



# Complementos de Fabricação Mecânica

## PMR 3301

Profa. Izabel Machado

[machadoi@usp.br](mailto:machadoi@usp.br)

# Peças obtidas por cera perdida ou investment casting



<https://blog.franciscajoias.com.br/descubra-como-funciona-a-producao-com-cera-perdida-da-francisca-joias/>

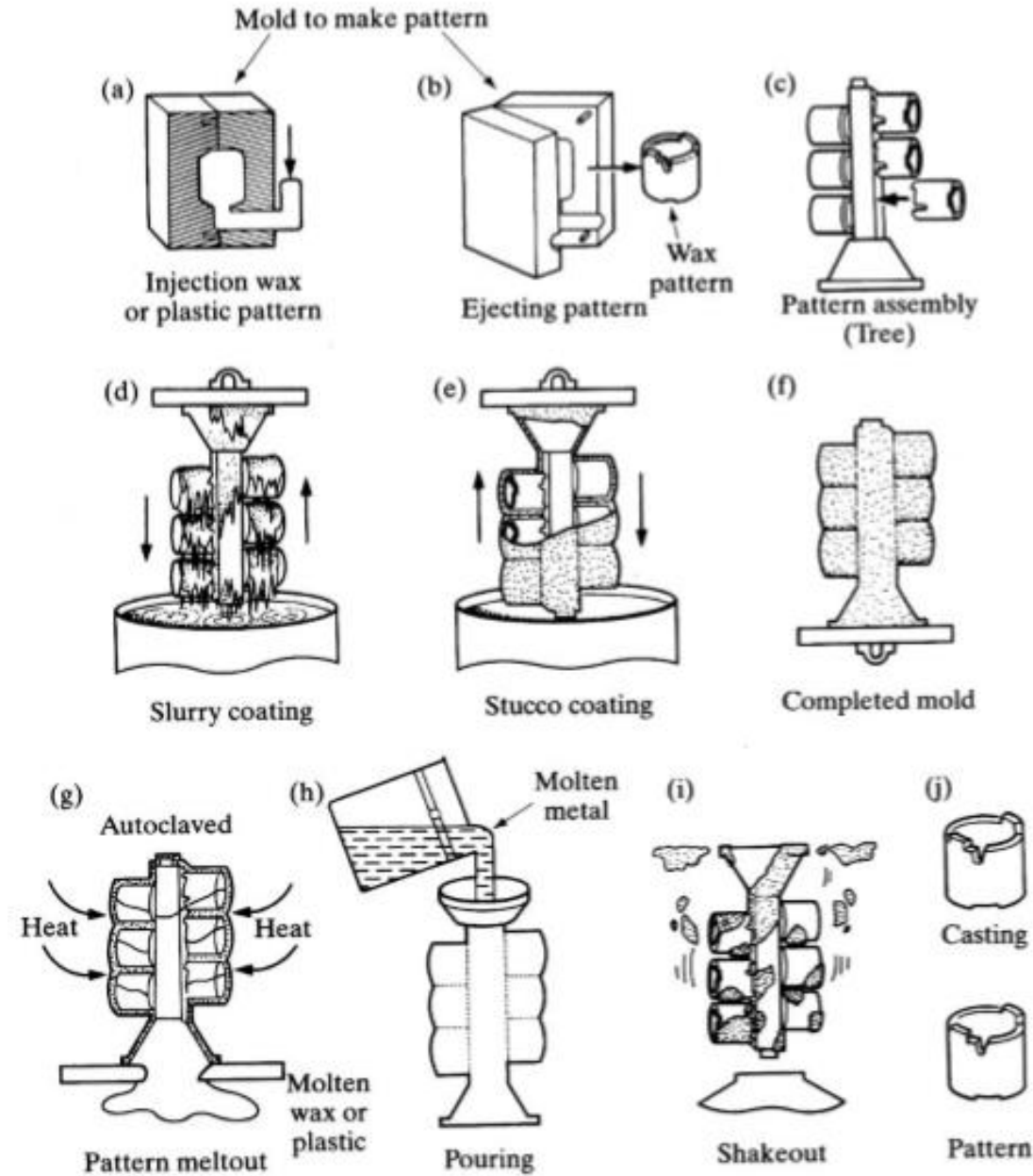
<https://www.environmental-expert.com/applications/lost-wax-investment-casting-foundry-for-stainless-steel-parts-11107>



# Fundição de Precisão

## Microfundição

### Fundição em cera perdida

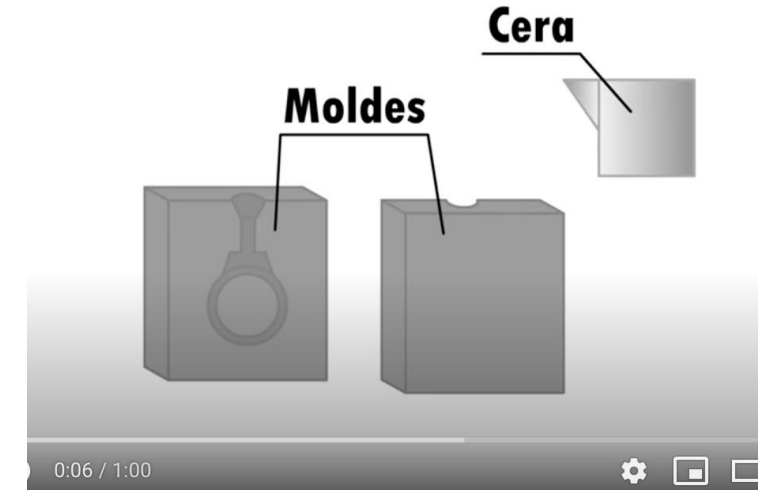


Kalpakajian



## Microfundição

**Fundição: Cera perdida**

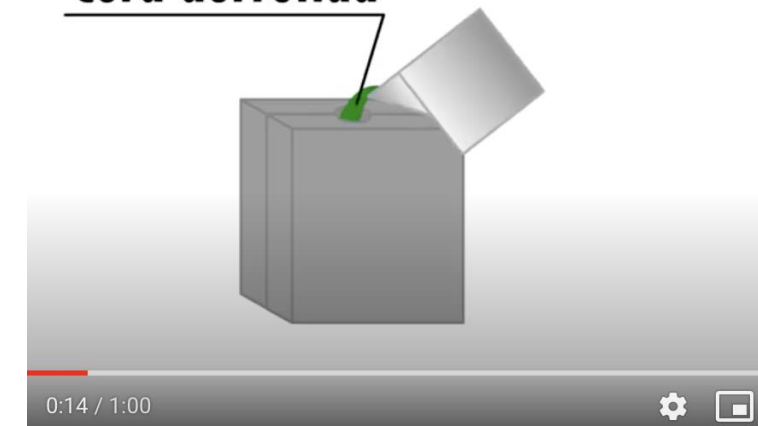


**A explicação em  
detalhes do processo  
a seguir encontra-se  
neste livro**



**Fundição: Cera perdida**

**Cera derretida**



<https://www.youtube.com/watch?v=DF-LDcv4SFs>

# Fundição de Precisão

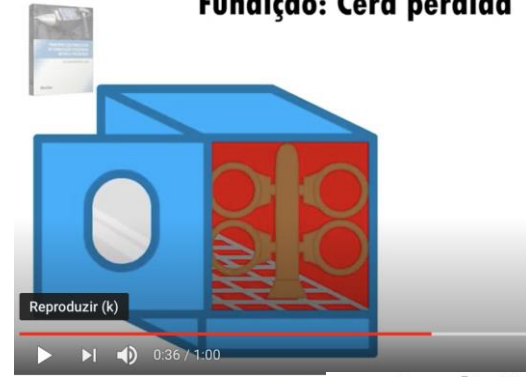
## Microfundição



Fundição: Cera perdida

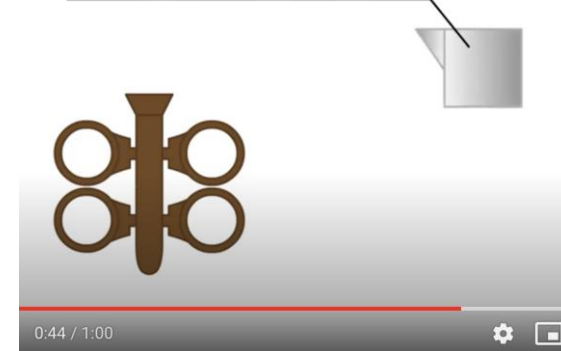


Fundição: Cera perdida



Fundição: Cera perdida

Recipiente com metal fundido



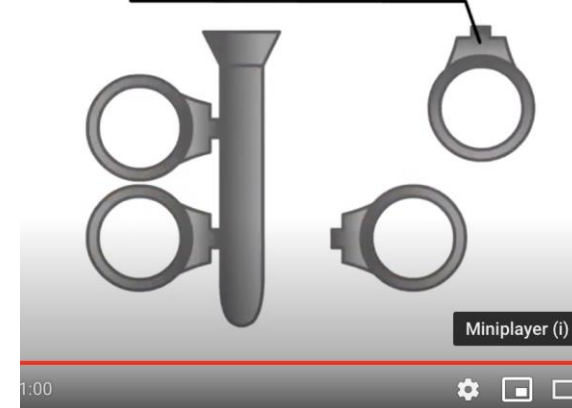
Fundição: Cera perdida



Fundição: Cera perdida



Peça pronta

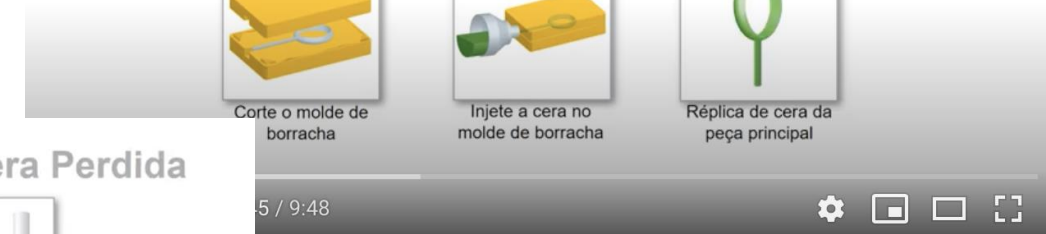


# Fundição de Precisão

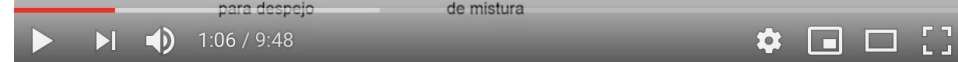
## Microfundição



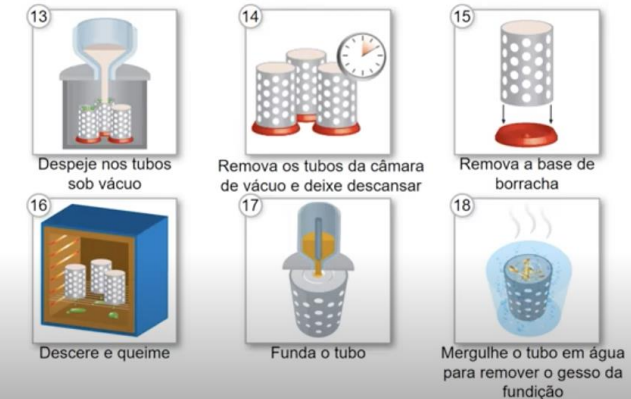
### Processo Básico de Fundição por Cera Perdida



### Processo Básico de Fundição por Cera Perdida



### Processo Básico de Fundição por Cera Perdida



### PASSO A PASSO: Processo de Fundição Por Cera Perdida



#### FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

A fundição no bloco de gesso é inicialmente usada por fabricantes de joias pela forma líquida de metais preciosos como ouro, prata e latão. É também usada para algumas partes com alta tolerância na indústria automotiva e aeroespacial, entretanto a maior parte dessas peças são fundidas pelo processo Shell.



