en el croquis de la figura 10 se tomó como "origen" (sección S1) una sección a 20 mm del extremo superior de la barra (todas la barras coladas posteriormente han sido analizadas en las mismas secciones). Se observaron defectos internos en distintas secciones como consecuencia de rechupes; la presencia de un pequeño rechupe en el extremo superior de la barra (sección S1 en la figura 11) y lo que resulta más destacable un gran rechupe central en la sección S5. También se puede observar como en la

sección S7 (sección a unos 100 mm del extremo inferior), también se observa un pequeño rechuefo central.



Figura 9: Extremo inferior del molde "estrangulado".



Figura 10: Esquema de las secciones analizadas en las barras. Origen (S1) en la sección superior.

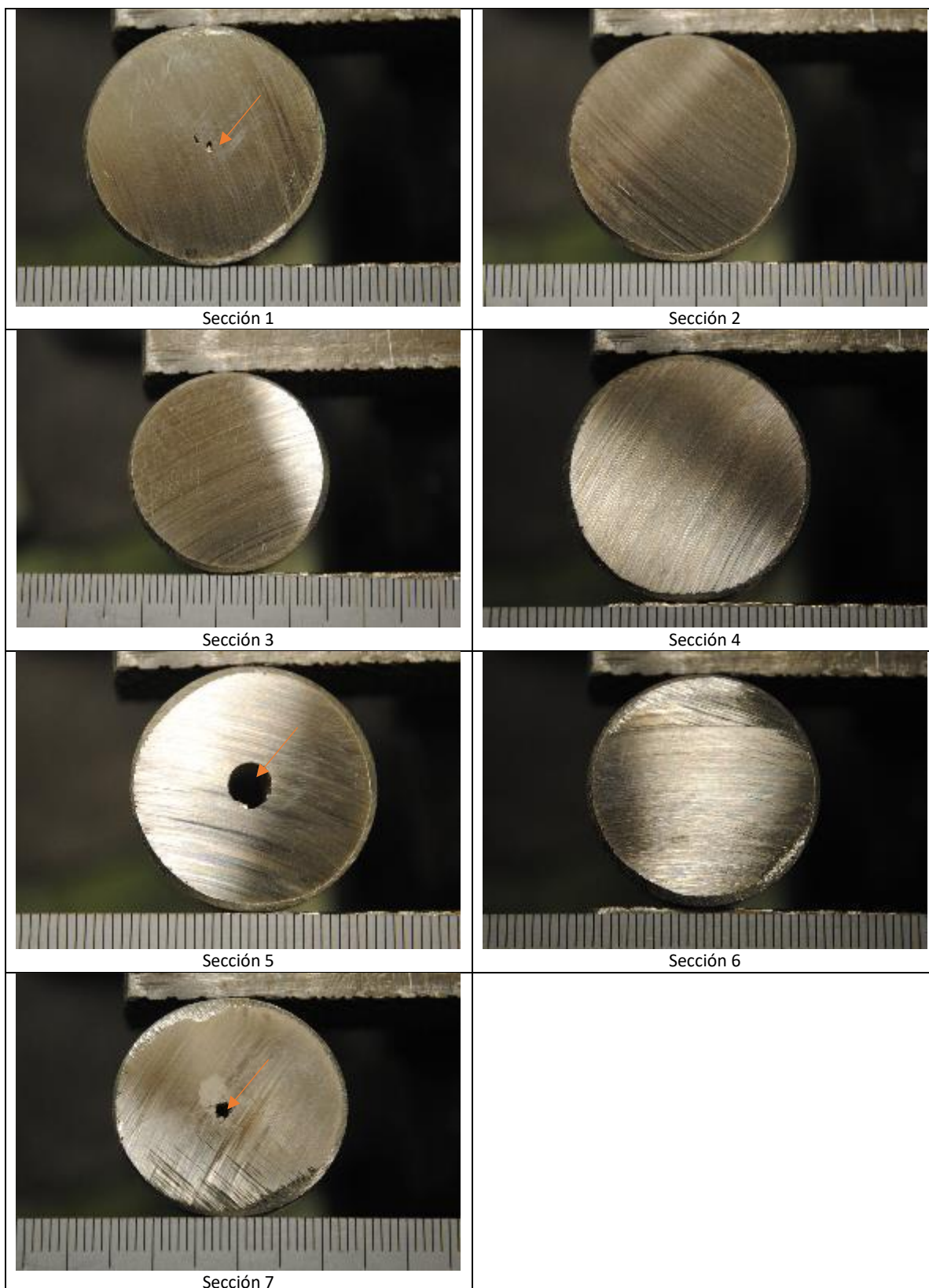


Figura 11: Colada 4. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 5

Objetivo de la prueba: Estudio de bajas velocidades de llenado en el rechupe central.

Parámetros de la prueba: Gracias a que se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 710 °C (retrasando la solidificación en el extremo superior del molde), se realizó un llenado del molde en 25 segundos (velocidad de llenado inferior a la de la prueba 4) y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm. Si el precalentamiento del molde fuese suficiente para evitar las marcas de ola en la superficie del molde, una velocidad de llenado “lenta” facilitaría el sellado mediante el sistema de refrigeración reduciendo las dimensiones del descuelgue.

Resultados de la prueba: Lo primero que cabe destacar es la presencia de marcas en forma de “olas” en la superficie de la barra en la zona próxima al extremo superior de la barra obtenida (extremo frío). En el estudio anterior ya se había observado este fenómeno y se había concluido que estas marcas superficiales son consecuencia de una velocidad de llenado “insuficiente”. Esto es, al tiempo que se produce el llenado del molde se inicia la solidificación del acero sobre la superficie del molde dando lugar a estas marcas. En la figura 12 se compara el aspecto superficial de las pruebas 5 (llenado en 25 segundos en la que se observan estas marcas superficiales) y 4 (tiempo de llenado de 15 segundos, con un aspecto más uniforme de la superficie).

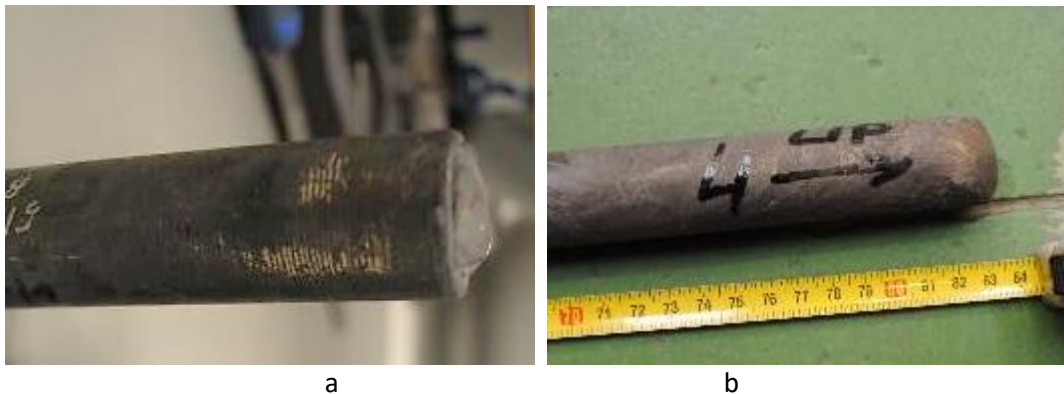


Figura 13: Extremo superior de a) barra “colada 5” y b) barra “colada 4”.

En el análisis de las secciones de la barra obtenida en la prueba 5 se ha observado como el rechupe presente en la zona superior de la barra 4 parece haber desaparecido pero en las secciones S4 y S5 se sigue observando un rechupe central muy significativo.

