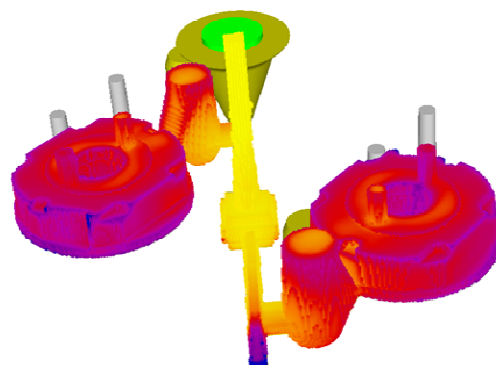
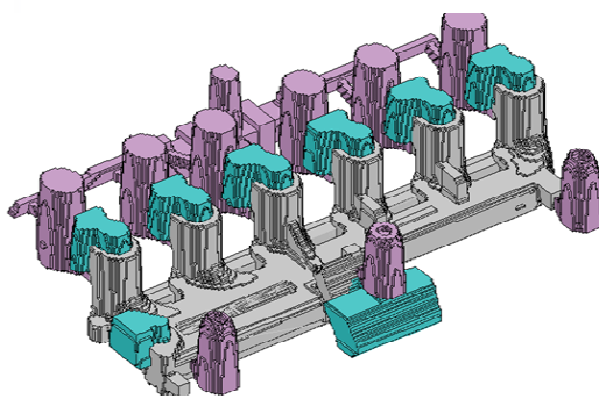
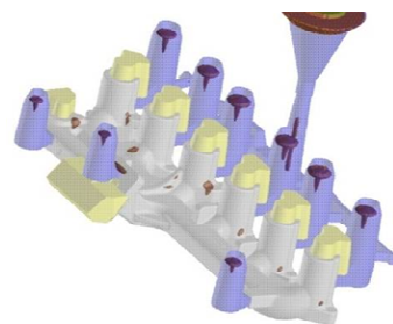
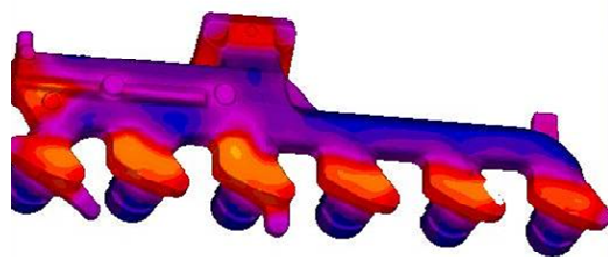


Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica  
e de Materiais

Validação e implementação de software de  
simulação na dinâmica de  
desenvolvimento de produto da  
OLIVA1925



Realizado por: Pedro M Trigo Lopes Rodrigues

Orientado na FEUP por: Prof. C A Silva Ribeiro

Orientado na empresa por: Eng.º Sandro Pinto

Porto, Maio de 2008

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Validação e Implementação de software de simulação na dinâmica de  
desenvolvimento de produto da OLIVA1925

Pedro Miguel Trigo Lopes Rodrigues

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Dissertação realizada sob a supervisão de

Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro,

do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

e do Eng.º Sandro Nelson Lemos Pinto,

do Departamento Engenharia de Produto/I&D  
da empresa OLIVA1925

Porto, Maio de 2008

---

---

<i>CANDIDATO</i>	Pedro Miguel Trigo Lopes Rodrigues	<i>Código</i>	010508005
<i>TÍTULO</i>	Validação e implementação de software de simulação na dinâmica de desenvolvimento de produto da OLIVA1925		
<i>DATA</i>	20 de Maio de 2008		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C-603- 16.00h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor José Joaquim Carneiro Barbosa	DEM/EEUM
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro	DEMM/FEUP

---

Desejo agradecer a todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização desta tese, especialmente aos meus orientadores, na FEUP ao Professor Doutor C.A Silva Ribeiro e na OLIVA1925 ao Eng.º Sandro Pinto. A todos os colaboradores da empresa OLIVA1925, particularmente ao Dep. de Engenharia de Produto/I&D nas pessoas de Eng.º Bruno Rodrigues, João Gonçalves, Vítor Pinho e José Resende.

Gostaria também de agradecer à minha família, a minha namorada e a todos os meus amigos pela força e apoio demonstrados, em especial ao Daniel Casanova, Pedro Cardoso, Diogo Melo e Pedro Rocha.

## Prólogo

Esta tese, inserida no Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, foi efectuada no departamento de Engenharia de Produto/I&D da empresa OLIVA1925.

Especificamente, este projecto consistiu na realização de vários estudos com a finalidade de determinar a aplicabilidade (redução do refugo associado a defeitos de enchimento e solidificação) de software para simulação de enchimento e solidificação, em casos reais produzidos na empresa. Durante o estágio realizado na empresa foram analisadas duas peças de importância estratégica, um colector e um *magnet housing*. Nesta tese estão descritas e discutidas as técnicas utilizadas e resultados obtidos.

# Índice

Agradecimentos .....	ii
Prólogo .....	iii
Índice .....	iv
1. Introdução .....	1
2. Fundamentos teóricos essenciais.....	1
2.1. Fundição .....	1
2.1.1. Vantagens da fundição .....	1
2.1.2. Fundição em areia verde .....	1
2.1.3. Sistema de alimentação .....	4
2.1.4. Sistema de enchimento.....	7
2.2. Software de Simulação .....	10
2.2.1. SOLIDCast.....	11
2.3. Desenvolvimento do Produto .....	18
2.4. Função de produto .....	19
2.4.1. Função do colector de gases.....	19
2.4.2. Função do <i>Magnet Housing</i> .....	20
3. Procedimentos experimentais .....	21
4. Resultados Colector .....	22
4.1. Discussão de resultados (Colector) .....	40
5. Resultados <i>Magnet housing</i> .....	40
5.1. Discussão de resultados ( <i>Magnet Housing</i> ).....	49
6. Análise crítica de resultados .....	50
7. Conclusões.....	51
Referências bibliográficas .....	52

## 1. Introdução

A Oliva1925 dedica-se à produção de peças de fundição em ferro fundido, obtidas por moldação em areia verde. Actualmente produz peças técnicas fundidas segundo o desenho do cliente em ferro cinzento e nodular, e desenvolve uma gama própria de caloríferos em ferro fundido. Durante o ano 2006, a produção da Oliva1925 foi de aproximadamente 6600 toneladas, sendo vazadas aproximadamente 22 toneladas/dia [1].

Esta empresa encontra-se numa fase de crescimento, e foi neste âmbito que foi decidido testar a aplicabilidade e viabilidade de utilização do software de simulação no desenvolvimento de produto.

## 2. Fundamentos teóricos essenciais

### 2.1. Fundição

O processo de fundição consiste numa serie de actividades que visam dar uma determinada forma a um metal, sendo necessária a sua fusão e posterior vazamento para uma moldação com o formato desejado [2,3].

#### 2.1.1. Vantagens da fundição

As peças fundidas podem variar desde fracções de centímetros e baixo peso até vários metros e várias toneladas. Este tipo de tecnologia tem sérias vantagens na produção com formas complexas, peças com secções côncavas ou com cavidades internas, peças volumosas e peças feitas em materiais difíceis de maquinar. Devido a estas vantagens óbvias, a fundição é um dos mais importantes processos de conformação [2,3].

Os vários processos de fundição diferem primeiramente no material da moldação (areia, metal, ou outros materiais) e no método de vazamento (gravidade, vácuo, baixa ou alta pressão).

Hoje em dia, é praticamente impossível conceber uma peça que não possa ser produzida pelo menos por um dos vários processos de fundição existentes. Contudo, os melhores resultados, aliados a um menor custo, apenas são atingidos se o projectista tiver consciência de todo o ciclo produtivo, optimizando o seu projecto ao processo que vai ser utilizado [2,3,4].

#### 2.1.2. Fundição em areia verde

Actualmente este tipo de processo de fundição é responsável por mais de 60% das peças fundidas mundialmente. Este consiste numa moldação em areia normalmente

constituída por 2 meias moldações, embora, para peças de geometria mais complexa, possa ser necessário utilizar mais do que um plano de apartação. Exceptuando estes casos, bem como a fundição de peças de grandes dimensões ou pequenas quantidades de peças nas quais é utilizada a moldação manual, o processo é normalmente mecanizado [3,4].

Cada meia moldação é obtida através da compactação de areia de moldação em redor de um molde/placa molde, no interior de uma caixa metálica.

Após esta operação efectua-se a separação/extracção do molde/placa molde (desmoldação), obtendo-se uma cavidade na areia destinada a receber o metal líquido.

Se o fundido tiver secções ocas, cilíndricas ou de outras formas variadas, é necessário a utilização de machos; estes vão impedir que o metal preencha determinadas áreas produzindo desta forma os ocos como pode ser visto na figura1. O ligante contido na areia de fabricação de machos é endurecido (este é endurecida por aquecimento ou quimicamente).