<https://www.youtube.com/watch?v=F-G0wjwavR8>

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Cera\\_perdida](https://pt.wikipedia.org/wiki/Cera_perdida)



# Fundição de Precisão

## Microfundição

“**Investment casting** is an industrial **process** based on lost-wax **casting**, one of the oldest known metal-forming techniques. The term "lost-wax **casting**" can also refer to modern **investment casting processes**. **Investment casting** derives its name from the pattern being invested (surrounded) with a refractory material “

<https://www.youtube.com/watch?v=npHQPXGGkgI>

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Cera\\_perdida](https://pt.wikipedia.org/wiki/Cera_perdida)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Investment\\_casting](https://en.wikipedia.org/wiki/Investment_casting)

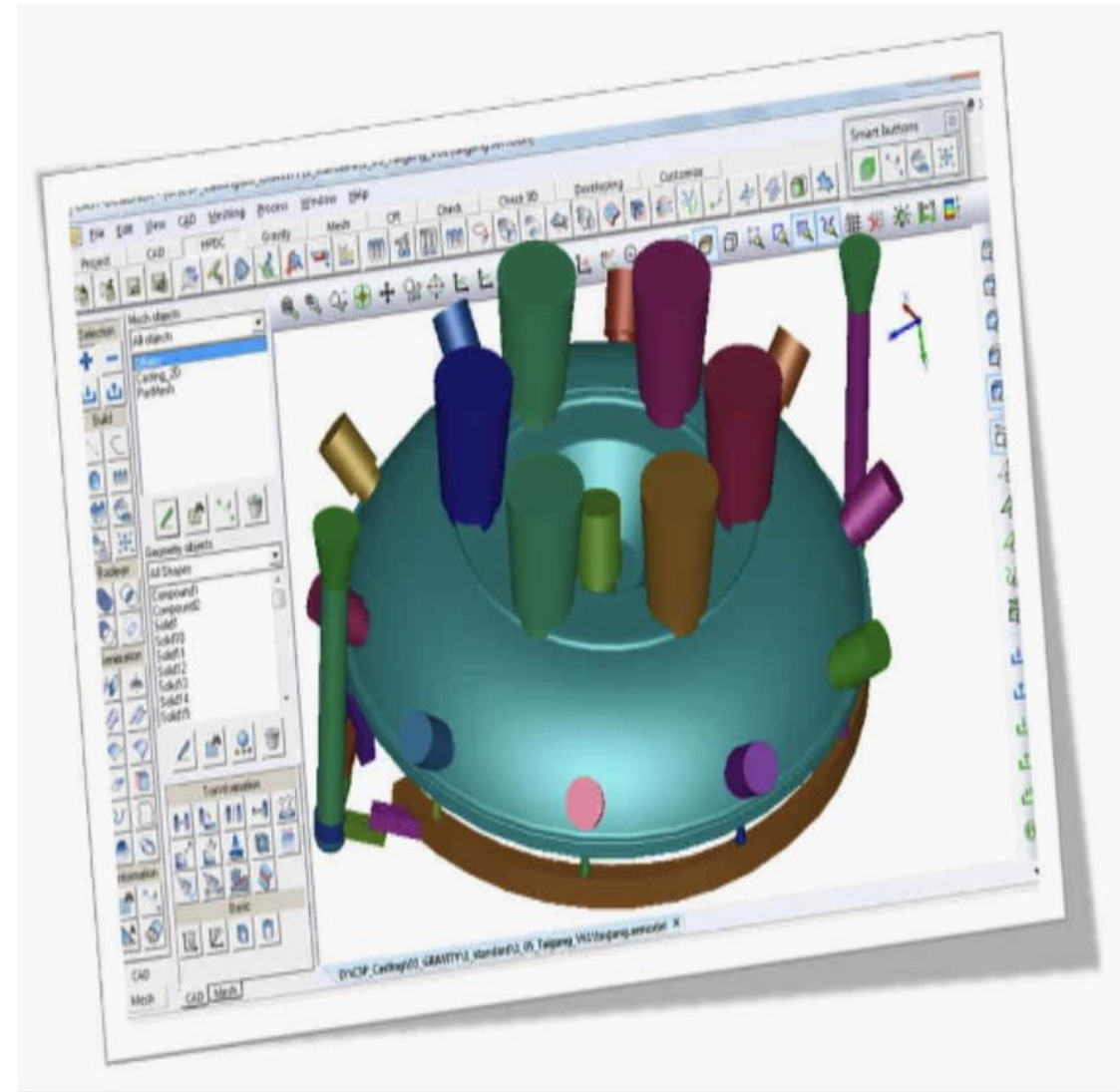
[https://www.micrometal.com.br/produtos/microfundidos/?gclid=EAlaIQobChMIw9mm44f96wIVDAyRCh1UewUIEAAYASAAEgJxA\\_D\\_BwE](https://www.micrometal.com.br/produtos/microfundidos/?gclid=EAlaIQobChMIw9mm44f96wIVDAyRCh1UewUIEAAYASAAEgJxA_D_BwE)



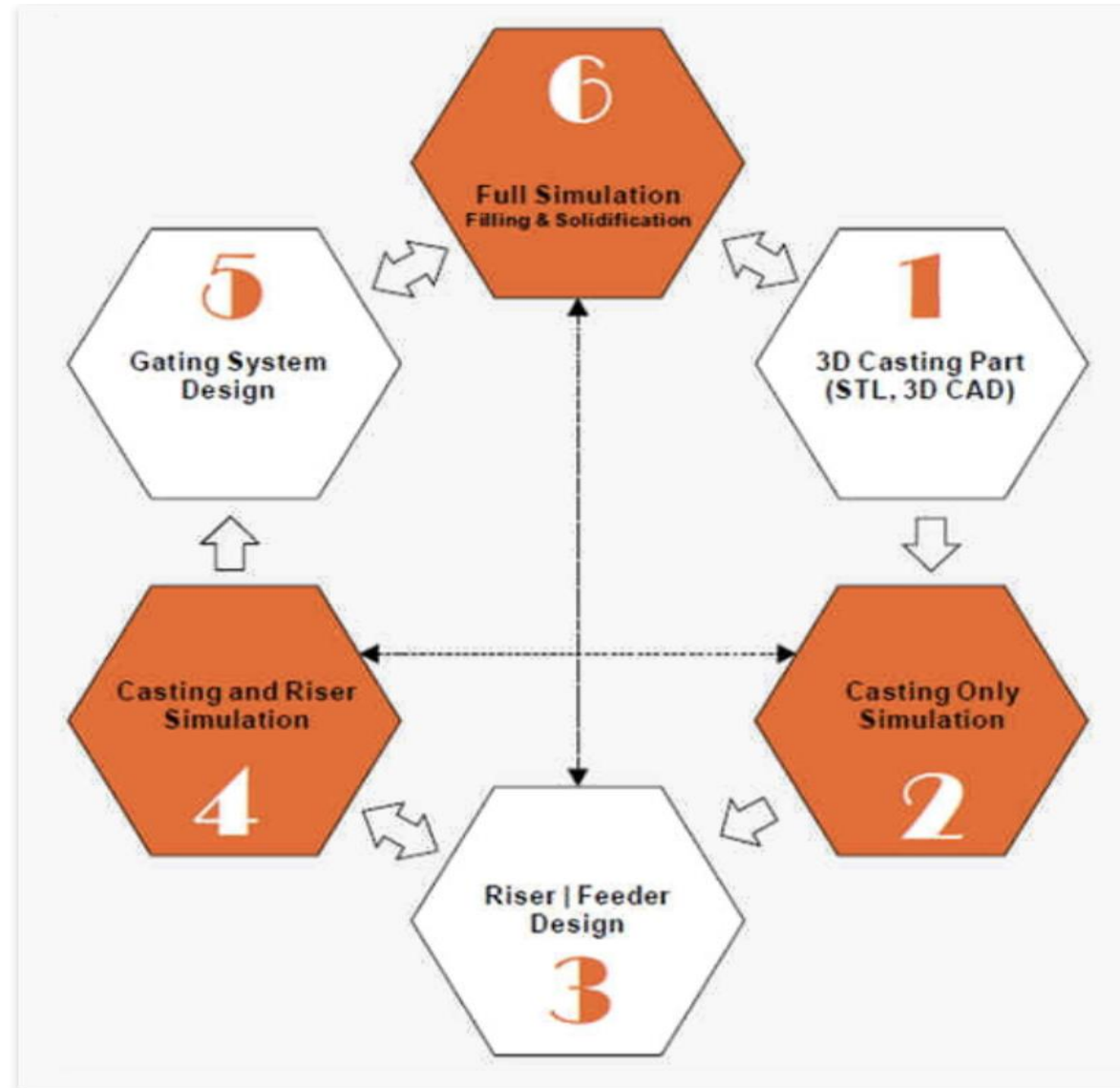
# Uso de simulação - Exemplos

Exemplo: CAST-DESIGNER para fundição por gravidade é utilizado para projetar o sistema de canais, bem como realizar simulações para fundição em areia, coquilha, baixa pressão, microfundição, lostfoamcasting, fundição centrífuga, etc

<http://www.cast-designer.com/lang/pt/gravity-casting-gating.html>







<http://www.cast-designer.com/lang/pt/gravity-casting-gating.html>

*Procedimento de projeto do sistema de canais de alimentação*



# Uso de simulação - Exemplos

Numerical simulation for the investment casting process of a large-size  $\gamma$  titanium alloy thin-wall casing

