

# FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

**“Diseño de un Molde Permanente de Fundición por Gravedad para la Fabricación de Pesas Adhesivas de Plomo Utilizadas en Balanceo de Neumáticos”**

**UISEK**



**25 AÑOS**

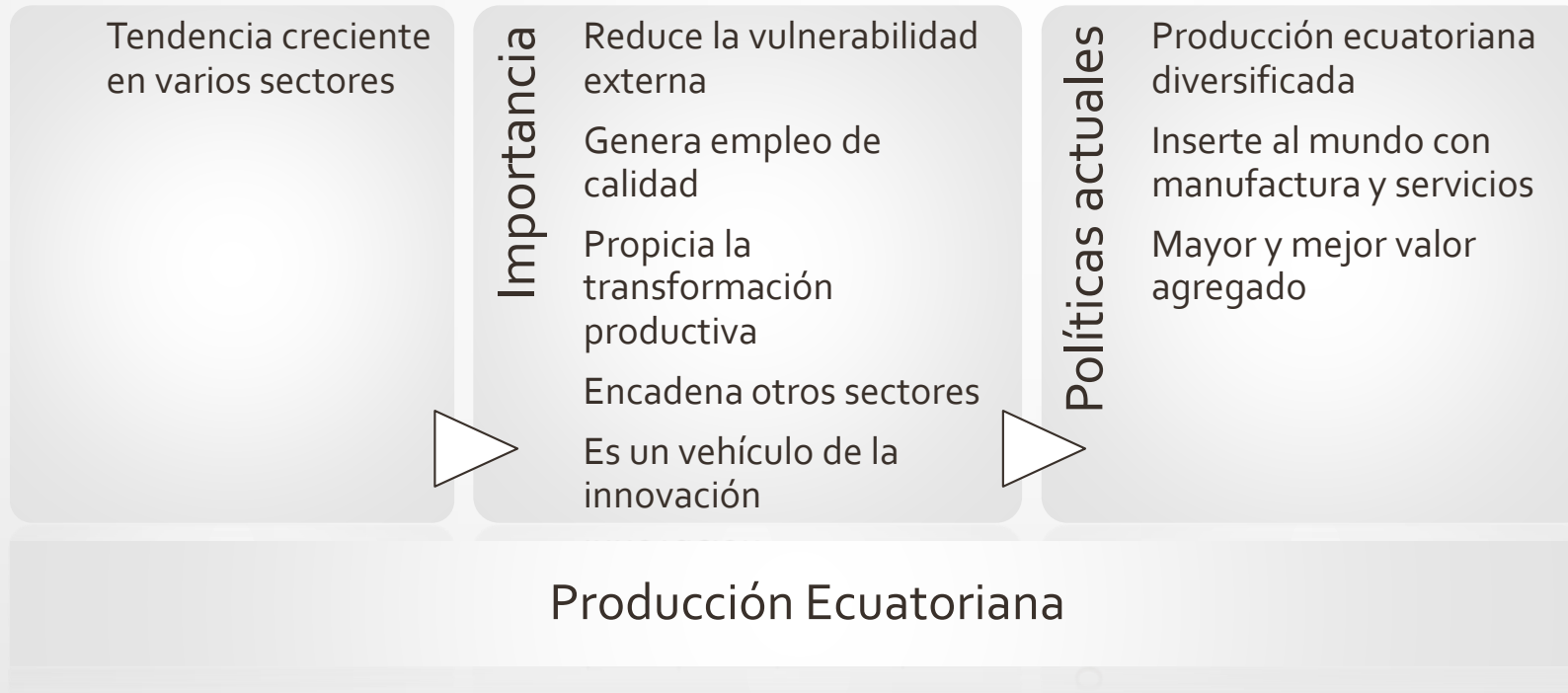
Autor:

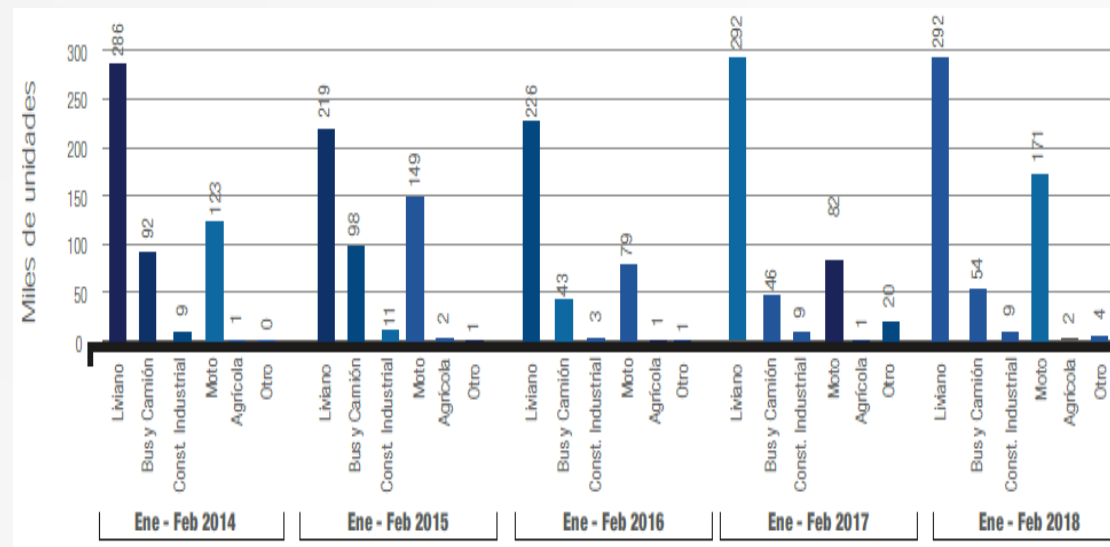
Ing. Paúl Bazante.

Quito, Marzo 2019

# INTRODUCCIÓN

## Desarrollo industrial del Ecuador

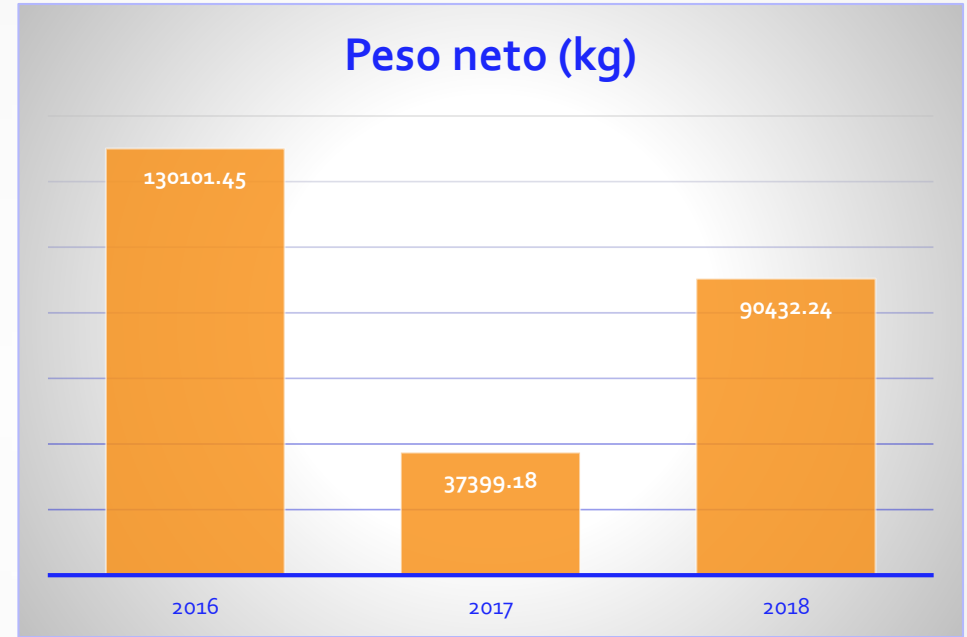
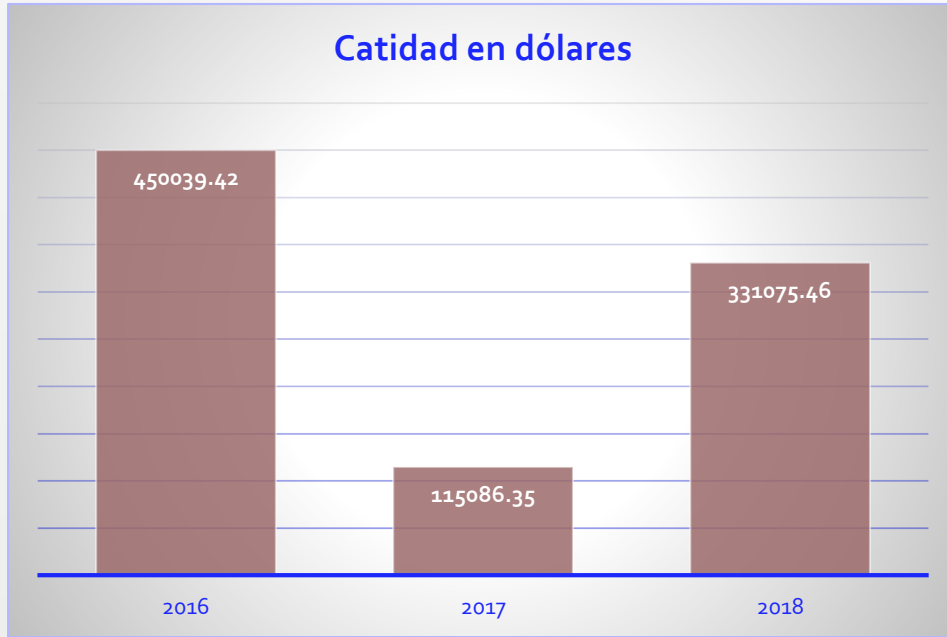




Importaciones totales de neumáticos por segmento  
Recuperado de AEADE (2018)



Conformación sector automotriz  
Recuperado de AEADE (2018)



Importaciones de pesas para balanceo  
Recuperado de SENA (2018)

# OBJETIVOS

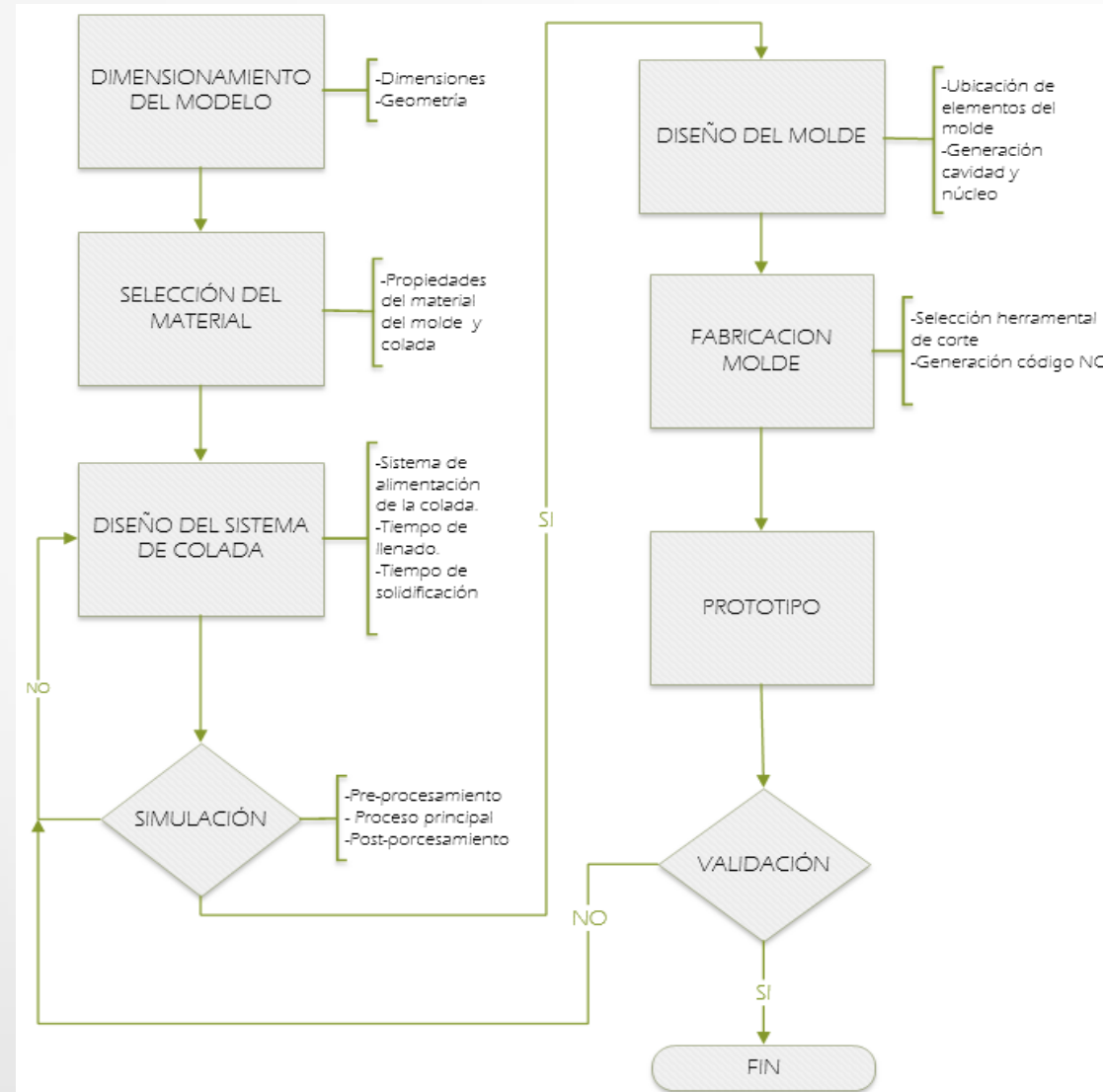
## Objetivo General

Diseñar un molde permanente de fundición por gravedad, mediante simulación computacional para implementar la fabricación de pesas adhesivas de balanceo utilizadas en neumáticos.

## Objetivos Específicos

1. Simular el molde de fundición, mediante el uso de software especializado, a utilizarse en el proceso de simulación de la colada.
2. Analizar las variables del proceso de colada mediante simulación utilizando CFD, para resolverse los defectos en los procesos de llenado y solidificación del modelo propuesto.
3. Comprobar el elemento fundido a través de pruebas, para verificar su llenado total, porosidades y calidad superficial.
4. Validar los resultados a través de un molde prototipo para compararse con lo obtenido mediante simulación.

