

ANEXOS

ANEXO 1. Tabla de clasificación de los procesos de fundición	2
ANEXO 2. Descripción de armario de gas.....	3
ANEXO 3. Descripción y tabla de productos de poteyage	4
ANEXO 4. Distribución de línea de producción.....	6
ANEXO 5. Propiedades térmicas del Acero 1.2343	7
ANEXO 6. Calidad del gas natural.....	10
ANEXO 7. Plano de boquilla de salida quemador lateral	11
ANEXO 8. Geometría del molde	12
ANEXO 9. Rampas de calentamiento	15
ANEXO 10. Estimación de la emisividad del molde.....	17
ANEXO 11. Estimación temperatura superficie del molde	20
ANEXO 12. Tabla de coeficientes de conducción transitoria	21
ANEXO 13. Selección de $T_{AD\ LLAMA}$ en función del exceso de aire	22
ANEXO 14. Croquis de mechero lateral	24
ANEXO 15. Clasificación de los procesos de fundición	25
ANEXO 16. Defectología en procesos de fundición. principales defectos	26
ANEXO 17. Cálculo de los coeficientes de convección.....	28
ANEXO 18. Cálculo del número de Biot y Fourier	31
ANEXO 19. Cálculos necesarios para el cálculo de la eficiencia.....	32
ANEXO 20. Planteamiento de números adimensionales y parámetros necesarios.....	33

ANEXO 1. Tabla de clasificación de los procesos de fundición

Características generales de los procesos de fundición								
	Arena	Cáscara	Modelo evaporativo	Yeso	Revestimiento	Molde permanente	Matriz a presión	Centrífuga
Materiales fundidos comúnmente	Todos	Todos	Todos	No ferrosos (Al, Mg, Zn, Cu)	Todos	Todos	No ferrosos (Al, Mg, Zn, Cu)	Todos
Peso (kg):								
Mínimo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.1	<0.01	0.01
Máximo	s/lím.	100+	100+	50+	100+	300	50	5000+
Tipo de acabado superficial (R_a en μm)	5–25	1–3	5–25	1–2	0.3–2	2–6	1–2	2–10
Porosidad ¹	3–5	4–5	3–5	4–5	5	2–3	1–3	1–2
Complejidad de forma ¹	1–2	2–3	1–2	1–2	1	2–3	3–4	3–4
Precisión dimensional ¹	3	2	3	2	1	1	1	3
Espesor sección (mm):								
Mínimo	3	2	2	1	1	2	0.5	2
Máximo	s/lím.	—	—	—	75	50	12	100
Tipo de tolerancia dimensional (mm/mm)	1.6–4 mm (0.25 mm para partes pequeñas)	± 0.003		± 0.005 –0.010	± 0.005	± 0.015	± 0.001 –0.005	0.015
Costo ^{1,2}								
Equipo	3–5	3	2–3	3–5	3–5	2	1	1
Modelo/matriz	3–5	2–3	2–3	3–5	2–3	2	1	1
Mano de obra	1–3	3	3	1–2	1–2	3	5	5
Tiempo típico de entrega ²	Días	Semanas	Semanas	Días	Semanas	Semanas	Semanas-meses	Meses
Capacidad típica de producción ² (partes/molde-hora)	1–20	5–50	1–20	1–10	1–1000	5–50	2–200	1–1000
Cantidad mínima ²	1	100	500	10	10	1000	10,000	10–10,000

Tabla 1.- Clasificación de los procesos de fundición. [Fuente]: tabla 11.2, Manufactura, Ingeniería y Tecnología- Serope Kalpakjian y Steven Schmid 5ta Edición. Página 288. Tabla 11.2.

ANEXO 2. Descripción de armario de gas

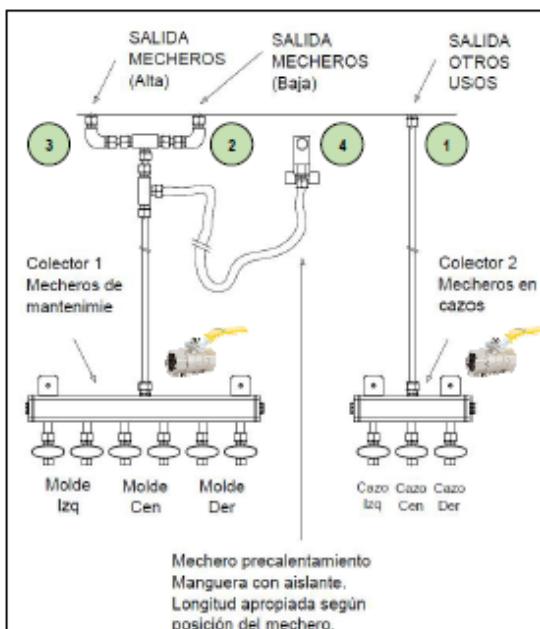
 <p>ALUMALSA Ctra. Castellón Km 6,400 Tfn.: 976 500 960 Fax.: 976 500 431</p> <p>Departamento Industrialización</p>	ARMARIOS DE GAS EN BASTIDORES	REF.:	OPL_170927a	Página 1/1		
		REVISIÓN:	A			
		Fecha:	27/09/2017			
Análisis funcional						
Ejemplo de conexión armario de gas.						
						
						
<p>1 Salida otros usos: Esta conexión, en ningún caso debe estar unida al resto de salidas del armario. Se trata de una salida no controlada. Su uso debe restringirse a mecheros de calentamiento en cazos.</p>						
<p>2 Salida mecheros baja (mecheros mantenimiento): Proporciona mezcla gas/aire con un caudal muy bajo. Está unida, con el mayor diámetro posible, a la salida del mechero de alta y al colector común. Su función es, únicamente como llama piloto, que garantice presencia de llama. Para obtener salida de mezcla, es necesario proceder de la siguiente forma: 1. Con selector de gas en posición 0 2. Poner a 1 el selector de gas 3. T<30° para encender físicamente la llama piloto. Piloto luminoso "confirm. Llama" parpadea. 4. Confirmar el encendido de llama, pulsando botón luminoso "confirm. Llama" 5. T>30° sin "confirm. Llama", se desconecta la salida de gas y es necesario repetir procedimiento desde el paso 1 6. T<30° con "confirm. Llama", piloto asociado al pulsador, permanece encendido de forma fija. La salida de mezcla del mechero de baja, es continua. Ajustar la llama piloto lo más bajo posible.</p>						
<p>3 Salida mecheros alta (mecheros mantenimiento): Proporciona mezcla gas/aire con un caudal muy alto. Está unida, con el mayor diámetro posible, a la salida del mechero de baja y al colector común. Su función es el calentamiento y mantenimiento de la temperatura de consigna del molde. Solo proporciona salida de mezcla cuando, la salida del mechero de baja está activa y la temperatura del molde está por debajo de la consigna.</p>						
<p>4 Mechero de precalentamiento: Función especial para alcanzar la temperatura de trabajo en molde. Empleo de mechero específico, no compatible con ciclo de trabajo. Puesta en servicio: seguir los mismos pasos descritos para los mecheros de mantenimiento Emplear enchufe rápido Rtc SERIE 170.11 de 1/2" o similar.</p>						
						

Figura 1. Armario de gas. [Fuente]: documento interno.

ANEXO 3. Descripción y tabla de productos de poteyage

Gracias a la capa de pintura adherida por este producto, esta aporta tres funciones principalmente: *proteger* al molde de la alta temperatura del metal, *generar* un adecuado acabado superficial en la pieza y, por último, dependiendo de la conductividad que tenga el producto aplicado, aportará una función determinada dependiendo de la zona del molde y, por ende, de la pieza en cuestión. Es decir, en una mazarota o en un bebedero, donde vamos a necesitar mayor temperatura y mantener la aleación en estado líquido durante la mayor parte del tiempo de solidificación, aplicaremos un componente que sea más aislante, a fin de mantener la temperatura. Para este caso, el principal componente de estos productos es el *polvo de talco* ($Mg_3H_2(SiO_3)_4$), gracias a su capacidad refractaria, protege al material donde se aplica y aísla de la temperatura.

En cambio, en un apoyo de filtro o eyector, donde necesitamos una superficie rígida y estable, aplicaremos un componente con mayor conductividad térmica, a fin de que se solidifique lo antes posible y no tengamos problemas a la hora de desmoldear la pieza. Para este caso, el principal componente de estos productos es el *polvo de grafito*.

En términos generales, el procedimiento a realizar se basa principalmente en tres etapas:

1. **Calentamiento del molde:** el molde debe de estar a una temperatura adecuada para poder eliminar adecuadamente los restos de pintura previos. Este proceso de calentamiento es independiente con respecto al calentamiento realizado en la línea (se explica más adelante en el apartado 1.2.2), ya que ese proceso se realiza mediante quemadores estándar de combustión de gas natural para todos los moldes. En cambio, en la línea dichos quemadores están diseñados acorde al bastidor y molde a fin de calentarlos de una forma más precisa acorde a su geometría. Este proceso se hace mediante quemadores estándar a través de combustión de gas natural. Aproximadamente se suelen fijar 280 °C, como referencia general para todos los moldes.
2. **Granallado:** es un proceso de chorreado con un decapante (el producto en cuestión se denomina "granalla de hueso de melocotón") para eliminar la pintura previa pintura depositada en el molde. Generalmente se suele verificar que la temperatura de la huella se encuentra entre 180 °C y 250 °C, dado que se trata de zonas críticas al fundir.
3. **Pintado:** aplicación de productos aislantes o conductores según se haya especificado en el documento correspondiente al molde de la pieza que se está trabajando.

La clasificación de la pintura se realiza mediante colores (el color asociado al producto es el correspondiente de la pintura), a fin de que el operario encargado de realizar este proceso en cuestión sepa claramente que es lo que tiene que hacer. A continuación, se presenta la tabla con cada color respectivo:

 ALUMALSA	INSTRUCCIÓN PREPARACIÓN DE PINTURA SECCIÓN DE POTEYAGE	Sello Sello CALIDAD	I26918
		Ditución 22.01.14	REVISION: D
			HOJA: 15/15
EMISOR: FABRICACION		FECHA DOC. ORIGINAL: 15.01.14	