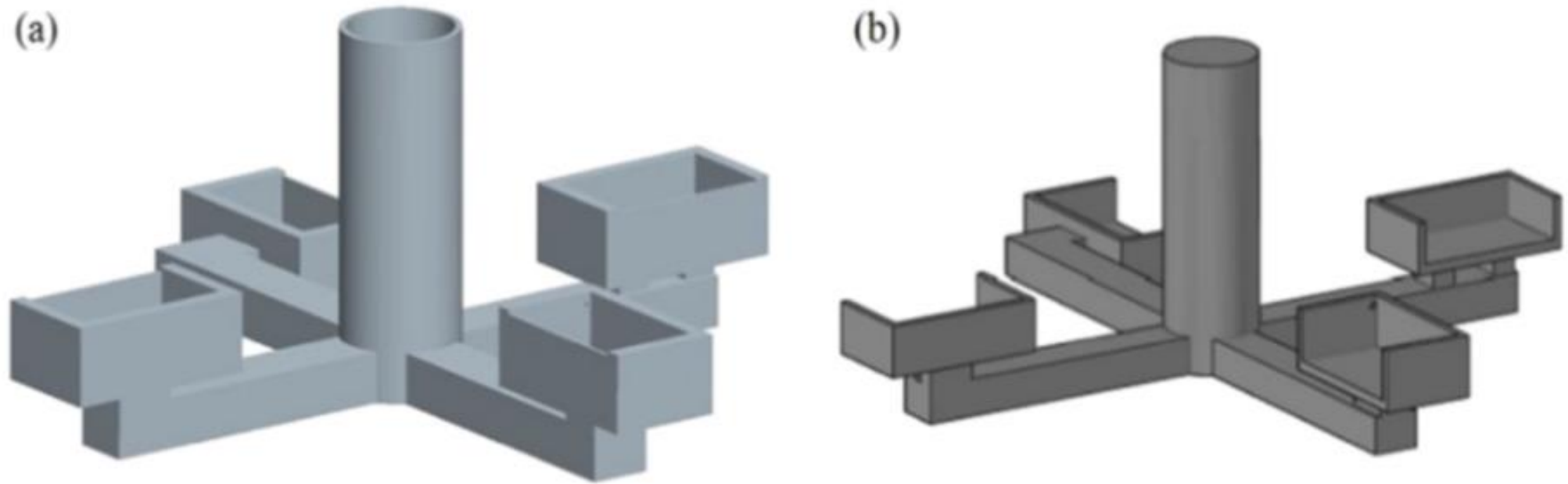
Neste estudo, o modelo fracamente compressível (WCM) e a malha de diferenças finitas não uniformizadas (UFDM) foram desenvolvidos para reduzir o custo computacional e garantir a eficiência da simulação. A precisão do WCM e UFDM foi verificada por simulação numérica da convecção térmica da cavidade em uma cavidade quadrada e simulação hidráulica do enchimento centrífugo em uma cavidade transparente.

A simulação numérica do processo de microfusão de um fundição de precisão de liga de titânio sob diferentes condições de processo foi realizada usando um software auto-desenvolvido, e as características de distribuição de defeitos de contração potenciais foram previstas.

<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.06.005>



Numerical simulation for the investment casting process of a large-size  $\pi$  titanium alloy thin-wall casing



**Fig. 5.** Schematic of the mold (a) and its inner cavity (b) for hydraulics simulation.



The mold kept rotating at 150rpm in clockwise direction when colored water was poured into the cavity (pouring time was 3.3 s). The flow state of water was recorded by **high-speed camera** and numerical simulation under corresponding conditions was also done. The comparison between numerical simulation result and recorded flow state at different time is shown in Fig. 6.

The results in Fig. 6 indicate that the numerical simulated flow state matches well with the recorded experimental results. Both the shape of the free surface and filling rate in the simulation result are similar to the recorded experimental result. Thus the precision of filling simulation result is verified further.

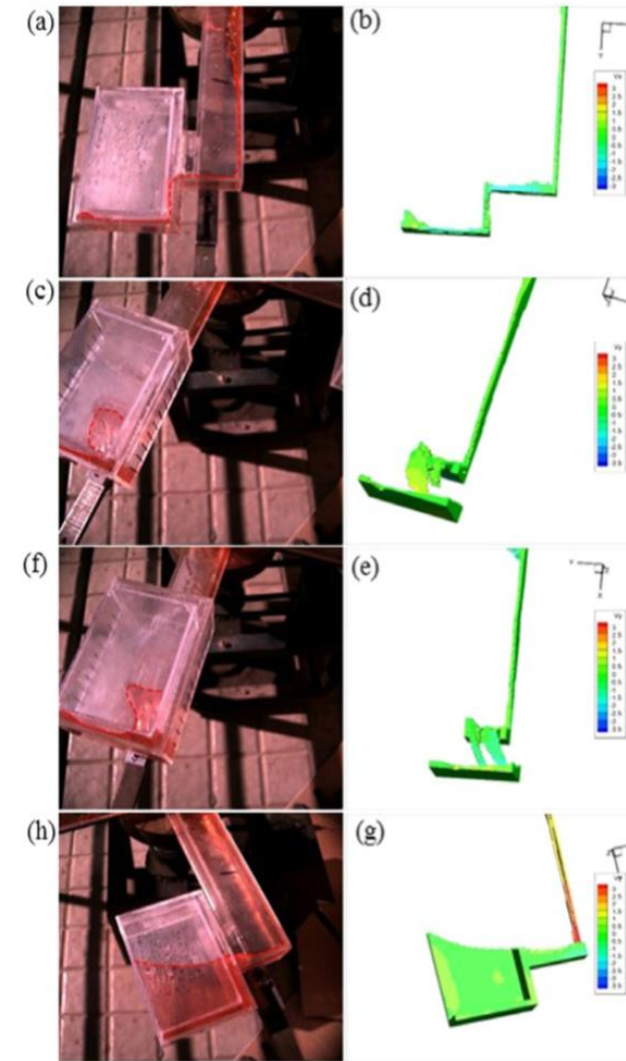


Fig. 6. Numerical simulated result and recorded flow state at different time: (a) (c) (e) (g) are recorded flow state after 0.483 s, 0.748 s, 0.889 s and 1.560 s from the beginning of pouring, respectively; (b) (d) (f) (h) are recorded flow state after 0.5 s, 0.8 s, 0.9 s and 1.6 s from the beginning of pouring, respectively.

<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.06.005>

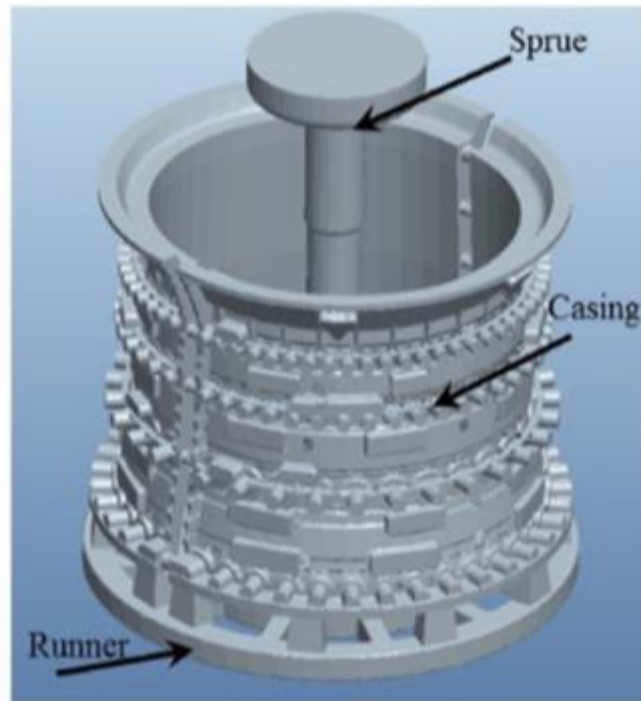
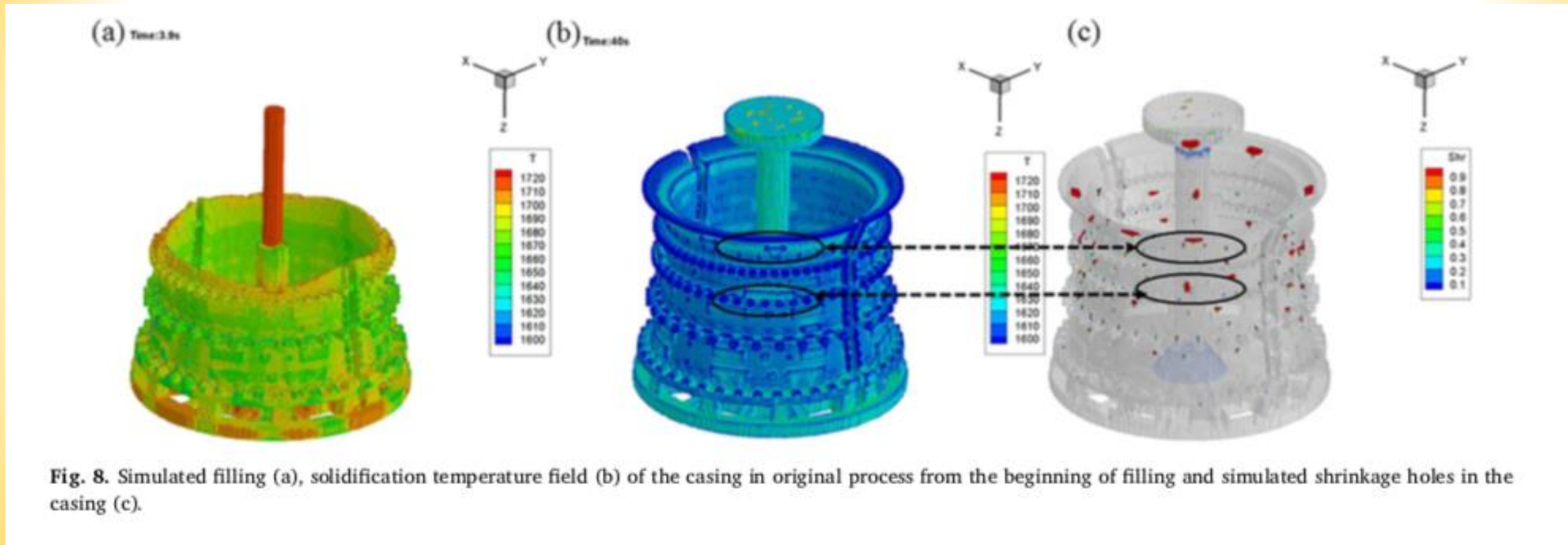


Fig. 7. 3-D model of the casing and its pouring system.