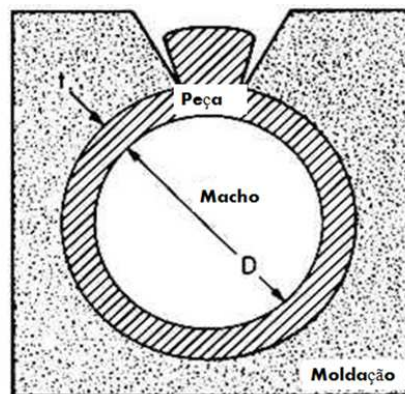


Figura 1 - representação de um macho [5].

Na Oliva1925 são utilizados três processos de produção de machos:

#### a) Processo Shell

É bastante utilizado em ferros fundidos sobretudo em peças pequenas, peças que necessitem de grande resistência ou que bastantes pormenores, conferindo desta maneira um melhor acabamento. Os machos obtidos neste processo são ocos, daí o nome Shell, e com excelente acabamento superficial [1].

#### b) Caixa Quente (Hot Box)

Este processo substitui o anterior e é geralmente utilizado para machos de pequena dimensão. A areia é de sílica e tem um catalisador (aditivo), activado com a temperatura. A percentagem de resina na areia é maior, logo leva a que haja maior libertação de azoto, podendo em último caso dar origem ao aparecimento de poros na peça devido a uma ineficiente secagem do macho [1].

### c) Caixa Fria (Cold box)

É utilizado para machos de maior dimensão, a percentagem de resina na areia é menor, diminuindo a probabilidade de existirem defeitos.

Após colocação dos machos (caso necessário), juntam-se entre si as duas meias moldações, através dum conjunto de pernos guia, ficando a moldação pronta para o vazamento [1].

O processo de fundição em areia verde está sucintamente descrito na figura 2:

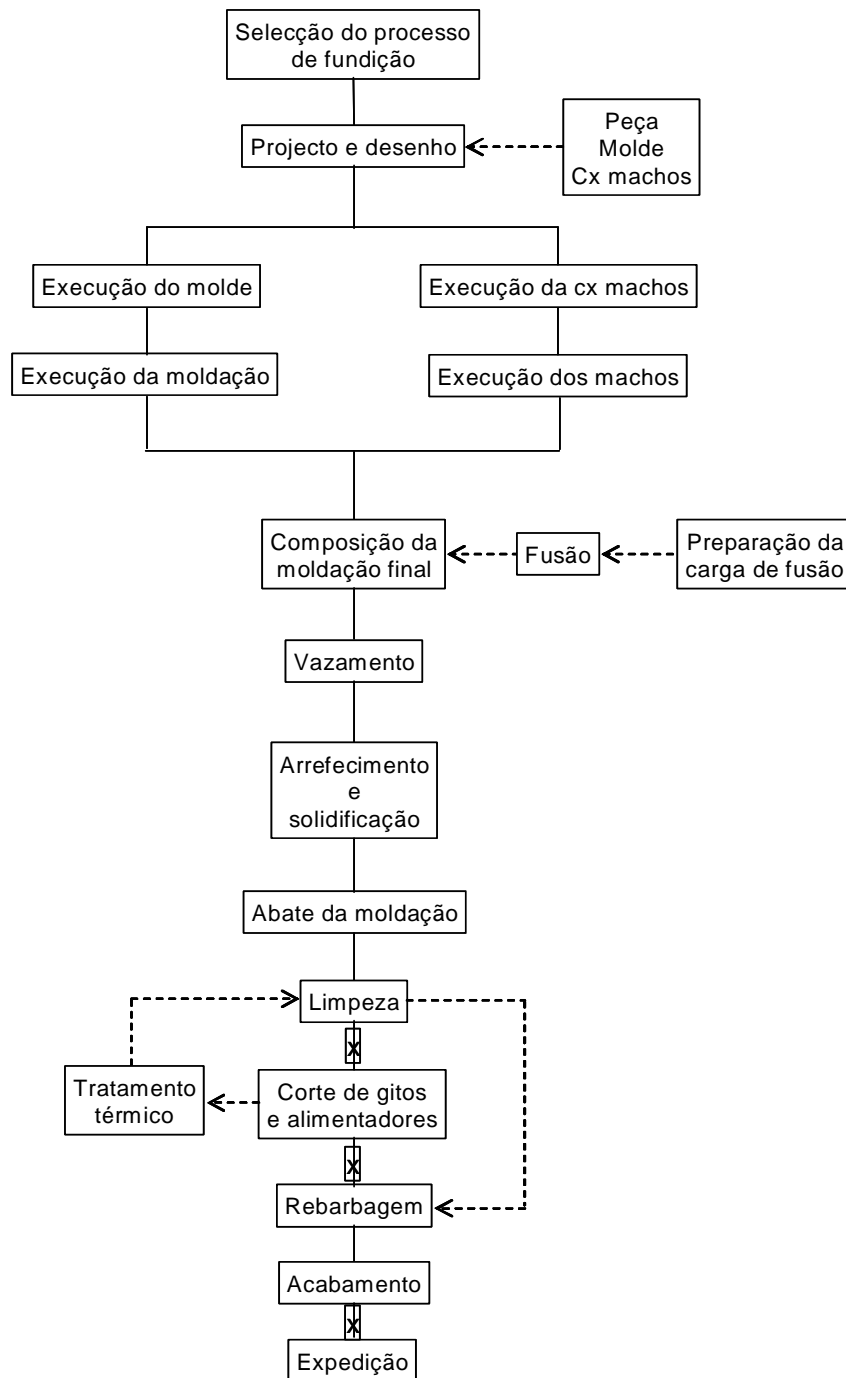


Figura 2 - Fluxograma de um processo típico de fundição, e pontos típicos de controlo

### 2.1.3. Sistema de alimentação

O arrefecimento de um metal, desde a sua temperatura de fusão até à temperatura ambiente, é normalmente acompanhado por uma redução de volume significativa, que em fundição se designa por contracção. Esta contracção ocorre em três estágios diferentes, e assume designações diferentes: contracção no estado líquido, contracção de solidificação, e contracção no estado sólido [5,6].

A contracção no estado sólido é responsável pelas dimensões finais das peças, podendo ainda ser responsável por possíveis fissuras que surjam nas mesmas. A contracção verificada na mudança de estado é responsável por defeitos de solidificação, como cavidades internas ou cavidades com ligação ao exterior, de dimensões consideráveis, habitualmente designados por rechupes. Saliente-se que estas cavidades não devem ser confundidas com porosidades, que habitualmente são de pequena dimensão, ainda que visíveis a olho nu, sendo geralmente causadas por gases dissolvidos no metal, ou apenas inclusões não metálicas, como grãos de areia, escória ou partículas de material refractário. Devido a estes factores são utilizados alimentadores, cujo funcionamento é explicado de seguida.

O primeiro metal que solidifica é aquele que entra em contacto com as paredes da cavidade moldante; isto advém do facto de estas estarem mais frias. A falta de metal neste caso vai ser notada no interior como se pode ver na figura 3.

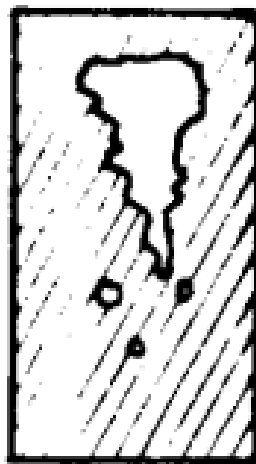


Figura 3 - Representação de um rechupe [5].

O objectivo do uso de alimentadores é assegurar o fornecimento de metal liquido á peça, compensando desta forma a contracção no estado liquido sofrida pelo metal durante a solidificação.

Como pode ser verificado na figura 4:

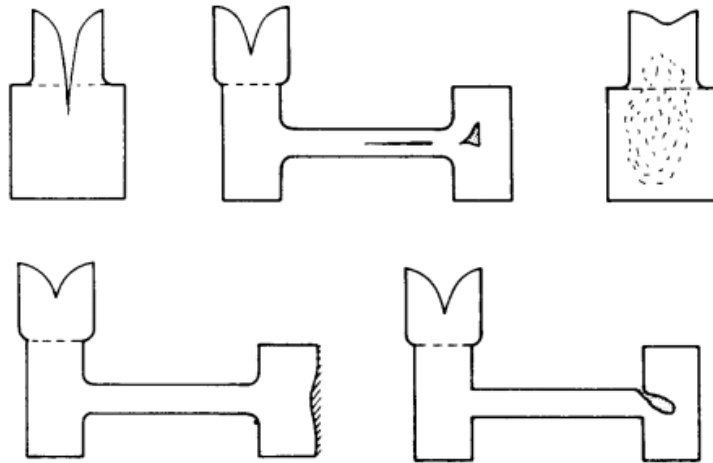


Figura 4 - Contração sofrida pelo metal [5].

No entanto não basta o simples facto de colocar alimentadores no projecto para garantir a sanidade da peça, a localização e dimensão destes deve ser cuidadosamente estudada [5,7].

Para isso o fundidor deve assegurar:

- que a solidificação da peça seja dirigida de forma a que não fiquem bolsas de metal líquido isoladas na peça;
- a promoção de uma solidificação dirigida;
- que o alimentador seja a última zona a solidificar (critério de temperatura de solidificação ou módulo);
- que o alimentador tenha um volume capaz de fornecer a quantidade de metal suficiente para compensar a contração (critério do volume de solidificação).