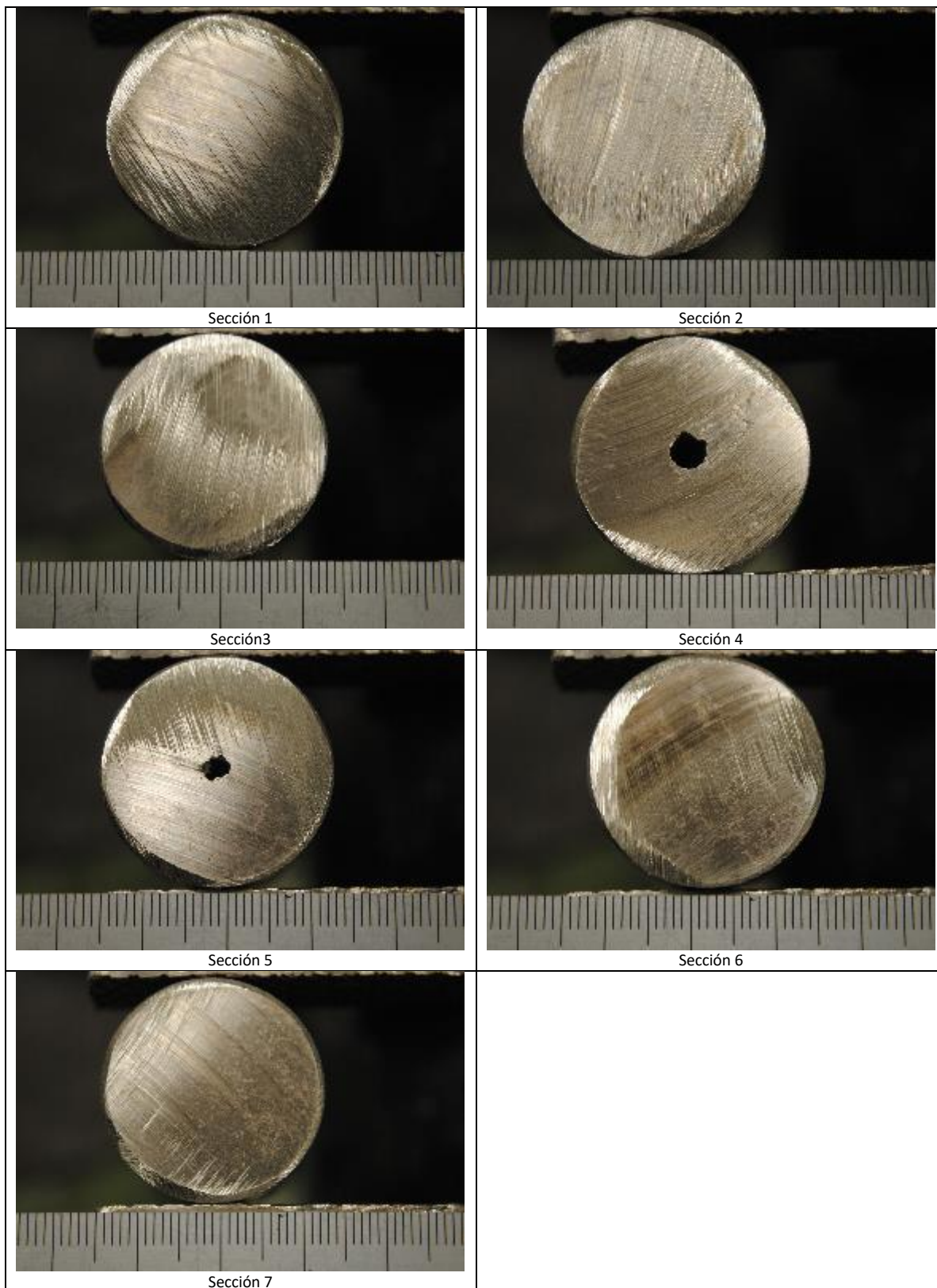


Figura 14: Colada 5. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 6

Objetivo de la prueba: Estudio de la influencia de la velocidad de llenado en el rechupe central y marcas de ola.

Parámetros de la prueba: Se repitieron las condiciones de colada de la prueba 5 a excepción de la velocidad de llenado que se ha producido en 10 segundos.

Resultados de la prueba: Se produjo un error en la colocación del molde de cuarzo en el horno de fusión (no se introdujo el extremo del molde suficiente) y se succionó aire y metal fundido. Esto supuso que el metal fundido alcanzase la manguera de succión perforándola e impidiendo el llenado del molde (se produjo el descuelgue del metal aún no solidificado). En la figura 15 se muestra la salida del metal fundido y aire en la zona de la manguera de succión y el aspecto superficial de la muestra obtenida en la zona superior del molde. Se puede observar la ausencia de olas de playa pero como se ha comentado al perforarse la manguera de succión se produjo el descuelgue del metal aún no solidificado obteniéndose un tubo en vez de una barra “maciza”.



Figura 15: Colada 6. Izquierda: Succión de aire y metal. Perforación de la manguera de succión. Derecha: Sección S1. Superficie del tubo sin olas de playa.

Prueba 7

Objetivo de la prueba: Estudio de la influencia de la válvula reguladora de caudal.

Parámetros de la prueba: Se optimizó el aislamiento del molde de cuarzo retacando lana de vidrio en la longitud total del bastidor de acero por debajo del horno de resistencias. También se redujo la presión del caudal de refrigeración del sistema de sellado al objeto de retardar la rotura del molde de cuarzo (cuando ya se produce la solidificación y el molde ha enfriado, caudales muy elevados de aire producían desprendimientos de cuarzo). Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 700°C, se realizó un llenado del molde en unos 40 segundos (al aumentar el aislamiento térmico del molde se decidió aumentar también el tiempo de llenado para evaluar la presencia de marcas de ola) y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm. Una vez completado el llenado del molde se cerró la válvula de

entrada del pulmón para evitar la oscilación del caldo observado durante la solidificación del mismo.

Resultados de la prueba: Se obtuvo una barra de 3,66 kg y unos 900 mm de longitud total. La reducción de la velocidad de solidificación (asociada a un mayor aislamiento térmico del molde y menor caudal de aire comprimido) supuso una reducción, respecto las pruebas anteriores de la extensión del rechupe central y no se observaron marcas de olas de playa en el extremo superior de la barra. Como se puede observar en la figura 16 únicamente se ha observado rechupe en la sección superior del molde (S1), una pequeña indicación en la sección S4 y defectos en la sección más próxima al extremo inferior (sección localizada por debajo de la zona de enfriamiento).