# MÉTODO



Secuencia metodológica

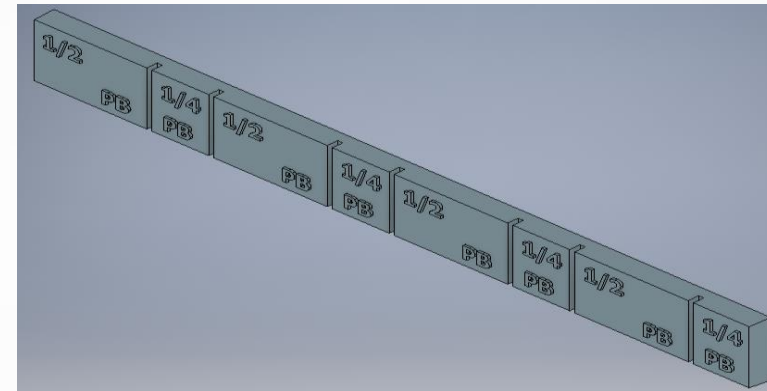
# Dimensionamiento del modelo

Abate, Pérez, Pouton, Martínez  
Krahmer, & Brignone (2015)

Primer paso el  
dimensionamiento del modelo



Tira de pesas comerciales



Modelo CAD de tira de pesas

General Summary Project Status Custom Save Physical

Solids  
The Part Update

Material  
Lead Clipboard

Density 11.340 g/cm<sup>3</sup> Requested Accuracy Low

General Properties

Center of Gravity	
Mass 7.193 g (Relative Err)	X -0.180 mm (Relative Err)
Area 552.023 mm <sup>2</sup> (Relat)	Y 0.002 mm (Relative Err)
Volume 634.343 mm <sup>3</sup> (Relat)	Z -1.995 mm (Relative Err)

Inertial Properties

Principal Global Center of Gravity

Principal Moments

I1 127.069 g mm <sup>2</sup>	I2 84.189 g mm <sup>2</sup>	I3 191.279 g mm <sup>2</sup>
------------------------------	-----------------------------	------------------------------

Rotation to Principal

Rx 0.02 deg (Relat)	Ry -0.68 deg (Relat)	Rz -0.17 deg (Relat)
---------------------	----------------------	----------------------

General Summary Project Status Custom Save Physical

Solids  
The Part Update

Material  
Lead Clipboard

Density 11.340 g/cm<sup>3</sup> Requested Accuracy Low

General Properties

Center of Gravity	
Mass 14.166 g (Relative Err)	X -122.324 mm (Relative Err)
Area 947.097 mm <sup>2</sup> (Relat)	Y 0.001 mm (Relative Err)
Volume 1249.242 mm <sup>3</sup> (Relat)	Z -1.993 mm (Relative Err)

Inertial Properties

Principal Global Center of Gravity

Principal Moments

I1 250.281 g mm <sup>2</sup>	I2 997.198 g mm <sup>2</sup>	I3 888.899 g mm <sup>2</sup>
------------------------------	------------------------------	------------------------------

Rotation to Principal

Rx 0.01 deg (Relat)	Ry 0.12 deg (Relat)	Rz -0.30 deg (Relat)
---------------------	---------------------	----------------------

Propiedades físicas

# Selección del material de colada



Norma ASTM E1085  
2016 (espectrometría  
de fluorescencia)



Muestras de pesas adhesivas

## Elementos aleantes de las probetas

Muestra	Elementos					
	Pb	Fe	Sb	P	Si	Cu
	%					
A	Contenido	99.75	0.25	-	-	-
	±Error	0.03	0.03	-	-	-
	%					
B	Contenido	97.57	1.37	0.64	0.161	0.157
	±Error	0.07	0.05	0.05	0.004	0.009
	%					
C	Contenido	99.71	0.24	-	-	0.05
	±Error	0.03	0.03	-	-	0.009



# Selección del material del molde

## Propiedades del Acero

- Estabilidad dimensional
- Resistencia a altas temperaturas
- Resistencia al choque térmico
- Resistencia a la fatiga
- Soportar ciclos térmicos
- Maquinabilidad adecuada



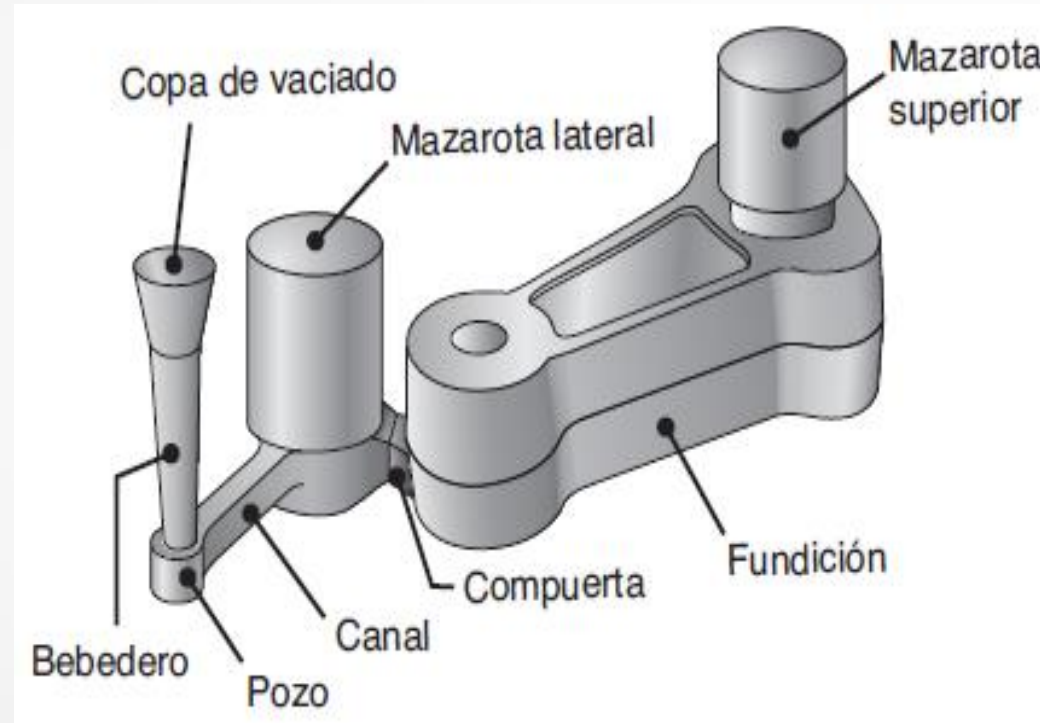
AISI P20



## Acero AISI P20

Información General							
Análisis típico	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S
%	0.37	0.3	1.4	2	1	0.2	<0.01
Normas equivalentes	UNE F-5303, F-3404 W.-Nr. 12738, 1.2311 (mejorado)						
Estado suministrado	Templado y revenido a 290 - 300 HB						

# Diseño del sistema de colada



Elementos del sistema de colada

# Mazarota

Navas, Batista, & Suchkov (1990)

Volumen mínimo

$$V_{maz} = k.c. V_{pieza}$$

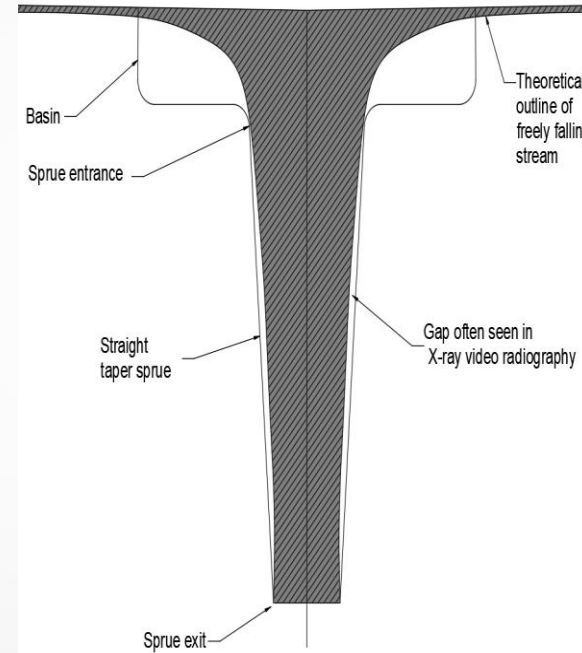
Módulo de enfriamiento

$$M_{enfriamiento} = \frac{V_{pieza}}{A_{pieza}}$$

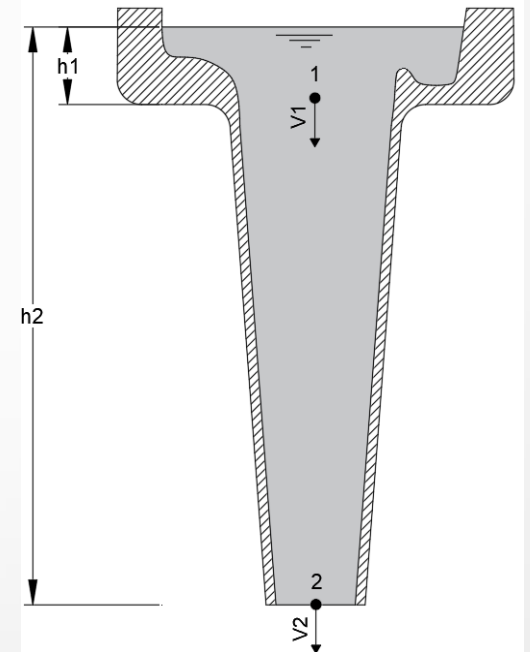
Dimensión	Valor
$D_{maz}$ (mm)	8.5
$h_{maz}$ (mm)	17
$V_{maz}$ (mm <sup>3</sup> )	964.665
$A_{maz}$ (mm <sup>2</sup> )	567.45

# Bebedero

Elbel & Havlicek (2014)



Forma ideal

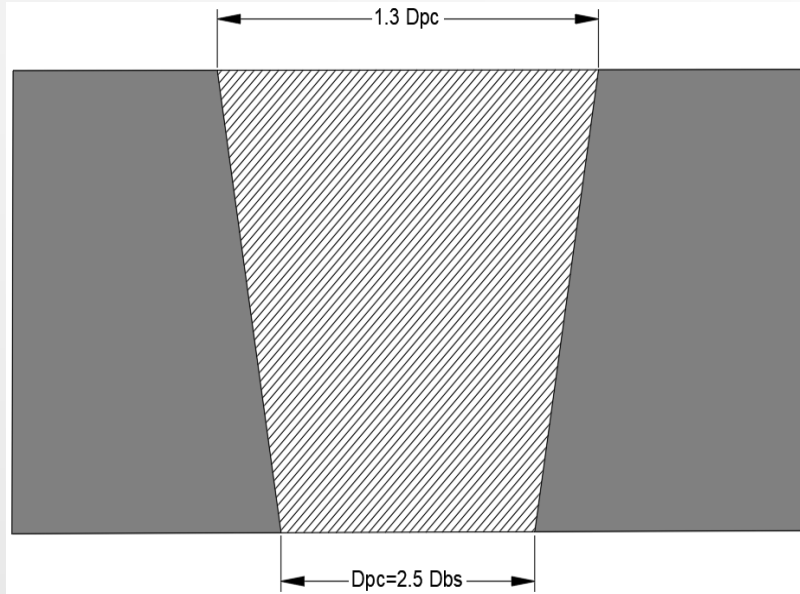


Puntos de cálculo

Dimensión	Valor
$D_{beb\_i}$ (mm)	3
$D_{beb\_s}$ (mm)	4
$h_{beb}$ (mm)	20
$V_{beb}$ (mm <sup>3</sup> )	193.732
$A_{beb}$ (mm <sup>2</sup> )	239.615

# Taza de colada

García Chacón (2013)

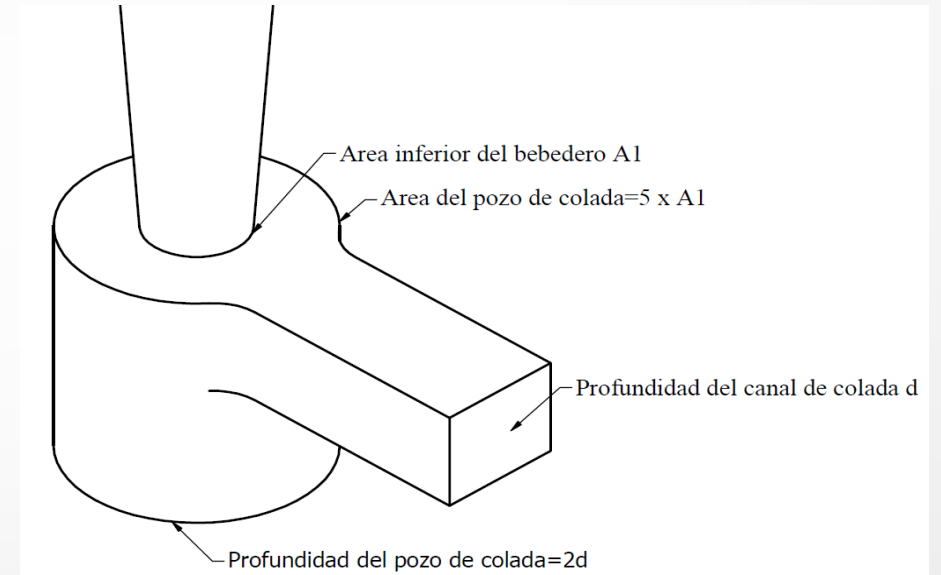


Taza cónica

Dimensión	Valor
$D_{taza\_i}$ (mm)	10
$D_{taza\_s}$ (mm)	13
$h_{taza}$ (mm)	10
$V_{taza}$ (mm <sup>3</sup> )	1044.580
$A_{taza}$ (mm <sup>2</sup> )	576.597

# Pozo de colada

García Chacón (2013)