O cálculo dos alimentadores deve ser executado satisfazendo três simples regras [3,5]:

- 1º Regra dos módulos
- 2º Regra da contração volumétrica
- 3º Regra do raio de acção

#### 1º Regra dos módulos

Fixa as dimensões dos alimentadores atendendo à relação entre os tempos de solidificação da peça (ou das partes em que a peça se possa dividir) e o do alimentador.

O tempo ( $t$ ) necessário para que uma peça solidifique até uma espessura está relacionado com o módulo de arrefecimento da secção ( $M_{\text{solidificação}}$ ) e factor de forma ( $\omega$ ) [3,5]:

$$M_{\text{Solidificação}} = \omega \cdot M_{\text{geométrico}}$$

$$t = k M_{\text{Solidificação}}^2$$

onde K varia com o material e o tipo de moldação, sendo constante para cada caso, e chama-se constante de solidificação.

Definindo o módulo de uma peça,  $M_p$ , como o quociente entre o seu volume,  $V_p$ , e a superfície de arrefecimento,  $S_p$ , ou seja:

$$M_p = \frac{V_p}{S_p}$$

## 2º Regra da contracção volumétrica

Em último lugar deve verificar-se se o volume do alimentador compensa a contracção volumétrica de solidificação global da peça [3,5].

Sabendo o coeficiente (R) de contracção volumétrica, pode calcular-se a contracção da peça da forma seguinte:

*Contracção da peça ou parte da peça = coeficiente de contracção volumétrico x volume da peça*

$$V_c = R V_p$$

Por outro lado nem todo o metal dos alimentadores pode ser escoado para a peça. Algum fica solidificado nas paredes do alimentador, pelo que se pode definir um rendimento (Q) para o alimentador, rendimento esse que depende do material e da forma do alimentador. No caso de alimentadores sem camisas exotérmicas ou isolantes apenas 1/6 do volume do alimentador é utilizado ( $Q \approx 6$ ).

Como  $\frac{V_a}{Q} \geq V_c$ , então o volume do alimentador será:  $V_a \geq Q R V_c$

Normalmente o volume do alimentador excede o necessário, minimizando desta forma a probabilidade do aparecimento de defeito. Caso contrário basta aumentar ao volume do alimentador para respeitar esta regra, desde que as regras anteriores não deixem de ser respeitadas pelo aumento de volume do alimentador.

## 3º Regra do raio de acção

O raio de acção de um alimentador pode definir-se como a zona que é afectada pela sua aplicação, já tendo sido previamente referido [3,5].

O raio de acção depende fortemente do tipo de material, da espessura da zona a alimentar e da forma como solidifica a liga.

Uma forma expedita de estimar o raio de acção é recorrer ao auxílio de gráficos, que mostram a variação do raio de acção com a espessura para cada material. Também se podem estabelecer equações do tipo  $B = C\sqrt{E}$  com:

B - raio de acção;

C - constante que depende do material usado e do tipo de moldação e do tipo de peça (Anexo B);

E - espessura da peça na zona a alimentar.

Numa peça com zonas de diferentes espessuras sabe-se que as zonas de maior espessura alimentam as de menor, e aquelas serão alimentadas pelo alimentador [3,5].

É necessário verificar se a zona de maior espessura tem raio de acção capaz de alimentar toda a zona de menor espessura, e caso contrário colocar alimentadores nas zonas que poderiam ficar sem alimentação.

Deve determinar-se para cada caso o perímetro ou comprimento da zona a alimentar. O número de alimentadores deve ser tal que a soma dos seus raios de acção seja capaz de cobrir todo o perímetro a alimentar.

#### 2.1.4. Sistema de enchimento

No processo de fundição, o metal líquido entra na cavidade da moldação através de um sistema de canais que constituem o designado *sistema de enchimento ou gitagem*. Mais do que um conjunto de canais de transporte de metal líquido, o sistema de enchimento garante que o escoamento de metal se efectue de forma controlada, condição absolutamente necessária, mas não suficiente, para obtenção de fundidos isentos de defeitos. Para desempenhar cabalmente as suas funções, o sistema de enchimento não pode ser concebido de forma arbitrária, mas sim objecto de projecto cuidadosamente estudado, cujo dimensionamento tem como base principal os conceitos da mecânica de fluidos [3,4,8].

Para além de conduzir o metal à cavidade moldante, o sistema de enchimento regula a forma e velocidade como o metal entra nessa cavidade, impedindo que o enchimento seja efectuado de forma turbulenta, e evitando o aparecimento de um conjunto de defeitos típicos de escoamentos turbulentos e descontrolados. Por outro lado, o sistema de enchimento deverá ser capaz de reter inclusões não metálicas que possam ter entrado na moldação durante o vazamento.

### **Determinação do sistema de enchimento [3,8]**

A determinação do sistema de enchimento faz-se com base nos pontos anteriormente abordados, e utilizando tabelas.

Para fazer um projecto de um sistema de alimentação é necessário ter em consideração seguintes pontos:

#### **a) Fixar a orientação da peça na posição de vazamento, tendo em conta:**

- o processo de fabrico da moldação
- tipo de machos a usar
- material usado nas moldações
- geometria da peça
- metal a vazar

#### **b) Cálculo prévio do sistema de alimentação**

Os alimentadores fazem parte do conjunto que é necessário encher, e consideram-se como fazendo parte da peça.

$$V_T = V_p + V_a \text{ (volume total do conjunto = volume da peça + volume dos alimentadores)}$$

$$P_T = P_p + P_a \text{ (massa total do conjunto = massa da peça + massa dos alimentadores)}$$

#### **c) Definir o percurso do metal e o modo de enchimento, em função do tipo de liga**

- ligas oxidáveis - vazamento em nascente;
- ligas não oxidáveis - em queda directa (peças simples);
  - em queda a meia altura (peças de média série atacadas pelo plano de junta);
  - em nascente (quando há risco de erosão).

#### **d) Definir o modo de ataque:**

- pelas partes maciças - para peças de ligas que solidificam em camada fina (aços de 0,2 a 0,3% de carbono, cobre, cupro-alumínios, latão 60/40, ferro fundido nodular, ferro fundido maleável, liga de alumínio 12% de silício);
- pelas partes finas - para ligas que solidificam em camada espessa, utilizando ataques numerosos (ferro fundido cinzento, bronzes, ligas leves).

**e) Escolher o escalonamento /relação de gitagem**

- ligas pouco sensíveis à oxidação no estado líquido deve usar-se o escalonamento 1-1-1, de secção decrescente, por ser mais económico;
- ligas sensíveis à oxidação aconselha-se a redução de velocidade do metal à entrada da cavidade 1-1 , 1-1,2.

**f) Determinar o tempo de enchimento**

É necessário conhecer a espessura de referência. Deve ser a menor espessura da peça que apresente extensão apreciável.

**g) Calcular as secções do sistema sabendo:**

- o volume da peça mais o dos alimentadores -  $V_T$ ;
- a altura metalostática H (enchimento em queda), ou as alturas metalostáticas  $H_i$  e  $H_f$  (enchimento em nascente);
- o tempo de enchimento;
- o coeficiente de perda de carga devido à forma do sistema;
- a secção do fundo do canal de descida,  $S_d$ , determina-se:

Admitindo o canal de descida cheio, e estabelecendo o equilíbrio entre a superfície livre do metal na bacia de vazamento e o fundo do canal de descida, obtém-se a partir da lei de conservação de energia, a expressão para a velocidade atingida pelo líquido [3,8]:

$$v = \sqrt{2gH}$$

Por outro lado, sabido o volume total a encher,  $V_T$ , e o tempo disponível para o enchimento,  $T_e$ , pode calcular-se o caudal efectivo de enchimento [3,8]:

$$Q = \frac{V_T}{T_e}$$

Este caudal atravessa a secção do canal de descida à velocidade  $v$ , e portanto:

$$Q = v S_d = S_d \sqrt{2gH}$$

combinando estas expressões obtém-se:

$$S_d = \frac{V_T}{T_e} \frac{1}{\sqrt{2gH}}$$

válida para sistemas de enchimento em queda, em que não sejam desprezadas as perdas de carga.

As perdas de carga podem ser introduzidas afectando esta expressão de um factor B.