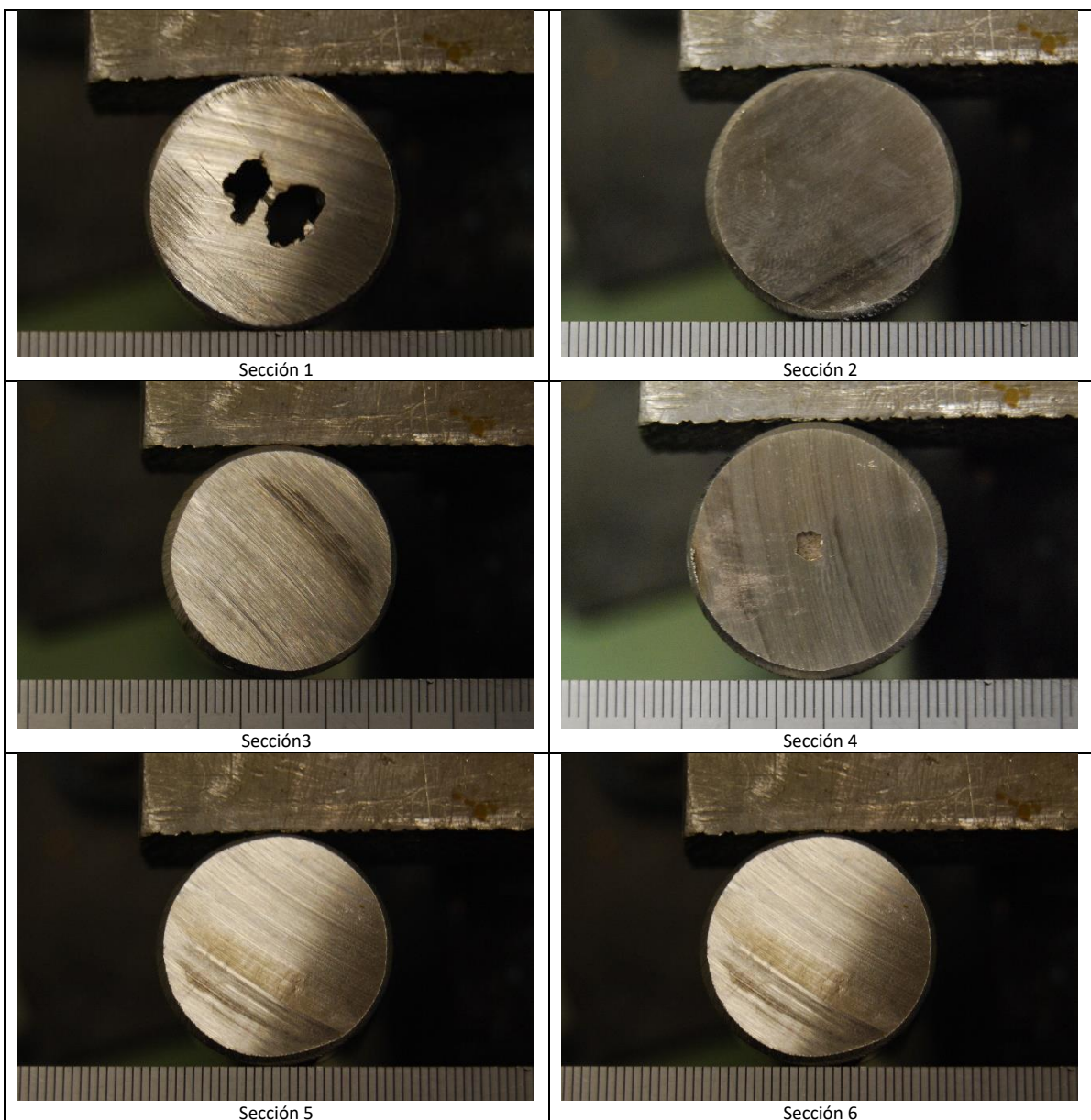




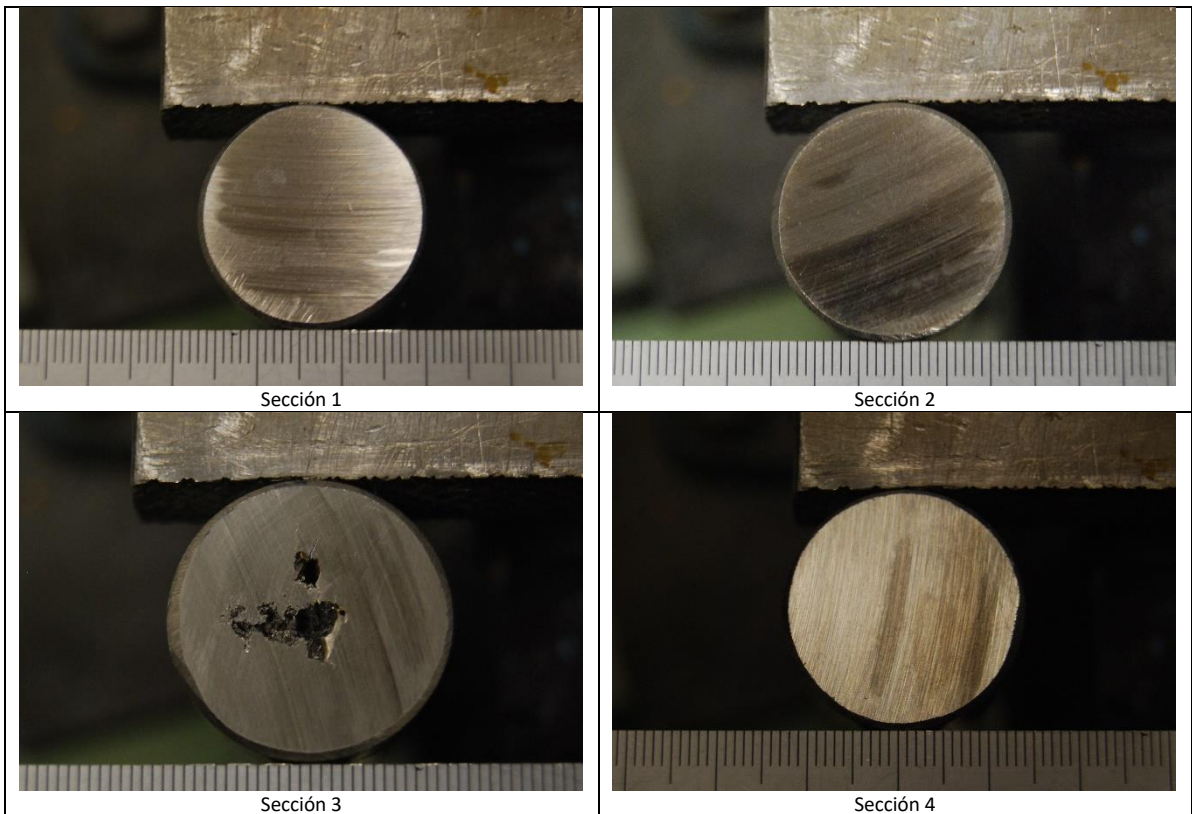
Figura 16: Colada 7. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 8

Objetivo de la prueba: Influencia de la velocidad de llenado en el rechupe central.

Parámetros de la prueba: Se utilizaron unos parámetros equivalentes a los de la prueba 7 a excepción de una mayor velocidad de llenado del molde (llenado en unos 15 segundos) y que tras el llenado del molde no se interrumpió la succión de las bombas de vacío.

Resultados de la prueba: Se obtuvo una barra de unos 3,63 kg y unos 900 mm de longitud y como se puede observar en la figura 17 únicamente se han observado defectos macroscópicos en la sección S3.