ANEXO 2

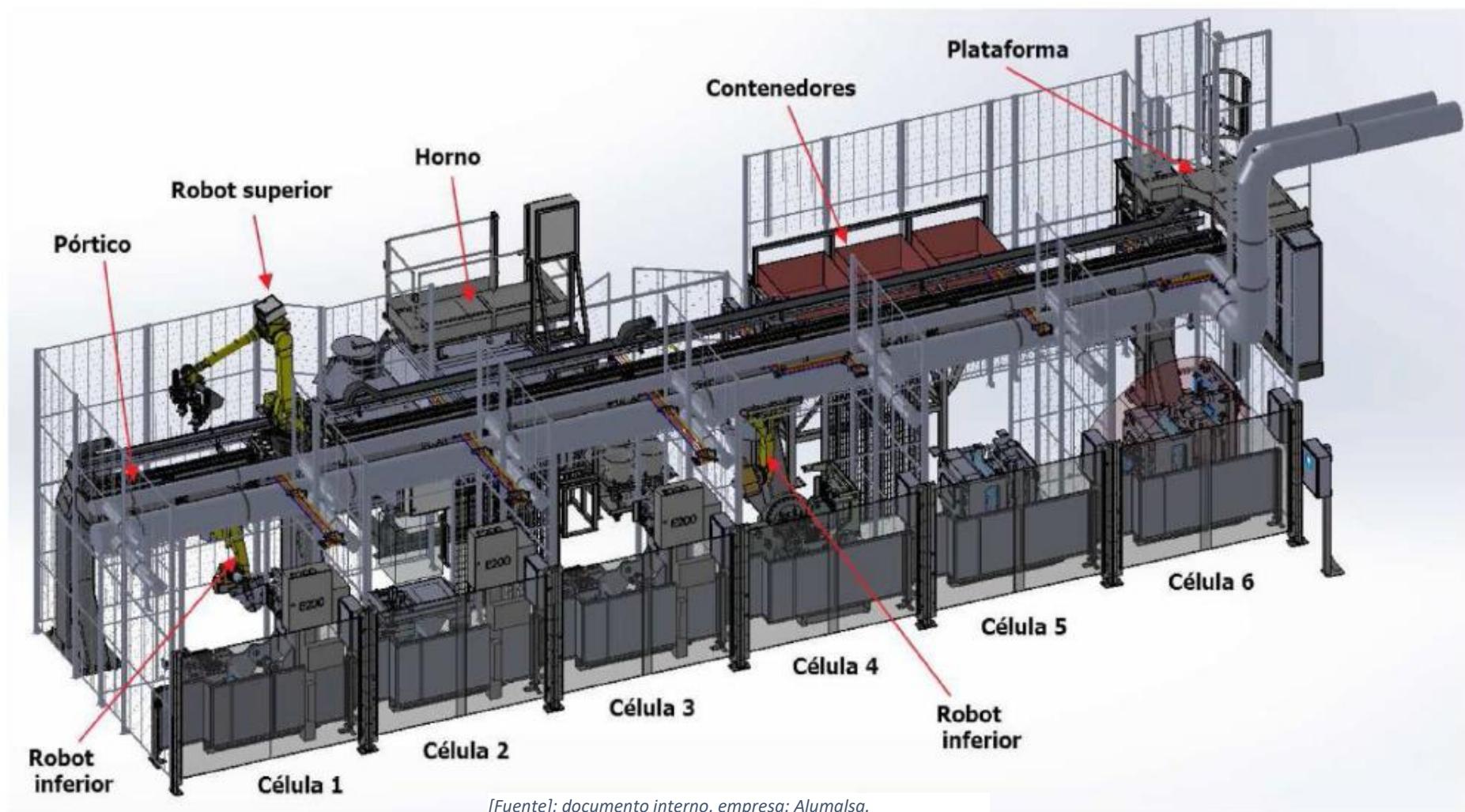
ESPECIFICACIONES DE POTEYAGES

COLOR PINTADO EN PIEZAS	NOMBRE COMERCIAL DE LA PINTURA	LO LLAMAMOS TAMBIEN EN ALUMALSA	COLOR DEL POTEYAGE EN COQUILLA	ZONAS DONDE SE APLICA EL POTEYAGE	PROPIEDAD PRINCIPAL QUE TIENE EL POTEYAGE	ASPECTO QUE DA EL POTEYAGE A LA PIEZA	EL POTEYAGE SE APlica CON:	RANGO DE TEMPER. DE APLICAC.
AZUL	DYCOTE 140	CARGA	BLANCO	MAZAROTAS Y COLADAS	MUY AISLANTE	RUGOSO	PISTOLA Y PINCEL	180°C + 250°C
AZUL CLARO	DYCOTE 140		BLANCO	HUELLA	MUY AISLANTE	NORMAL	PISTOLA	180°C + 250°C
VERDE	DYCOTE39	BLANCO ESPECIAL	BLANCO	HUELLA	AISLANTE LIMITA LOS DEFECTOS DE FUNDICION	MUY FINO BRILLANTE	PISTOLA	180°C + 250°C
AMARILLO	DYCOTE 34	BLANCO ARENA	BLANCO	HUELLA	AISLANTE MEJORA EL LLENADO	GRANULO SO BUEN ACABADO	PISTOLA	180°C + 250°C
NEGRO	DYCOTE 36	NEGRA ESPECIAL	NEGRO	HUELLAS COMPLICADAS	SEMICONDUCTOR FAVORECE EL DESMOLDEO	NORMAL	PISTOLA	180°C + 250°C
ROJO	ACUAGEL o AQUAGRAPH	NEGRA NORMAL	NEGRO	HUELLA, BROCHAS, PARTES MASIVAS, MAMELONES	CONDUCTOR FAVORECE EL DESMOLDEO	FINO	PISTOLA	180°C + 250°C

NARANJA	DYCOTE DR 87	PINTURA ROJA	ROJO	MAZAROTAS, COLADAS Y HUELLAS	ADHERENTE Y DELATADOR DE DESGASTE	FINO	PISTOLA	180°C + 250°C
CANELA	LUBRODAL C52C	PINTURA PARA 3-124 10-40	MARRON CLARO	MAZAROTAS Y COLADAS	MUY AISLANTE FAVORECE LA COLAVILIDAD	NORMAL	PISTOLA Y PINCEL	180°C + 250°C

Tabla 2. Distribución de colores en función del producto a utilizar. [Fuente]: documento interno.

ANEXO 4. Distribución de línea de producción.



ANEXO 5. Propiedades térmicas del Acero 1.2343

 Especificaciones Técnicas	<p>2343</p> <p>Acero para Trabajos en Caliente</p> <p>WNP 1.2343 / X37CrMoV5-1 / AISI H11</p>	Nombre: 2343 Revisión: 1 Vigencia: 03-18 Hoja: 1 de 2										
Composición Química	<table border="1"> <thead> <tr> <th>C%</th><th>Si%</th><th>Cr%</th><th>Mo%</th><th>V%</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,37</td><td>1,00</td><td>5,30</td><td>1,30</td><td>0,40</td></tr> </tbody> </table>	C%	Si%	Cr%	Mo%	V%	0,37	1,00	5,30	1,30	0,40	
C%	Si%	Cr%	Mo%	V%								
0,37	1,00	5,30	1,30	0,40								
Propiedades y Aplicaciones												
<p>Acero para trabajos en caliente que combina excelente tenacidad con alta estabilidad térmica, alta resistencia a la fatiga térmica, buena conductividad térmica.</p> <p>Apto para Nitrurar o recubrimiento PVD.</p> <p>Se utiliza en moldes para la inyección de metales ligeros, matrices de forja, herramientales de extrusión. Cuchillas para corte de metales, tornillos y cilindros para el procesamiento de plásticos, herramientas para el hidroformado.</p> <p>Se suministra con procesos y tratamientos especiales como EFS (Estructura Extra Fina) ó ESR(Refisión Baja Electroeccción) para optimizar sus propiedades (ver Informe Técnico)</p>												
Condición de Entrega:												
<p>Recocido Blando Max 230 HB</p>												
Propiedades Físicas												
Coeficiente de Expansión Térmica	$\frac{\delta}{10 \text{ m}}$ $\frac{\text{m}}{\text{K}}$	<u>20-100°C</u> <u>20-200°C</u> <u>20-500°C</u> <u>20-700°C</u> 11,4 12,4 13,1 13,3										
Coeficiente de Conductividad Térmica	$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	<u>20°C</u> <u>350°C</u> <u>700°C</u> 25,3 27,6 30,5										
Tratamiento Térmico												
Recocido Blando	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperatura °C</th><th>Enfriamiento</th><th>Dureza HB</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>750 - 790</td><td>En Horno</td><td>Max. 230</td></tr> </tbody> </table>	Temperatura °C	Enfriamiento	Dureza HB	750 - 790	En Horno	Max. 230					
Temperatura °C	Enfriamiento	Dureza HB										
750 - 790	En Horno	Max. 230										
Recocido Alivio de Tensiones	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperatura °C</th><th>Enfriamiento</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>600 - 650</td><td>En Horno</td></tr> </tbody> </table>	Temperatura °C	Enfriamiento	600 - 650	En Horno							
Temperatura °C	Enfriamiento											
600 - 650	En Horno											
Temple	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperatura °C</th><th>Enfriamiento</th><th>Revenido</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1000 - 1050</td><td>Aceite, Gas a presión(N2), aire ó Sales a 500-550°C</td><td>3 Veces Ver diagrama</td></tr> </tbody> </table>	Temperatura °C	Enfriamiento	Revenido	1000 - 1050	Aceite, Gas a presión(N2), aire ó Sales a 500-550°C	3 Veces Ver diagrama					
Temperatura °C	Enfriamiento	Revenido										
1000 - 1050	Aceite, Gas a presión(N2), aire ó Sales a 500-550°C	3 Veces Ver diagrama										
Dureza de Temple: 54 HRc												

Outokumpu Fortinox SA - Centro Industrial Garín- Rivadavia S/N (16119) Garín P.B.A.
 Tel (03327) 448000- ventas.especiales@outokumpu.com - www.fortinox.com.

Propriétés physiquesConditions: trempé et revenu
(valeurs Indicatives)**Propiedades físicas**Condición: templado y revenido
(valores aproximados)

Densité à / Densidad a

20 °C	7,80	kg/dm ³
500 °C	7,64	kg/dm ³
600 °C	7,60	kg/dm ³

Chaleur spécifique à / Calor específico a

20 °C	460	J/(kg.K)
500 °C	550	J/(kg.K)
600 °C	590	J/(kg.K)

Résistivité à / Resistencia eléctrica específica a

20 °C	0,52	Ohm.mm ² /m
500 °C	0,86	Ohm.mm ² /m
600 °C	0,96	Ohm.mm ² /m

Module d' élasticité à / Módulo de elasticidad a

20 °C	215 x 10 ³	N/mm ²
500 °C	176 x 10 ³	N/mm ²
600 °C	165 x 10 ³	N/mm ²

Dilatation thermique, entre 20 °C et ... °C, 10⁻⁶ m/(m.K) bel
Dilatación térmica, entre 20 °C y ... °C, 10⁻⁶ m/(m.K) at

100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C
11,5	12,0	12,2	12,5	12,9	13,0	13,2

Conductivité thermique à °C, W/(m.K)
Conductividad térmica a °C, W/(m.K)

100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C
32,1	32,6	32,8	32,6	32,1	30,5	29,6

Le présent imprimé donne un aperçu des caractéristiques de cet acier afin de vous faciliter le choix. Nous ne garantissons cependant certaines propriétés qu'après accord exprès par écrit dans chaque cas individuel.

Este Impreso da un resumen de las propiedades características de nuestros aceros finos y demás productos para facilitarle la selección. Para la garantía de propiedades determinadas se requiere, sin embargo, un acuerdo expreso por escrito en cada caso individual.

DENSIDAD

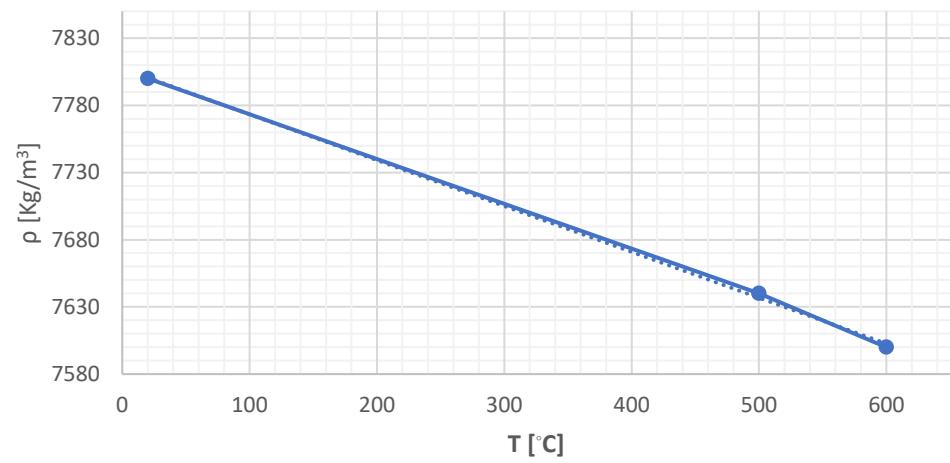


Gráfico 1. Densidad vs temperatura. [Fuente]: realizado por el autor.

CALOR ESPECÍFICO

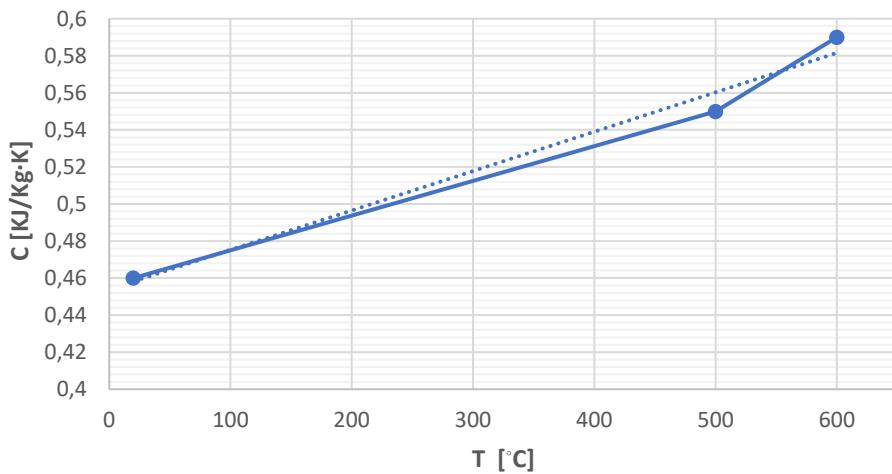


Gráfico 2. Calor específico vs temperatura. [Fuente]: realizado por el autor.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

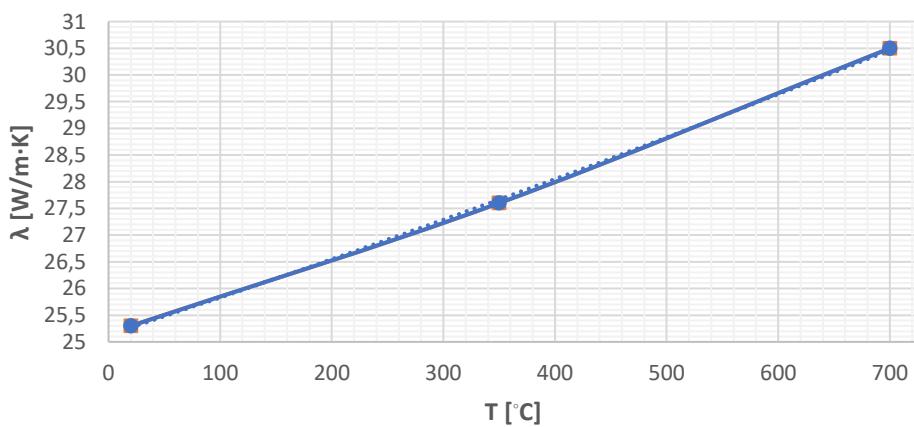


Gráfico 3. Conductividad térmica vs temperatura. [Fuente]: realizado por el autor.

ANEXO 6. Calidad del gas natural.

Calidad del gas

Según la Resolución de 22 de septiembre de 2011 por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 de "medición" de las normas de gestión técnica del sistema.

Las capacidades se expresan bajo las siguientes condiciones de referencia:[PCS a 0°C; V (0°C, 1,01325 bar)]. De acuerdo con el anexo J de la ISO 6976 el factor a aplicar para convertir el PCS de 0°C a 25°C será 1/1,0026.