No enchimento em nascente a velocidade no canal diminui com a subida de nível, o que implica um caudal variável a atravessar a secção de descida. Uma forma expedita de tratar este problema, em face da dificuldade que a variação geométrica da peça geralmente apresenta, é tomar para nas expressões anteriores como velocidade de enchimento a média das velocidades inicial,  $v_i = \sqrt{2gH_i}$ , e final  $v_f = \sqrt{2gH_f}$ , onde resulta [3,8]:

$$S_d = \frac{V_T}{T_e} \frac{B}{\sqrt{2g}} \frac{2}{(\sqrt{H_i} + \sqrt{H_f})}$$

- a secção do canal de distribuição obtém-se a partir do escalonamento:

$$\text{se: } \frac{S_c}{S_d} = \alpha, \text{ então } S_c = \alpha S_d$$

- a secção dos ataques também se obtém a partir do escalonamento:

$$\text{se: } \frac{S_a}{S_d} = \beta, \text{ então } S_a = \beta S_d$$

## 2.2. Software de Simulação

Este tipo de software ajuda o utilizador a visualizar melhor potenciais defeitos que possam ocorrer durante o vazamento e solidificação. Podendo encurtar o tempo de actuação mediante um certo defeito e poupando tempo e dinheiro em processo de ensaios de vazamentos. A intenção deste programa é ser utilizado por técnicos de processo como uma ferramenta diária, já que apresenta duas características chave: facilidade de utilização e rapidez de cálculo. Este tipo de software pode ter duas vertentes: preventiva, quando utilizado durante a fase de projecto, para prever defeitos potenciais e consequente diminuído o *time to market* (tempo desde o início do projecto ate a produção em serie) das peças produzidas, ou curativa na medida em que este pode ser utilizado no processo de tentativa/erro diminuindo o tempo e recursos gastos neste processo [9,10].

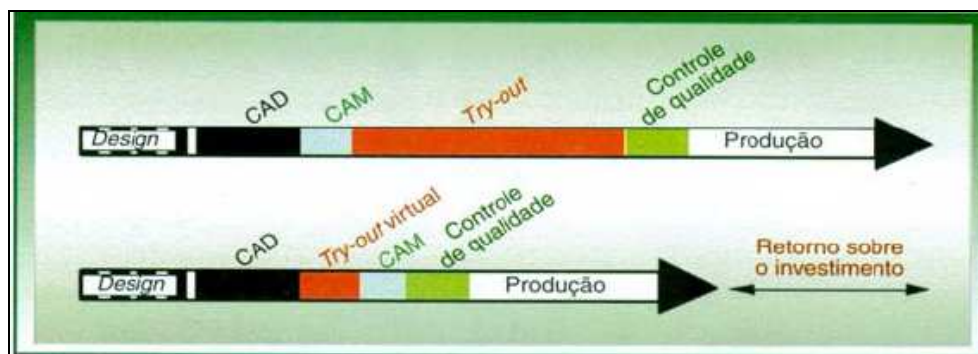


Figura 5 - Exemplificação do ganho de tempo obtido com um try-out virtual por simulação [11].

### 2.2.1. SOLIDCast

O SOLIDCast é um software usado na área da fundição, este software simula transferências de calor no processo de solidificação. Um dos seus módulos adicionais FLOWCast simula todo o comportamento físico e térmico do metal líquido a quando o seu vazamento. Uma vez que este software apenas tem em consideração transferências de calor, o mesmo não tem capacidade de prever defeitos causados por inclusões e gases, areias ou escória, e também não consegue simular estruturas esperadas [12,13,14].

A versão deste software utilizada nesta tese foi a versão 7.0.2, este programa é capaz de simular diversos tipos de ligas em diversas situações. O núcleo de cálculo deste software é baseado no método das diferenças finitas. Este tipo de motor de funcionamento tem como base uma malha composta por elementos unitários, todos eles com as mesmas dimensões. A simulação consiste numa iteração sucessiva de transferências de propriedades (calor) entre um elemento e os seus elementos vizinhos. O programa vai dividir o projecto tridimensional em pequenos elementos (cubos) ao longo dos eixos de x, y e z [15]. Calculando posteriormente cada unidade e a interacção desta com as unidades vizinhas. Quanto mais pequena e a unidade básica, melhores são os resultados óbitos, mas mais capacidade de processamento é necessária, sendo imperativo atingir um compromisso entre estes dois factores [12,13,14].

### Materiais e Moldação

O programa tem a sua própria base de dados de materiais de moldação e ligas utilizadas em fundição, cerca de 200 materiais, sendo possível modificar ou adicionar materiais a esta base de dados como se pode ver na figura 6 [12,13].

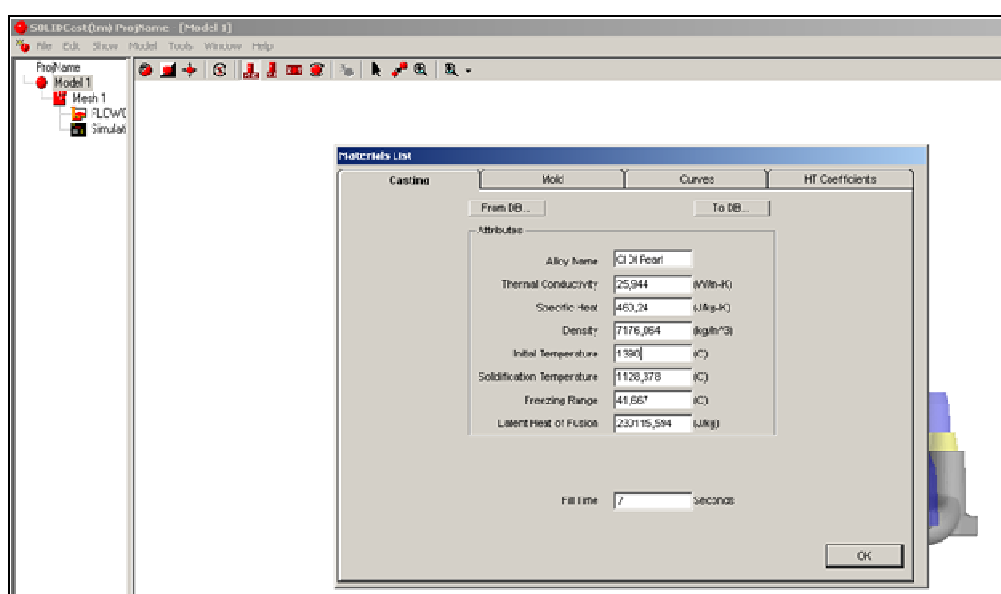


Figura 6 - Menu de escolha do material.

As propriedades requeridas para uma liga são: condutividade térmica, calor específico, densidade, calor latente de fusão, temperatura de sólidos e o intervalo de solidificação. É ainda considerada uma curva de arrefecimento para cada liga, com base na temperatura vs. entalpia. As curvas utilizadas podem ser as de base, ver figura 7, mas também podem ser ajustadas manualmente para cada liga, por exemplo, incluir a influência do sobreaquecimento na germinação das fases. O sistema permite o cálculo das curvas de arrefecimento e alteração volumétrica dos ferros fundidos (nodulares e lamelares), com base na especificação no teor de carbono e silício [12,13].

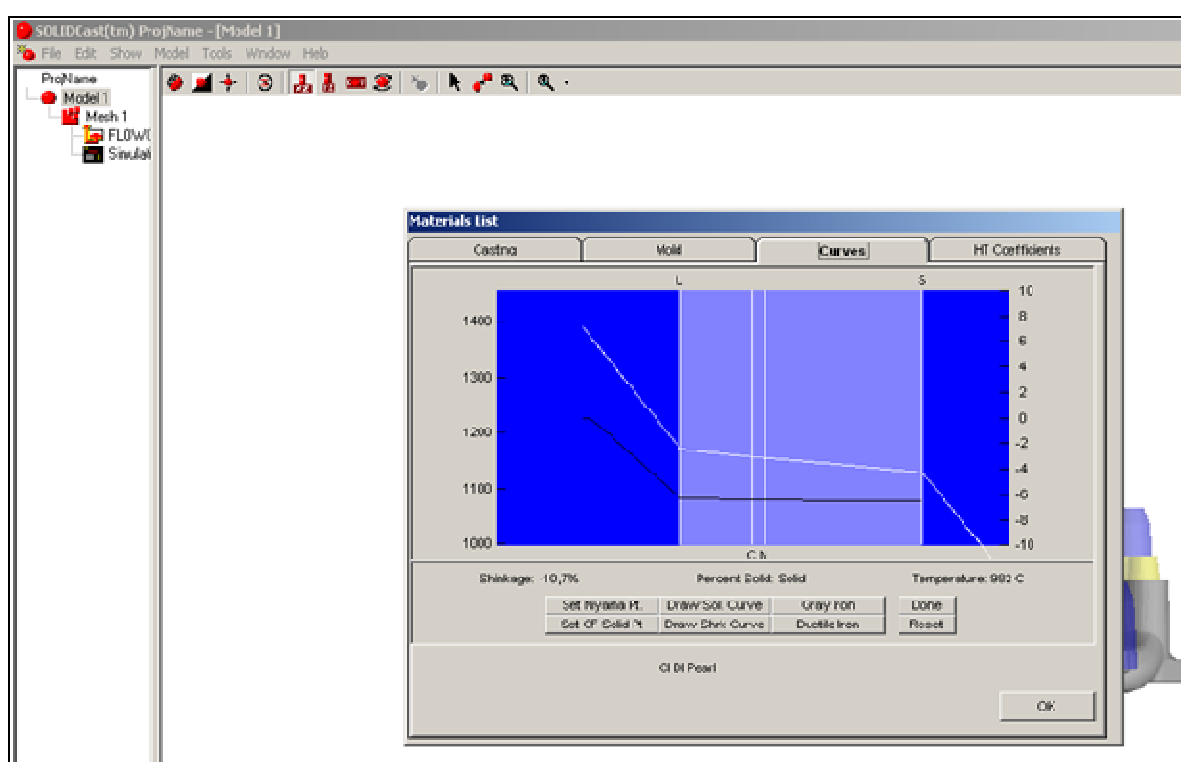


Figura 7 - Exemplo de uma curva de arrefecimento e solidificação associada ao material.