**Table 1**

The simulation parameters of Ti-6Al-4V alloy casing in original process.

Parameters	Values
Pouring temperature (°C)	1720
Shell preheating temperature (°C)	200
Pouring time (s)	5.5
Centrifugal rotation speed (r/min)	0
Interfacial heat-transfer coefficient between casting and mold ( $W m^{-2} k^{-1}$ )	[25]
Mesh size (mm)	2 mm, 4 mm
Element number for casting	1593129(2 mm), 219566(4 mm)
Element number for mold	2799935(2 mm), 163000(4 mm)



**Fig. 8.** Simulated filling (a), solidification temperature field (b) of the casing in original process from the beginning of filling and simulated shrinkage holes in the casing (c).

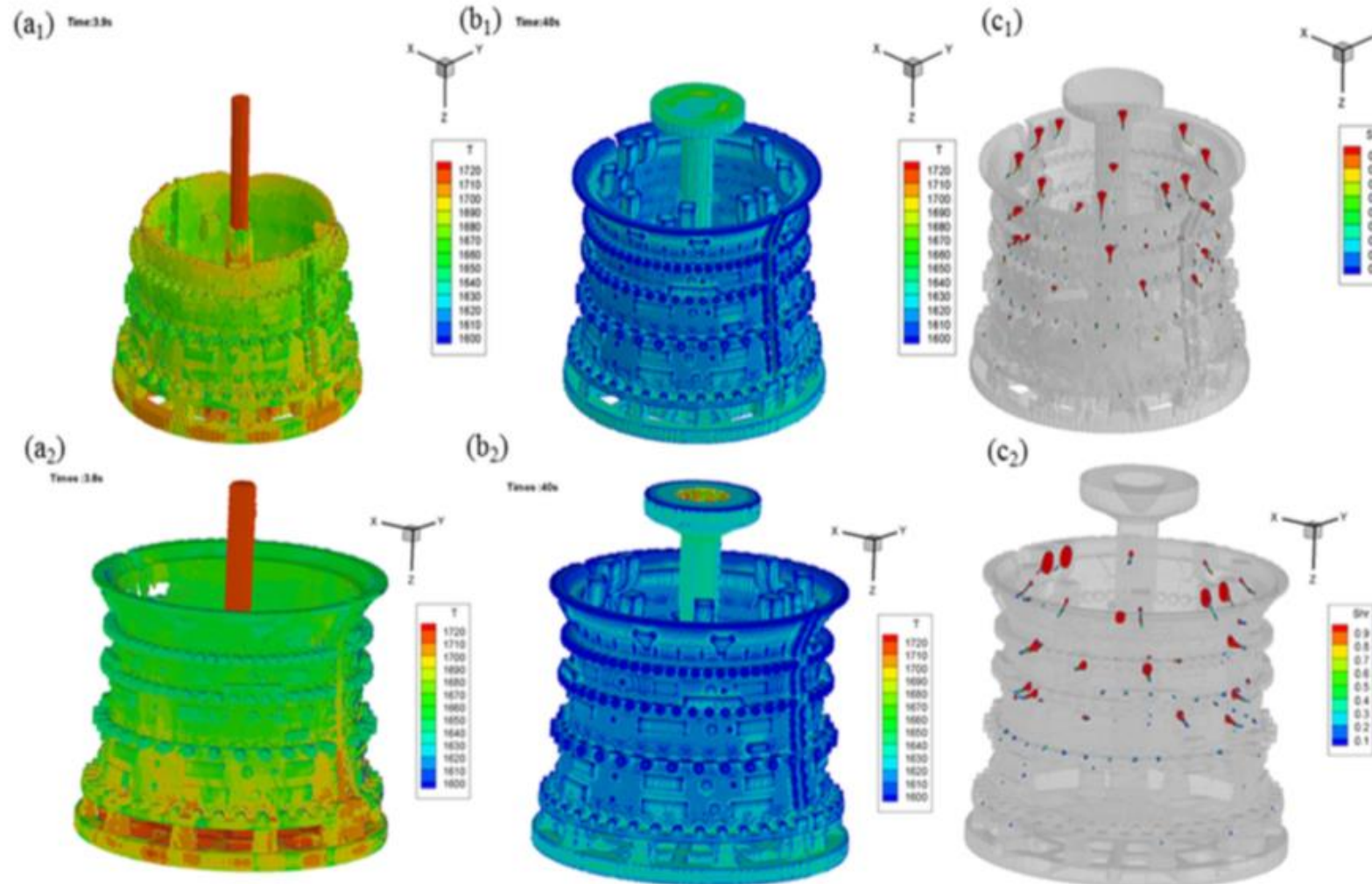


Fig. 9. Simulated results of the casing in the modified processes: (a<sub>1</sub>) (b<sub>1</sub>) (c<sub>1</sub>) simulated filling, temperature field and shrinkage defects of the casing in Scheme 1; (a<sub>2</sub>) (b<sub>2</sub>) (c<sub>2</sub>) simulated filling, temperature field and shrinkage defects of the casing in Scheme 2.



O processo de fundição por cera perdida de uma parede fina de liga de titânio foi simulado por um software desenvolvido pelo próprio usando o método WCM e UFDM. (Weakly compressible model (WCM) e ununiformed finite difference mesh (UFDM))

O preenchimento, campo de temperatura de solidificação e vazios de contração em diferentes condições de processo foram investigados. Os vazios de contração (rechupe) na liga de titânio analisados usando testes de raios-X.

Com base nos resultados experimentais e na análise de simulação, as seguintes conclusões podem ser tiradas: (1) O WCM fornece uma boa precisão na simulação de fluxo sob rotação centrífuga. O UFDM mantém a precisão, enquanto diminui significativamente o número de elementos da malha, o custo computacional e o tempo de simulação. (2) Os defeitos de contração (rechupes) previstos correspondem bem aos resultados do experimento de raios-X. (3) Os alimentadores são eficazes na eliminação de rechupes na fundição por gravidade, enquanto a rotação centrífuga adicional não apresenta melhorias óbvias nos defeitos concentrados na superfície. A fundição por gravidade é mais adequada do que a fundição centrífuga para a fabricação desta carcaça do compressor do ponto de vista da produção real.





Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing

Sumarizando:

Verificou-se que os defeitos previstos no revestimento da liga de titânio são detectados e relacionados com os resultados experimentais de raios-X (reais). Para os componentes investigados neste artigo, resultados de simulação numéricos mostram que o processo de fundição centrífuga em relação à fundição por gravidade não teve melhorias óbvias nos defeitos de contração, e o processo de fundição por gravidade pode ser melhor do ponto de vista da engenharia.

# Peças obtidas por fundição sob pressão

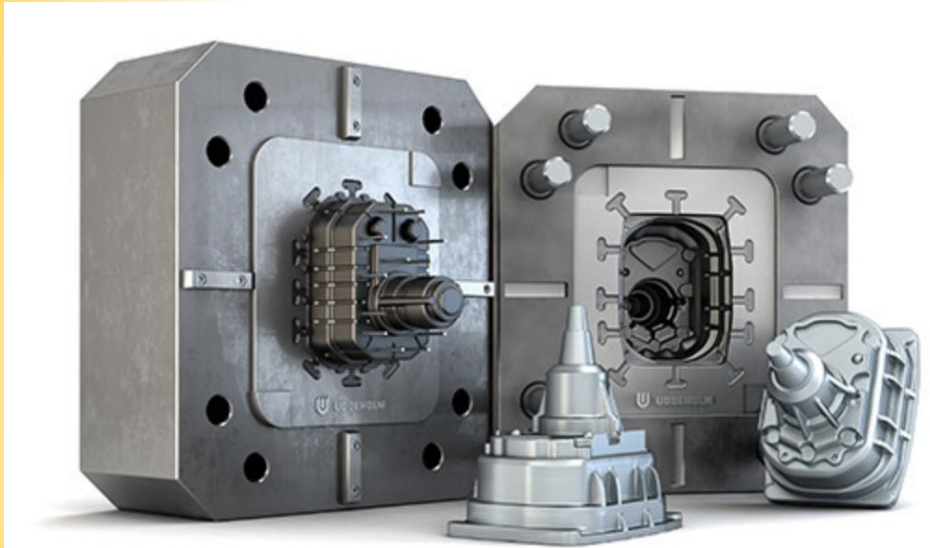
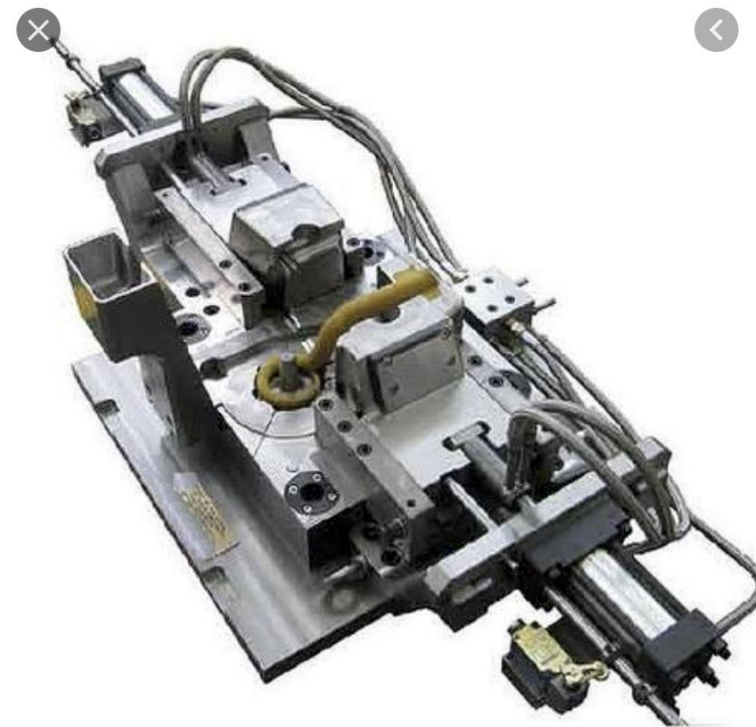


Figure 1: Die-cast mold with finished die-cast parts.