Todo gas introducido en los puntos de entrada del Sistema Gasista, deberá cumplir con las especificaciones de calidad de la siguiente tabla:

Propiedad (*)	Unidad	Mínimo	Máximo
Indice de Wobbe	kWh/m ³	13.403	16.058
PCS	kWh/m ³	10.26	13.26
d	m ³ /m ³	0.555	0.700
S Total	mg/m ³	-	50
H ₂ S + COS (como S)	mg/m ³	-	15
RSH (como S)	mg/m ³	-	17
O ₂	mol%	-	[0.01]
CO ₂	mol%	-	2.5
H ₂ O (Punto de rocío)	°C at 70 bar (a)	-	+2
HC (Punto de rocío)	°C at 1-70 bar (a)	-	+5
Polvo / Partículas	-	Técnicamente Puro	

(*) Tabla expresada en las siguientes condiciones de referencia: [0 °C; V(0 °C: 1,01325 bar)]

Además de las características anteriores, los gases procedentes de fuentes no convencionales, tales como biogás, el gas obtenido a partir de biomasa u otro tipo de gas producido mediante procesos de digestión microbiana, deberán cumplir con las especificaciones de calidad de la siguiente tabla:

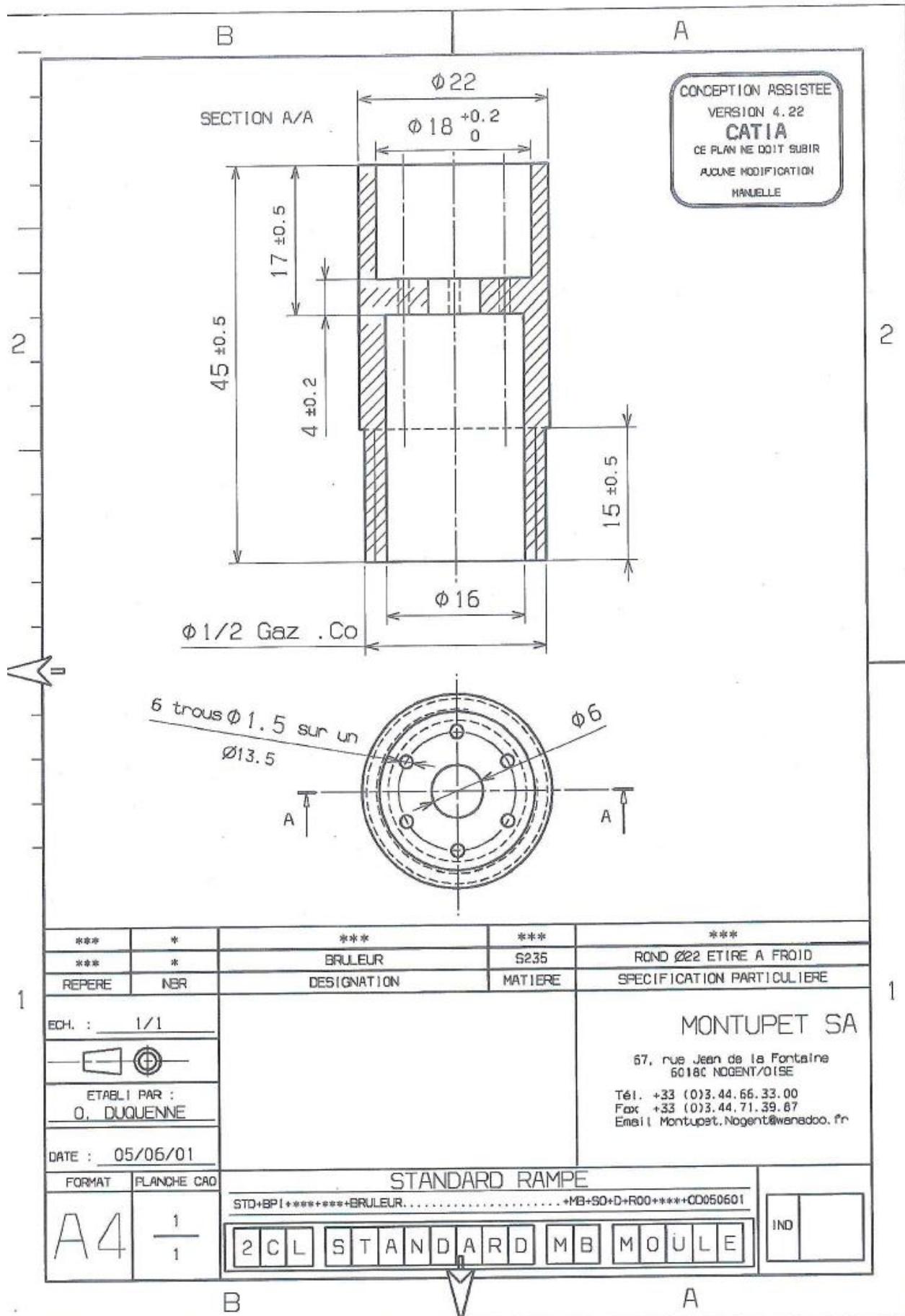
Propiedad (*)	Unidad	Mínimo	Máximo
Metano (CH ₄)	mol %	95	-
CO	mol %	-	2
H ₂	mol %	-	5
Compuestos Halogenados:			
Flúor	mg/m ³	-	10 1
Cloro	mg/m ³	-	
Amoniaco	mg/m ³	-	3
Mercurio	µg/m ³	-	1
Siloxanos	mg/m ³	-	10
Benceno, tolueno, Xileno (BTX)	mg/m ³	-	500
Microorganismos	-	Técnicamente puro	
Polvo / Partículas	-	Técnicamente puro	

(*) Tabla expresada en las siguientes condiciones de referencia: [0 °C; V(0 °C: 1,01325 bar)]



Enagás ha obtenido el Certificado del Sistema de Gestión de Calidad de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 9001:2000 en su Proceso de Medición.

ANEXO 7. Plano de boquilla de salida quemador lateral



[Fuente]: departamento de manufacturing, empresa: Alumalsa.

ANEXO 8. Geometría del molde

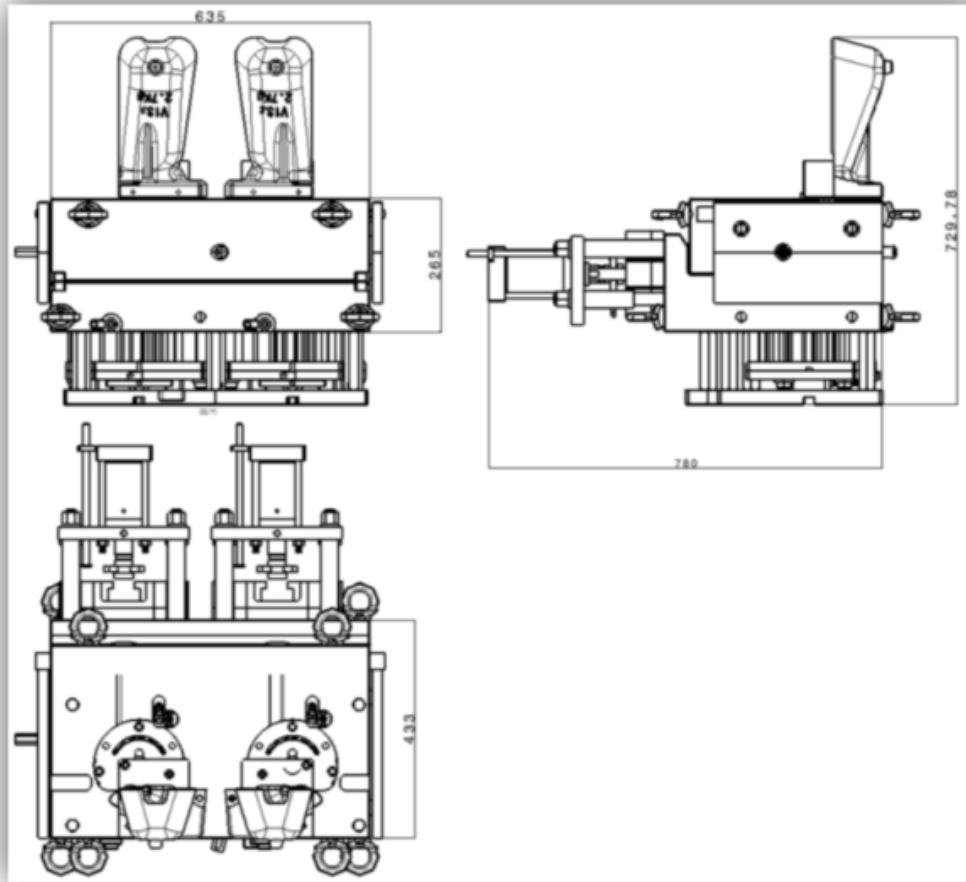
3-583.09 MOLDE 2 HUELLAS OM_s



1. Molde completo -> 750 Kg

2. Volumen (2 situaciones):

3-583.09	DIMENSIONES (m)			
	LARGO	ANCHO	ALTO	VOLUMEN (m ³)
SOLO HUELLAS	0,635	0,433	0,265	0,073
COMPLETO EXP. INF. + CILINDROS + CAZO)	0,635	0,78	0,73	0,362



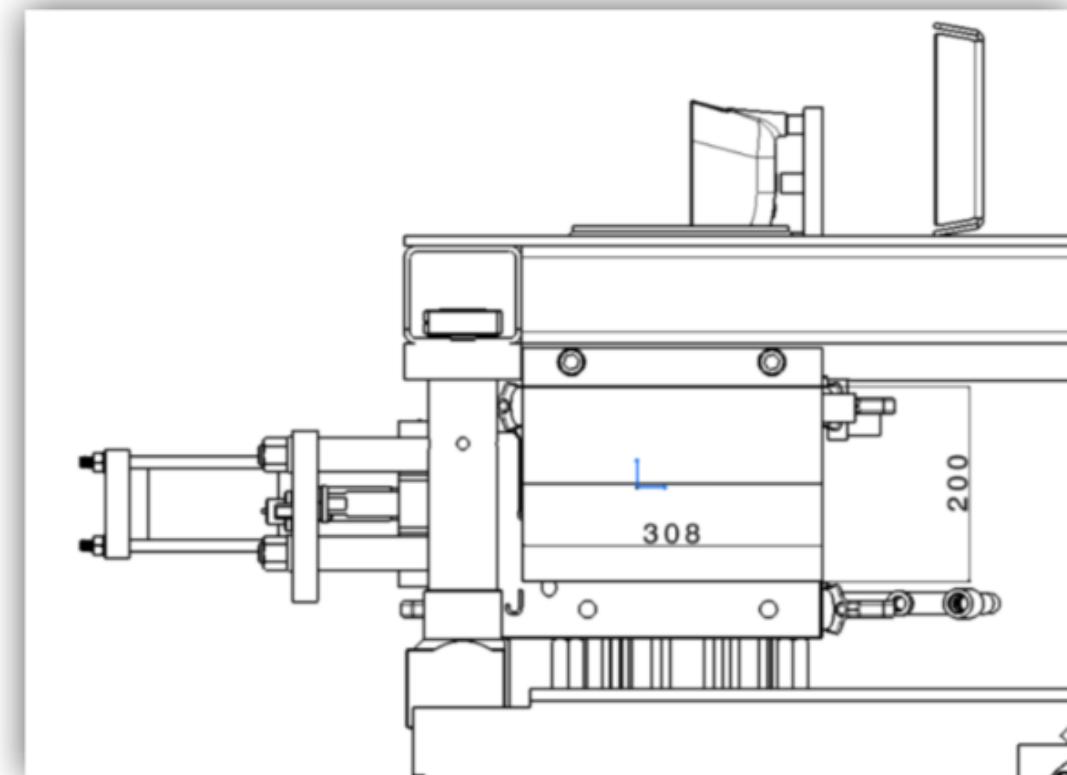
3-583.09 MOLDE 2 HUELLAS OM_s



3._Área de incidencia mecheros exteriores (1 en cada lateral):

Datos para 1 mechero (8 boquillas):

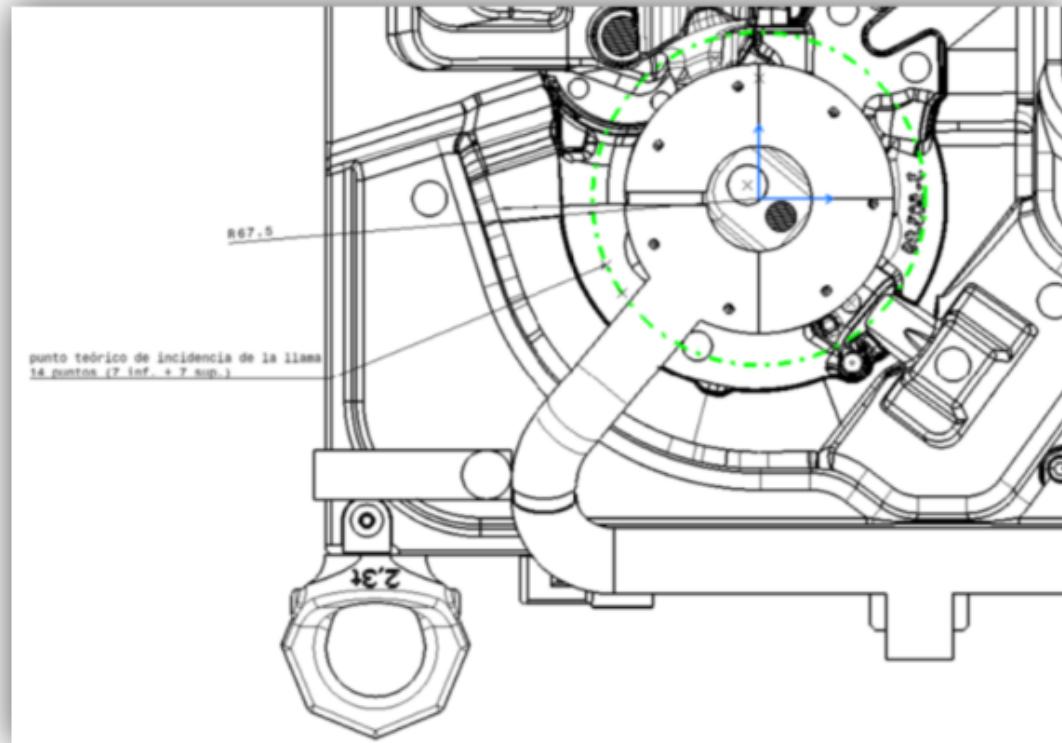
1 MECHERO EXTERIOR DIMENSIONES (m)		
LARGO	ALTO	ÁREA (m ²)
0,308	0,2	0,062