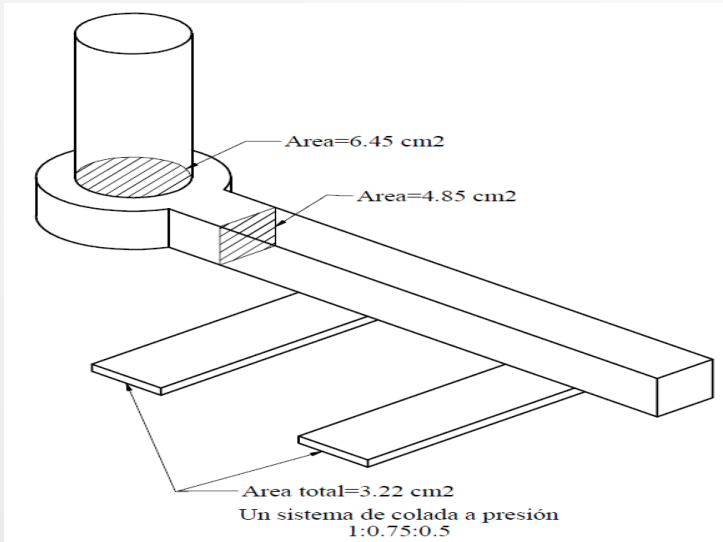


Pozo cilíndrico

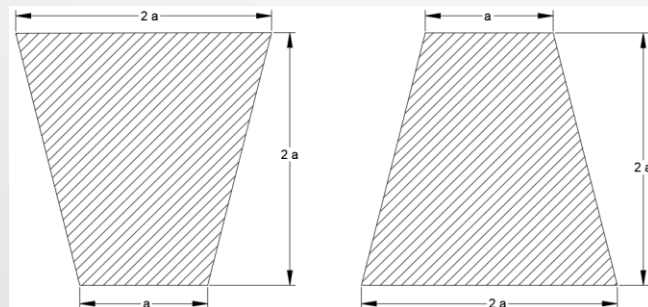
Dimensión	Valor
$D_{pozo}$ (mm)	7
$h_{pozo}$ (mm)	10
$V_{pozo}$ (mm <sup>3</sup> )	384,85
$A_{pozo}$ (mm <sup>2</sup> )	296.881

# Canales de ataque y colada

Boatswain Medina (2018)



Relación de colada



Canales trapezoidales

$$A_{bebedero_i} : A_{c_colada} : A_{c_ataque}$$

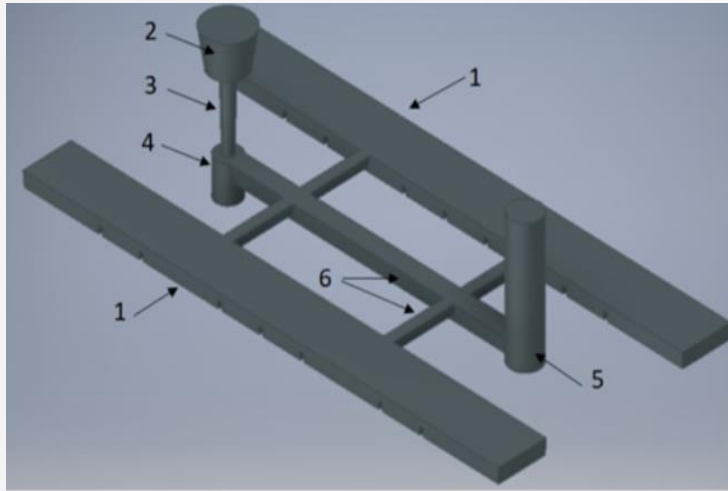
$$1:2:2$$

Relación de coladas más comunes

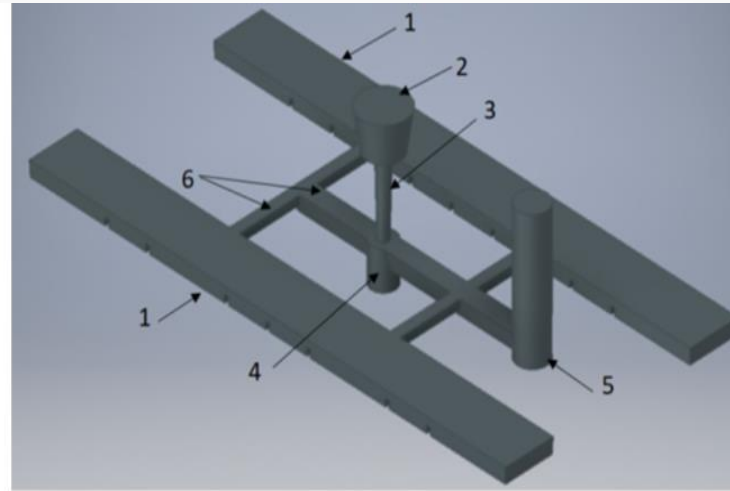
Material	Relación
Acero	1:2:1.5
	1:3:3
	1:1:0.7
	1:2:2
Fundición Gris	1:3:3
	1:4:4
	1:1.3:1.1
Aluminio	1:2:4
	1:3:1
	1:3:3
Bronce	1:1:1
	1:1:3

	Colada	Ataque
$B_{mayor}$ (mm)	5	3
$b_{menor}$ (mm)	2.5	1.5
$h$ (mm)	5	3
$V$ (mm <sup>3</sup> )	767.813	337.838
$A$ (mm <sup>2</sup> )	18.75	6.75

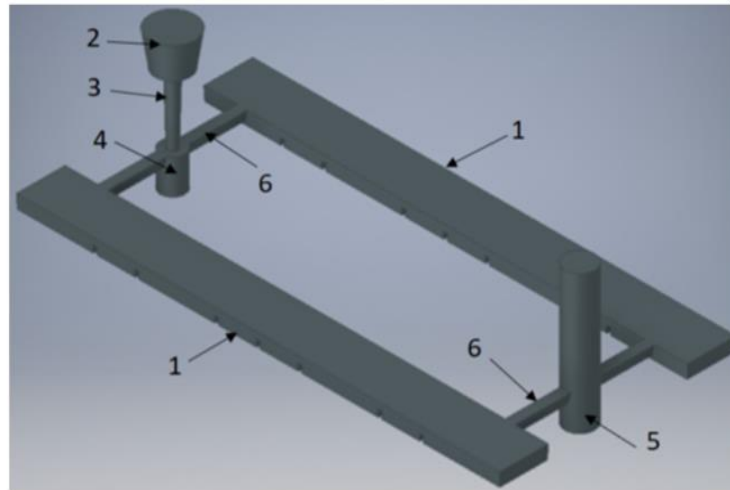
# Opciones del sistema de alimentación



Opción A



Opción B



Opción C

1. Tira de pesas, 2. Taza de colada, 3. Bebedero, 4. Pozo de colada, 5. Mazarota, 6. Canales de colada.

# Simulación

## Mallado

<b>Modelo</b>		<b>Opción A</b>		
<b>Simulación número</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tamaño de Malla (mm)	Colada	7	5	1
	Caja	10	5	3
Número de Elementos	2D	2446	6940	49654
	3D	16341	44143	1101577

<b>Modelo</b>		<b>Opción B</b>		
<b>Simulación número</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tamaño de Malla (mm)	Colada	7	5	1
	Caja	10	5	3
Número de Elementos	2D	2446	6880	48744
	3D	16347	43951	1069010

<b>Modelo</b>		<b>Opción C</b>		
<b>Simulación número</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Tamaño de Malla (mm)	Colada	7	5	1
	Caja	10	5	3
Número de Elementos	2D	2364	6742	46186
	3D	15388	42868	868829

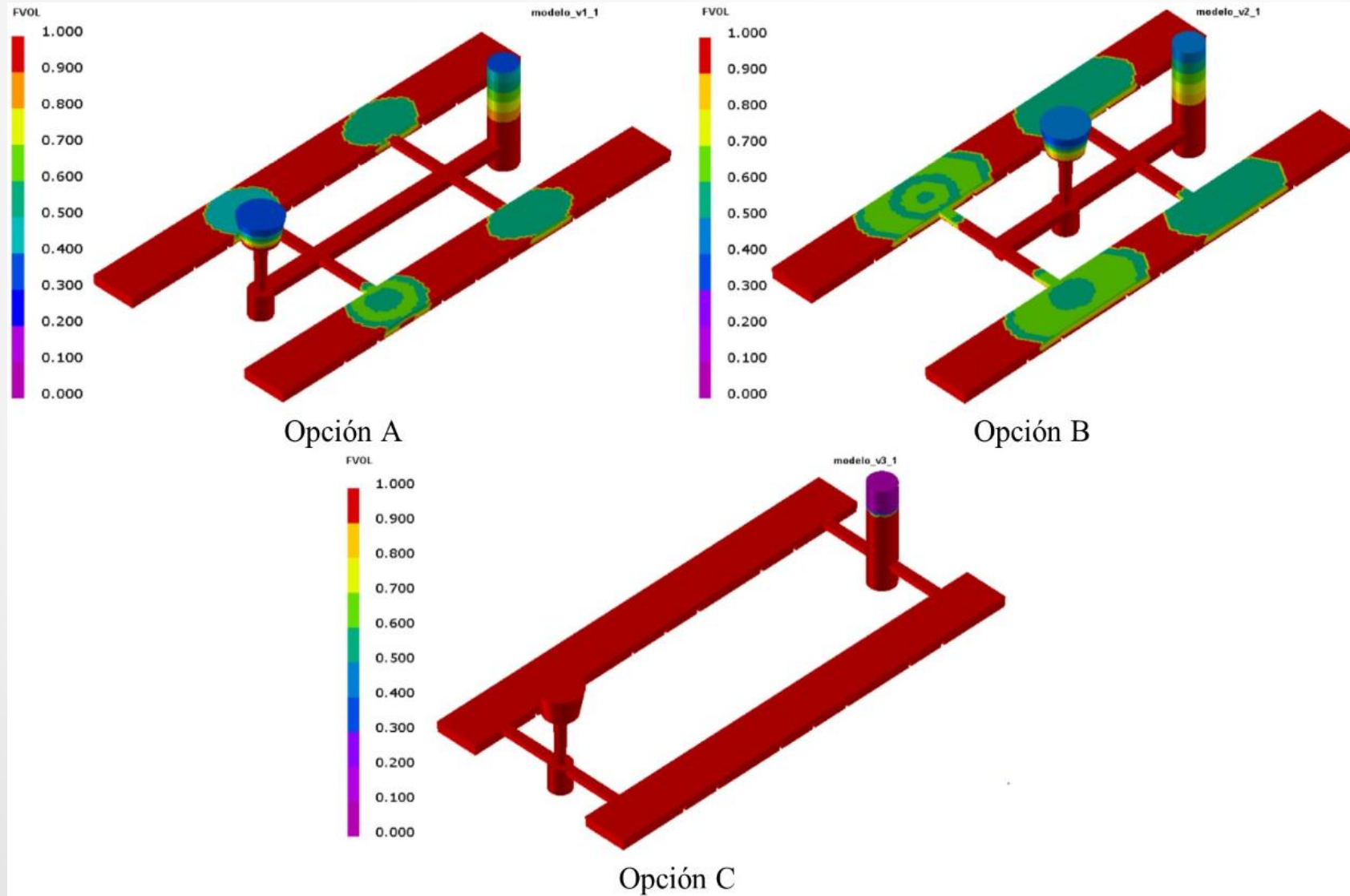
## Condiciones de frontera

<b>Condiciones de frontera</b>	
Gravedad ( $m/s^2$ )	9.81
Coefficiente de convección de aire ( $w/m^2.K$ )	10
Temperatura del aire ( $^{\circ}C$ )	20
Caudal másico de colada (kg/s)	0.0614
Presión atmosférica ( $N/m^2$ )	102700
Temperatura del molde ( $^{\circ}C$ )	300
Temperatura del colada ( $^{\circ}C$ )	700
Coefficiente de transferencia $h(w/m^2.K)$	1800

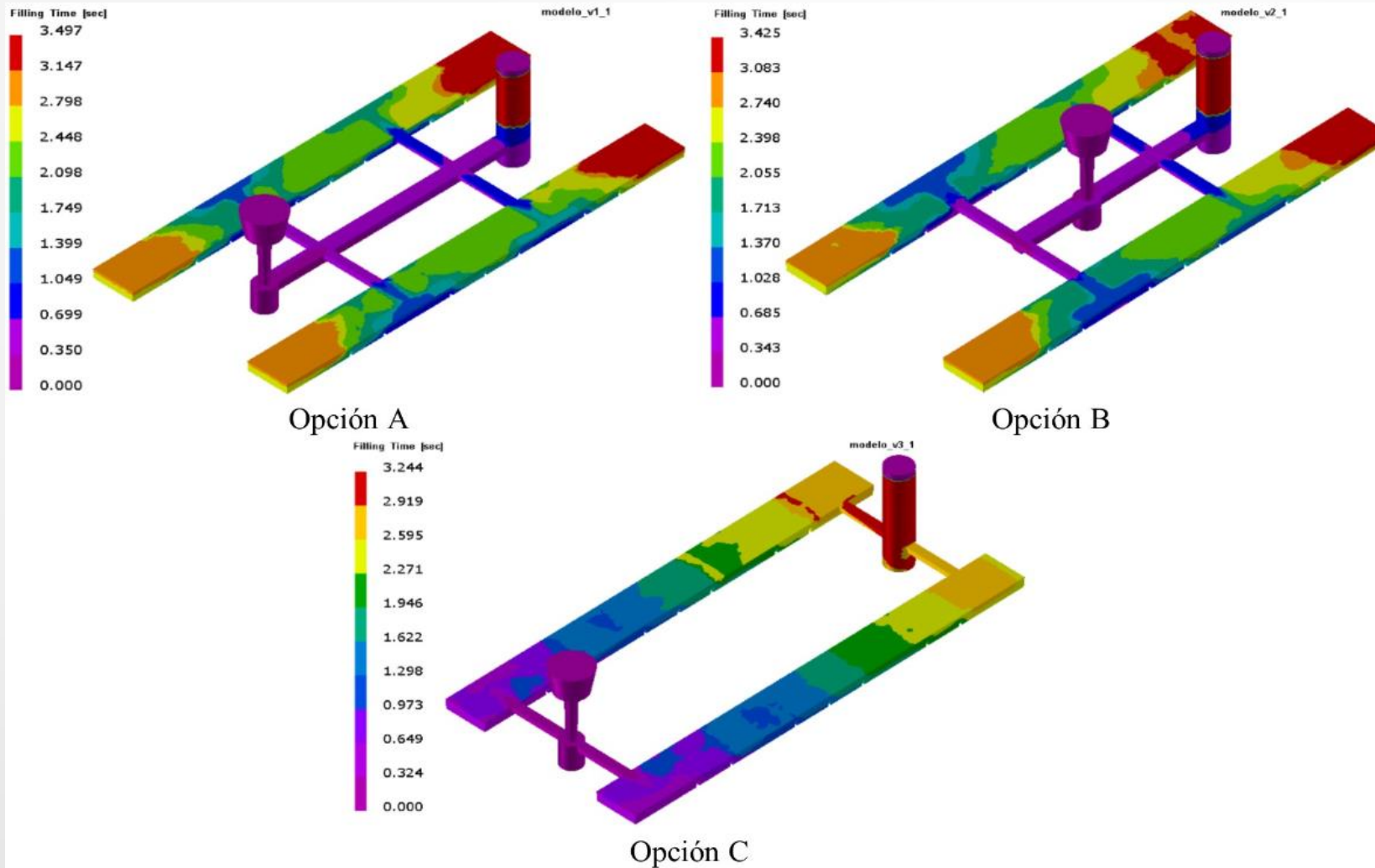
Temperatura (°C)	Coeficiente de transferencia de calor h (W/m <sup>2</sup> .K)	Módulo de enfriamiento (cm)															Promedio	
Molde=200 Colada=600	h=400	1.3490	1.3210	1.2929	1.2649	1.2368	1.2088	2.1808	1.1527	1.1247	1.0967	1.0686	1.0406	1.0125	0.9845	0.9565	0.9284	1.2012
	h=500	1.2644	1.2346	1.2047	1.1748	1.1450	1.1151	1.0852	1.0554	1.0255	0.9956	0.9658	0.9359	0.9060	0.8762	0.8463	0.8164	1.0404
	h=1000	1.0846	1.0569	1.0292	1.0015	0.9738	0.9461	0.9184	0.8908	0.8631	0.8354	0.8077	0.7800	0.7523	0.7246	0.6969	0.6693	0.8769
	h=1500	No se llena																
Molde=300 Colada=600	h=1000	0.2509	0.2447	0.2385	0.2323	0.2261	0.2198	0.2136	0.2074	0.2012	0.1950	0.1888	0.1825	0.1763	0.1701	0.1639	0.1577	0.2043
	h=1500	0.2358	0.2291	0.2224	0.2156	0.2089	0.2022	0.1954	0.1887	0.1820	0.1753	0.1685	0.1618	0.1551	0.1484	0.1416	0.1349	0.1853
	h=2000	0.2279	0.2209	0.2139	0.2069	0.1999	0.1929	0.1859	0.1790	0.1720	0.1650	0.1580	0.1510	0.1440	0.1370	0.1301	0.1231	0.1755
	h=2500	No se llena																
Molde=300 Colada=650	h=2000	0.2003	0.1940	0.1878	0.1816	0.1753	0.1691	0.1629	0.1566	0.1504	0.1442	0.1379	0.1317	0.1255	0.1192	0.1130	0.1067	0.1535
	h=2200	0.1989	0.1925	0.1861	0.1797	0.1733	0.1669	0.1605	0.1541	0.1477	0.1413	0.1349	0.1285	0.1221	0.1157	0.1093	0.1029	0.1509
	h=2400	0.1988	0.1922	0.1856	0.1790	0.1724	0.1658	0.1593	0.1527	0.1461	0.1395	0.1329	0.1263	0.1197	0.1131	0.1066	0.1000	0.1494
	h=2600	No se llena																
Molde=300 Colada=700	h=1600	0.1839	0.1780	0.1728	0.1673	0.1618	0.1564	0.1507	0.1452	0.1397	0.1343	0.1286	0.1231	0.1177	0.1122	0.1065	0.1010	0.1425
	h=1800	0.1824	0.1766	0.1711	0.1655	0.1599	0.1543	0.1486	0.1430	0.1374	0.1318	0.1261	0.1205	0.1149	0.1093	0.1036	0.0980	0.1402
	h=2000	0.1809	0.1752	0.1694	0.1637	0.1580	0.1522	0.1465	0.1408	0.1351	0.1293	0.1236	0.1179	0.1121	0.1064	0.1007	0.0950	0.1379
	h=2200	0.1794	0.1738	0.1677	0.1619	0.1561	0.1501	0.1444	0.1386	0.1328	0.1268	0.1211	0.1153	0.1093	0.1035	0.0978	0.0920	0.1357