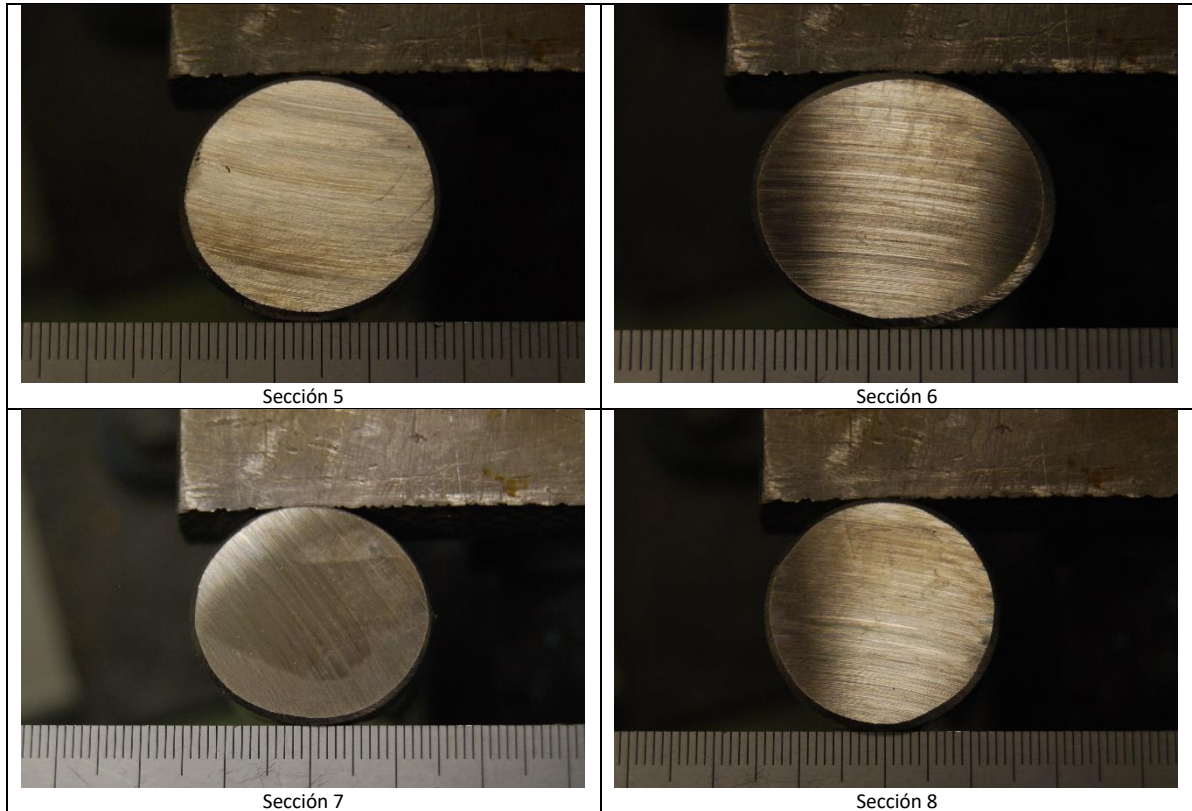


Figura 17: Colada 8. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 9

Objetivo de la prueba: Influencia de la velocidad de llenado en el rechupe central.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 700 °C, se realizó un llenado del molde en unos 7 segundos y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm. Para conseguir esta velocidad de llenado se presurizó inicialmente el calderín a -0.2 atm y se abrió la válvula reguladora de entrada al calderín al 100%.

Resultados de la prueba: La pieza fue desmoldeada demasiado pronto y en el momento de extraerla el molde del soporte de acero se golpeó y la barra colada rompió en una sección que no había solidificado completamente (véase figura 18). Se observaron defectos en las secciones S2, S6 y S7 (véase figura 19), pero ha de tenerse en cuenta el hecho de que la pieza fue desmoldeada sin haber solidificado completamente y se observó derrame de acero fundido.



Figura 18: Colada 9. Sección rota al desmoldear.