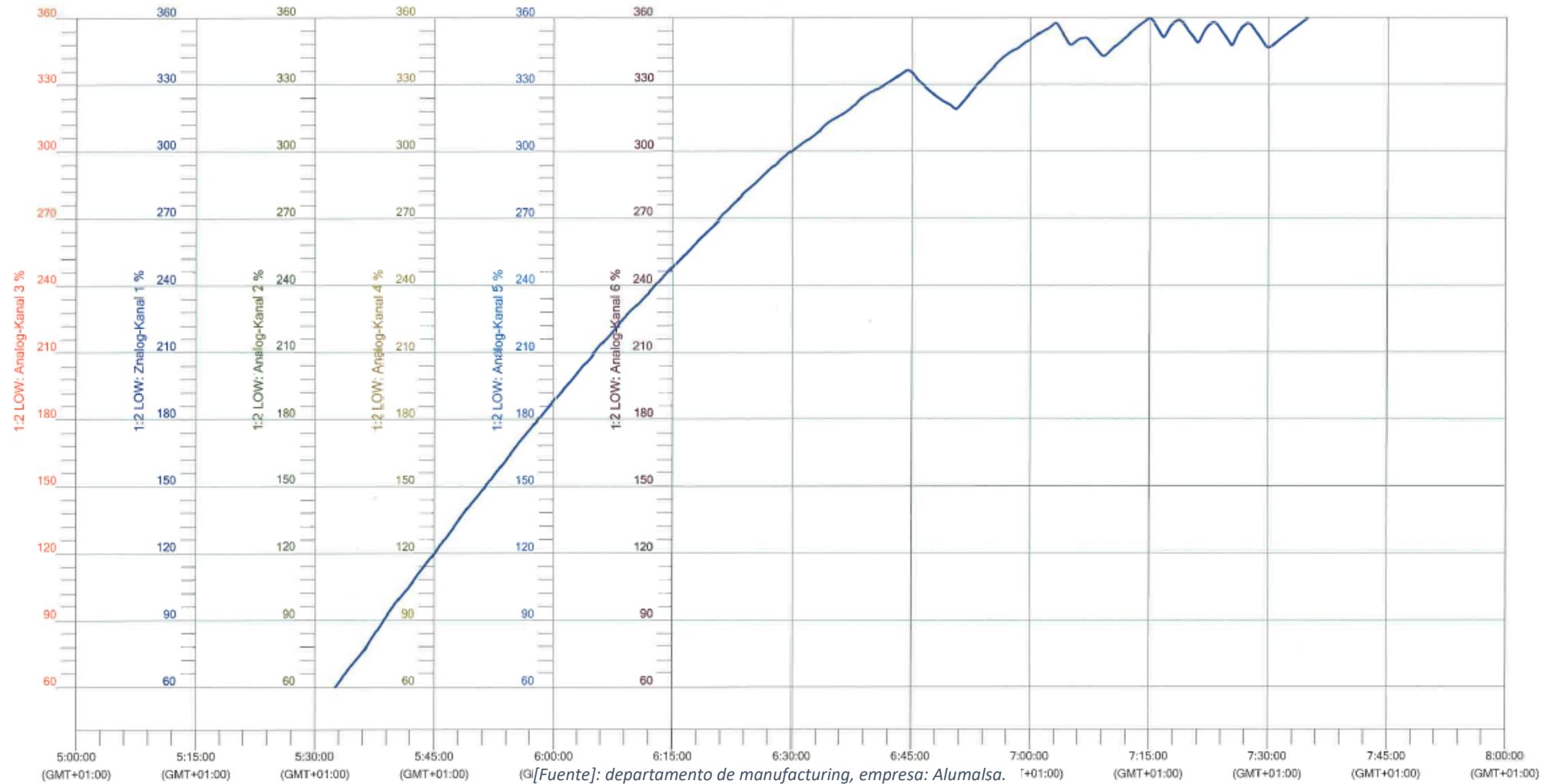
3-583.09 MOLDE 2 HUELLAS OM_s

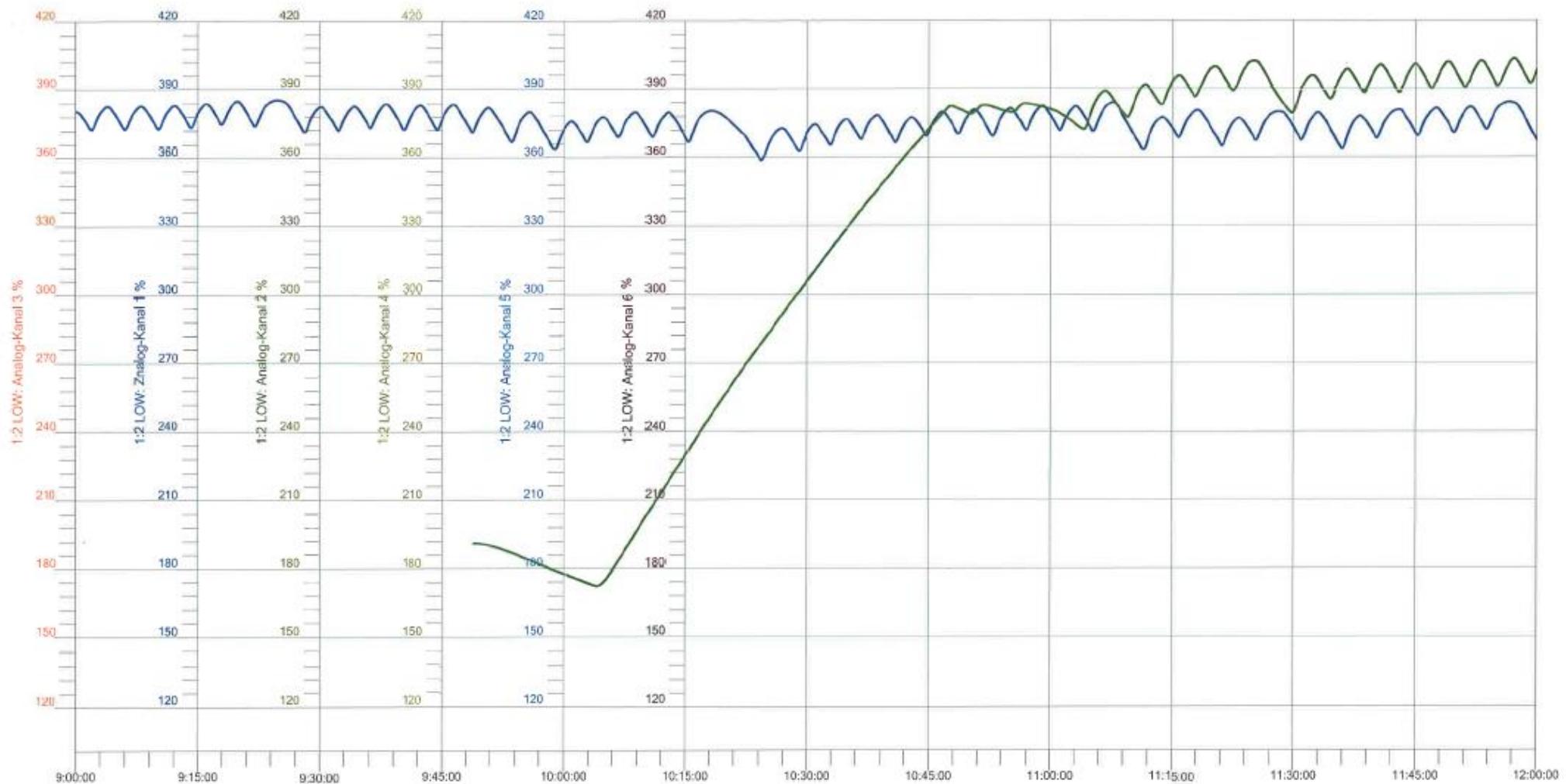
4._Área de incidencia mechero precalentamiento (1 huella):

MECHERO PRECALENTAMIENTO RADIO INCIDENCIA (m)	
R	ÁREA (m ²)
0,0675	0,014



ANEXO 9. Rampas de calentamiento





ANEXO 10. Estimación de la emisividad del molde

Con los datos presentes en la segunda gráfica, se va a estimar la emisividad del molde (ϵ_s), sabiendo que¹⁷:

$$\epsilon_{termógrafo} \cdot (T_{termografía} + 273)^3 = \epsilon_{estimada} \cdot (T_{medida} + 273)^3 \quad (18)$$

Donde:

$\epsilon_{termógrafo}$: emisividad de la cámara termográfica.

$T_{termografía}$: temperatura media del molde durante el calentamiento.

T_{medida} : temperatura obtenida mediante el termopar instalado en el molde. Dichas medidas están representadas en la primera gráfica anterior.

$\epsilon_{estimada}$: emisividad del molde obtenida tras los cálculos realizados.

$$\epsilon_{estimada} = \frac{\epsilon_{termógrafo} \cdot (T_{termografía} + 273)^3}{(T_{medida} + 273)^3}$$

Cabe destacar que las termografías fueron tomadas al mismo tiempo que la toma de datos de la temperatura. Es por ello que, sabiendo que ambas termografías fueron tomadas con aproximadamente 5 minutos de diferencia entre las 10:45 a.m. y 11:00 a.m. se han realizado los siguientes cálculos:

1. En la primera aproximación, suponemos $\epsilon_{termógrafo} = 1$.

$T_{termografía} = 353.57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (observar termografía).

$T_{medida} (\approx 10,45 \text{ a.m.}) = 372 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$\epsilon_{estimada_1} = \frac{1 \cdot (353.57 + 273)^3}{(372 + 273)^3} = 0.91$$

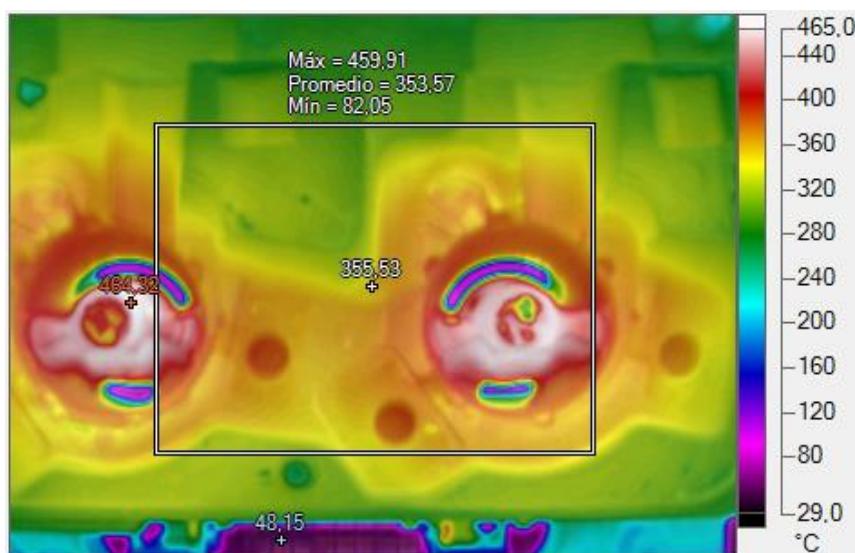


Figura 2. Primera termografía con molde caliente.

[Fuente]: departamento Manufacturing, empresa Alumalsa. Realizada 14/06/2019 $\approx 10,45 \text{ a.m.}$

¹⁷ E. O. Doebelin, Measurement Systems. Application and Design, 4^a edición, McGraw-Hill (1990). Páginas 678-681.

2. A continuación, realizamos el mismo proceso con la segunda termografía y se obtiene la nueva emisividad con la temperatura media de la termografía.

$$T_{\text{termografía}} = 364.75 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (observar termografía).}$$

$$T_{\text{medida}} (\approx 10,50 \text{ a.m.}) = 379 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

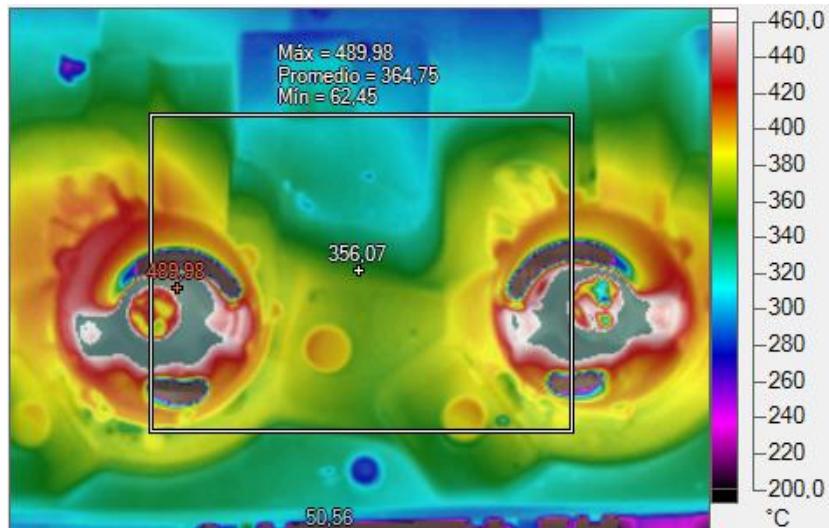


Figura 3. Segunda termografía con molde caliente.