Os materiais da moldação podem ser de vários tipos: os mais utilizados são aqueles em que não ocorre nenhuma alteração química ou de fase, durante a solidificação. Os materiais exotérmicos, como aqueles encontrados nas camisas, podem ser simulados especificando a temperatura de ignição, temperatura de queima, tempo de queima e as propriedades térmicas após a queima; estes parâmetros são simulados nó a nó.

A figura 8 mostra as propriedades típicas de uma camisa exotérmica, estas propriedades podem ser alteradas a qualquer momento [12,13].

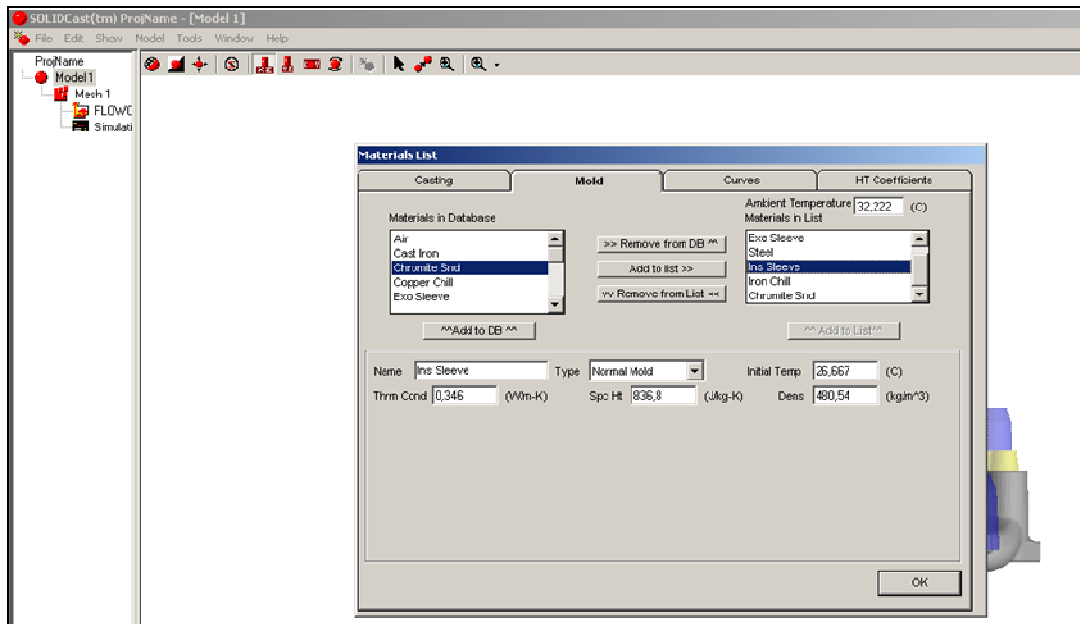


Figura 8 - Escolha de materiais da moldação.

### Transferências de calor

O sistema tem em conta os coeficientes de transferência de calor de várias formas, ver figura 9, dependendo do processo. Para a maioria dos processos que utilizam matérias de moldação de baixa condutividade térmica (fundição em areia), os coeficientes de transferência de calor internos (material para material) não são significativos na solução e podem ser considerados insignificantes pelo utilizador. Só são definidos os valores de transferência de calor por convecção do material da moldação para o meio ambiente [12,13].

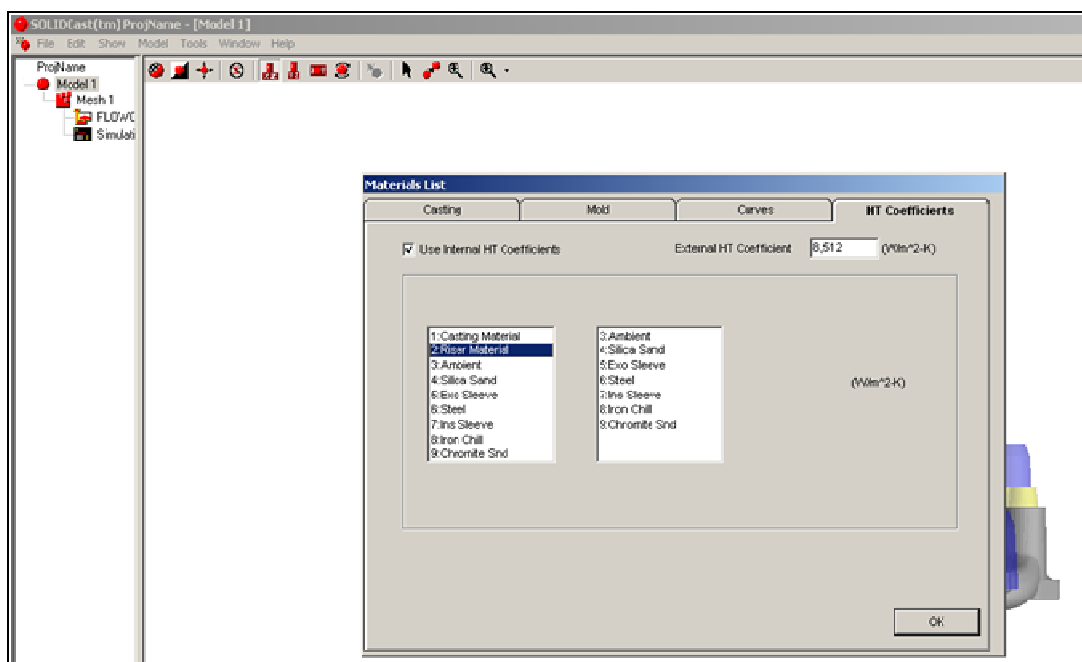


Figura 9 - Menu para escolha dos coeficientes de transferência de calor.

Para processos em moldes metálicos, os coeficientes internos de transferência de calor são de extrema importância e podem ser incluídos na simulação através de especificação dos valores entre os diversos materiais

### Malha

O SOLIDCast contém o seu próprio módulo de geração de malhas. A malha é gerada como uma série de elementos cúbicos, o que significa que o malhamento é completamente automático, ver figura 10 e 11 [12,13,15,16].

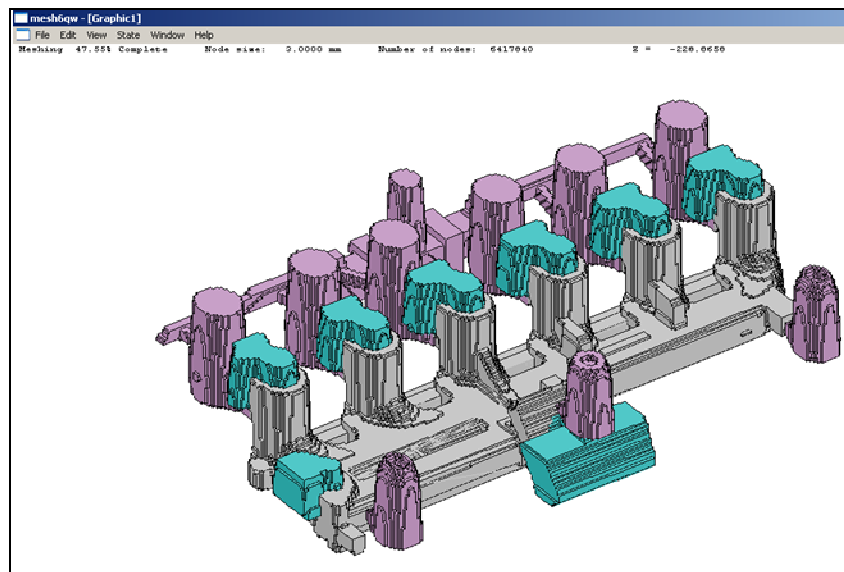


Figura 10 - Malha gerada pelo SOLIDCast mostrando a peça, alimentadores e machos.