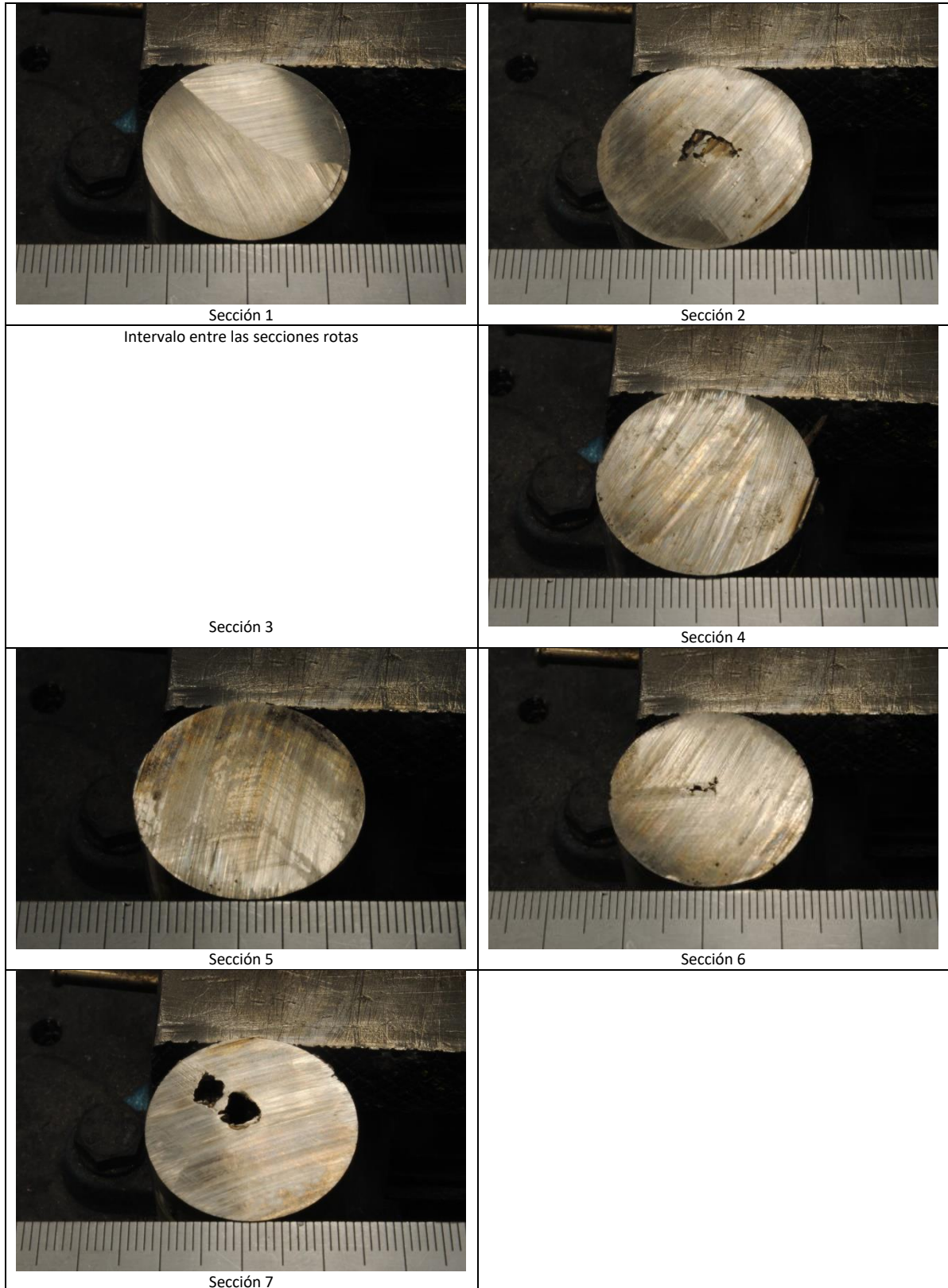


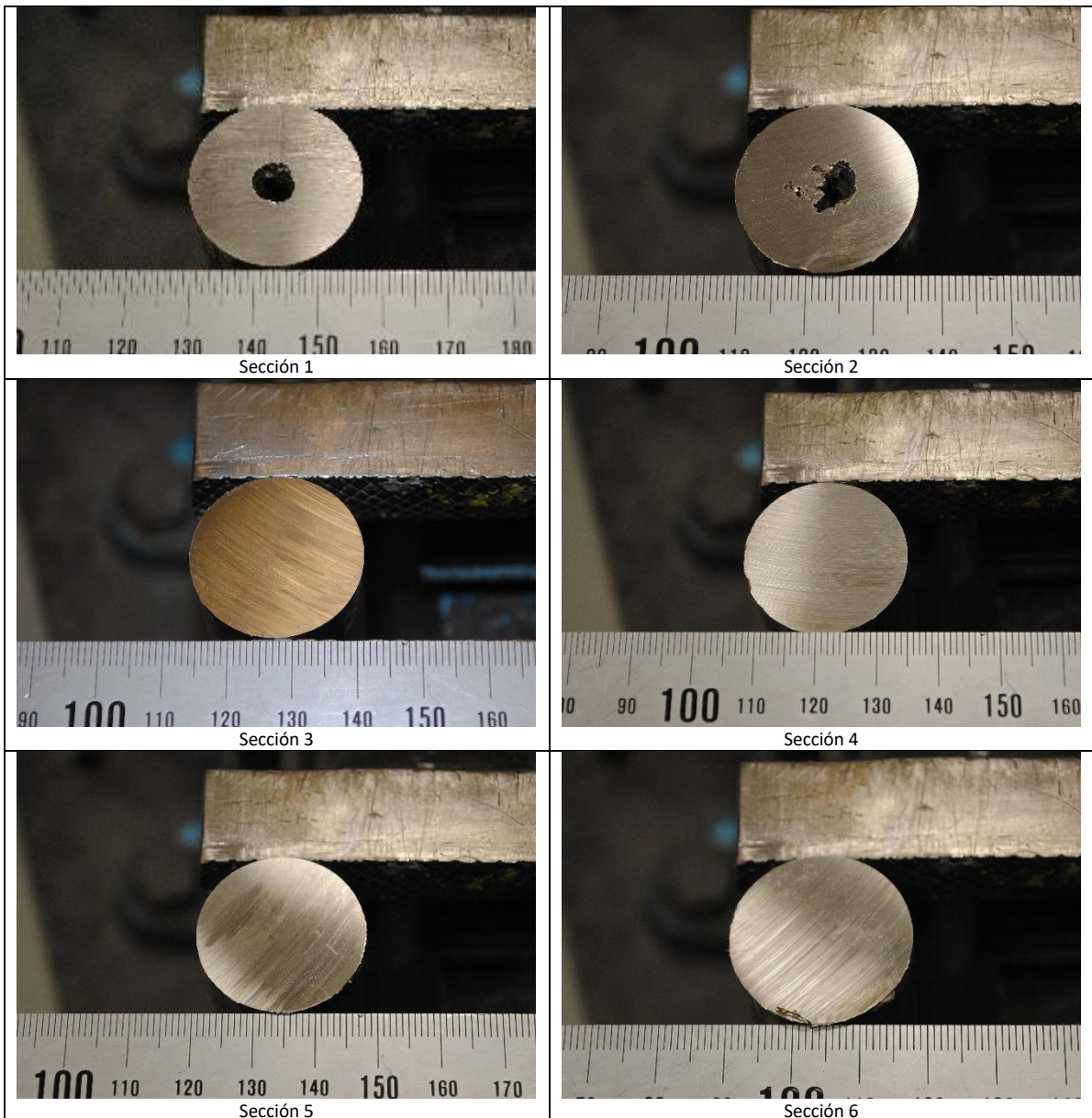
Figura 19: Colada 9. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 10

Objetivo de la prueba: Influencia de la temperatura de precalentamiento en el rechupe central.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 900 °C, se realizó un llenado del molde en unos 5 segundos y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm. También se redujo el caudal del aire comprimido utilizado en el sistema de refrigeración.

Resultados de la prueba: Se obtuvo una barra de 3,39 kg y únicamente se observaron defectos en las secciones S1 y S2 (véase figura 20).



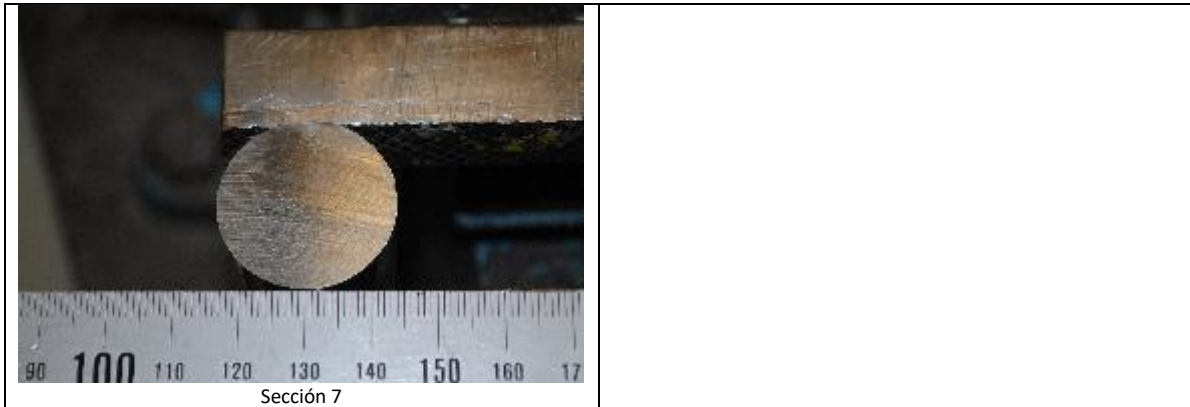


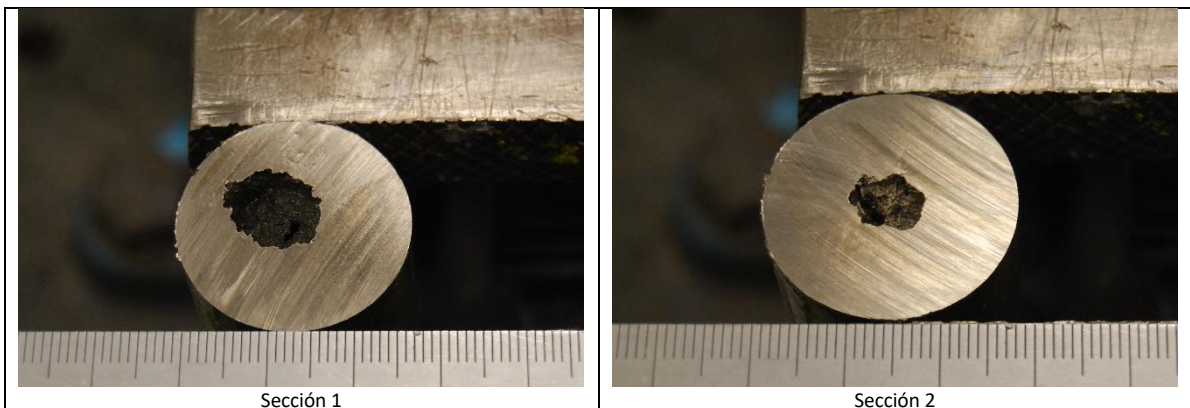
Figura 20: Colada 10. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 11.

Objetivo de la prueba: Influencia de la longitud de la barra en el rechupe central.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 900 °C, se realizó un llenado del molde en unos 10 segundos y una presión objetivo del presostato de -0.75 atm (unos 100 mm más larga que las pruebas anteriores) con una presión inicial del calderín antes de iniciarse la succión de -0.50 atm.

Resultados de la prueba: Lo primero que cabe destacar es que al utilizar una presión objetivo menor (-0.75 atm en vez de -0.65 como en las coladas anteriores) se obtuvo una barra de mayor longitud (unos 105 mm más) y peso (4,53 kg). Al igual que en la prueba 10 en la que también se utilizó una temperatura del horno eléctrico de 900°C no se observaron defectos en las secciones inferiores de la barra. Sin embargo siguen observándose rechupes en las secciones superiores (véanse secciones S1, S2 y S3 en la figura 21). En esta prueba se obtuvo una longitud sin defectos ligeramente superior a los 700mm.