[Fuente]: departamento Manufacturing, empresa Alumalsa. Realizada 14/06/2019 $\approx 10,50$ a.m

$$\epsilon_{\text{estimada_2}} = \frac{0.91 \cdot (364.75 + 273)^3}{(379 + 273)^3} = 0.85$$

3. Finalmente, volvemos a realizar el mismo proceso con una tercera termografía y se obtiene la nueva emisividad con la temperatura media de la termografía.

$$T_{\text{termografía}} = 378.16 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (observar termografía).}$$

$$T_{\text{medida}} (\approx 10,55 \text{ a.m.}) = 384 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

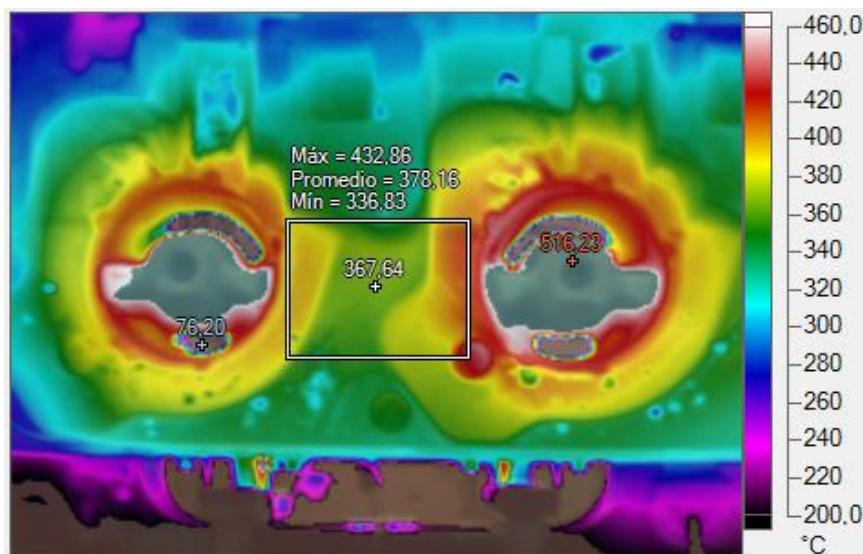


Figura 4. Tercera termografía con molde caliente.

[Fuente]: departamento Manufacturing, empresa Alumalsa. Realizada 14/06/2019 $\approx 10,55$ a.m

$$\epsilon_{estimada_3} = \frac{0.84 \cdot (378.16 + 273)^3}{(384 + 273)^3} = 0.817$$

ANEXO 11. Estimación temperatura superficie del molde

Para obtener este dato, se ha realizado una toma de datos de temperatura y tiempo cada 3 °C de la primera gráfica del *anexo 9*, y se ha realizado un promedio con los datos resultantes.

T [°C]	t [s]
25	0
66	61,8
72	120,9
78	188,88
84	247,98
90	298,26
96	386,88
102	475,56
108	623,34
114	688,32
120	682,44
126	762,18
132	830,16
138	904,08
144	977,94
150	1066,62
156	1155,24
162	1214,34
168	1303,02
174	1391,7
180	1450,8
186	1539,42
192	1598,52
198	1687,2
204	1746,3
210	1834,98
216	1923,6
222	2012,28
228	2086,14
234	2189,58
240	2278,26
246	2366,88
252	2411,22
258	2455,56
264	2544,18
270	2603,34
276	2721,54
282	2810,16
288	2928,36
294	3017,04
300	3135,24
306	3430,8
312	3489,9
318	3637,62
324	3755,88
330	3933,18
336	4051,38

Tabla 3. Temperatura y tiempo durante calentamiento.

[Fuente]: anexo 9.

$$\overline{T_s} = 315 \text{ } ^\circ\text{C} \quad t_{CALENTAMIENTO} = 4052 \text{ s.}$$

ANEXO 12. Tabla de coeficientes de conducción transitoria

TABLE 5.1 Coefficients used in the one-term approximation to the series solutions for transient one-dimensional conduction

Bi^a	Plane Wall		Infinite Cylinder		Sphere	
	ζ_1 (rad)	C_1	ζ_1 (rad)	C_1	ζ_1 (rad)	C_1
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025	0.1730	1.0030
0.02	0.1410	1.0033	0.1995	1.0050	0.2445	1.0060
0.03	0.1723	1.0049	0.2440	1.0075	0.2991	1.0090
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099	0.3450	1.0120
0.05	0.2218	1.0082	0.3143	1.0124	0.3854	1.0149
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148	0.4217	1.0179
0.07	0.2615	1.0114	0.3709	1.0173	0.4551	1.0209
0.08	0.2791	1.0130	0.3960	1.0197	0.4860	1.0239
0.09	0.2956	1.0145	0.4195	1.0222	0.5150	1.0268
0.10	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246	0.5423	1.0298
0.15	0.3779	1.0237	0.5376	1.0365	0.6609	1.0445
0.20	0.4328	1.0311	0.6170	1.0483	0.7593	1.0592
0.25	0.4801	1.0382	0.6856	1.0598	0.8447	1.0737
0.30	0.5218	1.0450	0.7465	1.0712	0.9208	1.0880
0.4	0.5932	1.0580	0.8516	1.0932	1.0528	1.1164
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143	1.1656	1.1441
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345	1.2644	1.1713
0.7	0.7506	1.0919	1.0873	1.1539	1.3525	1.1978
0.8	0.7910	1.1016	1.1490	1.1724	1.4320	1.2236
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732
2.0	1.0769	1.1785	1.5994	1.3384	2.0288	1.4793
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202
5.0	1.3138	1.2402	1.9898	1.5029	2.5704	1.7870
6.0	1.3496	1.2479	2.0490	1.5253	2.6537	1.8338
7.0	1.3766	1.2532	2.0937	1.5411	2.7165	1.8673
8.0	1.3978	1.2570	2.1286	1.5526	1.7654	1.8920
9.0	1.4149	1.2598	2.1566	1.5611	2.8044	1.9106
10.0	1.4289	1.2620	2.1795	1.5677	2.8363	1.9249
20.0	1.4961	1.2699	2.2881	1.5919	2.9857	1.9781
30.0	1.5202	1.2717	2.3261	1.5973	3.0372	1.9898
40.0	1.5325	1.2723	2.3455	1.5993	3.0632	1.9942
50.0	1.5400	1.2727	2.3572	1.6002	3.0788	1.9962
100.0	1.5552	1.2731	2.3809	1.6015	3.1102	1.9990
∞	1.5708	1.2733	2.4050	1.6018	3.1415	2.0000

^a $Bi = hL/k$ for the plane wall and hr_o/k for the infinite cylinder and sphere. See Figure 5.6.

[Fuente]: Incropera & DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, Wiley (1989). Capítulo 5, tabla 5.1, página 301.

ANEXO 13. Selección de T_{AD LLAMA} en función del exceso de aire

EXC_aire [%]	T_ad [K]	EXC_aire [%]	T_ad [K]	EXC_aire [%]	T_ad [K]
0,1004	2042	4,418	1996	8,735	1954
0,2008	2041	4,518	1995	8,835	1953
0,3012	2040	4,618	1994	8,936	1952
0,4016	2039	4,719	1993	9,036	1951
0,502	2038	4,819	1992	9,137	1950
0,6024	2036	4,92	1991	9,237	1949
0,7028	2035	5,02	1990	9,337	1948
0,8032	2034	5,12	1989	9,438	1947
0,9036	2033	5,221	1988	9,538	1946
1,004	2032	5,321	1987	9,639	1945
1,104	2031	5,422	1986	9,739	1944
1,205	2030	5,522	1985	9,839	1943
1,305	2029	5,622	1984	9,94	1942
1,406	2028	5,723	1983	10,04	1941
1,506	2027	5,823	1982	10,14	1940
1,606	2026	5,924	1981	10,24	1939
1,707	2025	6,024	1980	10,34	1938
1,807	2024	6,124	1979	10,44	1937
1,908	2023	6,225	1978	10,54	1936
2,008	2022	6,325	1977	10,64	1935
2,108	2020	6,426	1976	10,74	1934
2,209	2019	6,526	1975	10,84	1933
2,309	2018	6,627	1974	10,94	1932
2,41	2017	6,727	1973	11,04	1931
2,51	2016	6,827	1972	11,14	1930
2,61	2015	6,928	1971	11,24	1930
2,711	2014	7,028	1970	11,35	1929
2,811	2013	7,129	1969	11,45	1928
2,912	2012	7,229	1968	11,55	1927
3,012	2011	7,329	1967	11,65	1926
3,112	2010	7,43	1966	11,75	1925
3,213	2009	7,53	1965	11,85	1924
3,313	2008	7,631	1964	11,95	1923
3,414	2007	7,731	1963	12,05	1922
3,514	2006	7,831	1962	12,15	1921
3,614	2005	7,932	1961	12,25	1920
3,715	2004	8,032	1960	12,35	1919
3,815	2003	8,133	1959	12,45	1918
3,916	2002	8,233	1958	12,65	1916
4,016	2001	8,333	1957	12,75	1916
4,116	2000	8,434	1956	12,85	1915
4,217	1999	8,534	1955	12,95	1914
4,317	1998	8,635	1954	13,05	1913

EXC_aire [%]	T_ad [K]	EXC_aire [%]	T_ad [K]	EXC_aire [%]	T_ad [K]
13,15	1912	17,17	1876	21,18	1841
13,25	1911	17,27	1875	21,29	1840
13,35	1910	17,37	1874	21,39	1840
13,45	1909	17,47	1873	21,49	1839
13,55	1908	17,57	1872	21,59	1838
13,65	1907	17,67	1871	21,69	1837
13,76	1906	17,77	1870	21,79	1836
13,86	1905	17,87	1870	21,89	1835
13,96	1904	17,97	1869	21,99	1835
14,06	1904	18,07	1868	22,09	1834
14,16	1903	18,17	1867	22,19	1833
14,26	1902	18,27	1866	22,29	1832
14,36	1901	18,37	1865	22,39	1831
14,46	1900	18,47	1864	22,49	1830
14,56	1899	18,57	1864	22,59	1830
14,66	1898	18,67	1863	22,69	1829
14,76	1897	18,78	1862	22,79	1828
14,86	1896	18,88	1861	22,89	1827
14,96	1895	18,98	1860	22,99	1826
15,06	1894	19,08	1859	23,09	1825
15,16	1894	19,18	1858	23,19	1825
15,26	1893	19,28	1857	23,29	1824
15,36	1892	19,38	1857	23,39	1823
15,46	1891	19,48	1856	23,49	1822
15,56	1890	19,58	1855	23,59	1821
15,66	1889	19,68	1854	23,69	1821
15,76	1888	19,78	1853	23,8	1820
15,86	1887	19,88	1852	23,9	1819
15,96	1886	19,98	1851	24	1818
16,06	1885	20,08	1851	24,1	1817
16,16	1885	20,18	1850	24,2	1816
16,27	1884	20,28	1849	24,3	1816
16,37	1883	20,38	1848	24,4	1815
16,47	1882	20,48	1847	24,5	1814
16,57	1881	20,58	1846	24,6	1813
16,67	1880	20,68	1846	24,7	1812
16,77	1879	20,78	1845	24,8	1812
16,87	1878	20,88	1844	24,9	1811
16,97	1878	20,98	1843	25	1810
17,07	1877	21,08	1842		

Tabla 4. Valores de exceso de Temperatura adiabática de llama.
[Fuente]: software EES.

*Valores resaltados corresponden a los valores elegidos para los cálculos

ANEXO 14. Croquis de mechero lateral

Dado que se poseen las dimensiones (ancho y alto) del mechero precedentes del anexo 8, pero se desconocen las medidas entre las salidas del gas natural necesarias para completar los datos de la ecuación 28 (S_2), se ha supuesto que la posición de cada boquilla es simétrica a igual distancia una de otra.

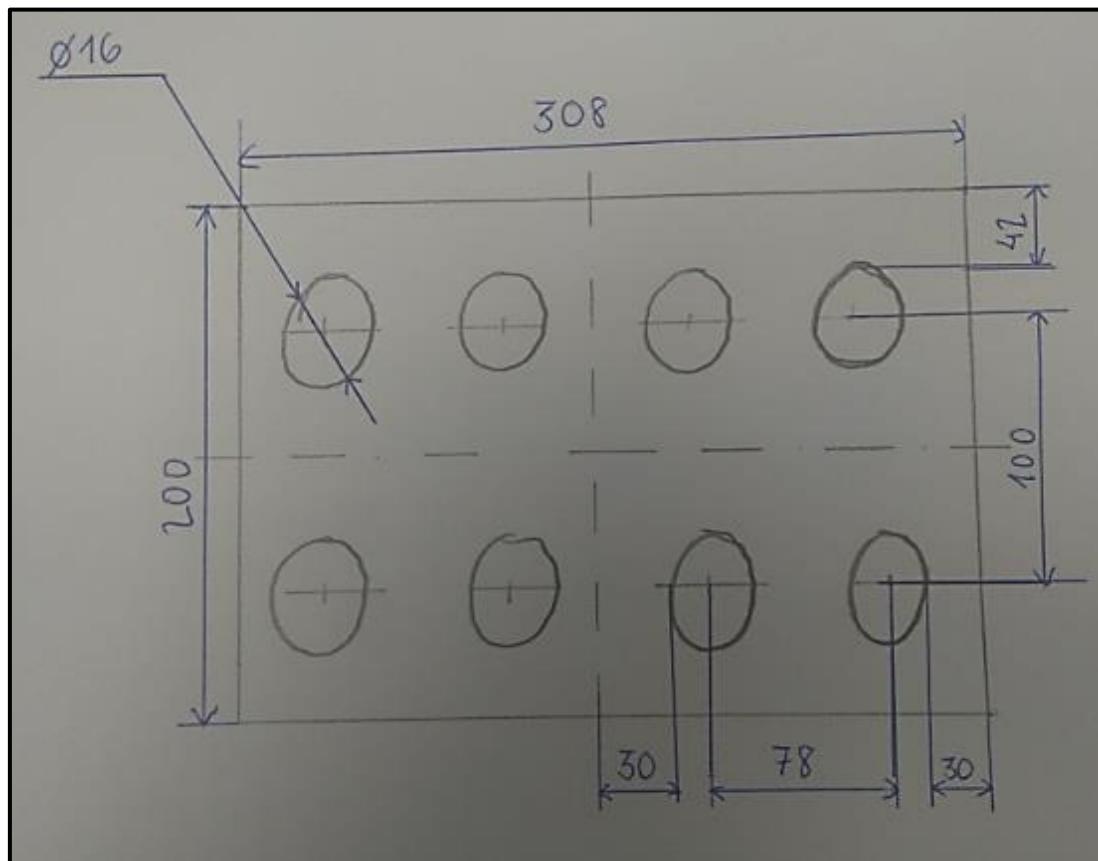


Figura 5. Croquis del mechero lateral.
[Fuente]: realizada por el autor (07/09/2019.)