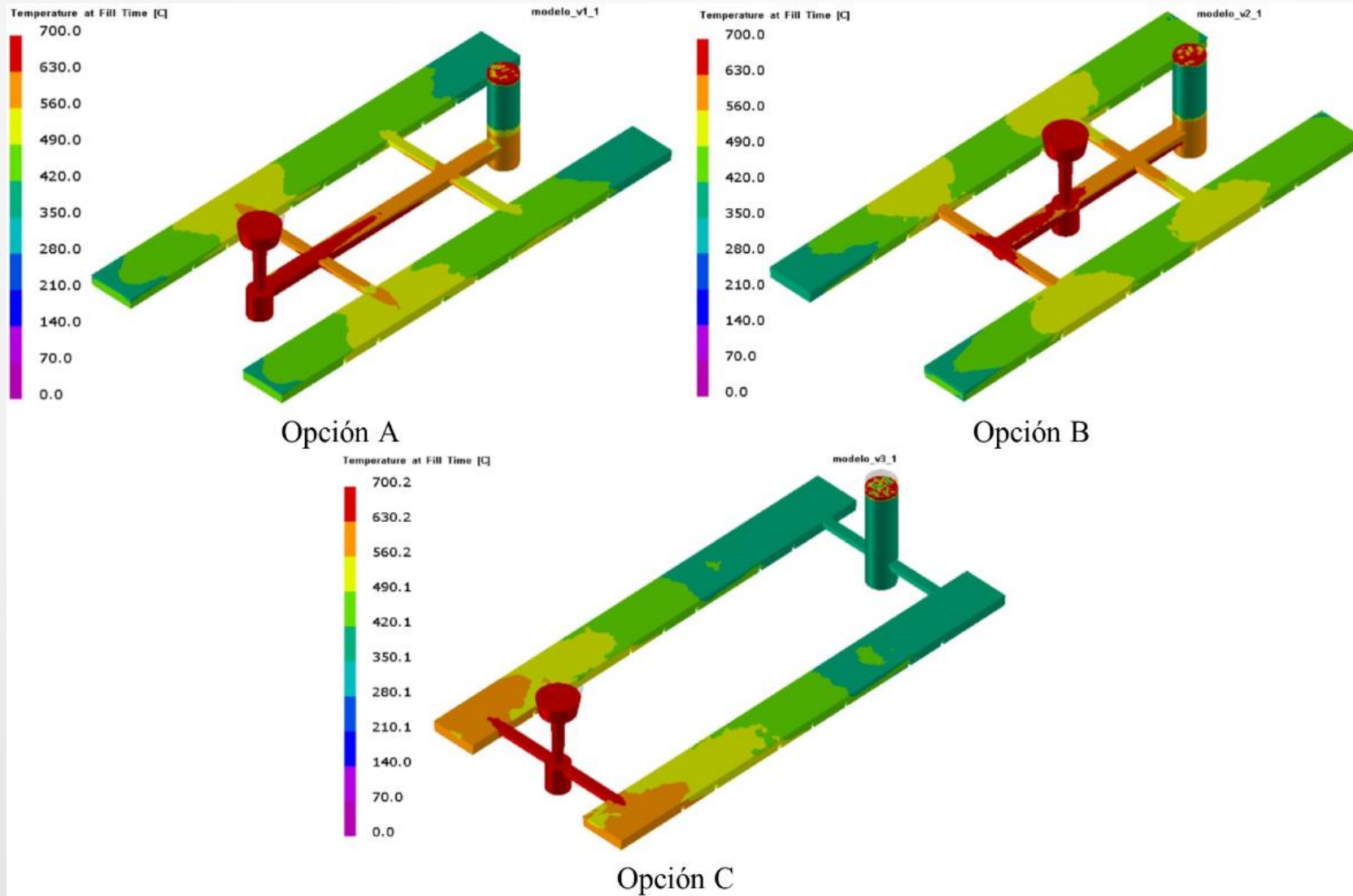
# Resultados factor de llenado



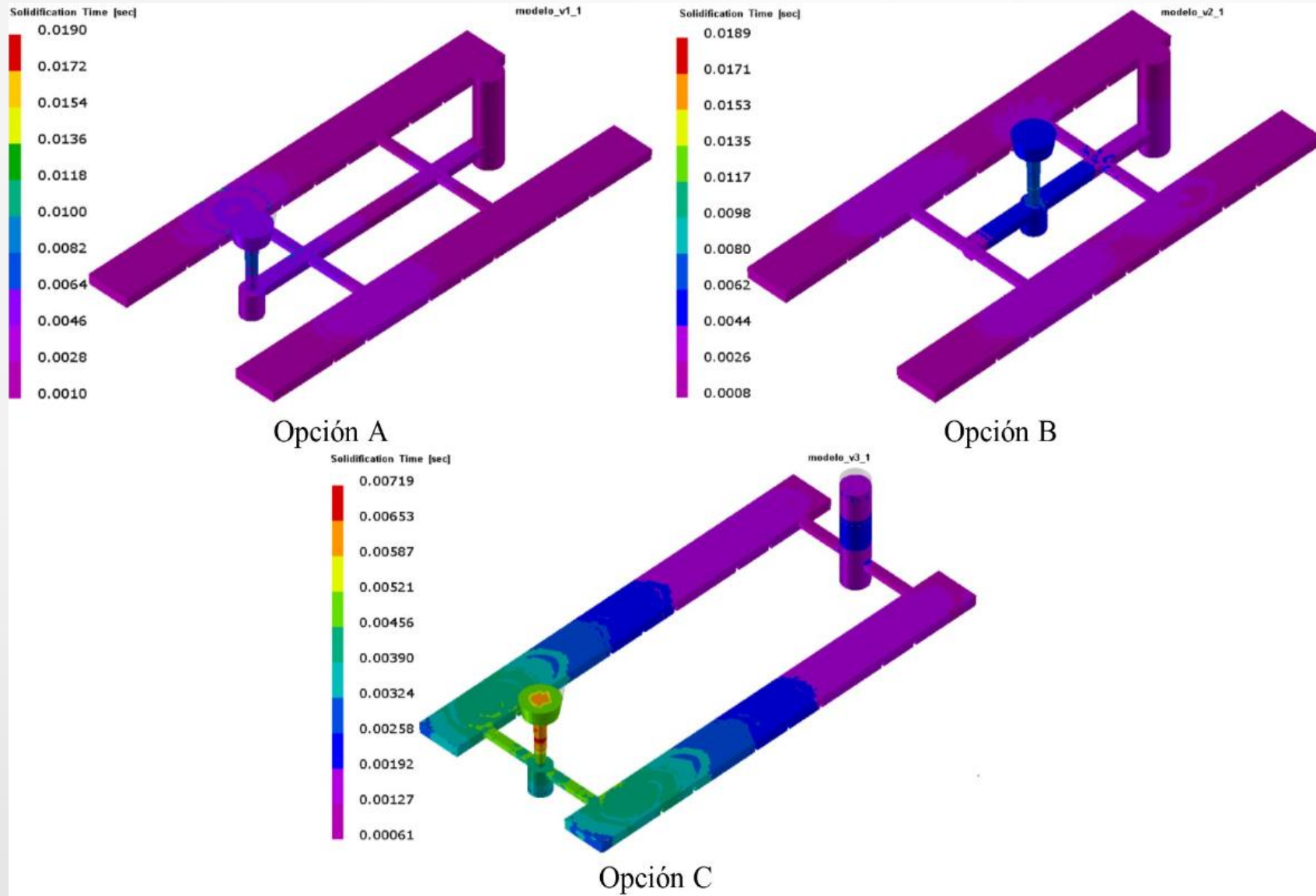
# Resultados tiempo de llenado



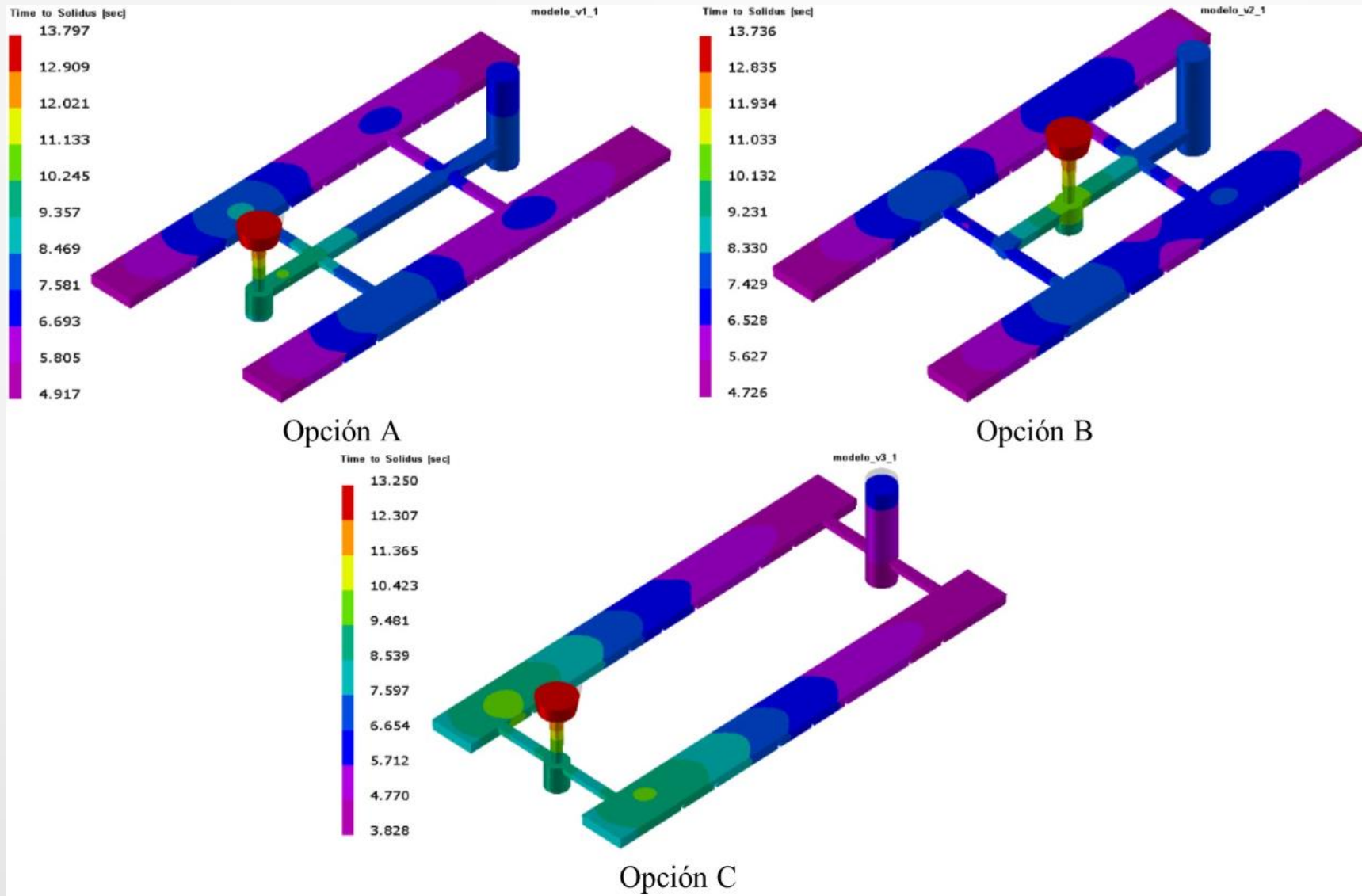
# Resultados temperatura al llenado



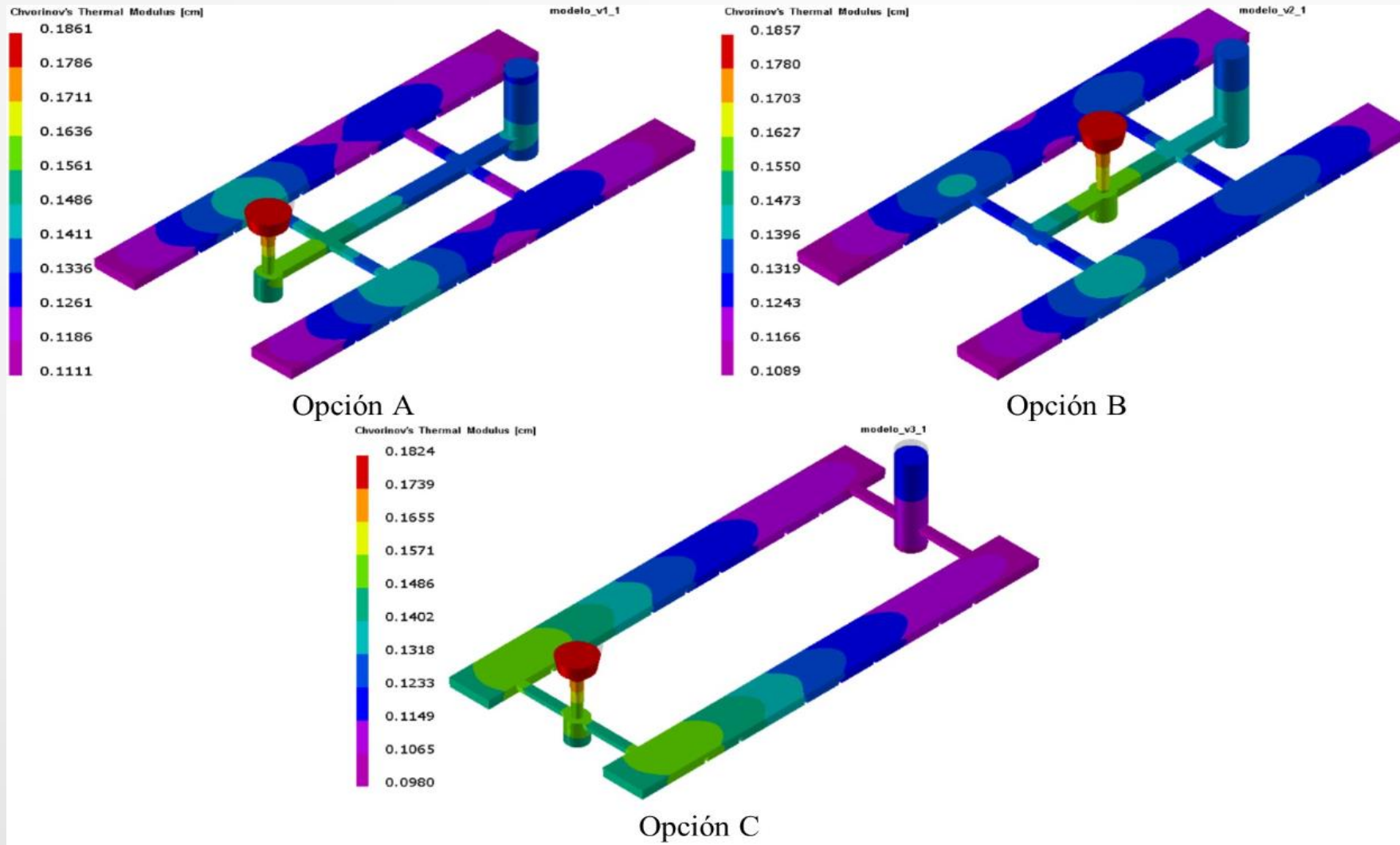
# Resultados tiempo de solidificación



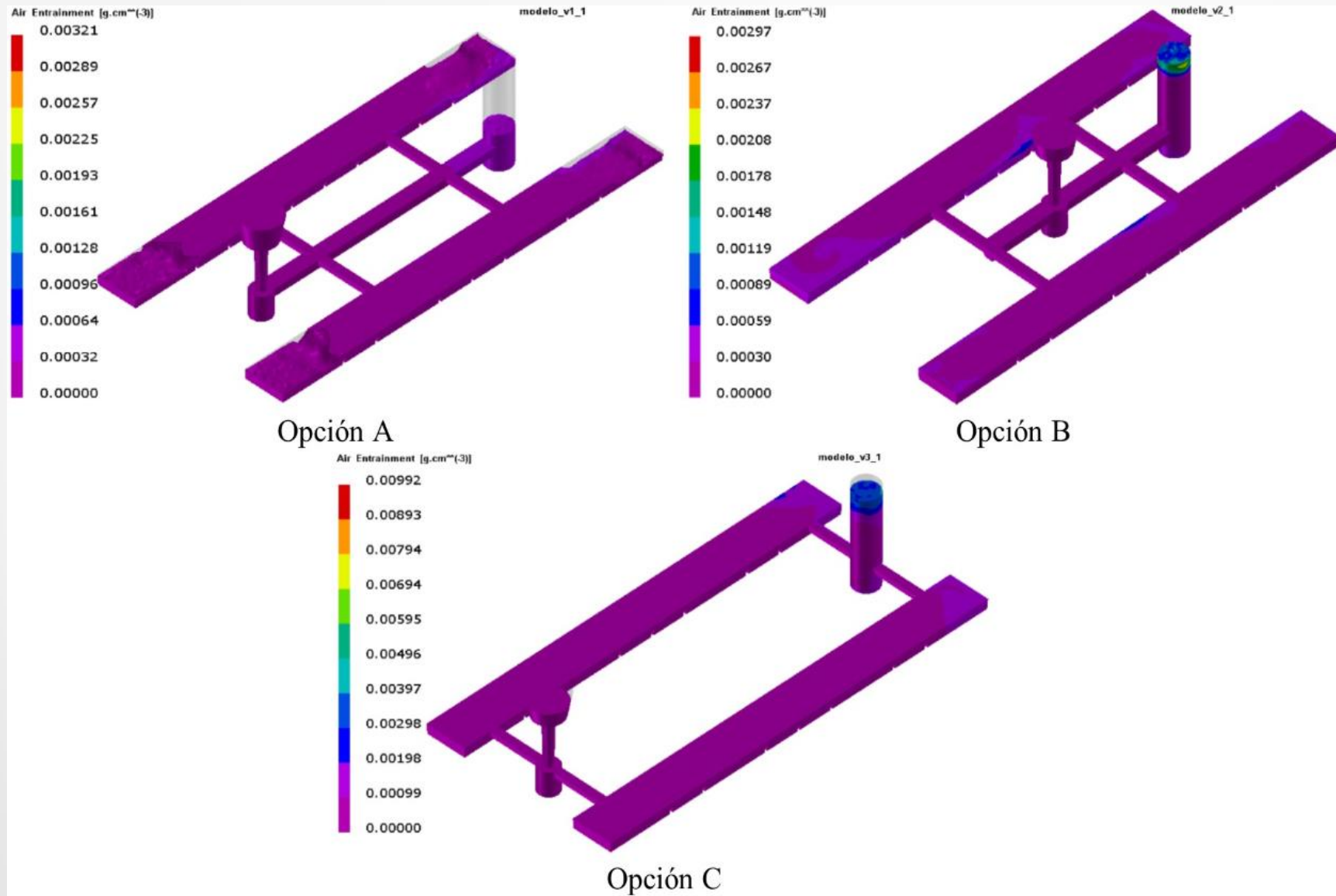
# Resultados tiempo para solido



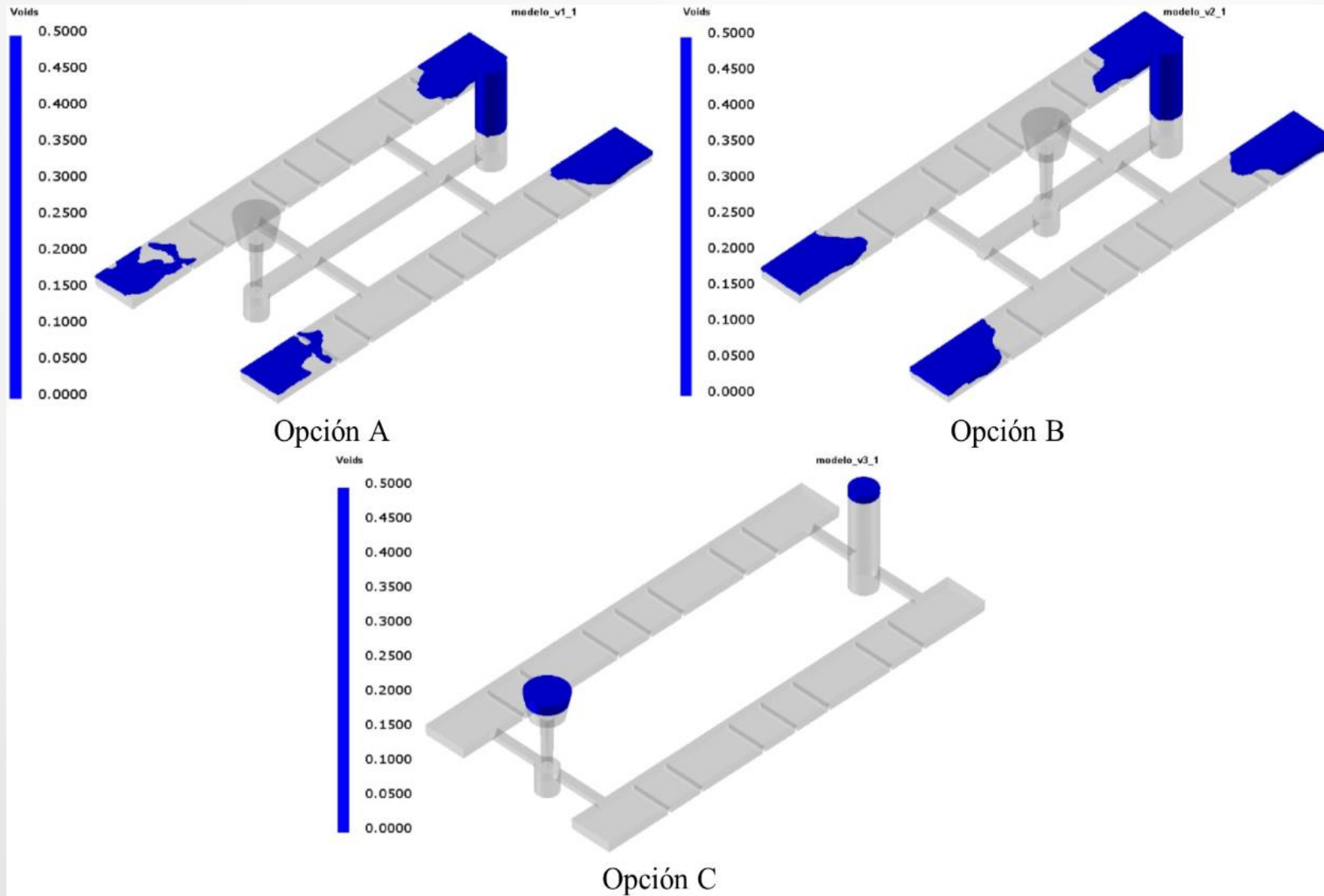
# Resultados módulo de enfriamiento



## Resultados entrada de aire

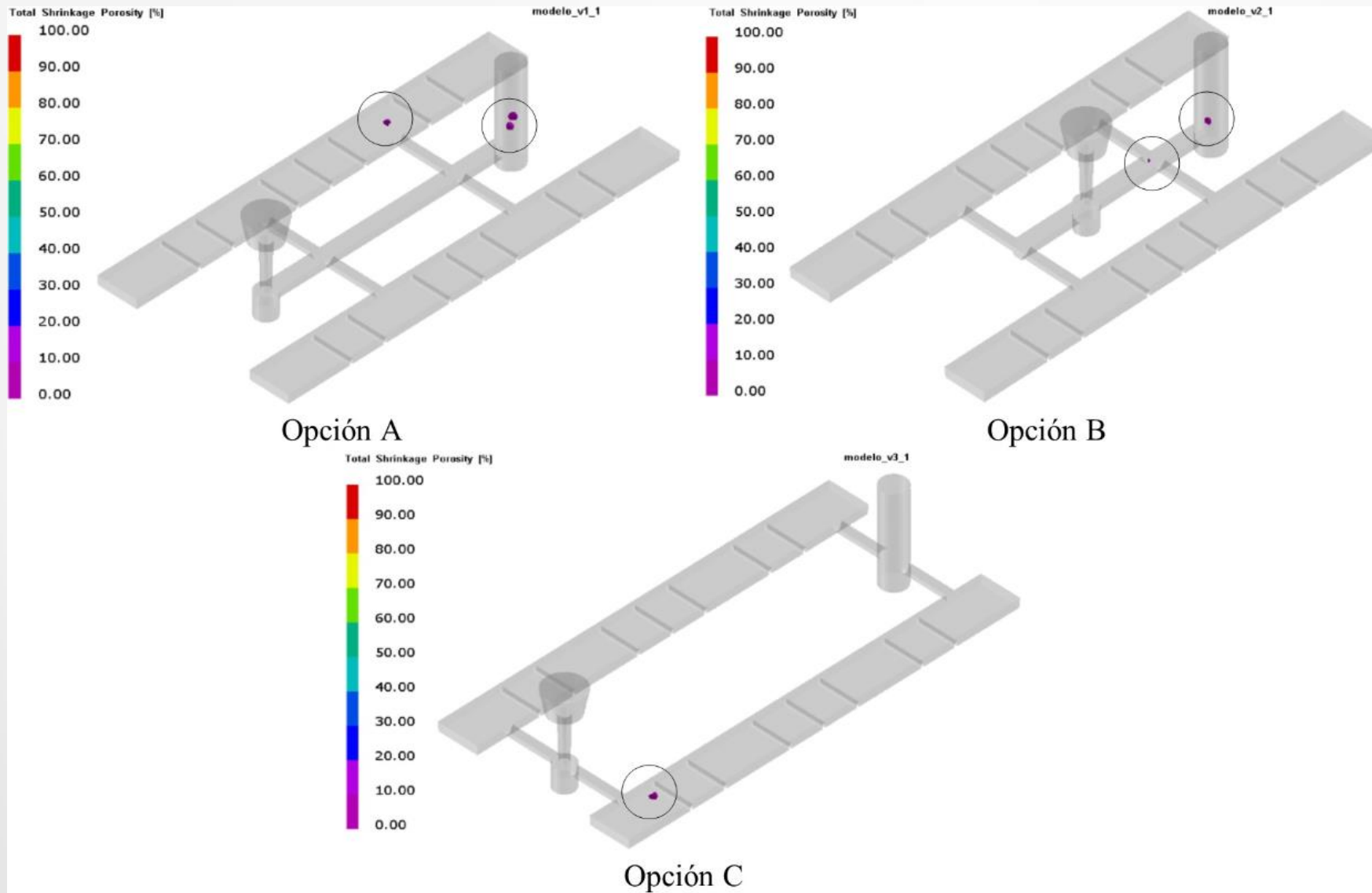


# Resultados de vacíos

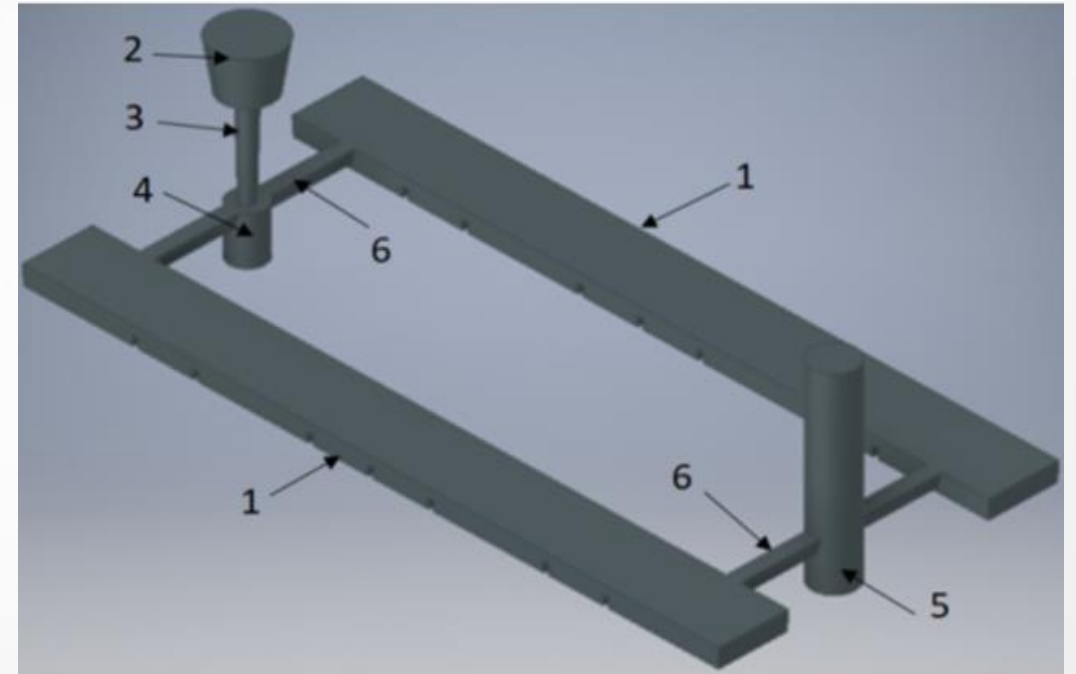
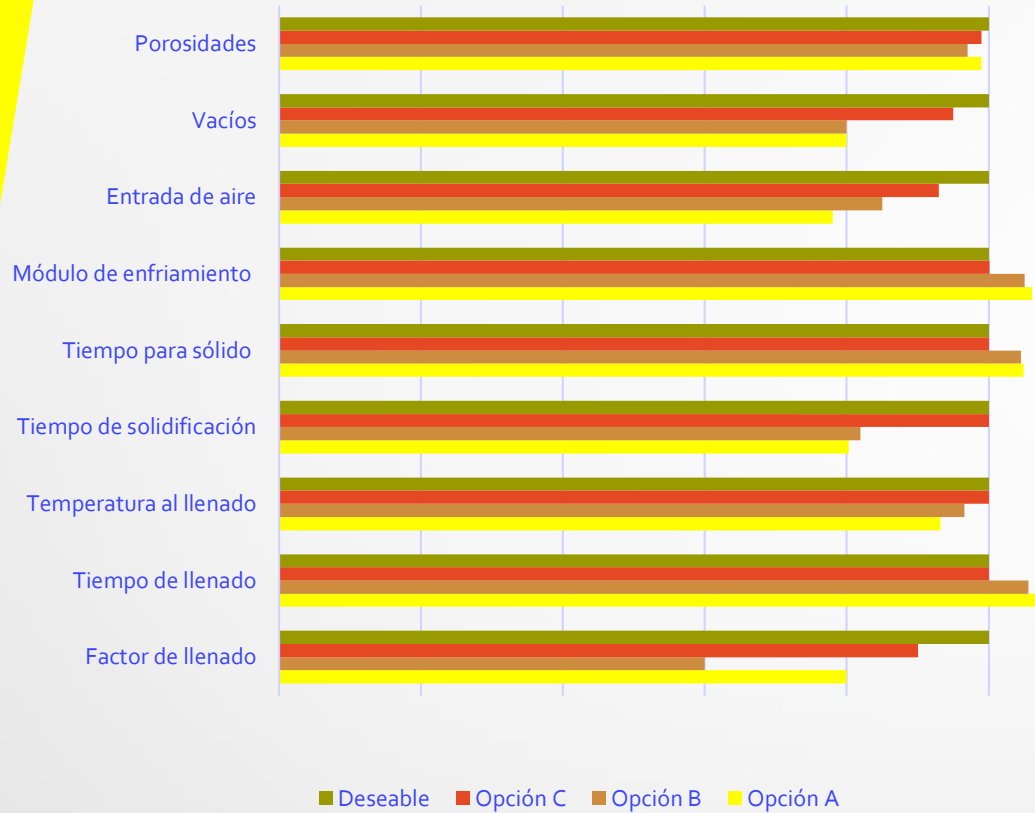




# Resultados de porosidades



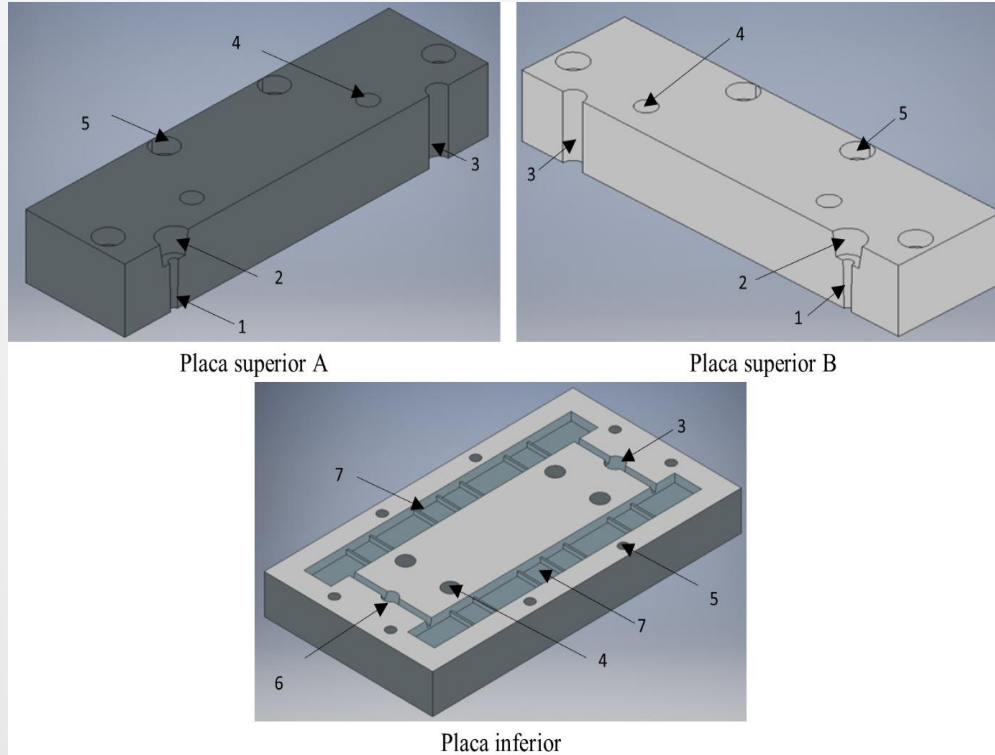
## Selección del modelo



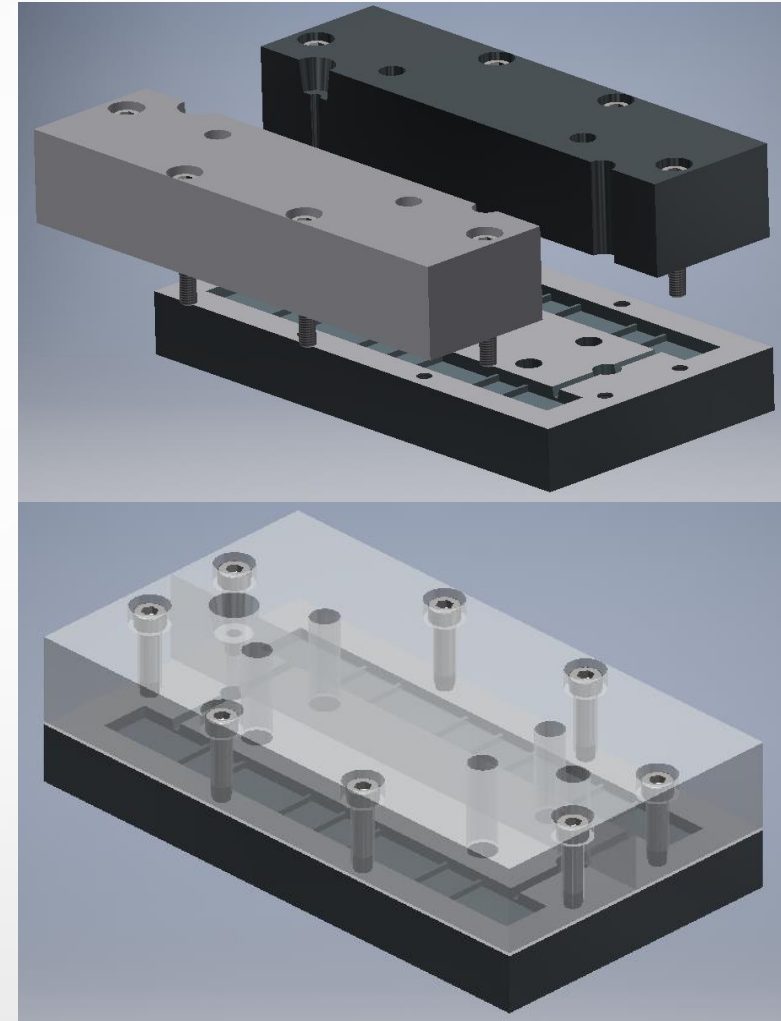
Opción C

1. Tira de pesas, 2. Taza de colada, 3. Bebedero, 4. Pozo de colada, 5. Mazarota, 6. Canales de colada.