Image credit: <https://www.uddeholm.com/uk/en/applications/die-casting/>



500 x 476

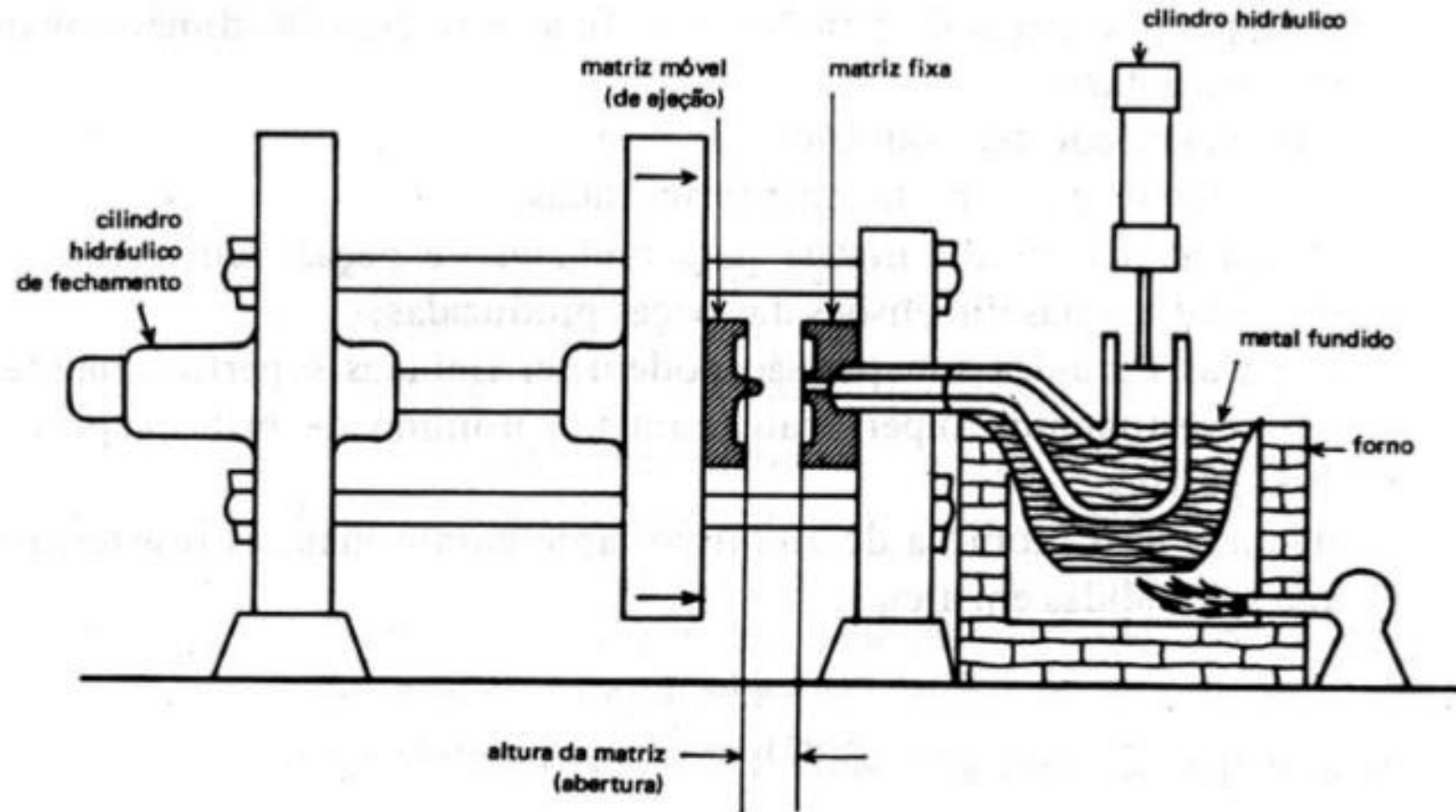


<https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/die-casting-vs-sand-casting/#register>



Fundição sob Pressão

Fundição sob pressão câmara quente





### Ciclo de câmara quente

Os componentes básicos de uma máquina e molde de fundição de câmara quente são ilustrados nas Figuras 6 e 7. O processo é chamado de câmara quente porque a câmara de injeção e o pistão estão submersos no metal fundido no cadinho. A energia para injetar o metal na cavidade de fundição é fornecida por uma bomba hidráulica e armazenada no acumulador, de onde é retirada, conforme desejado, para movimentar o pistão.

do ciclo. A seguir, o pistão é acionado para baixo, forçando o metal fundido a sair do cilindro através do gooseneck, bocal, canais e entradas para a cavidade do molde, preenchendo-a e mantendo a pressão no metal, à medida que ele se solidifica. Após a solidificação, o molde é aberto, enquanto o pistão retorna para a posição inicial, recarregando o cilindro de injeção. A peça é então extraída e o ciclo é repetido. Um lubrificante pode ser aplicado de tempos em tempos no molde para facilitar a extração da peça.

A sequência de operação do ciclo da câmara quente é ilustrada na Figura 8. O molde é fechado no início

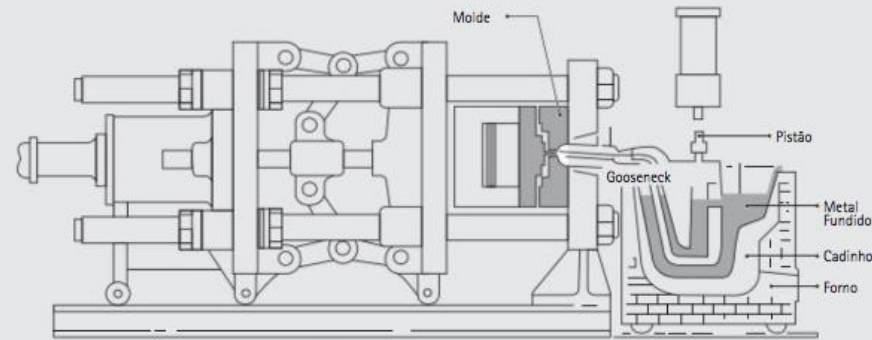


Fig. 6 Seção transversal de uma injetora de câmara quente

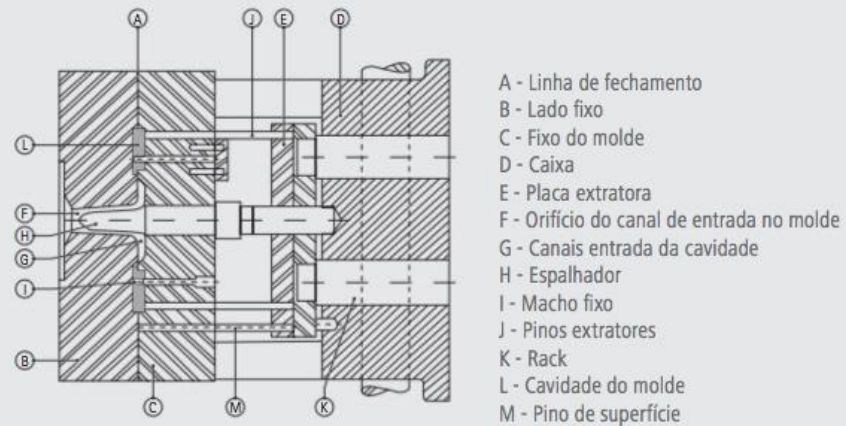
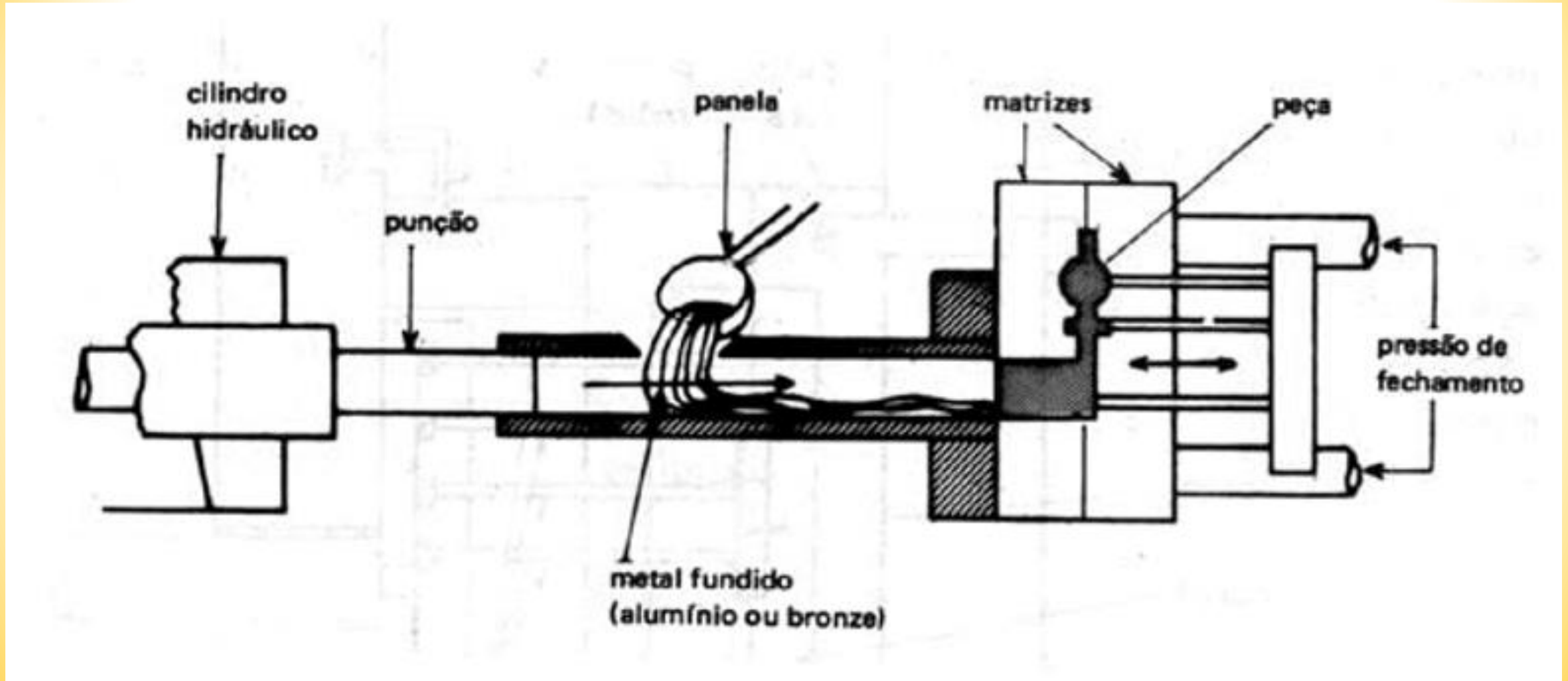


Fig. 7 Seção transversal de um molde para fundição sob pressão em câmara quente

<https://issuu.com/prodweb/docs/manual-de-fundicao-sob-pressao>





<https://issuu.com/prodweb/docs/manual-de-fundicao-sob-pressao>

### Ciclo de câmara fria

A última área da cavidade do molde a ser preenchida normalmente contém o metal mais frio, o que pode resultar em defeitos na fundição. A tecnologia atual de fundição aplicada ao sistema de alimentação de metal e um bom projeto do sistema de refrigeração/aquecimento dos moldes geralmente evitam esse tipo de defeito. Em alguns casos, é necessário alocar bolsas acopladas às cavidades do molde de forma a minimizar defeitos em algumas áreas críticas. A bolsa recebe o metal mais frio e permite que o metal com temperatura mais alta que vem a seguir preencha a cavidade do molde. As bolsas devem ser utilizadas apenas quando necessário, e seu tamanho deve ser cuidadosamente calculado, pois elas constituem metal extra para reciclagem.