Por tanto, según el dibujo, suponiendo simetría completa en todo el quemador, obtenemos $S_2 = 0,1 \text{ m}$.

ANEXO 15. Clasificación de los procesos de fundición

Según proceso de alimentación del molde¹⁸:

- 1.- Moldeo en coquilla: se introduce el metal líquido dejándolo caer en el interior del molde por medio de gravedad.
- 2.- Moldeo por presión: se introduce el metal líquido en el molde inyectándolo a presión por medio de un gas.
- 3.- Moldeo por vacío: se introduce parcialmente el molde dentro de metal fundido para que el metal ascienda dentro de este.
- 4.- Moldeo centrífugo: se introduce el metal líquido dentro de un recipiente donde se encuentra el molde el cual gira a altas revoluciones para repartir el metal por toda la huella

Según tipo de molde:

1.-Molde permanente: proceso de fundición donde el molde no se rompe tras la solidificación de la pieza. Un ejemplo de ello es la fundición en **moldes metálicos**, los cuales, gracias a la alta conductividad térmica del metal, se mejora el acabado superficial de las piezas.

Este tipo de molde se suele utilizar en producciones con alto número de piezas, debido al elevado precio que supone la fabricación de estos moldes. Además, este campo es el ámbito de aplicación de nuestro estudio

2.-Molde desecharable: proceso de fundición donde el molde está diseñado para ser eliminado con el fin de extraer la pieza tras la solidificación de esta. Estos moldes suelen estar compuestos por arenas, yeso o cerámica, característicos por ser refractarios. Además, se incluyen agentes aglutinantes para mejorar la unión. Estos moldes en partir tienen un uso especial, pues aportan mucha flexibilidad en la fabricación de piezas, además de su bajo coste. Ello supone que el acabado y los defectos generados por caídas de arena o falta de llenado sean más altos.

3.- Moldes compuestos: proceso de fundición donde el molde está compuesto por una parte desecharable y otra permanente (metálico)

En la tabla que se presenta en el *anexo 1*, se observa más profundamente los diferentes procesos de fundición junto con los parámetros más importantes a tener en cuenta durante un proceso de producción, más concretamente, nuestro caso va a ir dedicado a un proceso de **fundición por gravedad en moldes permanentes metálicos**.

Con respecto a este tipo de procesos cabe destacar que su principal dedicación es el sector automovilístico, donde se fabrican altos volúmenes de producción de piezas con características de alta complejidad geométrica, bajo peso (espesores pequeños) y volumen (turbocompresores, pistones, culatas...) dentro de un molde mecanizado acorde a las características de la pieza fundida.

Una vez hemos planteado los diferentes métodos de fundición y nos hemos centrado en procesos de moldeo permanentes, a continuación, se presenta los principales componentes que entran en juego durante la fabricación de esta pieza en bruto, los cuales sí se pueden ver en otras fundiciones, pero con diferencias geométricas, material, composición química o tratamientos superficiales entre otras especificaciones.

¹⁸ Serope Kalpakjian y Steven Schmid ,Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 5^a Edición (2008). Capítulo 11. Página 285-288.

ANEXO 16. Defectología en procesos de fundición.

principales defectos

Uno de los objetivos a los que afecta indirectamente nuestro proyecto sería, dentro de lo posible, reducir el rechazo generado por piezas defectuosas dentro del rango de defectos en el que nuestra posible alternativa de calentamiento se ve afectada.

Consideramos que una pieza es *defectuosa* cuando sus características geométricas o estructura interna es inadecuada con respecto aquellas definidas por el cliente. Un fenómeno que nos va a afectar de manera determinante se trata del proceso de solidificación de nuestra colada en el momento que esta comienza a cambiar de estado de líquido a sólido y los consiguientes gradientes de temperatura que conlleva.

Previamente a comentar los principales defectos que pueden aparecer en las piezas fabricadas, es importante destacar que no podemos establecer a priori una **causa raíz** por la cual se genera esta tipología de defectos. En nuestro caso, podemos establecer **motivos o causas** por las cuales se tiene un defecto en el proceso de producción y, por ende, plantear la solución que nos resuelve parte del problema global. Sin embargo, no podemos concluir que ello se trate de la **causa originaria** del problema. Esto se debe a que los sistemas de producción en fundición son bastante complejos donde se manejan bastantes variables difíciles de medir (tamaño de grano, gradiente de temperatura, solidificación...) y, por ende, no podemos tomar conclusiones precipitadas.

A pesar de todo ello, vamos a plantear los principales defectos y las posibles causas que lo generan que nos pueden surgir en ocasiones determinadas.

Según lo mencionado anteriormente, el International Comitee of Foundry Technical Associations¹⁹ el establece el estándar de defectos en fundición como:

A.- Proyecciones metálicas: aletas, rebabas o proyecciones en el interior o exterior de la pieza. Una de las causas que generan esta tipología de defecto es la “caída de arena”, la cual genera dos defectos independientes. Por un lado, la arena que cae propiamente en el molde se cubre de metal generando así una superficie granulosa irregular. Por otro, el hueco en el macho que ha dejado esa arena que ha caído dentro del molde, éste se llena de metal y genera una rebaba que tendrá que eliminarse posteriormente si se considera aceptable y no debe volverse a refundir.

B.- Cavidades: consisten en porosidades, *rechupes* (huecos procedentes de la contracción del metal durante la solidificación) o *sopladuras* (burbujas esféricas en la superficie de la pieza debido a la carencia de evacuación de los gases durante el basculamiento y solidificación del metal). Es común que ocurra debido a gases que se quedan ocluidos²⁰), debido, entre muchos factores, a falta de llenado del metal líquido en zonas de contacto entre macho y metal líquido o esquinas del molde con radios de redondeo muy bajos.

C.- Discontinuidades: arrastres, deformaciones o grietas, debidos entre otros factores, a que la temperatura de solidificación de la pieza ha sido inferior a la establecida, por tanto, se impide que la pieza se contraiga adecuadamente. Una de las posibles fuentes causantes de este problema . Ejemplo de ello lo apreciamos en la *figura 18* de la página siguiente.

¹⁹ Serope Kalpakjian y Steven Schmid, Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5^a Edición (2008). Capítulo 10. Página 276.

²⁰ <http://www.raquelserrano.com/apuntes-2/segundo/procesos-industriales/>. Capítulo 10: defectos en piezas fundidas. Página 4.

D.- Superficies defectuosas: capas de óxido, pliegues, caídas de arena, impurezas... Es importante destacar que la generación de alúmina y nitruro de aluminio es algo inherente a la fundición de aluminio, debido a la alta temperatura de trabajo ($700\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$), los cuales nos generarán imperfecciones en nuestras piezas, tanto en la superficie como en la parte interior de la pieza. Por lo tanto, la alúmina u óxido de aluminio al tener mayor dureza y punto de fusión que el aluminio es una fuente de problemas, ya que, debido al empleo de mecanizado de alta velocidad (HSM), el hecho de encontrar un punto de mayor dureza supone una alta probabilidad de rotura de herramienta, lo cual supondrá un alto coste.

Según la norma UNE-EN 12258-1:2012, el concepto más conocido por el cual se denomina a los óxidos o “pellejos” (como se conoce popularmente), se denomina **nata**²¹. Estos residuos proceden del contacto de metal líquido con una superficie sólida, como puede ser las paredes de un horno fusor, cuchara de transporte o cazo.

E.- Fundición incompleta: falta de material en la pieza. Varios factores que generan estos defectos son: temperatura inferior a la consigna que finaliza con solidificación prematura, volumen de dosificación insuficiente o molde por debajo de temperatura consigna. Un ejemplo claro de ello es la pieza de la *figura 6* de la página posterior.

F.- Dimensiones o formas incorrectas: errores en montaje del molde, contracción irregular o tolerancia inapropiada de la contracción. Un defecto típico correspondiente a esta clase se trata de las “rebabas”, como aumento de tamaño del plano de unión entre el macho superior e inferior, causado, por ejemplo, a un mal ajuste entre macho o expansión térmica excesiva de uno de los dos machos. Un ejemplo de ello es la *figura 7*, donde se aprecia una excesiva parte sobrante de la pieza, o la *figura 9*, donde no se obtiene la altura adecuada de mazarota.

G.- Inclusiones: este tipo de defecto se refiere a las partes de material no soluble presente en la aleación. Es por ello por lo que este tipo de estructuras intergranulares genera serios puntos de dureza superior al del resto de material, lo cual conlleva a un riesgo de rotura de herramienta a la hora de mecanizar. Uno de los motivos por los cuales se generan inclusiones es la turbulencia durante la dosificación del metal en el molde.

A continuación, se incluyen imágenes de los apartados anteriormente nombrados:



Figura 6. Defecto común de “falta de llenado”.
[Fuente]: realizada por el autor (28/05/2019).



Figura 7. Defecto de “macho explotado”.
[Fuente]: realizada por el autor (28/05/2019).



Figura 8. Defecto de “pliegue”.
[Fuente]: realizada por el autor (28/05/2019).



Figura 9. Defecto de “mazarota corta”.
[Fuente]: realizada por el autor (28/05/2019).

²¹ UNE-EN 12258-1:2012. Aluminio y aleaciones de aluminio. Términos y definiciones. Parte 1: Términos generales.

ANEXO 17. Cálculo de los coeficientes de convección

Dado que para los cálculos realizados en este apartado requiere un cálculo de propiedades más amplio, se va a utilizar una temperatura de película T_p ²⁴, para calcular todas las propiedades dependientes de la temperatura mediante el software EES

$$T_p = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{588,15 + 298,15}{2} = 443,15 \text{ K}$$

En primer lugar, se resolverá la *ecuación 19*, para ello, se debe calcular los números adimensionales de las *ecuaciones 12* y *16*, los cuales resultan:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{0.00001562 \cdot 41,81}{0.05608} = 0,01165$$

Como se explica en el apartado 2.3.2.2., para poder obtener el número de Reynolds, hay que calcular la velocidad a la entrada de la tobera. Para ello, resolvemos las 8 ecuaciones que se proponen:

$$Q = \sqrt[1.82]{\frac{p_{SUM}^2 - p_B^2}{48,6 \cdot ds \cdot L_E \cdot D^{-4,82}}} = \sqrt[1.82]{\frac{4,5^2 - P_B^2}{48,6 \cdot 0,578 \cdot 72 \cdot 53,1^{-4,82}}}$$

Fijamos $L_E = 72 \text{ m}$ ²², $p_{SUM} = 4,5 \text{ bar}$ ²³, $D = 53,1 \text{ mm}$ ²³ y $Q_o = \frac{Q}{3600}$, para obtener el caudal en $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$:

$$\begin{aligned} \text{Línea 1: } & p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_1}{A}\right)^2}{2g} + h_{L1}; h_{L1} = K_1 \cdot \frac{\left(\frac{Q_1}{A}\right)^2}{2g}; p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_1}{A}\right)^2}{2g} + 1 \cdot \frac{\left(\frac{Q_1}{A}\right)^2}{2g} \\ \text{Línea 2: } & p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_2}{A}\right)^2}{2g} + h_{L2}; h_{L2} = K_2 \cdot \frac{\left(\frac{Q_2}{A}\right)^2}{2g}; p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_2}{A}\right)^2}{2g} + 1,2 \cdot \frac{\left(\frac{Q_2}{A}\right)^2}{2g} \\ \text{Línea 3: } & p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_3}{A}\right)^2}{2g} + h_{L3}; h_{L3} = K_3 \cdot \frac{\left(\frac{Q_3}{A}\right)^2}{2g}; p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_3}{A}\right)^2}{2g} + 1,4 \cdot \frac{\left(\frac{Q_3}{A}\right)^2}{2g} \\ \text{Línea 4: } & p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_4}{A}\right)^2}{2g} + h_{L4}; h_{L4} = K_4 \cdot \frac{\left(\frac{Q_4}{A}\right)^2}{2g}; p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_4}{A}\right)^2}{2g} + 1,6 \cdot \frac{\left(\frac{Q_4}{A}\right)^2}{2g} \\ \text{Línea 5: } & p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_5}{A}\right)^2}{2g} + h_{L5}; h_{L5} = K_5 \cdot \frac{\left(\frac{Q_5}{A}\right)^2}{2g}; p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_5}{A}\right)^2}{2g} + \frac{\left(\frac{Q_5}{A}\right)^2}{2g} \\ \text{Línea 6: } & p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_6}{A}\right)^2}{2g} + h_{L6}; h_{L6} = K_6 \cdot \frac{\left(\frac{Q_6}{A}\right)^2}{2g}; p_B \cdot 10,2 = \frac{\left(\frac{Q_6}{A}\right)^2}{2g} + 2 \cdot \frac{\left(\frac{Q_6}{A}\right)^2}{2g} \end{aligned}$$

$$Q_o = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

Resolviendo las 8 ecuaciones con las 8 incógnitas, obtenemos:

$$Q_o = 0,03382 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad Q_1 = 0,006766 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad Q_2 = 0,006765 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_3 = 0,06764 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad Q_4 = 0,006764 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad Q_5 = 0,006763 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

²² Plan de Autoprotección Contra Incendios y de Evacuación. Anexo VII. Planos (empresa AlumalSA).