# Diseño y fabricación del prototipo



1. Bebedero, 2. Taza de colada, 3. Mazarota, 4. Agujero para centradores, 5. Agujeros pernos de cierre, 6. Pozo de colada, 7. Cavidades de la pieza.



Ensamble del molde

# Diseño y fabricación del prototipo



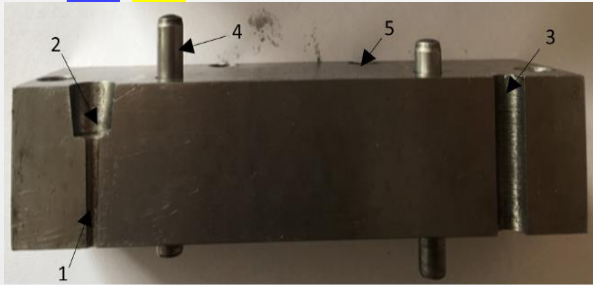
Placa Base								Grafico
Operación	Herramienta		Parámetros de corte			#		
Tipo	Tipo	Diámetro	Material	Vc (m/min)	fz (mm/diente)		Ap (mm)	
1	Contorneado exterior	Fresa de escuadrar	15 mm	HSS	150	0.4	20	
2	Planeado cara inferior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	150	0.4	1	
3	Planeado cara superior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	150	0.4	1	
4	Acabado cara superior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	120	0.2	1	
5	Contorneado cavidades	Fresa de escuadrar	5 mm	HSS	150	0.4	1	
6	Acabado cavidades	Fresa de escuadrar	1 mm	HSS	15	0.05	0.1	
7	Fresado cilíndrico	Fresa de escuadrar	3 mm	HSS	150	0.4	20	
8	Fresado canales	Fresa de escuadrar	1 mm	HSS	150	0.4	0.5	
9	Taladrado	Broca	8 mm	HSS	16	0.25	20	
10	Taladrado	Broca	5 mm	HSS	14	0.15	20	

Placa Superior								Grafico
Operación	Herramienta		Parámetros de corte			#		
Tipo	Tipo	Diámetro	Material	Vc (m/min)	fz (mm/diente)		Ap (mm)	
1	Contorneado exterior	Fresa de escuadrar	15 mm	HSS	150	0.4	20	
2	Planeado cara superior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	150	0.4	1	
3	Taladrado	Broca	5 mm	HSS	14	0.15	20	
4	Fresado cilíndrico	Fresa de escuadrar	3 mm	HSS	150	0.4	20	
5	Fresado cilíndrico	Fresa de escuadrar	3 mm	HSS	150	0.4	20	
6	Taladrado	Broca	8 mm	HSS	16	0.25	20	
7	Planeado cara inferior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	150	0.4	1	
8	Acabado cara inferior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	120	0.2	1	
9	Corte	Electro erosión	0.30 mm	Latón				
10	Corte bebedero	Electro erosión	0.30 mm	Latón				