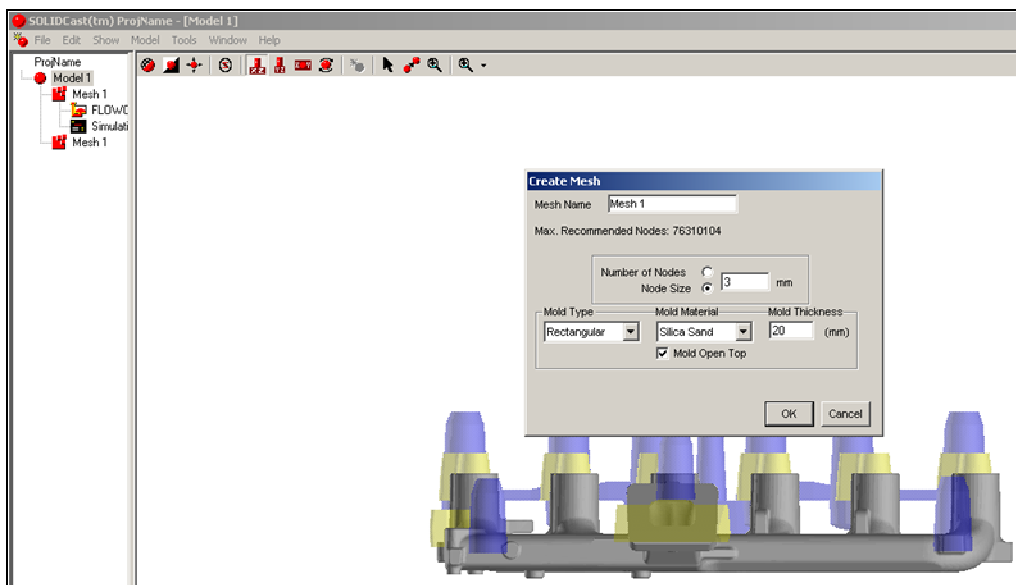


Figura 11 - Menu de criação da malha.

O utilizador pode especificar ou o tamanho dos elementos ou o número total de elementos na malha sendo o número máximo de elementos de malha limitado pela

memória RAM do computador. Não podendo no entanto atribuir diferentes parâmetros de malha a diferentes zonas da peça, levando muitas vezes o utilizador a ter que utilizar um parâmetro de malha mais grosseiro que o pretendido, e podendo desta forma afectar negativamente os resultados obtidos [9,15].

### Enchimento e Solidificação

O SOLIDCast permite ao utilizador indicar o ponto de entrada do metal líquido no molde e o tempo necessário para o encher. Todos estes cálculos são efectuados para prever enchimentos, perdas de calor do metal líquido, e ganhos de calor do molde durante o enchimento da cavidade de moldação. E são uma solução da equação de Bernoulli para o escoamento de fluidos ao longo de uma linha de fluxo. Este é um método simplificado que possui vantagens na rapidez de solução e na facilidade de utilização. O método de cálculo do enchimento do molde realizado pelo SOLIDCast não é uma solução de escoamento CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que envolve as equações Navier-Stokes para o escoamento de fluidos. Existe um módulo de cálculo CFD para o SOLIDCast que se chama FLOWCast. Este módulo resolve as equações de Navier-Stokes e pode dar informações da temperatura, pressão e velocidade para uma sequência de enchimento [12,13].

Durante o enchimento são apresentadas as temperaturas numa escala de cores, para se ver o desenvolvimento de zonas quentes ou frias, ver figura 12 e 13.

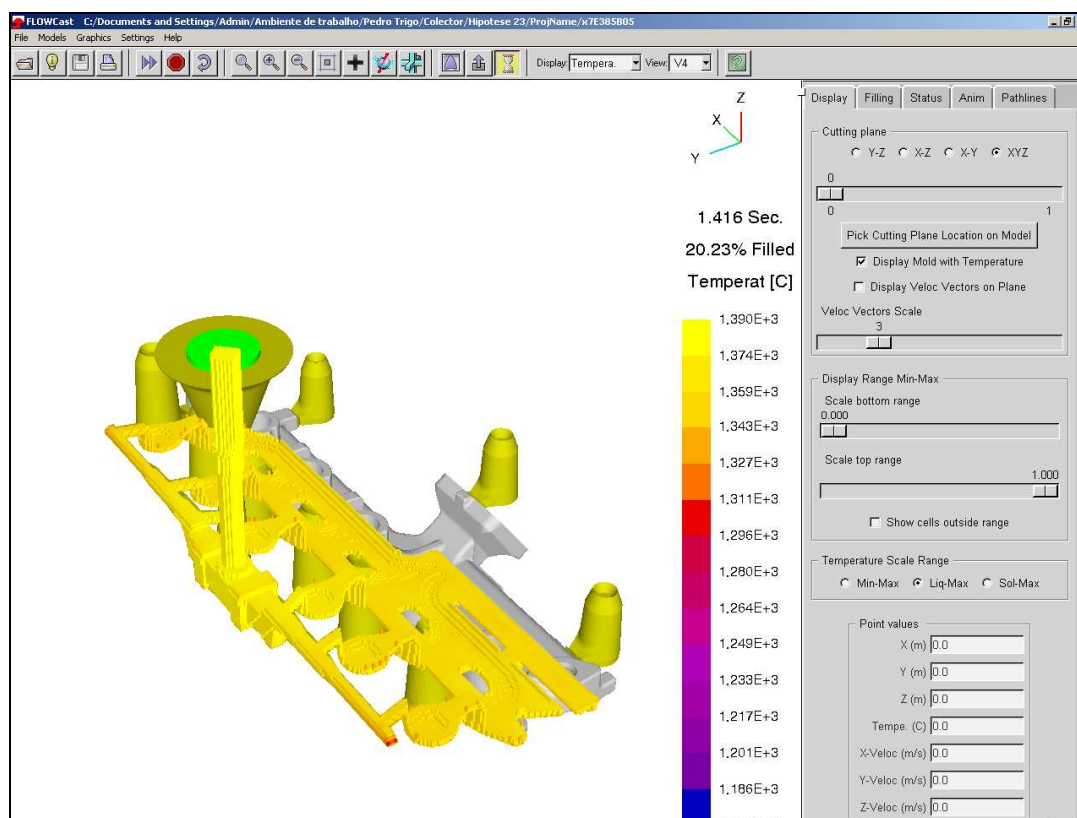


Figura 12 - Representação de temperaturas.

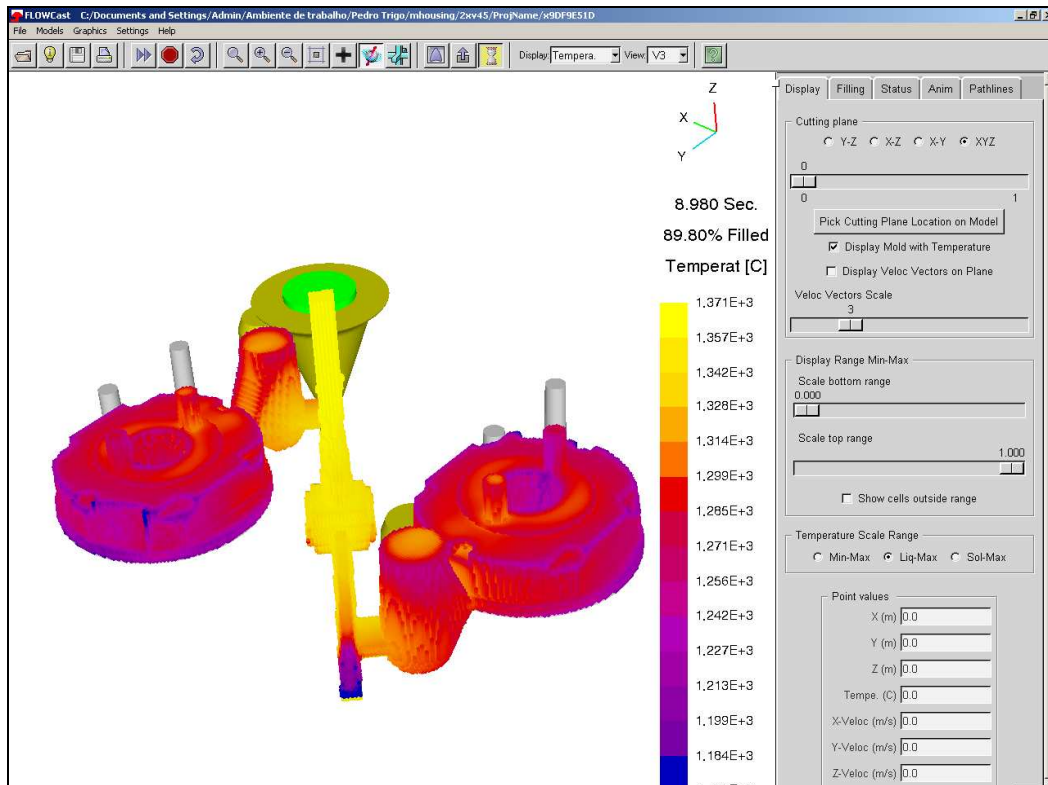


Figura 13 - Representação de temperaturas.

Durante a solidificação, o sistema calcula alterações volumétricas (contrações do metal líquido a medida que solidifica, e no caso dos ferros expansões associadas a precipitação da grafite) e simula o movimento do líquido que ira alimentar a peça em resposta a essa alteração volumétrica, permitindo que o sistema preveja a acção dos alimentadores e a formação de porosidades, ver figura 14.

È possível ver as temperaturas durante o arrefecimento. De referir que a alimentação volumétrica, metal fornecido pelos alimentadores às zonas da peça em contração, é calculada simultaneamente com a temperatura [12,13].