O processo em câmara fria é utilizado principalmente para as ligas ZA-12 e 27, pois a temperatura de fundição dessas ligas está dentro do intervalo no qual ligas zinco-alumínio podem atacar o aço do gooseneck e do pistão. Esse é o mesmo processo utilizado para fundição de ligas de alumínio. A sequência para esse ciclo é basicamente a mesma que o ciclo de câmara quente. Ao invés de submergir o cilindro, o metal fundido é transferido, manualmente ou automaticamente em conchas, para um cilindro de injeção horizontal. Esse sistema não emprega canal de entrada, o pistão para antes de atingir o final do cilindro em uma distância de aproximadamente um terço do diâmetro do cilindro, formando a característica "bolacha". As etapas seguintes são idênticas ao ciclo de câmara quente.

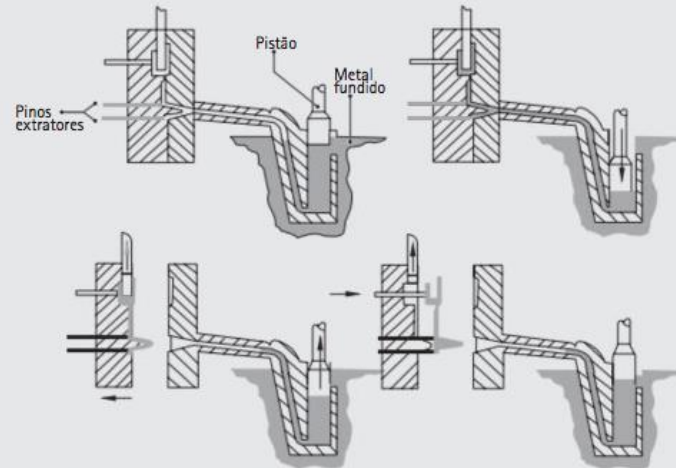


Fig. 8 Sequência de operação de um ciclo do processo de fundição sob pressão em câmara quente

*Este capítulo foi extraído do livro 'Zinc Alloy Castings - Design and Development' traduzido e editado para adequação ao manual*



## PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS LIGAS DE ZINCO PARA FUNDIÇÃO E OUTROS MATERIAIS SELECIONADOS

Propriedade	Unidades	LIGAS DE ZINCO			LIGAS DE ALUMÍNIO		LIGAS DE MAGNÉSIO	POLÍMEROS				
		Zamac 3	Zamac 5	Zamac 2	LM24	A380	AZ91D	ABS	Nylon PA66	Nylon PA66 reforçado com 30% de fibra de vidro	Polycarbonato	Poliacetal
Limite de escoamento	MPa	268	295	361	150	159	111-170	n/a	n/a	n/a	n/a	-
Limite de resistência à tração	MPa	308	331	397	320	317-324	200-260	25-65	71-85	155-210	54-72	37-70
Módulo de Young	GPa	96	96	96	71	71	44	1,4-5,1	0,7-4,1	3,2-12,7	1,6-5,5	1,4-3,6
Módulo de torção	MPa x 10 <sup>3</sup>	33+	33+	33+	26,9	26,9	16,5	n/a	n/a	n/a	n/a	-
Alongamento em ruptura	%	5,8	3,4	6	2	3,5	3	2-110	15-300	2-150	8-135	3-250
Resistência ao cisalhamento	MPa	214	262	317	-	186	138	-	-	-	-	-
Limite de escoamento por compressão	MPa	414	600	641	-	-	108-159	-	-	-	-	-
Resistência ao impacto	Joules	46	52	38	3,4	4	3,7-6	1-2	0,6-1,4	5	20-30	8
Resistência à Fadiga (5.10 ciclos)	MPa	48	57	59	-	70-138	97	7	-	15	7	-
Dureza	Brinell	97	114	130	85	80	63-85	muito macio	muito macio	muito macio	muito macio	-
Tenacidade à fratura K <sub>IC</sub>	x 10 <sup>3</sup> N.m <sup>-3/2</sup>	2,25	2,1	-	3,6	3,6	-	-	0,07	-	0,22	0,09
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	6,6	6,7	6,8	2,79	2,76	1,82	1,02-1,21	1,03-1,16	1,11-1,68	1,17-1,45	1,29-1,43
Capacidade de amortecimento a 35 MPa	%	18	-	-	-	1	25	-	-	-	-	-
Capacidade de amortecimento a 100 MPa	%	40	-	-	-	4	53	-	-	-	-	-
Coefficiente de expansão térmica	µm/m°C	27,4	27,4	27,8	21	21,1	25,2-26,0	50-150	65-150	17-104	32-20	12-162
Condutividade térmica	Wm <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>	113	109	105	96	109	51-72,7	0,2	0,24	<1	<1	0,13-0,3
Condutividade elétrica	% IACS	27	26	25	24	27	11,5-12,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Resistividade elétrica	µ ohm - cm	6,37	6,54	6,85	-	-	-	-	-	-	-	-
Intervalo de temperatura de fusão	°C	381-387	380-386	379-390	520-580	538-593	468-598	-	-	-	-	-
Calor específico	J/kg°C	419	419	419	960	960	1020	1.960-2.130	1.600-2.750	1.200-2.350	1.000-1.200	-
Coefficiente de atrito	-	0,07	0,08	0,08	-	-	-	0,45	0,28-0,46	0,28	0,38	0,21
Precisão típica em mais de 100 mm	± µ	100	100	100	250-350	250-350	175	Alta contração e umidade faz com as tolerâncias sejam menores para o plástico				
Espessura de parede mínima	mm	0,4	0,4	0,4	1,3	1,3	1,2	-				
Velocidades típicas de produção	injeções por hora	*Grande 200-500. Pequeno 400-1.000. Muito pequeno 2.000-3.000.*			50-250	-	Normal 200-275. Cerca de 2/3 comparados ao mesmo tamanho em Zn	Velocidades de produção regidas pelo tamanho do produto, material utilizado e taxa de resfriamento, que tende a ser menor do que em metais				
Variação de velocidade de produção	injeções por hora	200-3.600			30-350	-	tamanho por tamanho. 40-2.400	Velocidade de injeção de 100 a 400 injeções por hora				
Ciclo de vida típico de ferramenta	injeções	750.000-2.000.000			100.000-225.000	-	300.000-500.000	Altamente dependente da composição e reforço				

Os valores contidos nessa tabela são valores de referência, podendo variar de acordo com o processo.

Tab. 2

Elementos	Zamac 2		Zamac 3		Zamac 5		Zamac 7		ZA-8		ZA-12		ZA-27	
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Al	3,9	4,3	3,9	4,3	3,9	4,3	3,9	4,3	8,2	8,8	10,8	11,5	25,5	28,0
Mg	0,025	0,05	0,03	0,06	0,03	0,06	0,010	0,020	0,02	0,03	0,02	0,03	0,012	0,020
Cu	2,7	3,3	-	0,10	0,7	1,1	-	0,10	0,9	1,3	0,5	1,2	2,0	2,5
Fe	-	0,035	-	0,035	-	0,035	-	0,75	-	0,035	-	0,05	-	0,07
Pb	-	0,0040	-	0,0040	-	0,0040	-	0,0030	-	0,005	-	0,005	-	0,005
Cd	-	0,0030	-	0,0030	-	0,0030	-	0,0020	-	0,005	-	0,005	-	0,005
Sn	-	0,0015	-	0,0015	-	0,0015	-	0,0010	-	0,002	-	0,002	-	0,002
Ni	0,0010	-	-	-	-	-	0,005	0,020	-	-	-	-	-	-
Zn	Restante	-	Restante	-	Restante	-	Restante	-	Restante	-	Restante	-	Restante	-



## Fundição sob pressão

Como todo o processo de fabricação, a fundição sob pressão tem uma série de vantagens e desvantagens. As vantagens são:

1. peças de ligas como as de alumínio, fundidas sob pressão, apresentam maiores resistências do que as fundidas em areia;
2. as peças fundidas sob pressão podem receber tratamento de superfície com um mínimo de preparo prévio da superfície;
3. possibilidade de produção de peças com formas mais complexas;





## Fundição sob pressão

Como todo o processo de fabricação, a fundição sob pressão tem uma série de vantagens e desvantagens. As desvantagens são:

1. tamanho das peças máximo (5 kg)
2. Custo do molde elevado
3. Produzir muitas peças amortizar os custos
4. Limitação dos tipos de liga (Al, Zn, baixo ponto de fusão)



# Uso de simulação - Exemplos

Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process

Devido à alta velocidade do metal líquido, a fundição de alumínio é complexa e fluxo é uma questão crítica no processo de enchimento do molde. Em peças complexas, é quase impossível calcular o desempenho exato do preenchimento do molde com o uso de conhecimento experimental.

**A simulação pode tornar um sistema de fundição ideal e também elevar a qualidade da fundição com menos experiência. A maior vantagem de usar programas de simulação é a economia de tempo e custo do projeto de layout de fundição.**



## Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process

A seleção da condição do HPDC baseou-se principalmente na experiência e especialização de um trabalhador individual nas indústrias de fundição. Nas indústrias de fundição atuais, o paradigma de desenvolvimento de produto está mudando de tentativa e erro tradicional para prova de conceito baseada em simulação habilitada para CAE.

A análise de enchimento foi usada para descobrir o tamanho e a localização do canal de alimentação e o projeto adequado do sistema de rotor. Pela modificação do sistema de alimentação e a configuração de escoamento, porosidades internas causadas por aprisionamentos de ar foram previstas e reduzidas notavelmente. A análise de solidificação, as porosidades internas causadas pela retração de solidificação também foram previstas.