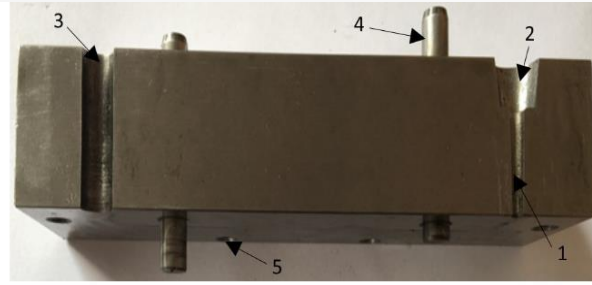
Placa Superior		
Operación	Tiempo mecanizado	
#	Tipo	t(min)
1	Contorneado exterior	0.5
2	Planeado cara superior	0.52
3	Taladrado	1.32
4	Fresado cilíndrico	1.02
5	Fresado cilíndrico	0.57
6	Taladrado	1.78
7	Planeado cara inferior	0.52
8	Acabado cara inferior	0.92
9	Corte	8
10	Corte bebedero	12
Tiempo total (min)		27.15

Placa Base		
Operación	Tiempo mecanizado	
#	Tipo	t(min)
1	Contorneado exterior	0.5
2	Planeado cara inferior	0.52
3	Planeado cara superior	0.52
4	Acabado cara superior	0.92
5	Contorneado cavidades	23.97
6	Acabado cavidades	165.2
7	Fresado cilíndrico	3.38
8	Fresado canales	3.23
9	Taladrado	1.23
10	Taladrado	1.13
Tiempo total (min)		200.6

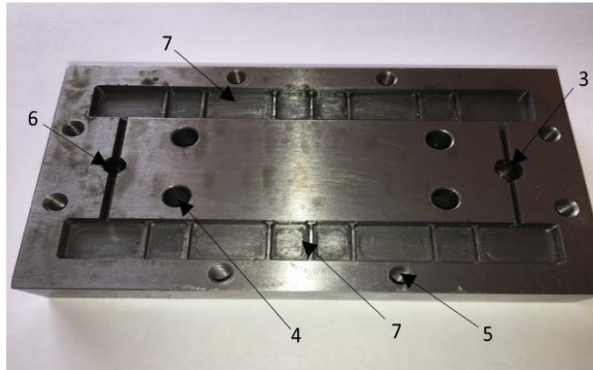
# Diseño y fabricación del prototipo



Placa superior A

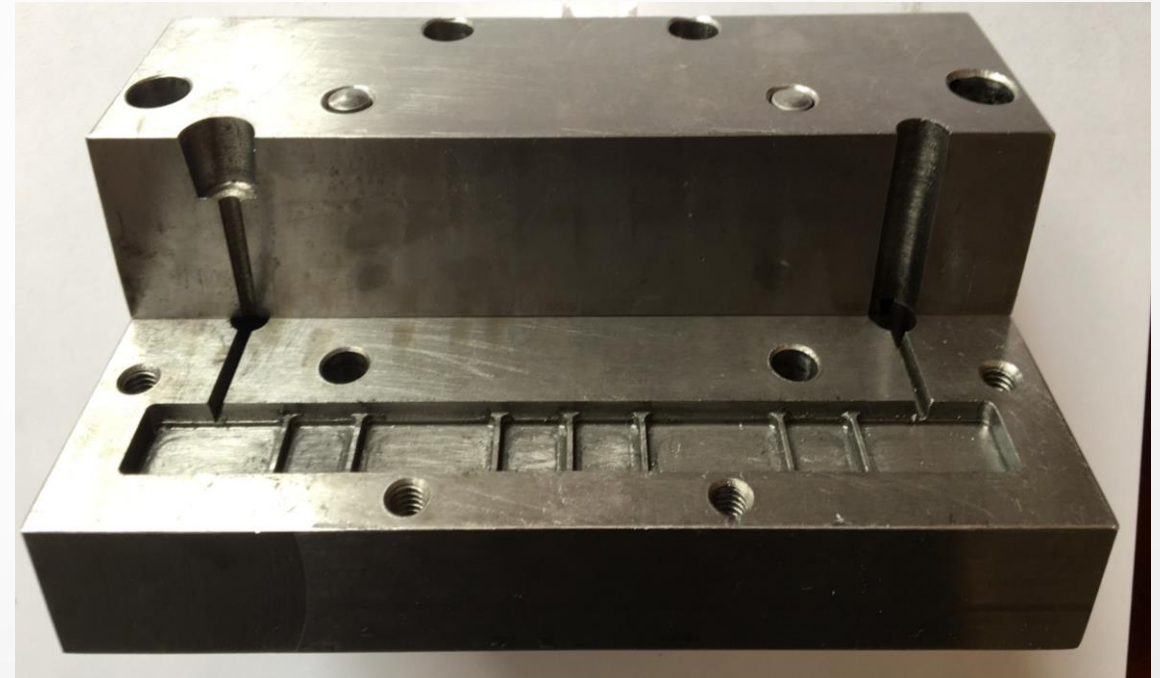


Placa superior B



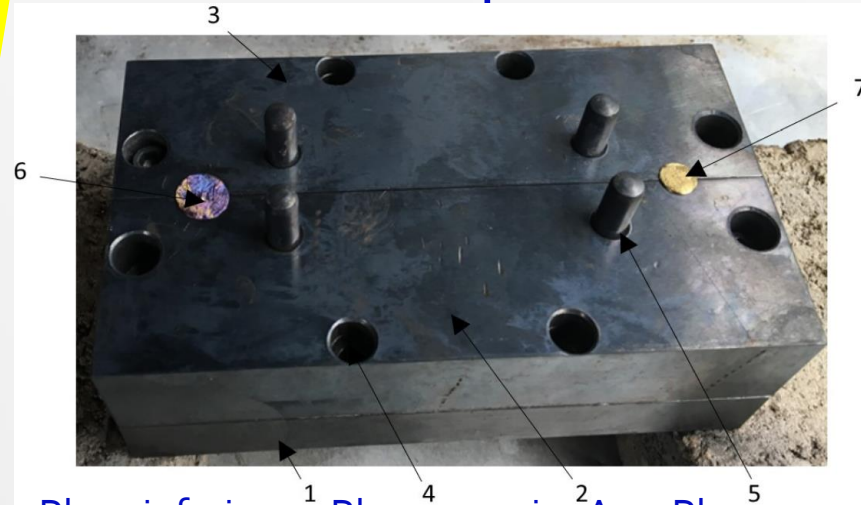
Placa inferior

1. Bebedero, 2. Taza de colada, 3. Mazarota, 4. Agujero centradores, 5. Agujeros pernos de cierre, 6. Pozo de colada, 7. Cavidades de la pieza.



Ensamble del molde mecanizado

# Protocolo de pruebas



1. Placa inferior, 2. Placa superior A, 3. Placa superior B, 4. Pernos de cierre, 5. Centradores, 6. Taza de colada, 7. Mazarota.

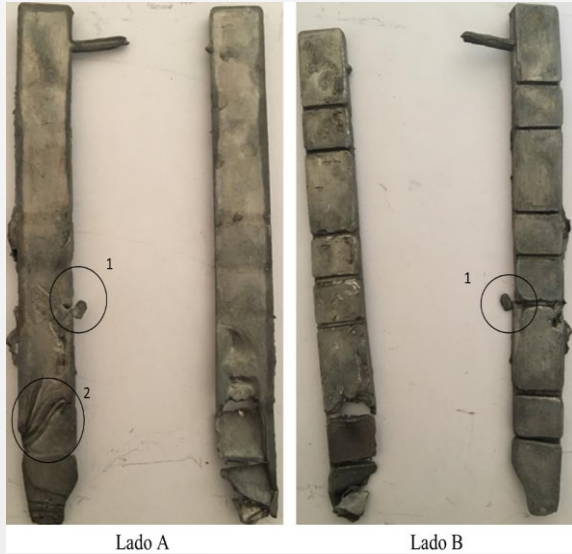


1. Taza de colada, 2. Bebedero, 3. Canales de alimentacion, 4. Pieza fundida, 5. Mazarota.

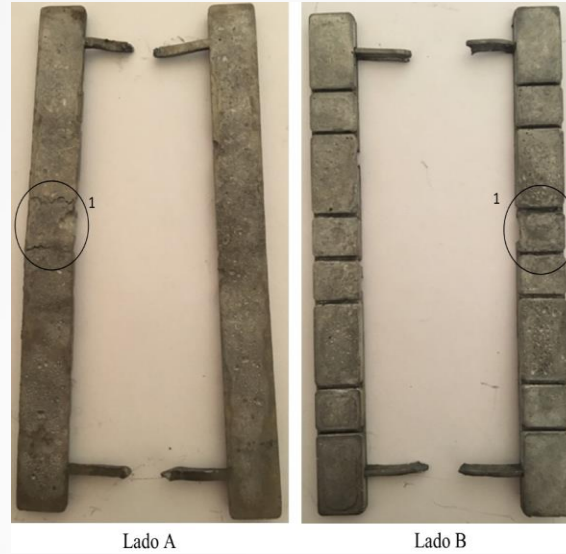
## Resultados experimentales

Fundición	Temperatura (°C)		Tiempo de llenado (s)	Llenado	Acabado superficial
	Molde	Colada			
1	280.2	683.1		Incompleto	Malo
2	294.2	685.2		Incompleto	Malo
3	293.8	698.2	3.34	Completo	Regular
4	295.2	699.4	3.18	Completo	Regular
5	296.1	704	3.24	Completo	Bueno
6	296.4	709.9	3.25	Completo	Bueno
7	296.8	701.2	3.33	Completo	Bueno
8	297.5	705.2	3.23	Completo	Bueno
9	297.7	700.9	3.23	Completo	Bueno
10	298.8	701.8	3.22	Completo	Bueno
11	299.2	703.2	3.25	Completo	Bueno
12	300.1	708.3	3.23	Completo	Bueno
13	300.4	700.3	3.27	Completo	Bueno
14	301.1	712.4	3.21	Completo	Bueno
15	301.2	714.3	3.15	Completo	Bueno
16	301.2	706.2	3.22	Completo	Bueno
17	303.3	704.8	3.26	Completo	Bueno
18	303.4	712.2	3.17	Completo	Bueno
19	305.2	706.7	3.25	Completo	Bueno
20	306.2	704.3	3.20	Completo	Bueno
21	307.0	711.3	3.19	Completo	Bueno
22	309.4	710.4	3.19	Completo	Bueno
23	315.3	701.4	3.21	Completo	Bueno
24	330.1	715.9	3.14	Completo	Bueno
25	336.1	711.2	3.16	Completo	Bueno