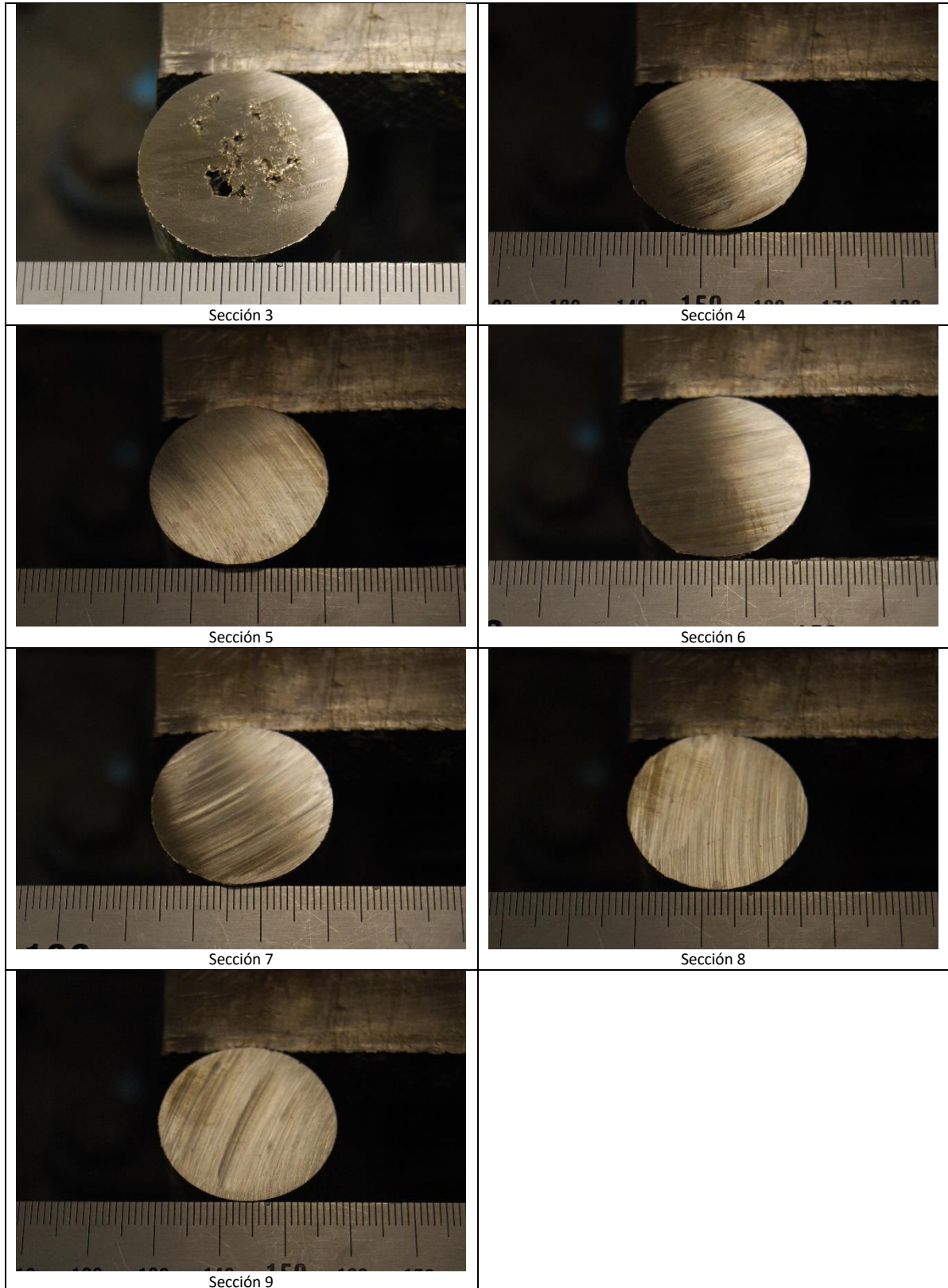


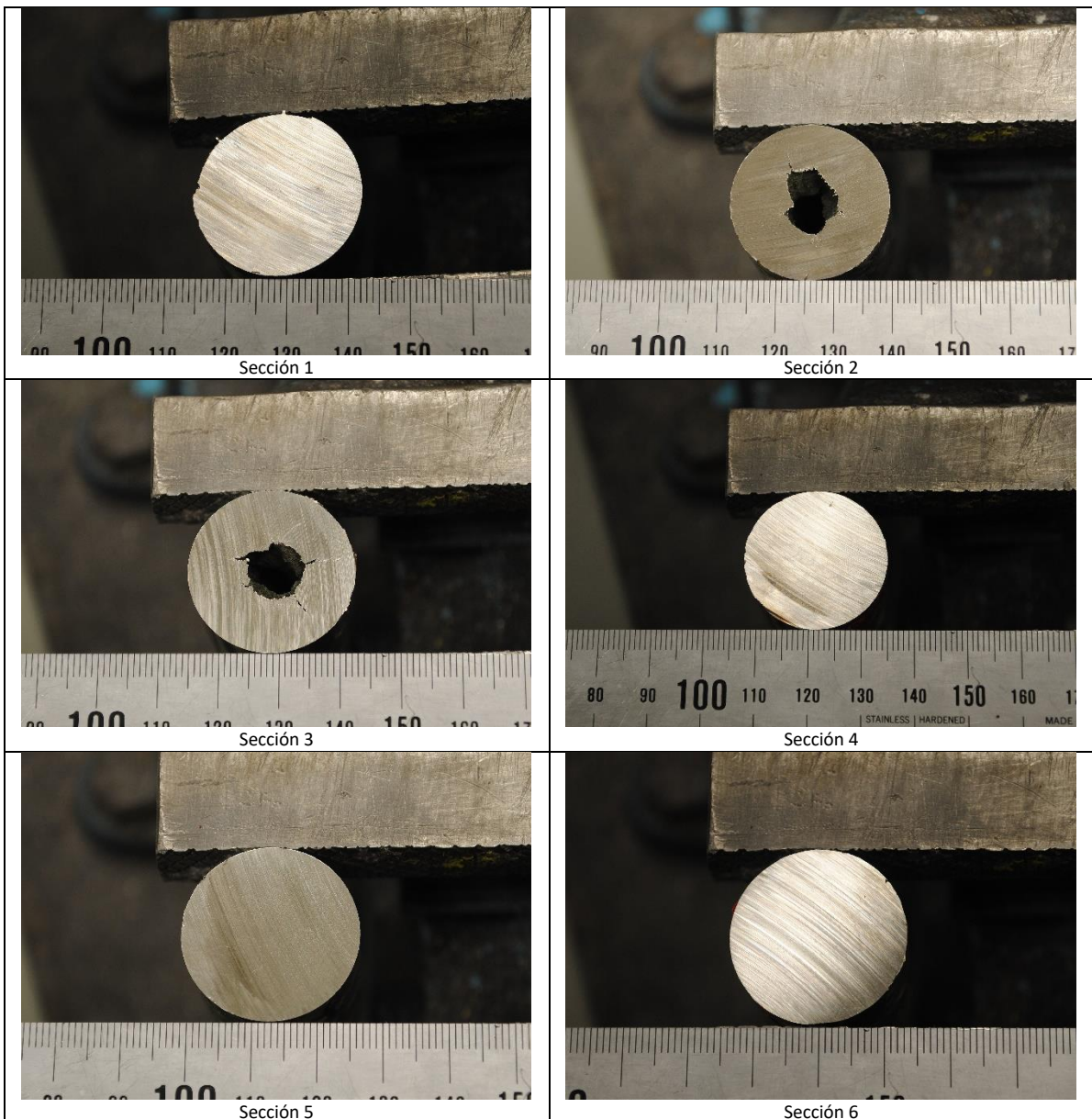
Figura 21: Colada 11. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 12.

Objetivo de la prueba: Estudio de la influencia de la velocidad de llenado en el rechupe central.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 700°C, se realizó un llenado del molde casi instantáneo y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm con una presión inicial del calderín antes de iniciarse la succión de -0.60 atm.

Resultados de la prueba: No se observaron diferencias significativas con pruebas anteriores a pesar de una velocidad de llenado tan elevada en las que se había utilizado una velocidad de llenado inferior. Siguen observándose defectos en las secciones superiores S2 y S3 mientras las secciones inferiores no presentan defectos.