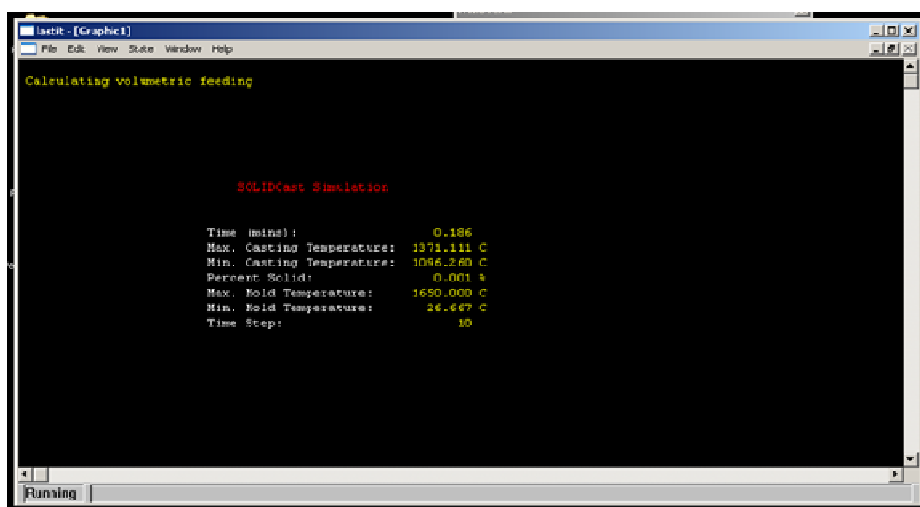


Figura 14 - Progressão da solidificação.

## Visualização de Resultados

O utilizador pode verificar os resultados usando quatro formas de visionamento de dados pós-processados: superfícies tridimensionais, planos de corte bidimensionais, modelos sólidos e superfícies impostas em imagens de modelos sólidos. Ao utilizador é possível também, criar animações mostrando os resultados progressivos da simulação em forma de ficheiros AVI. De entre os parâmetros passíveis de visionamento destacam-se os seguintes [9,12,13].

- Temperatura durante o enchimento e a solidificação;
- Tempo;
  - Líquidus
  - Fracção crítica de sólido
  - 100% Sólido
  - Solidificação Local
- Pontos quentes;
  - Baseados no critério de fracção crítica de sólido
  - Baseados nos pontos 100% solidificados
- Gradiente de temperatura;
- Taxa de arrefecimento;
- Densidade (rechupes);
- Funções diversas;
  - Niyama
  - Micro-porosidade
  - Funções definidas pelo utilizador (mediante programação)

A quantidade de informação gerada é imensa isto porque na prática foi simulada e registada a curva de arrefecimento de cada um dos cubos gerados durante o malhamento).

### ***Material Density***

Este parâmetro de pós-processamento é de extrema importância, pois consegue de forma expedita prever eventuais macro-rechupes que possam existir.

Este refere-se à percentagem de material contido numa determinada célula.

O mesmo resulta de um cálculo onde é tomada em conta a contracção do fundido, e a quantidade de metal líquido disponível durante a solidificação. Áreas cujo metal líquido tenha servido para alimentar outras zonas próximas iram aparecer com um *material density* menor que o resto. Os valores deste podem variar entre 0 e 1, em que 0 representa um vazio total; e 1 representa uma zona preenchida [9,12,13].

Os valores devem ser interpretados da seguinte forma:

Valor = 0	0% Metal	100% Porosidade
Valor = 0.90	90% Metal	10% Porosidade
Valor = 0.99	99% Metal	1% Porosidade

### Optimização de resultados

A simulação é um processo interactivo, que implica um conjunto de simulações para permitir otimizar um sistema inicial, de acordo com objectivos previamente definidos (eliminação de rechupes em zonas críticas, aumento de rendimento de placa, etc)

Uma das grandes vantagens do SOLIDCast é o facto de permitir a importação directa de geometrias CAD 3D, permitindo assim proceder facilmente a alterações geométricas e dos parâmetros do processo.

## 2.3. Desenvolvimento do Produto

A definição de desenvolvimento do produto não é pacífica existindo diversas tentativas de definição, no entanto todas elas começam com uma ideia e acabam com o produto final [10,18]. Entre estes dois pontos é efectuado o desenvolvimento do produto. Para ser mais fácil a compreensão pode-se utilizar como exemplo a possível criação de uma peça de indústria metalúrgica elaborada por fundição.

1. Surge a primeira ideia da peça que de seguida é modelada num software CAD, este passo pode não ser desenvolvido dentro da fundição, exceptuando os casos em que a própria fundição desenvolve produtos (No caso da OLIVA1925 são desenvolvidas internamente gamas de caloríferos).
2. São efectuadas simulações das propriedades mecânicas da peça com software CAE, com os resultados do CAE pode-se otimizar diversos parâmetros. Nesta fase pode-se ainda efectuar um protótipo da peça, que caso sofra alterações manuais pode ser convertido novamente em ficheiro CAD através da digitalização 3D.
3. O desenho da peça é enviado para a fundição, para onde será efectuado o projecto para a produção da mesma. Nesta fase são usadas ferramentas de CAD, para desenho de gítagem e alimentação, e CAE para simulação de parâmetros do processo. Esta fase é de extrema importância pois caso seja bem-feita pode poupar tempo e dinheiro à empresa.

## 2.4. Função de produto

Para dar toda uma nova dinâmica ao processo de produção de peças, foi decidido estudar a função do produto para as peças propostas para este trabalho, estando a empresa desta forma mais apta a discutir com o cliente final hipotéticas alterações ao desenho das peças.

### 2.4.1. Função do colector de gases

O colector de gases tem como função principal o agrupamento dos gases que saem dos cilindros do motor, eliminando desta forma a necessidade de um sistema de escape dedicado para cada cilindro [19,20].

Após a queima do combustível, no interior de cada cilindro, é aberta a válvula de escape ao mesmo tempo que ocorre a subida do pistão, conseqüentemente, dá-se um aumento de pressão que obriga os gases resultantes da queima a saírem. Os gases de cada cilindro (A, B e C) são então conduzidos para o colector de escape que mistura os gases e transporta-os para o sistema de escape (D), ver figura 15.

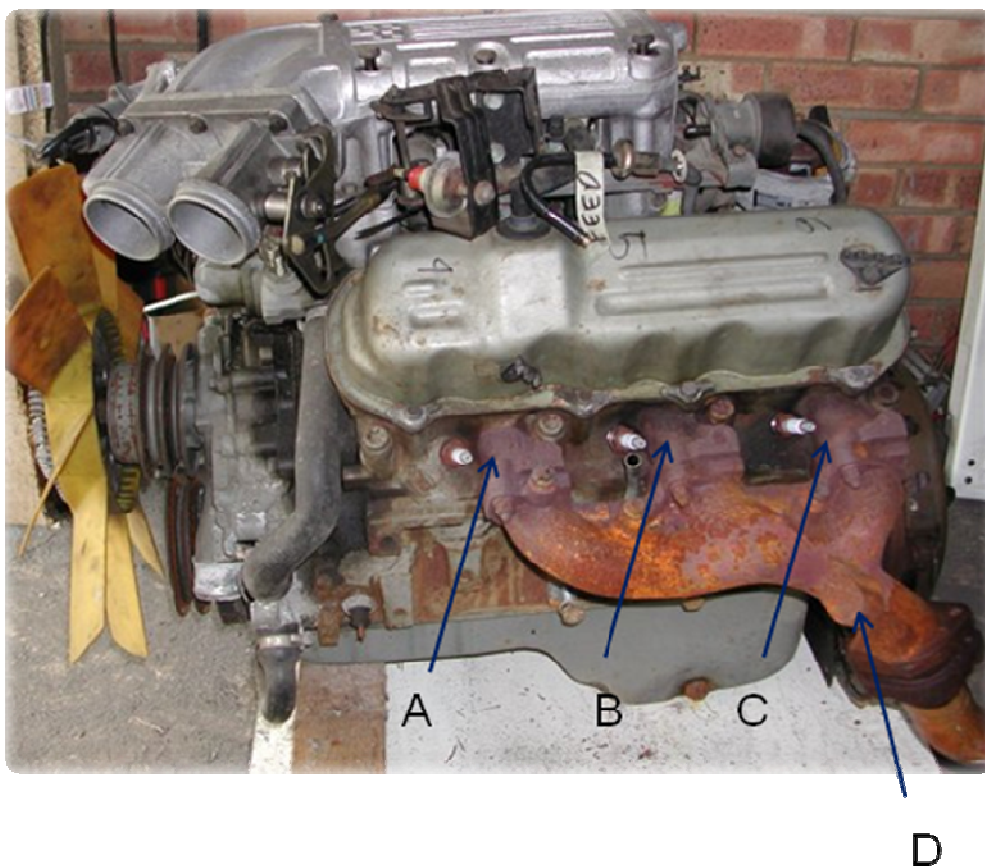


Figura 15 - Esquema de um colector de gases.

Os colectores de escape são habitualmente produzidos em ferro fundido, durante a sua utilização atingem temperaturas entre 200°C e 600°C [21]. Por este motivo os colectores são sensíveis ao derrame de água proveniente de outros pontos do motor, devido a ocorrência de choque térmico, o que pode provocar fissuração. Sendo assim é de extrema importância que este tipo de peças tenham uma composição uniforme, de maneira a evitar zonas de concentração de tensões.