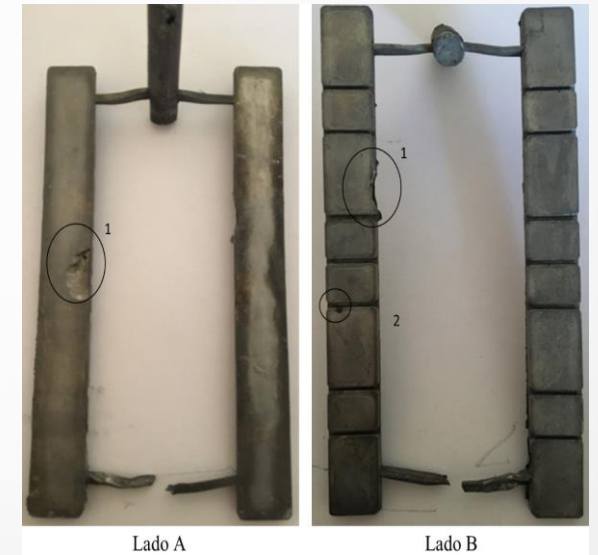
# Resultados visuales



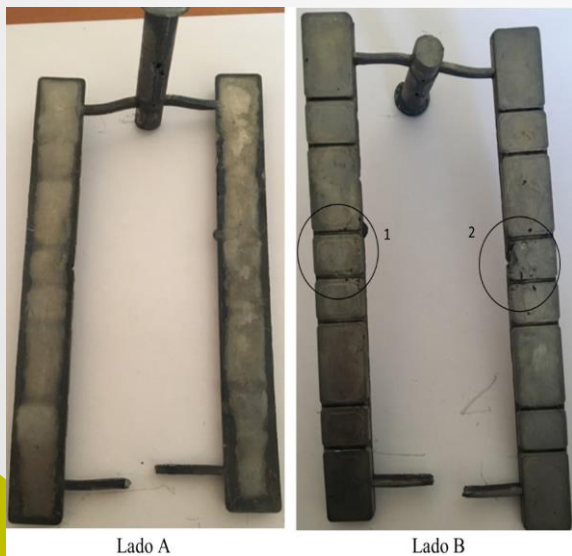
Fundición 1



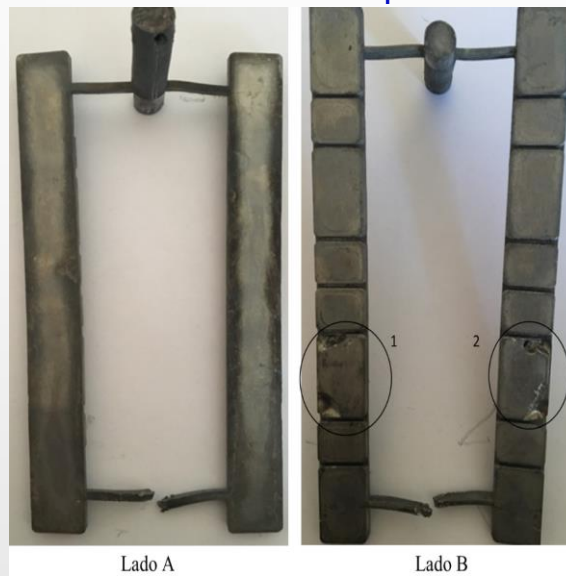
Fundición 4



Fundición 22

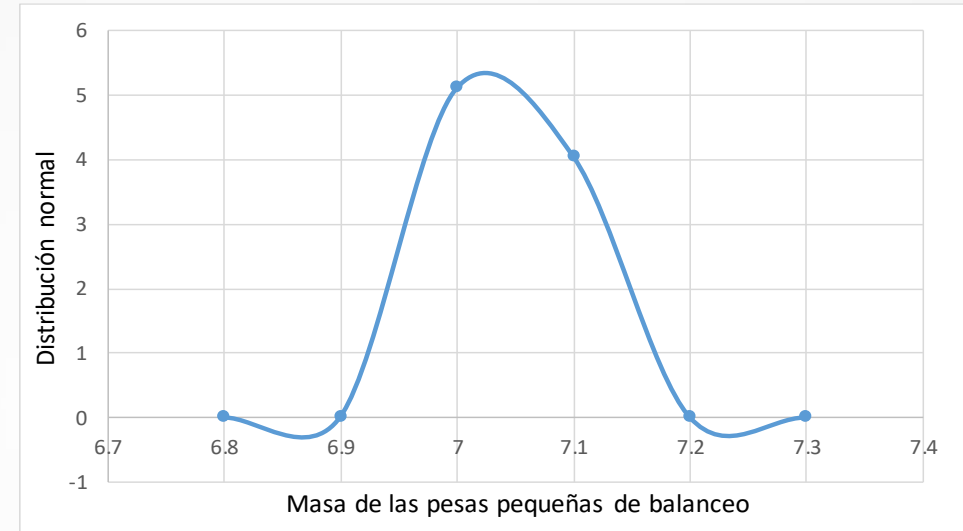
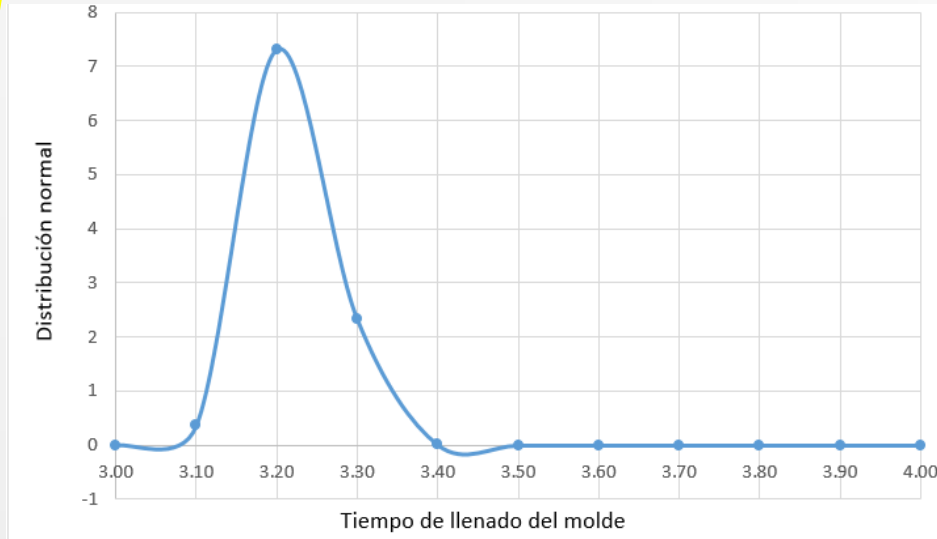


Fundición 10

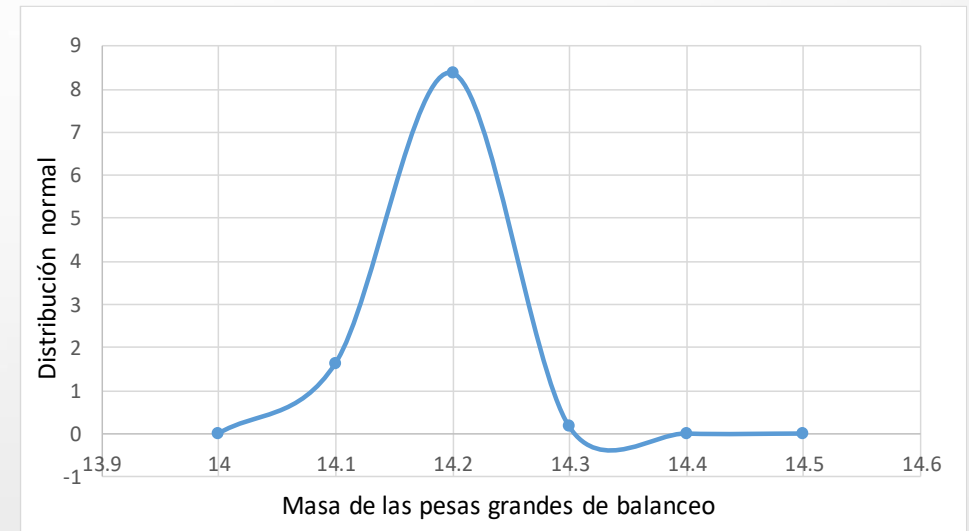


Fundición 16

# Resultados



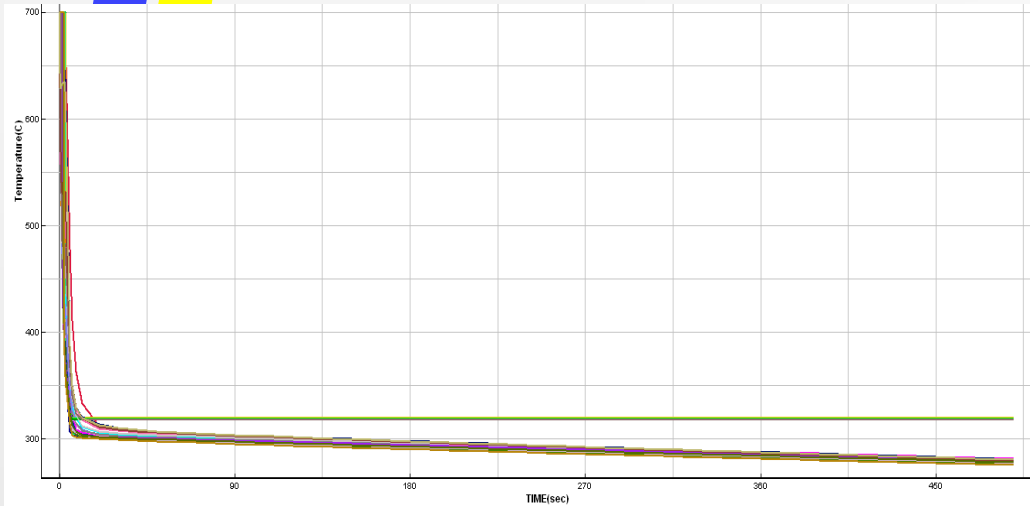
	<b>Analítico</b>	<b>CFD</b>	<b>Experimental</b>
T llenado (s)	3.571	3.244	3.223
Error porcentual		9.15	9.74



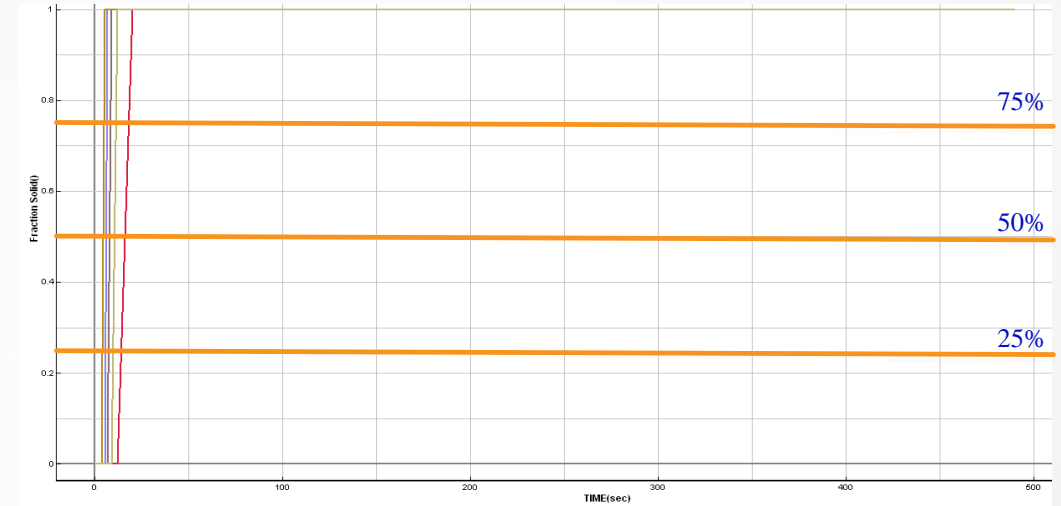
<b>Pesas</b>	<b>Peso requerido (gr)</b>	<b>Peso promedio experimental (gr)</b>	<b>Error %</b>
Pequeñas	7.08	7.04	0.56
Grandes	14.18	14.17	0.07



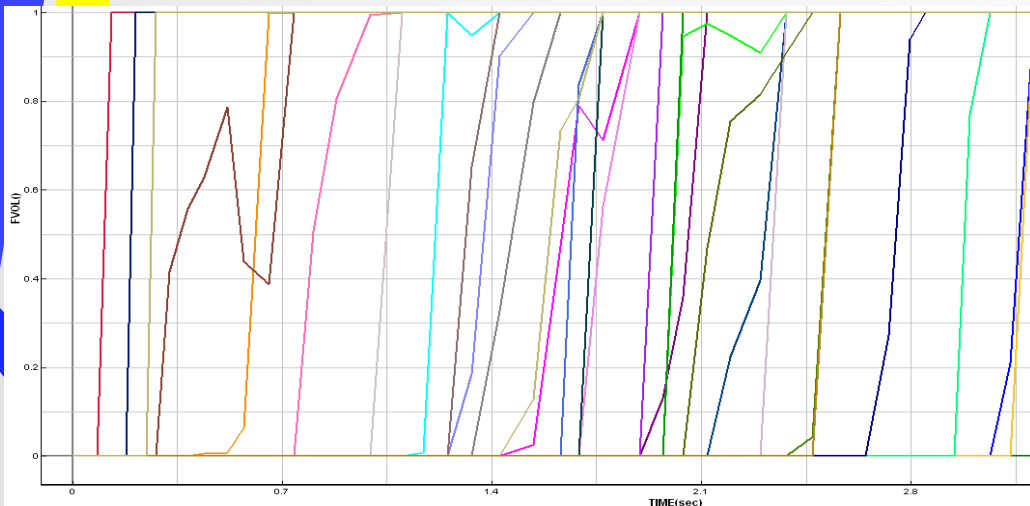
# Convergencia de resultados



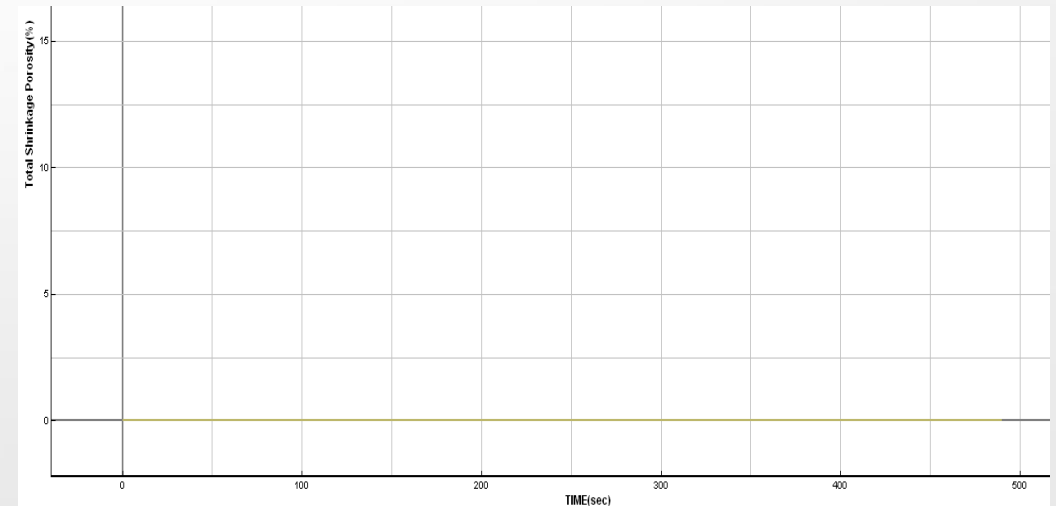
Temperatura vs tiempo



Temperatura vs tiempo



Factor de llenado vs tiempo



Porcentaje de porosidades vs tiempo

# Conclusiones

- Mediante las pruebas de composición química efectuadas en los especímenes tomados de 15 negocios locales que se dedican a la actividad de enllantaje y balanceo de ruedas, se logró determinar que las pesas de balanceo son efectivamente fabricadas en un 99% a base de plomo.
- Según investigaciones de campo, especificaciones de los fabricantes y sugerencias recolectadas de autores que han estudiado moldes para fundición, se definió que el material más adecuado para el molde es el acero AISI P20 por sus propiedades para trabajos en caliente, además de disponibilidad en el país.
- Los resultados obtenidos de simulaciones realizadas en un software especializado en fundición, sirvieron para predecir el comportamiento de la colada en el interior del molde, y poder determinar la ubicación y dimensión más adecuada de los sistemas de colada.
- Se logró determinar el modelo adecuado mediante la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones de las tres opciones de modelo, de las cuales se pudo elegir el más adecuado, que es la opción C (ver figura 26), quedando definido la configuración de todos los sistemas de colada.
- Una vez determinado el modelo, se diseñó y fabricó un molde prototipo, en cual se utilizó para realizar pruebas de fundición que ayudaron a corroborar los resultados obtenidos mediante el software.
- Los resultados de las pruebas revelaron que el diseño del molde es adecuado, los datos experimentales del tiempo de llenado se cotejaron con el calculado analíticamente y mediante el software, teniendo como error un porcentaje menor al 10%.

Por último, se obtuvo la masa adecuada para las pesas de balanceo de  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  onza o su equivalencia aproximada de 7 y 14 gramos, dando como resultado un error menor al 1%.

# Recomendaciones

- Uno de los principales defectos obtenidos en la fabricación de las pesas de balanceo, fue el arrastramiento de escorias e impurezas, que se encuentran en la colada debido a que el material utilizado para la fundición era de reciclaje, a pesar de haberse realizado una limpieza previa; se recomienda analizar la posibilidad de utilizar algún agente químico que ayude con esta tarea.
- El factor más influyente de todo el proceso de vertido de la colada, fue el caudal o flujo de entrada en el pozo de colada, ya que este depende de la persona que está realizando este proceso, además de ser un factor difícil controlar por lo que se recomienda tratar verter el material siempre a una misma distancia tomada desde la cara superior del molde y controlando el tiempo de llenado.
- Se recomienda difundir los resultados de esta investigación a fin de impulsar la producción de pesas de balanceo de ruedas a nivel nacional, ya que a la fecha en que se realizó esta investigación es inexistente y las pesas que se usan en el país son importadas.
- Además, se alienta a impulsar la realización de estudios similares con materiales alternativos a fin de reemplazar al plomo como material de fabricación, debido al alto impacto ambiental que puede generar, no solo en el proceso de fundición, sino al finalizar su ciclo de vida.
- Como recomendación final debería realizarse un estudio para fabricar las mencionadas pesas de balanceo, utilizando otros procesos de fundición como, por ejemplo, fundición por inyección a presión, para elevar la producción y de una forma automática para prevenir posibles riesgos a los operadores debido a la toxicidad del plomo.