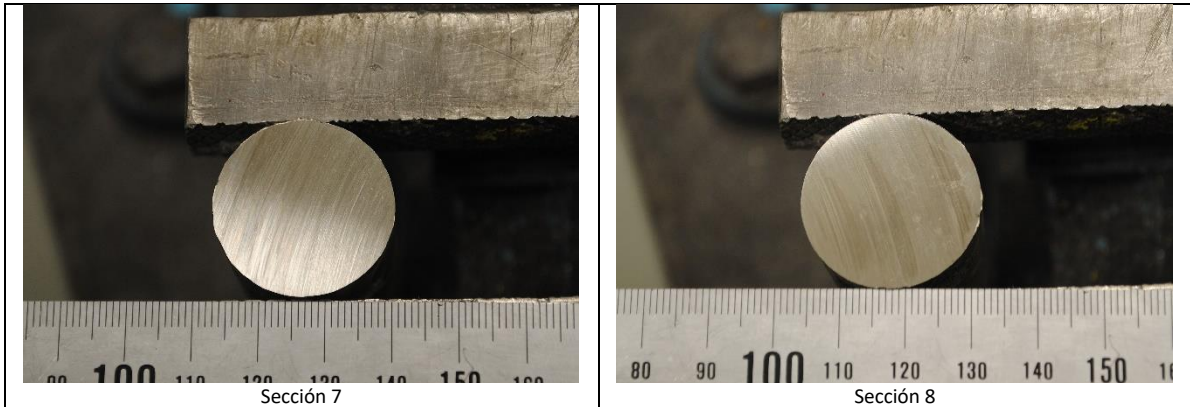


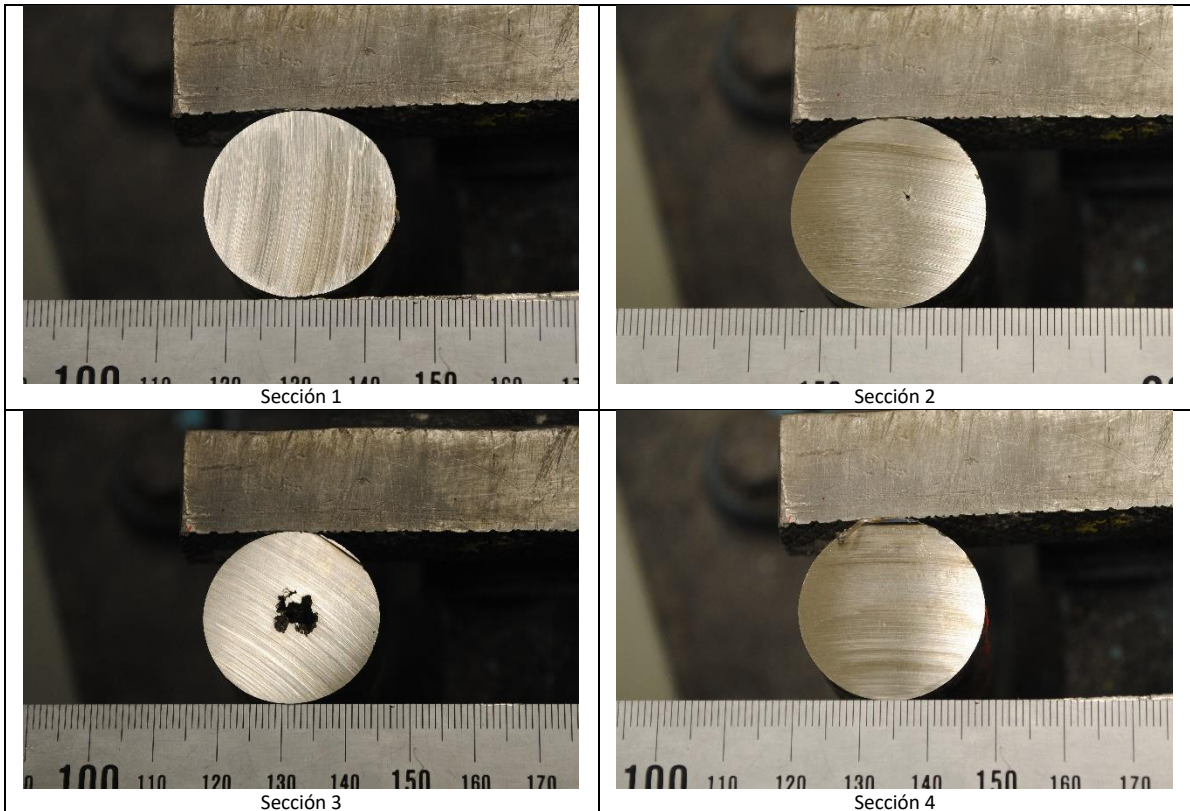
Figura 22: Colada 12. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 13

Objetivo de la prueba: Estudio de la influencia de la temperatura del horno eléctrico en el rechupe central.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 550°C, se realizó un llenado del molde en unos 8-10 segundos y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm con una presión inicial del calderín antes de iniciarse la succión de -0.45 atm.

Resultados de la prueba: Se observaron defectos internos en las secciones S2, S3, S6 y S7.



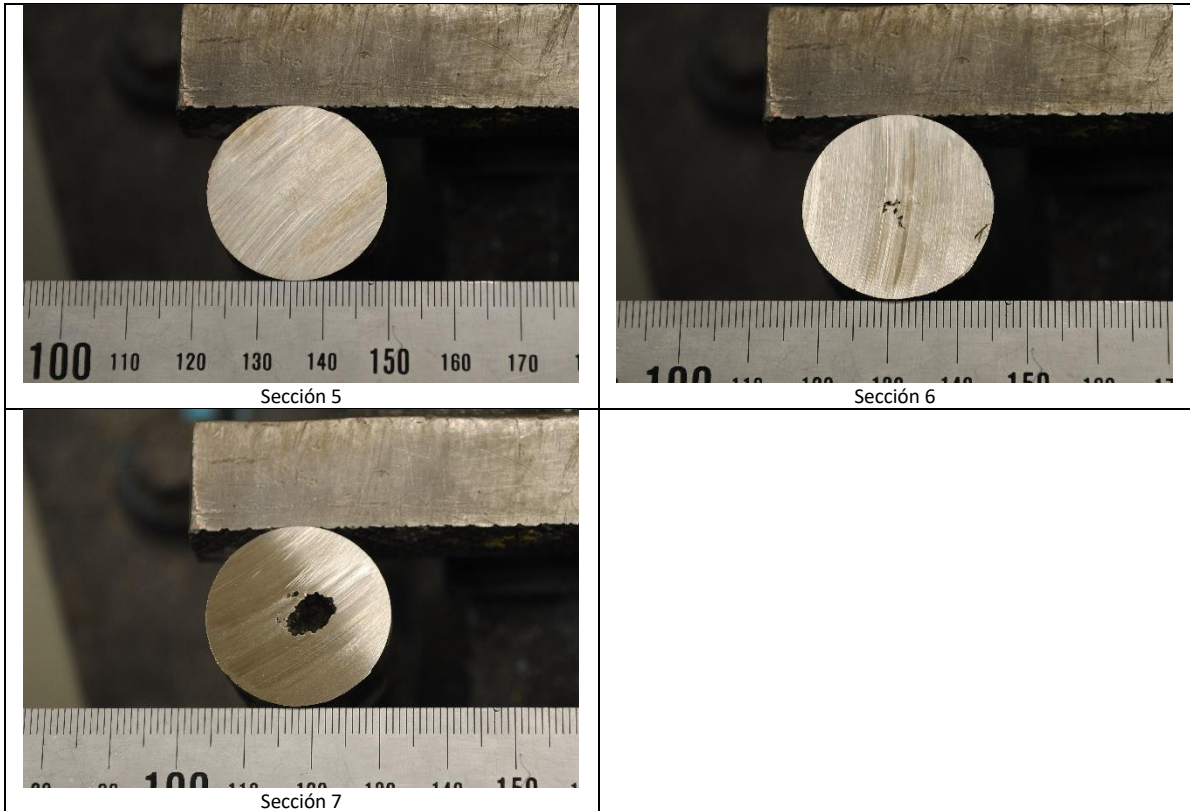


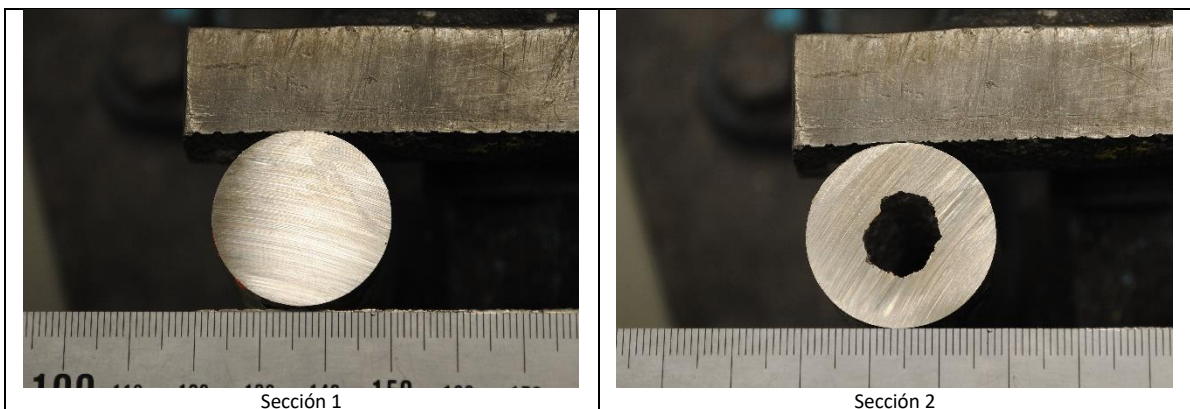
Figura 23: Colada 13. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