²³ Plan de Autoprotección Contra Incendios y de Evacuación. Instalación de gas natural (empresa AlumalSA).

$$Q_6 = 0,006762 \frac{m^3}{s} \quad p_B = 4,493 \text{ bar}$$

A continuación, calculamos V_E y Reynolds (*ecuación 21*) para ambos mecheros, escogiendo como valor más representativo caudal del puesto 1, $Q_1 = 0,006766 \frac{m^3}{s}$:

- Mecheros de precalentamiento (*figura 17 de la memoria*):

$$V_{E1} = \frac{4 \cdot Q_1}{\pi D_1^2 \cdot N_1} = \frac{4 \cdot 0,006766}{\pi \cdot 0,01^2 \cdot 8} = 10,77 \frac{m}{s}$$

$$D_1 = 0,01 \text{ m.} \quad N_1 = 4 \text{ agujeros (*figura 17 de la memoria*)}$$

$$Re_1 = \frac{\rho \cdot V_{E1} \cdot D_1}{\mu} = \frac{0,4605 \cdot 10,77 \cdot 0,01}{0,00001562} = 3175,15$$

- Mecheros laterales (*figura 19 y 20 de la memoria*):

$$V_{E2} = \frac{4 \cdot Q_1}{\pi D_2^2 \cdot N_2} = \frac{4 \cdot 0,006766}{\pi \cdot 0,016^2 \cdot 16} = 2,1 \frac{m}{s}$$

$$D_2 = 0,016 \text{ m (*Anexo 7*).} \quad N_2 = 8 \text{ (*figura 19 y 20 de la memoria*)}$$

$$Re_2 = \frac{\rho \cdot V_{E2} \cdot D_2}{\mu} = \frac{0,4605 \cdot 2,1 \cdot 0,016}{0,00001562} = 990,6$$

Como ya tenemos los números adimensionales calculados, pasamos a resolver las *ecuaciones 17 y 18*:

- Mecheros de precalentamiento:

$$\overline{Nu}_1 = G\left(A_r, \frac{H}{D}\right) \cdot [2 \cdot Re_2^{0.5} \cdot (1 + 0,005 \cdot Re_1^{0.55})^{0.5}] \cdot Pr^{0.42} = 0,1352 \cdot [2 \cdot 3175,15^{0.5} \cdot (1 + 0,005 \cdot 3175,15^{0.55})^{0.5}] \cdot 0,01165^{0.42} = 2,7998 \approx 2,8$$

Donde:

$$H_1 = 0,005 \text{ m (Altura de la boquilla, *figura 17 de la memoria*).} \quad r = 0,0675 \text{ m (*anexo 8*).}$$

$$D_1 = 0,01 \text{ m (diámetro de salida, *figura 17 de la memoria*).}$$

$$A_{r1} = \left(\frac{D_1^2}{4r^2} \right) = \left(\frac{0,01^2}{4 \cdot 0,0675^2} \right) = 0,0055$$

$$G\left(\frac{H_1}{D_1}, A_{r1}\right) = 2 \cdot A_{r1}^{1/2} \cdot \frac{1-2,2 \cdot A_{r1}^{1/2}}{1+0,2 \cdot \left(\frac{H_1}{D_1}-6\right) \cdot A_{r1}^{1/2}} = 2 \cdot 0,0055^{0.5} \cdot \frac{1-2,2 \cdot 0,0055^{0.5}}{1+0,2 \cdot \left(\frac{0,005}{0,01}-6\right) \cdot 0,0055^{0.5}} = 0,1352$$

- Mecheros laterales:

$$\overline{Nu}_2 = F_2(Re) \cdot G\left(\frac{H}{D}, A_r\right) \cdot K\left(A_r, \frac{H}{D}\right) \cdot Pr^{0.42} = 49,686 \cdot 0,2145 \cdot 1 \cdot 0,01165^{0.42} = 1,643 \approx 1,7$$

Donde:

$$H_2 = 0,045 \text{ m. (Altura de la boquilla. *anexo 7*)} \quad S_2 = 0,1 \text{ m. (Distancia entre tubos. *anexo 14*)}$$

$$A_{r2} = \left(\frac{\pi D_2^2}{4S_2^2} \right) = \left(\frac{0,016^2}{4 \cdot 0,1^2} \right) = 6,4 \cdot 10^{-3} \quad F_2(Re) = 0,5 \cdot Re_2^{2/3} = 0,5 \cdot 990,6^{\frac{2}{3}} = 49,686$$

$$G\left(\frac{H_2}{D_2}, A_{r2}\right) = 2 \cdot A_{r2}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1-2,2 \cdot A_{r2}^{\frac{1}{2}}}{1+0,2 \cdot \left(\frac{H_2}{D_2}-6\right) \cdot A_{r2}^{\frac{1}{2}}} = 2 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3^{0,5}} \cdot \frac{1-2,2 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3^{0,5}}}{1+0,2 \cdot \left(\frac{0,045}{0,016}-6\right) \cdot 6,4 \cdot 10^{-3^{0,5}}} = 0,2145$$

$$K\left(A_{r2}, \frac{H_2}{D_2}\right) = \left[1 + \left(\frac{\frac{H_2}{D_2}}{\frac{0,6}{A_{r2}^{0,5}}} \right)^6 \right]^{-0,05} = \left[1 + \left(\frac{\frac{0,045}{0,016}}{\frac{0,6}{6,4 \cdot 10^{-3^{0,5}}}} \right)^6 \right]^{-0,05} = 1$$

Sustituimos los valores obtenidos en la ecuación 19 respectivamente:

- Mecheros de precalentamiento:

$$h_{ESC1} = \frac{\bar{N}u_1 \cdot \lambda}{D_1} = \frac{2,8 \cdot 0,05608}{0,01} = 15,7 \frac{W}{m \cdot K}$$

- Mecheros laterales:

$$h_{ESC2} = \frac{\bar{N}u_2 \cdot \lambda}{D_2} = \frac{1,7 \cdot 0,05608}{0,016} = 9,54 \frac{W}{m \cdot K}$$

ANEXO 18. Cálculo del número de Biot y Fourier

Una vez tenemos los valores más representativos del proceso de transferencia de calor, se procede a obtener los números adimensionales de conducción transitoria representados en las ecuaciones 20 y 21:

- Biot (ecuación 30)⁹: $Bi = \frac{h_{EQ} \cdot L_c}{\lambda_{MOLDE}}$

Donde:

$$L_c = 0,3175 \text{ (espesor a calentar, anexo 8).} \quad \lambda_{MOLDE}(T_s) = 27,4 \frac{W}{m^2 \cdot K} \text{ (anexo 5).}$$

Nos queda:

$$Bi_{MÁXIMO} \equiv \frac{250,7 \cdot 0,3175}{27,4} = 2,91 \approx 3$$

$$Bi_{INTERMEDIO} \equiv \frac{175,55 \cdot 0,3175}{27,4} = 2,04 \approx 2$$

$$Bi_{MÍNIMO} \equiv \frac{146,52 \cdot 0,3175}{27,4} = 1,689 \approx 1,7$$

- Fourier (ecuación 31)⁹: $Fo \equiv \frac{a \cdot t}{L_c^2}$

Donde:

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} = \frac{0,05608}{0,4605 \cdot 41,81} = 2,93 \cdot 10^{-3} \approx 3 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \text{ (EES). } t = 4052s \text{ (anexo 11).}$$

Nos queda:

$$Fo(t) \equiv \frac{a \cdot t}{L_c^2} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot t}{0,3175^2} = 0,0297 \cdot t \approx 0,03 \cdot t$$

$$Fo(t = 4052 s) \equiv \frac{a \cdot t}{L_c^2} = 0,03 \cdot 4052 = 121,56$$

ANEXO 19. Cálculos necesarios para el cálculo de la eficiencia

Planteamos la *ecuación 16* para el cálculo de la eficiencia:

$$\eta_{térmico} = \frac{q_o}{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \cdot PCI \cdot t}$$

Sustituimos entonces en la *ecuación 17*:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_Q \cdot V_E$$

Donde:

$$\rho = 0,4605 \frac{Kg}{m^3} (\text{EES}); \quad V_{E1} = 10,77 \frac{m}{s} (\text{apartado 3.2}); \quad V_{E2} = 2,1 \frac{m}{s} (\text{apartado 3.2})$$

$$A_{Q1} = \frac{\pi \cdot 0,01^2 \cdot 8}{4} = 6,3 \cdot 10^{-4} m^2 (\text{apartado 3.2}).$$

$$A_{Q2} = \frac{\pi \cdot 0,016^2 \cdot 16}{4} = 3,25 \cdot 10^{-3} m^2 (\text{apartado 3.2}).$$

$$\dot{m}_1 = \rho \cdot A_{Q1} \cdot V_{E1} = 0,4605 \cdot 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot 10,77 = 3,13 \cdot 10^{-3} \frac{Kg}{s}$$

$$\dot{m}_2 = \rho \cdot A_{Q2} \cdot V_{E2} = 0,4605 \cdot 3,25 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 = 3,15 \cdot 10^{-3} \frac{Kg}{s}$$

Cambiamos de unidades el valor de PCI:

$$PCI = 10,83 \frac{KWh}{m^3} (\text{anexo 6}) = \frac{10,83 \cdot 3600}{\rho(T = 273,15 K; p = p_{atm})} = \frac{10,83 \cdot 3600}{0,7471} = 52.185,8 \frac{KJ}{Kg}$$

Donde:

$$\rho_{C.N.}(T = 273,15 K; p = p_{atm}): \text{densidad en condiciones normales} = 0,7471 \frac{Kg}{m^3} (\text{EES}).$$

ANEXO 20. Planteamiento de números adimensionales y parámetros necesarios

En primer lugar, nuestro objetivo primordial es obtener el *número de Nusselt*²⁴. Para ello, hay que evaluar previamente distintos números adimensionales para saber que fórmula se va a utilizar para estimar dicho número.

- *Número de Nusselt*²⁴: expresión adimensional de la difusividad térmica.

$$\overline{Nu} = \frac{h_{ESC} \cdot D}{\lambda} \quad (18)$$

λ : conductividad térmica del gas. En nuestro caso, varía con la temperatura [$\frac{W}{m \cdot K}$].
D: diámetro de salida de la tobera [m] (anexo 7).

Como nuestro objetivo es calcular h_{ESC} (coeficiente de convección), sustituimos en la ecuación:

$$h_{ESC} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{D} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (19)$$

A continuación, procederemos a calcular el número de Nusselt mediante una estimación que vendrá impuesta por otros números adimensionales y parámetros geométricos, ya que sabemos que para chorros normales a superficies el número de Nusselt depende de:

$$\overline{Nu} = f(Re, Pr) \quad (20)$$

- *Número de Reynolds*¹⁴: cociente entre las fuerza de inercia y las viscosas.

$$Re = \frac{\rho \cdot V_e \cdot D}{\mu} \quad (21)$$

V_E : velocidad a la entrada de la tobera [$\frac{m}{s}$]. * D : diámetro de la tobera [m].
 μ : viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$]. ρ : densidad del fluido [$\frac{Kg}{m^3}$].

*Para calcular la V_E , calcularemos el caudal usando la ecuación de Renouard cuadrática²⁵:

$$p_{SUM}^2 - p_B^2 = 48.6 \cdot ds \cdot L_E \cdot Q^{1.82} \cdot D^{-4.82} \quad (22)$$

Donde:

p_{sum} : presión de suministro [bar].

p_B : presión en el nodo de distribución de gas natural de la línea [bar].

²⁴ Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 6. Introduction to convection.

²⁵ Especificaciones técnicas CONAIF-SEDIGAS para la certificación de instaladores de gas. Parte 17. (Octubre 2008).

$ds = 0.578$ (densidad relativa del cálculo de gas, es decir, cociente de densidades gas natural y aire)

L_E : Longitud equivalente del tramo [m].²²

Q: caudal $\left[\frac{m^3}{h} \right]$.

Este valor de caudal es aquel que llega a la línea. Una vez allí, éste se reparte por los 6 puestos acorde al siguiente esquema (para más información observar *anexo 4*):

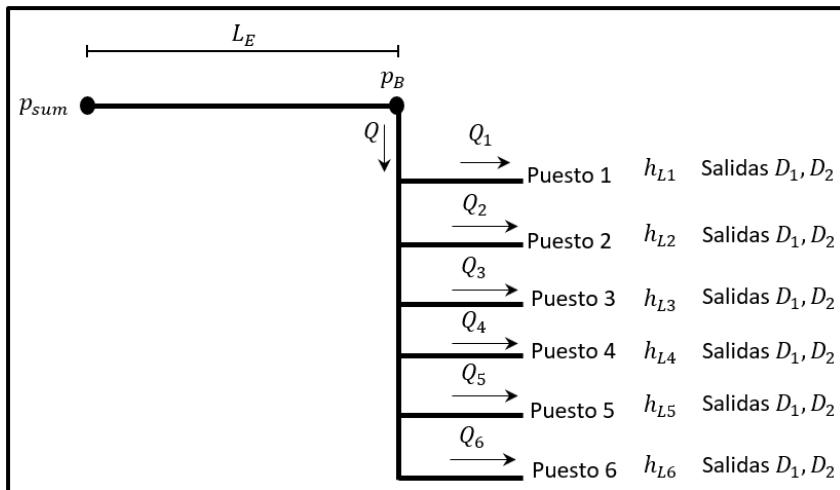


Figura 10. Esquema de distribución de líneas de gas natural en la línea de producción.
[Fuente]: realizado por el autor (09/09/2019).

h_L : pérdida de carga por fricción [m].