**Table 1**  
Chemical composition (%) of SKD61.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0.32–0.42	0.80–1.20	<0.50	<0.03	<0.03	4.50–5.60	–	1.00–1.50	0.80–1.20
W	N	Cu	Co	Pb	B	Nb	Al	Other
–	–	–	–	–	–	–	–	–

**Table 2**  
Condition for the CAE simulation.

Part		Mold		Plunger	
Material	ACD12	Material	SKD61	Diameter	120mm
Liquidus line	853.15K(580 °C)	Initial Temperature	473.15K(200 °C)	Slow velocity	0.90 m/s
Solidus line	788.15K(515 °C)	–	–	High velocity	3.50 m/s
Initial temperature	913.15K(640 °C)	–	–	Length	850 mm
Weight for casting	4083 g	–	–	–	–

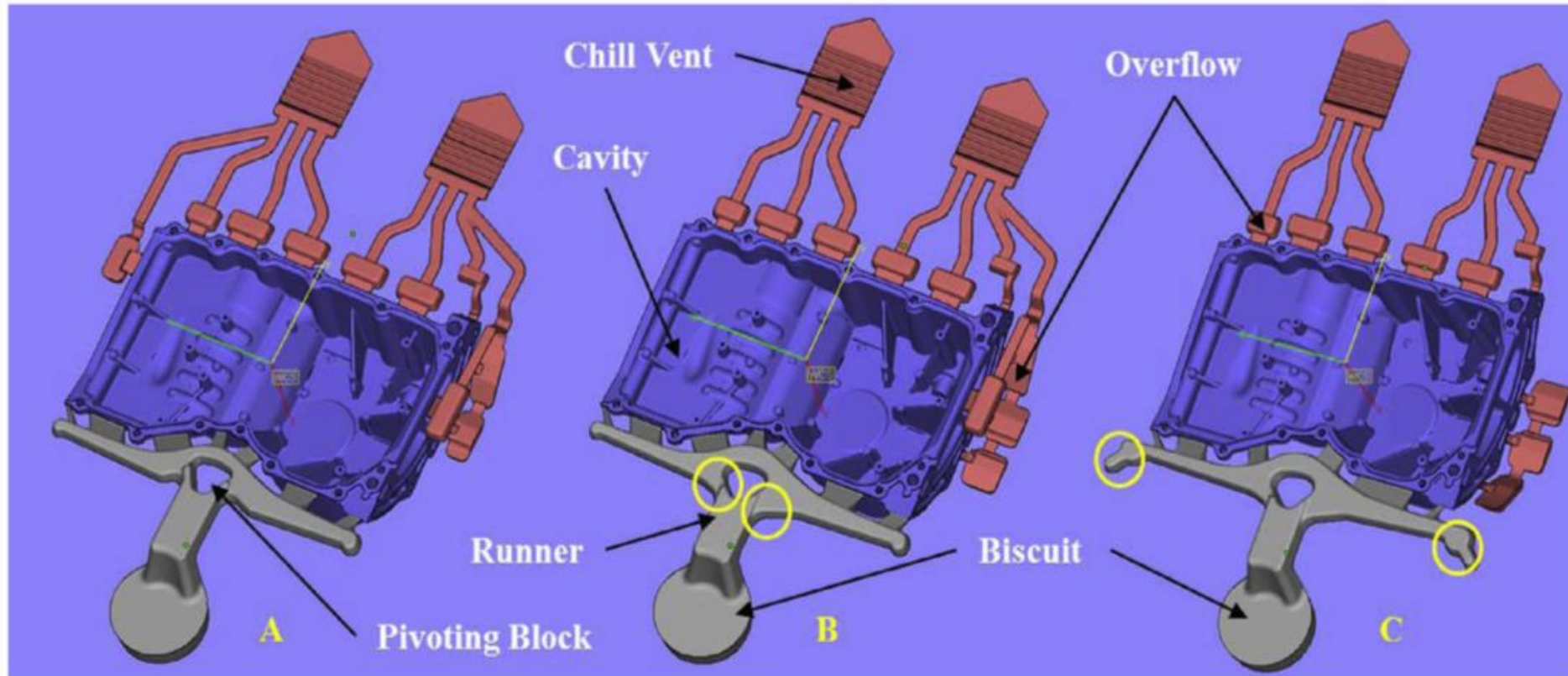


Fig. 3. Casting model of Oil Pan (BR2E). (A) Case 1, (B) Case 2, (C) Case 3.

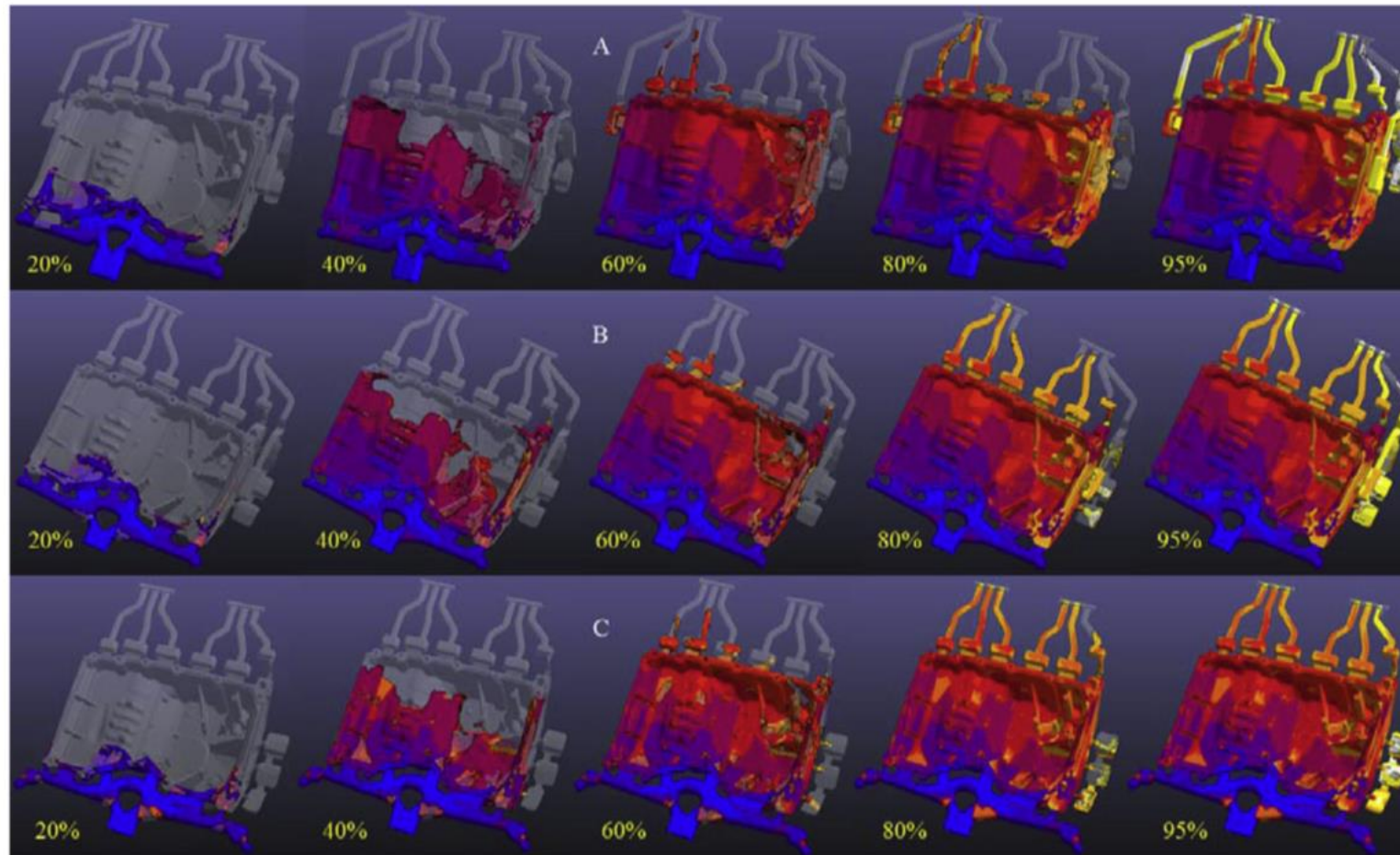


Fig. 4. Simulation results of the mold filling. (A) Case 1, (B) Case 2, (C) Case 3.

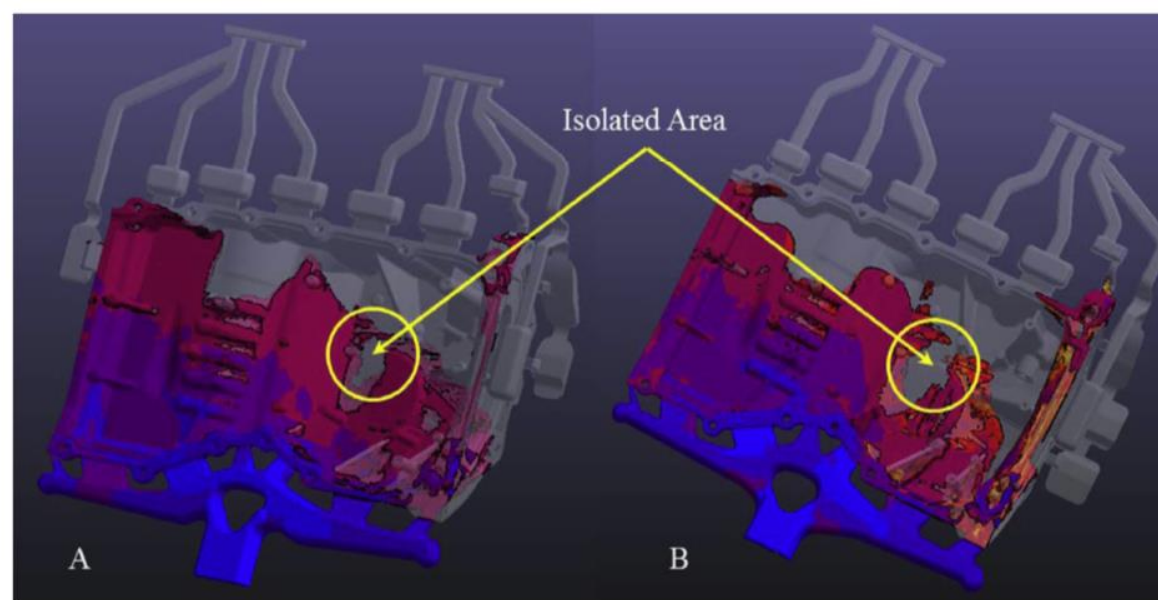


Fig. 5. Simulation results after 40% filling. (A) Case 1. (B) Case 2.