Prueba 14

Objetivo de la prueba: Estudio de la influencia de la temperatura del horno eléctrico en el rechupe central.

Parámetros de la prueba: Se utilizó una temperatura de precalentamiento en el horno eléctrico de 500°C, se realizó un llenado del molde en unos 8-10 segundos y una presión objetivo del presostato de -0.65 atm con una presión inicial del calderín antes de iniciarse la succión de -0.45 atm.

Resultados de la prueba: Se obtuvieron resultados equivalentes a los obtenidos en la prueba 13 con defectos internos en varias secciones (S2, S3, S4 y S6).



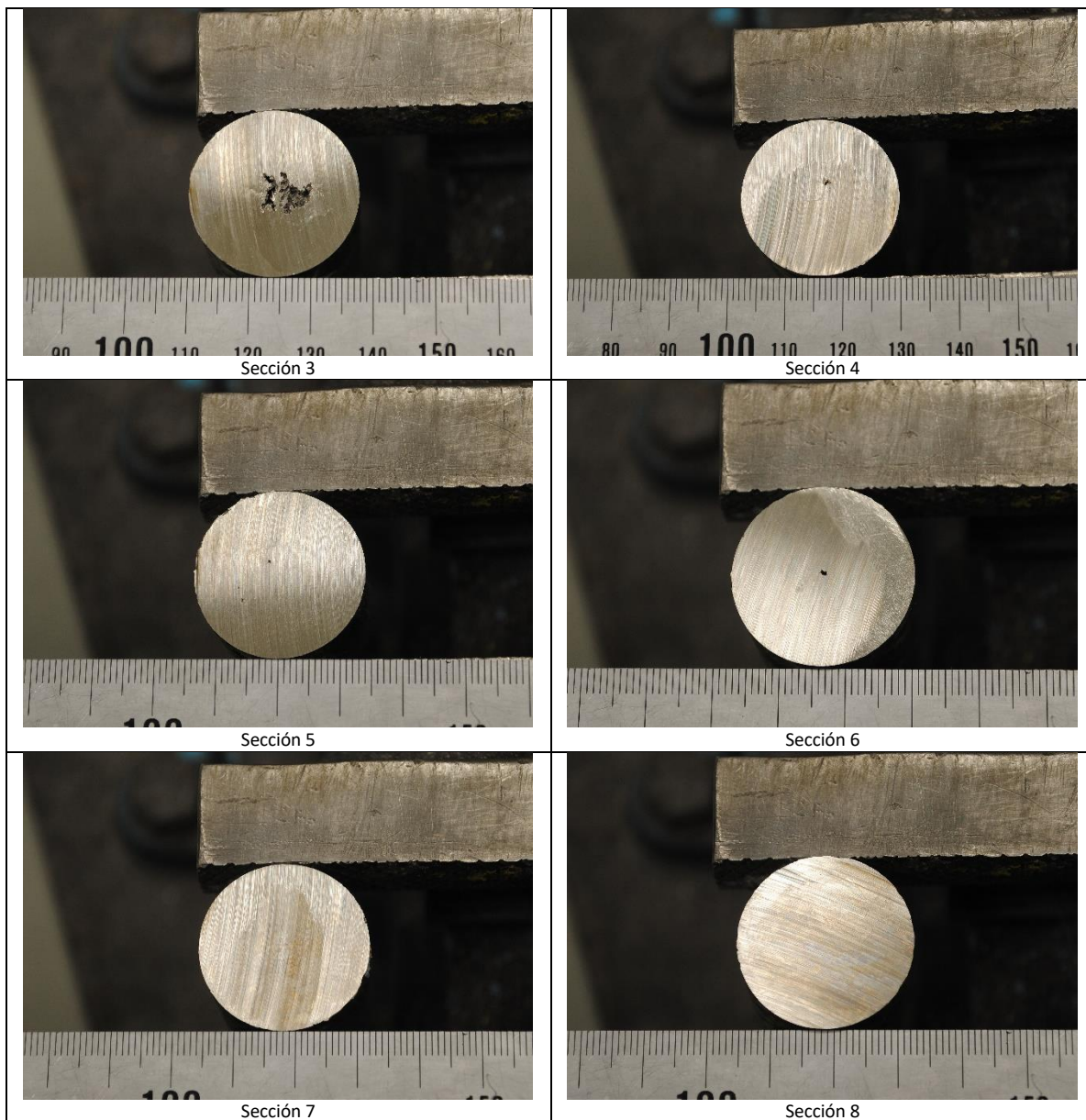


Figura 24: Colada 14. Aspecto macroscópico cada 100 mm desde el extremo superior.

4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en las coladas experimentales han permitido validar el diseño del sistema de moldeo por succión propuesto, observando que este cubre todas las necesidades detectadas inicialmente.
- En cuanto a la velocidad de llenado de los moldes, se observó que esta variable influye principalmente en el acabado superficial de las barras. Se observó que esta tiende a mejorar cuanto mayor es la velocidad de llenado.
- Se ha identificado la temperatura de precalentamiento del molde como la variable con mayor influencia en la presencia de los rechupes centrales, así cuanto mayor es la temperatura menor es la densidad y tamaño de los mismos. Para temperaturas de precalentamiento del molde inferiores a 700°C, se observa rechupes en las zonas próximas al extremo inferior del molde de cuarzo además de los rechupes en el extremo superior.
- De las dos opciones analizadas para el control del descuelgue del acero fundido (forzar el inicio de la barra de solidificación en la parte inferior del molde mediante un sistema de refrigeración y el sellado mecánico mediante sistema hidráulico), la prueba realizada con las pinzas hidráulicas no ha dado los resultados esperados. El desarrollo final se ha basado en un sistema de refrigeración por aire comprimido que fuerza el inicio de la solidificación en la parte inferior del molde.
- El diseño de la junta del moldeo utilizado permite la adaptación del prototipo a geometrías diferentes de barras con distintos diámetros con la simple adaptación del amarre del molde de cuarzo al sistema de succión.
- Si bien la longitud de las barras no ha sido un parámetro estudiado profusamente, se ha observado como al aumentar la longitud de las barras aumenta la longitud libre de rechupes, ya que con el procedimiento desarrollado estos se localizan en el extremo superior de la barra.
- Las conclusiones obtenidas en los puntos anteriores han permitido definir un procedimiento óptimo de operación en la que fijando las variables temperatura de precalentamiento, velocidad de llenado del molde y altura de llenado del molde por el que se consigue el moldeo por succión de barras de 25 mm de diámetro y hasta unos 700 mm de longitud libre de defectos internos. Aunque en las pruebas experimentales se observó la presencia de rechupes en alguna sección de las barras, estos se producían en el extremo superior de las mismas, lo que permite obtener barras con hasta 700mm de longitud libres de defectos.