Es por ello que, para poder calcular el caudal de salida de cada puesto, tenemos que plantear un las siguientes ecuaciones:

$$Q = \sum Q_N \quad (23)$$

Donde:

N: cada línea de salida de gas natural.

Sustituyendo valores:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \left[\frac{m^3}{s} \right]. \quad (24)$$

Además, aplicando la *ecuación de Bernoulli* entre el punto “B” y la salida de cada línea (obtenemos 6 ecuaciones, una por puesto):

$$P_B + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B = P_{SALIDA} + \frac{V_{SALIDA}^2}{2g} + Z_{SALIDA} + h_{L_N} \quad (25)$$

Por lo tanto, obtendremos 8 ecuaciones y 8 incógnitas ($Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q$ y P_B) a fin de poder obtener una estimación de la velocidad de salida con la siguiente ecuación (sustituyendo en ella el valor de mayor caudal):

$$Q = V_E \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4} \cdot N \right) \quad (26)$$

Donde:

N : número de boquillas/salidas.

- *Número de Prandtl*²⁴: cociente entre difusividades de momento y térmica del fluido.

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \quad (27)$$

μ : viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$].

C_p : calor específico [$\frac{KJ}{Kg \cdot K}$].

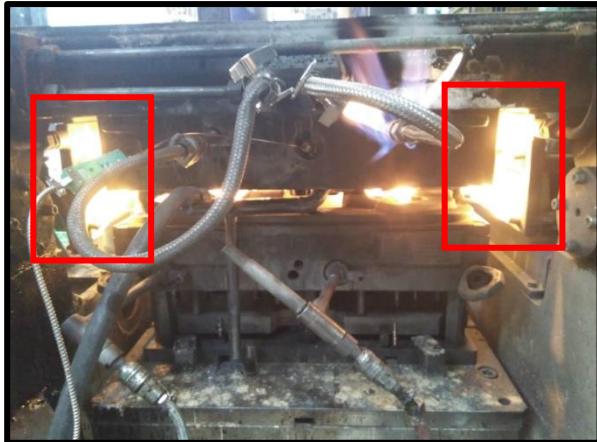


Figura 11. Calentamiento del molde en su superficie lateral.
[Fuente]: realizada por el autor (04/06/2019).

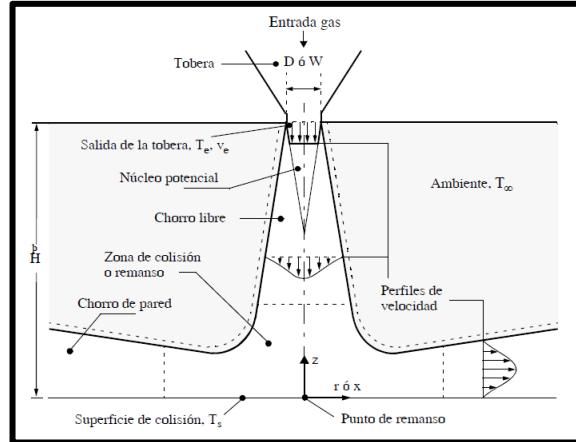


Figura 12. Choque con una superficie de un único chorro de gas.
[Fuente]: Incropera & DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, Wiley (1989). Capítulo 6.

1. En base a la evaluación obtenida de cada número adimensional, se podrá seleccionar una estimación del número de Nusselt para, finalmente, resolver la *ecuación 19* y obtener el coeficiente de convección h_{ESC} .

- 1.1. Según la geometría que presentan nuestros quemadores laterales en la *figura 19 y 20 de la memoria*, la cual concuerda aproximadamente con la presentada en la *figura 13* de la página siguiente, procedente de la fuente indicada. Por lo tanto, utilizaremos la ecuación siguiente⁸:

$$\overline{Nu} = F_2(Re) \cdot G\left(\frac{H}{D}, A_r\right) \cdot K\left(A_r, \frac{H}{D}\right) \cdot Pr^{0.42} \quad (28)$$

Donde:

$$F_2(Re) = 0.5 \cdot Re_1^{2/3}$$

$$G\left(\frac{H}{D}, A_r\right) = 2 \cdot A_r^{1/2} \cdot \frac{1 - 2.2 \cdot A_r^{1/2}}{1 + 0.2 \cdot \left(\frac{H}{D} - 6\right) \cdot A_r^{1/2}}$$

$$A_r = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4S^2}\right)$$

$$K\left(A_r, \frac{H}{D}\right) = \left[1 + \left(\frac{\frac{H}{D}}{\frac{0.6}{A_r^2}}\right)^6\right]^{-0.05}$$

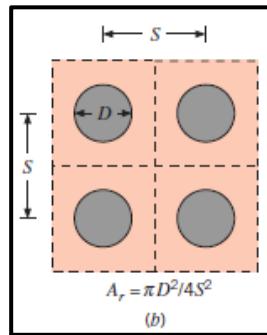


Figura 13. Disposición alineada de chorros redondos.

[Fuente]: Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 7. Figura 7.18b.

- 1.2. Según la geometría que presentan nuestros quemadores de precalentamiento en la figura 17 de la memoria, lo más cercano a la geometría que tenemos se puede observar en la figura 14 con la correspondiente fórmula⁸:

$$\overline{Nu} = G \left(A_r, \frac{H}{D} \right) \cdot [2 \cdot Re_2^{0.5} \cdot (1 + 0.005 \cdot Re_2^{0.55})^{0.5}] \cdot Pr^{0.42} \quad (29)$$

Donde los coeficientes son iguales (pero con valores distintos) que la ecuación 28, exceptuando:

$$A_r = \left(\frac{D^2}{4r^2} \right)$$

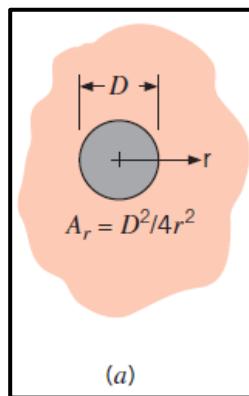


Figura 14. Chorro redondo único

[Fuente]: Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 7. Figura 7.18a.

Finalmente, para evaluar el transitorio:

- *Número de Biot*⁹: cociente entre la resistencia a la conducción en el interior de un sólido y la convección con un fluido exterior.

$$Bi \equiv \frac{h_{EO} \cdot L_c}{\lambda} \quad (30)$$

L_c : espesor representativo del molde [m] (anexo 8).

λ : conductividad térmica del molde [$\frac{W}{m \cdot K}$].

- *Número de Fourier*⁹: nos ofrece un tiempo adimensional.

$$Fo \equiv \frac{a \cdot t}{L_c^2} \quad (311)$$

$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$: difusividad térmica del fluido [$\frac{m^2}{s}$]. t : tiempo [s].

ANEXO 21. Explicación del ciclo de trabajo

En el siguiente esquema se explica cualitativamente todo el proceso que se desarrolla para poder producir la pieza, suponiendo que el molde y la línea de producción se encuentran en las condiciones óptimas para fundir (dentro de la consigna de parámetros explicadas a final de este apartado).

En el *anexo 4* se encuentra una figura con la distribución de la línea y todos los elementos que entran en juego a la hora de producir, para visualizar de forma más profunda el funcionamiento del proceso completo.

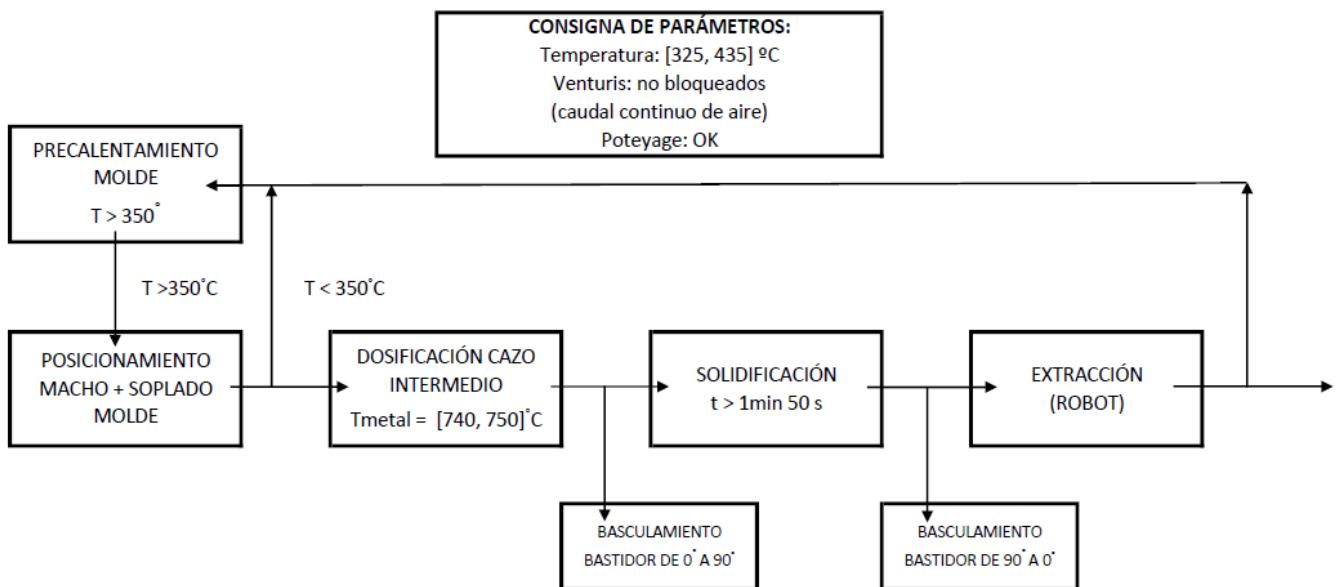


Figura 15. Esquema explicativo del ciclo de trabajo.

[Fuente]: realizado por el autor.

1. **Precalentamiento del molde:** se basa en el proceso de llevar el molde de temperatura ambiente o temperatura de poteyage (250°C), dependiendo del origen del molde, a los 350°C, introduciendo en él el mechero de precalentamiento, el cual se explicará en el apartado siguiente, junto con los mecheros laterales. En nuestro caso, hemos fijado la 25 °C como la temperatura inicial de llegada del molde a la línea de producción.

2. **Posicionamiento de macho + soplado:** procedimiento en el que el operario coloca los machos en la portada del molde y soplado del mismo, con el objetivo de eliminar los posibles restos previos de arena y, en consecuencia, reducir el rechazo de piezas por caída de arena.

A pesar de parecer una obviedad, el hecho de no soplar el molde antes de introducir el metal líquido puede ser una fuente de problemas y disparar así el rechazo.

3. **Dosificación del cazo intermedio:** se basa en el llenado del cazo del molde. Un robot (robot inferior del *anexo 4*) se encarga de transportar dicho metal líquido en un cazo con recubrimiento cerámico desde el horno de mantenimiento al cazo del molde. A continuación, se procede al basculamiento, donde el metal fluye a lo largo de las huellas del molde.

Todas estas operaciones están controladas mediante parámetros fijos de tiempo como se indica en el esquema. Además, cabe destacar que no se pasa a la siguiente etapa hasta que el molde está a 90°, es decir, existe un tiempo de basculamiento, fijado durante la puesta a punto de la línea, de tal forma que permite al metal líquido llenar toda la huella durante

dicha rotación del molde. Una vez finalizado este tiempo, el molde se encuentra a 90° y se inicia el tiempo de solidificación.

4. **Solidificación:** proceso de cambio de estado del metal líquido a sólido. Se trata de un proceso altamente complejo, debido a la cantidad de variables que entran en juego durante este proceso (gradiente de temperatura, cambio de tamaño de grano, oxidación del metal...). En lo que a nuestro proceso respecta, nos regiremos por el tiempo de solidificación, el cual una vez haya acabado, pasaremos a la siguiente etapa.
5. **Extracción:** una vez la pieza está solidificada, las pinzas del robot manipulador (robot superior del *anexo 4*) se encarga de recoger la pieza en el caso de que sea buena. En caso contrario será el operario encargado de recogerla e introducirla en el cajón de rechazo.

Una vez se ha finalizado esta etapa final, volveríamos al punto inicial. Este proceso es reiterativo, una vez acabado, se empieza de nuevo. Sin embargo, este proceso se ve interrumpido cada 5 turnos (1 turno corresponde a 8 horas de trabajo), pues es el momento en el que se realiza el poteyage de los moldes, como se explica en el apartado 1.1.3 del apartado anterior.

Es importante destacar la **consigna de parámetros**, ya que se trata de parámetros determinantes a la hora de fundir, de tal manera que, si alguno de éstos no se encuentra del rango adecuado o no son aceptables, es muy probable que las piezas obtenidas durante ese proceso sean inadecuadas. Es por ello que, si alguno de estos parámetros se encuentra fuera del rango designado, entonces el puesto se bloquee impidiendo así la producción en ese puesto (esto se puede detectar porque en la botonera del bastidor aparece el mensaje “bloqueado”).