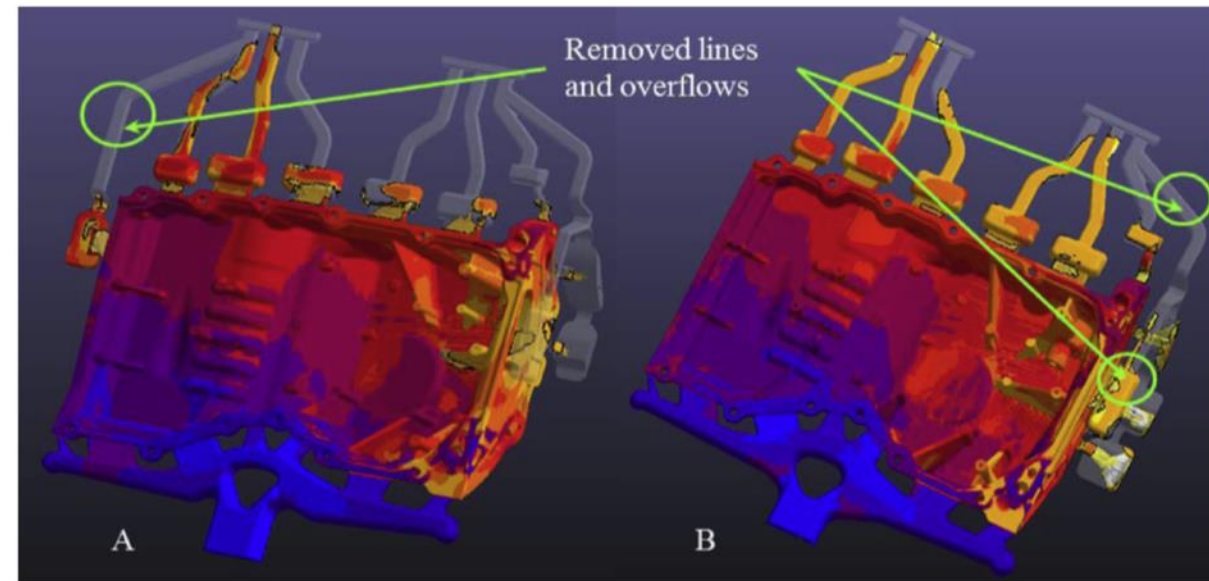


Fig. 6. Simulation results after 80% filling. (A) Case 1, (B) Case 2.

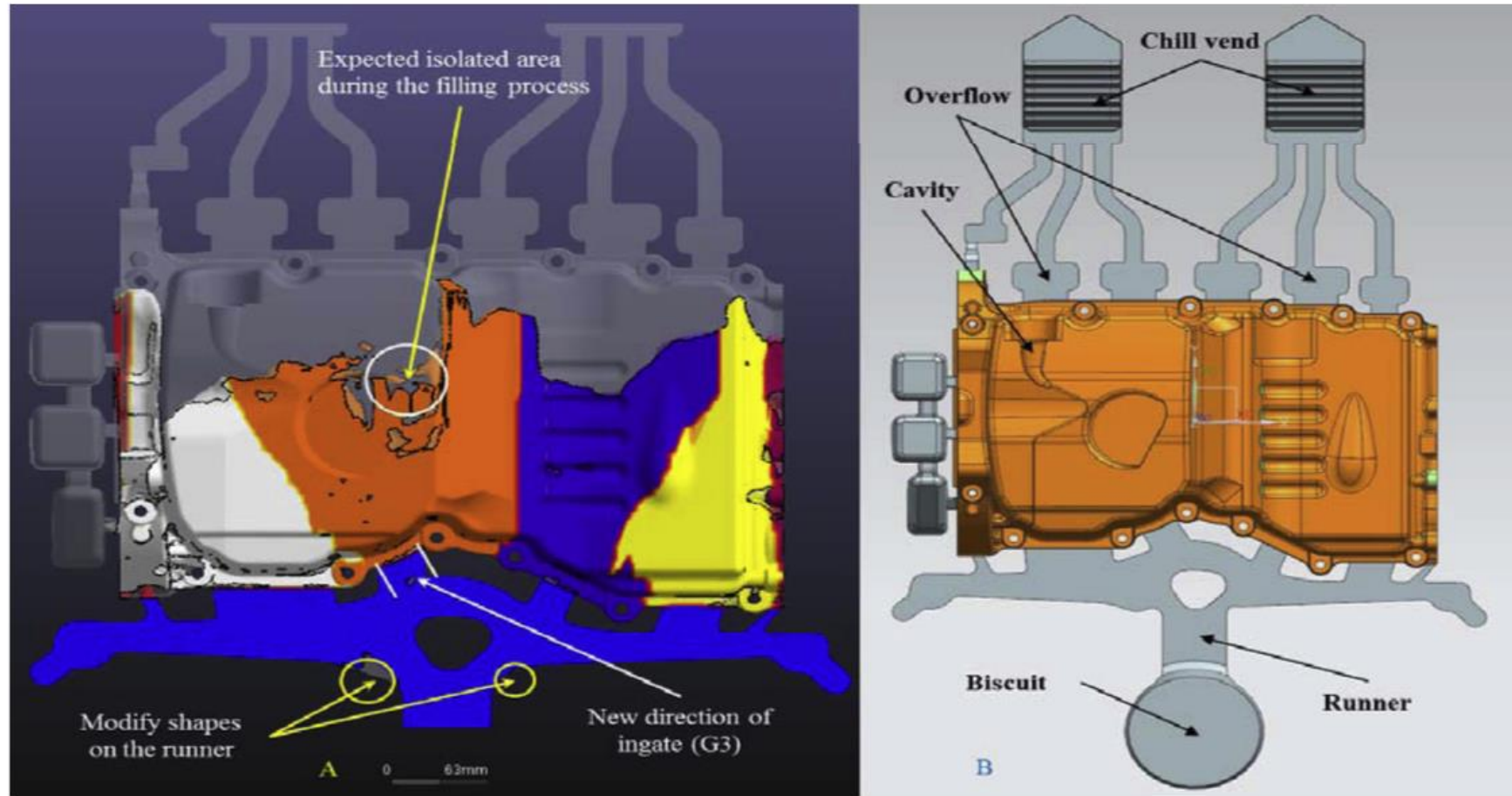
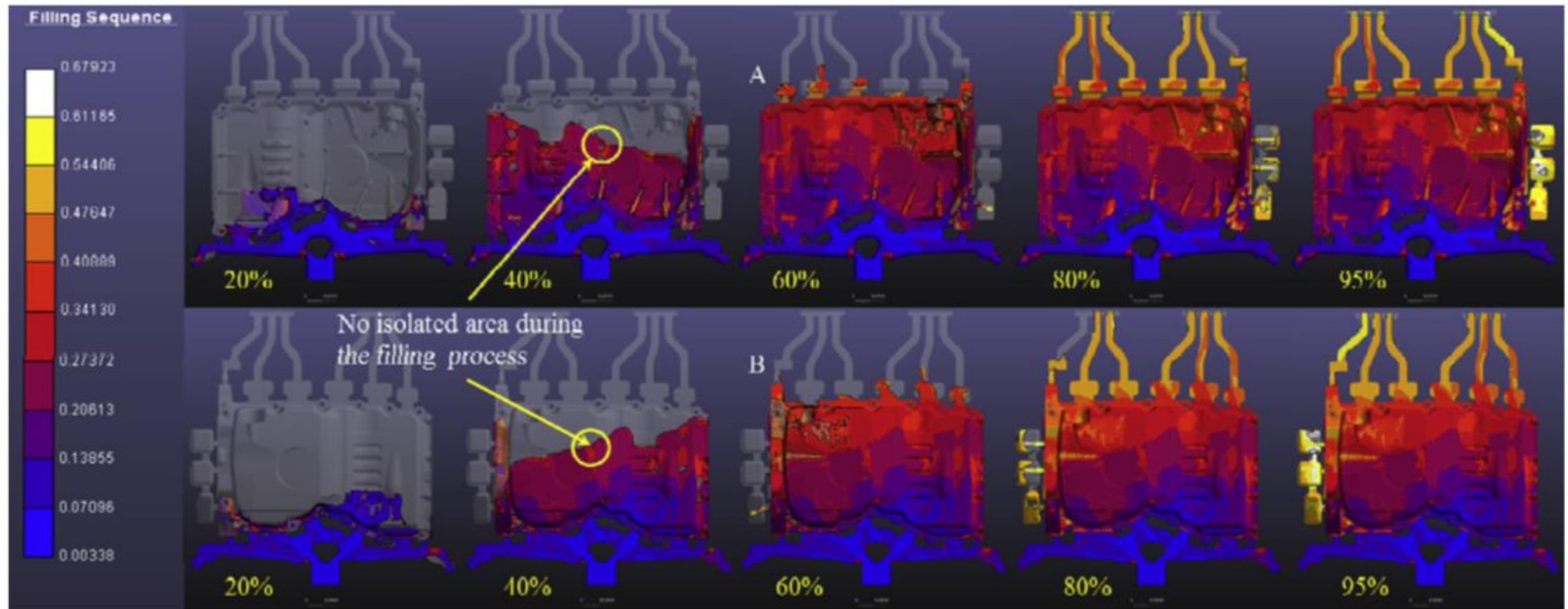


Fig. 10. (A) Simulation results after 40% filling of case 3; (B) Final casting layout.





**Fig. 11.** Simulation results with the final tool design. (A) View of the moving side, (B) View of the fixed side.



## Conclusões

Nas indústrias de fundição atuais, o projeto e o desenvolvimento de um produto e processo de fundição são um processo de tentativa e erro baseado no know-how heurístico. A solução alcançada desta forma carece de cálculos e análises científicas.

Usando simulação CAE com AnyCasting, os seguintes resultados foram alcançados: De acordo com o processo de enchimento, o layout de fundição final na Fig. 10 (B) é melhor do que outros layouts de fundição na Fig. 3 por causa da localização da zona de junção de fluxo e do enchimento uniforme e uniforme na cavidade do molde.

Áreas de defeito de contração (rechupe) são observadas com o **método do módulo**. O contração ocorre nessas áreas devido à temperatura de resfriamento uniforme e causa o defeito de contração (rechupe ?) Para evitar esses defeitos, um sofisticado sistema de resfriamento nessas áreas deve ser adicionado quando o molde é fabricado.

Ao aplicar o projeto de fundição final da Fig. 10 (B) em um molde HPDC de produção, os resultados da simulação da Fig. 11 devem ser verificados.



## Sumário

Fundição em cera perdida

Fundição sob pressão