Figura 16 - Colector de escape de um tractor agrícola.

O colector, ver figura 16, é uma peça importante uma vez que qualquer irregularidade no seu interior pode afectar o escoamento dos gases e provocar um desgaste prematuro do motor, as irregularidades podem também actuar como concentradores de tensões e zonas de maior sensibilidade à corrosão [19,20,21].

#### 2.4.2. Função do *Magnet Housing*

Este tipo de peça é utilizado com estrutura de travões magnéticos, por isso para compreender a função desta peça é necessário compreender o funcionamento do travão em si.



Figura 17 - Travão magnético.

O funcionamento deste tipo de travões baseia-se no campo magnético produzido pelo íman (geralmente ímanes de grande potência como Niodimio) aproveitando este para oferecer resistência ao movimento de outra peça [21,22].

A principal vantagem de serem utilizados travões magnéticos é que não existe contacto directo entre o travão e a parte a ser travada, diminuindo desta forma o desgaste da peça e anulando quase por completo a probabilidade de falha deste tipo de travões. Outra das vantagens deste tipo de equipamento reside no facto de não ser necessário qualquer tipo de alimentação eléctrica para o seu funcionamento, sendo este tipo de travões comumente preferido para travões de emergência de elevadores, montanhas-russas e para travões de sistemas de produção industriais [21,22].

Devido ao seu princípio de funcionamento é de extrema importância que o ferromagnetismo dos componentes seja garantido. É também de extrema importância que as *magnet houses* estejam isentas de rechupes uma vez que estes vão perturbar a rigorosa calibração dos travões, este tipo de defeitos altera o campo magnético [21,22].

### 3. Procedimentos experimentais

Para a realização das simulações de enchimento e solidificação apresentadas ao longo deste trabalho foi utilizado o software SOLIDCast 7.0.2 e o seu modulo de expansão FLOWCast 7.0.0 para simular solidificação e enchimento respectivamente.

As simulações foram realizadas num computador do tipo PC (*Personal Computer*) com a seguinte configuração:

- Processador AMD Athlon 64bits 3800+
- 2Gigabytes de memoria RAM DDR2
- Disco S-ATA 120 GB
- Motherboard NForce Series 3
- Placa Gráfica ATI Radeon 9600

## 4. Resultados Colector

Durante a realização deste estágio o departamento de Engenharia de Produto desenvolveu um projecto de reengenharia sobre a placa-molde dos colectores, no qual a simulação assistida surgiu como parceiro importante. Este projecto visava reduzir o número de peças por caixa de duas para uma, sendo que a diminuição de rentabilidade seria compensada com: 1) a diminuição do nível de refugo interno; 2) aumento do rendimento económico da peça (eliminando o uso de camisas exotérmicas, o uso de seis machos de pequenas dimensões, aumentando a cadência de moldação, etc.), nesta fase o software de simulação tornou-se uma ferramenta crucial pois permitiu testar toda uma panóplia de situações sem necessidade de efectuar qualquer alteração na placa molde.

### Escolha de parâmetro de pós-processamento

Uma vez que o principal defeito encontrado nesta peça era o macro-rechupe, o parâmetro de pós-processamento recomendado para analisar este tipo de defeito é o *material density* [9,12,13]. No entanto surgiu a dúvida de que valor utilizar dentro da gama recomendada para ferros fundidos (0,99 a 0,995). Para isso foram realizadas simulações com a situação actual de alimentação e gitagem praticada pela empresa. Os parâmetros de simulação usados são apresentados na tabela I e os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 18 a 24.

Tabela I - Parâmetros de simulação.

Temperatura	1390 °C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.995 a 0,990
Tempo de Vazamento	12seg
Camisas	Propriedades Empresa 1
Condutividade Térmica	0,65 W/mK
Calor específico	1500 J/KgK
Densidade	720 Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de Queima	1650°C
Tempo de Queima	3min
Temperatura de Ignição	600°C

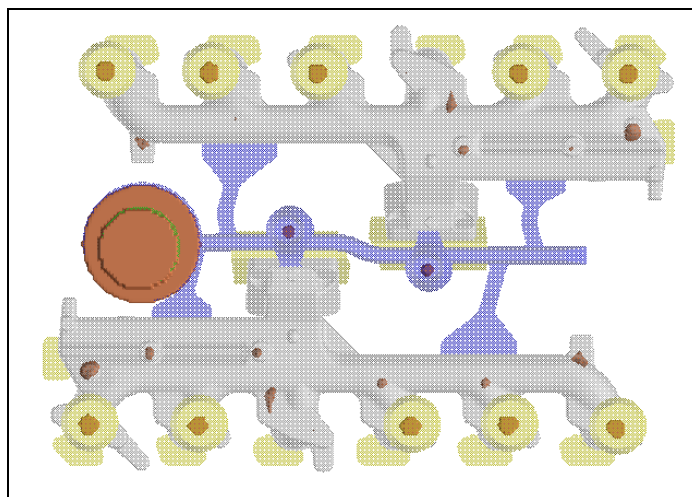


Figura 18 - Resultados obtidos com o parâmetro *material density* a 0,990.

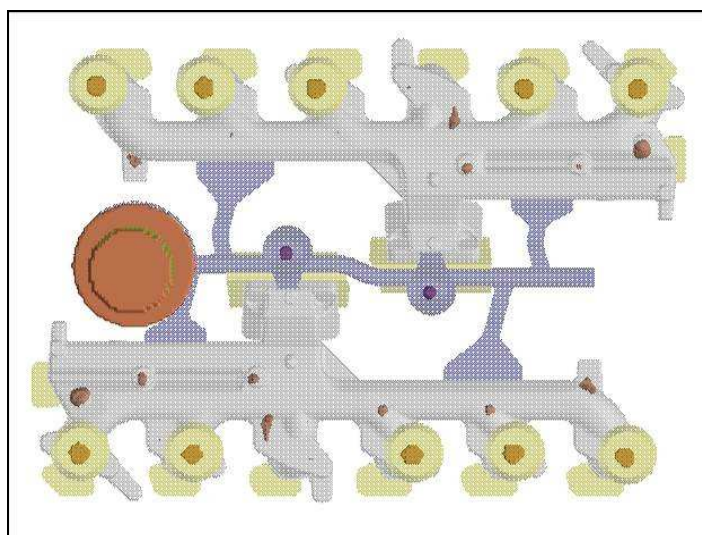


Figura 19 - Resultados obtidos com o parâmetro *material density* a 0,991.

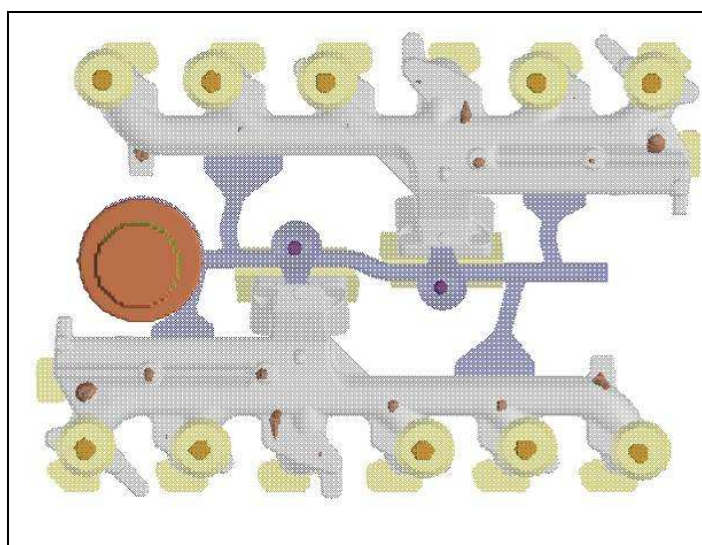


Figura 20 - Resultados obtidos com o parâmetro *material density* a 0,992.

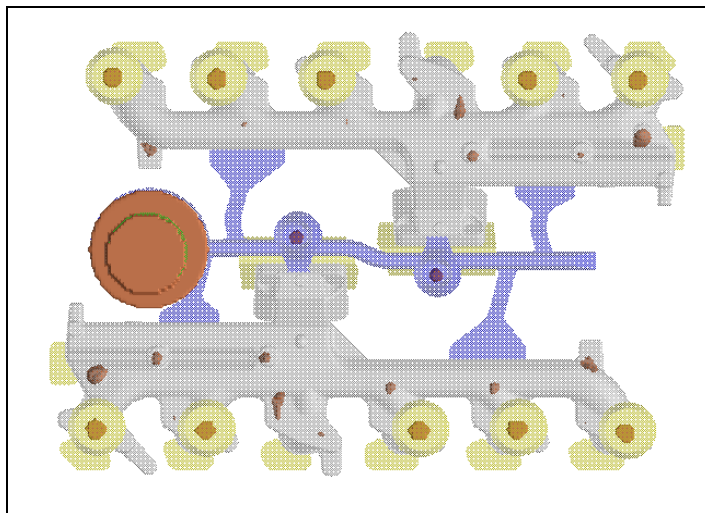


Figura 21 - Resultados obtidos com o parâmetro material density a 0,993.

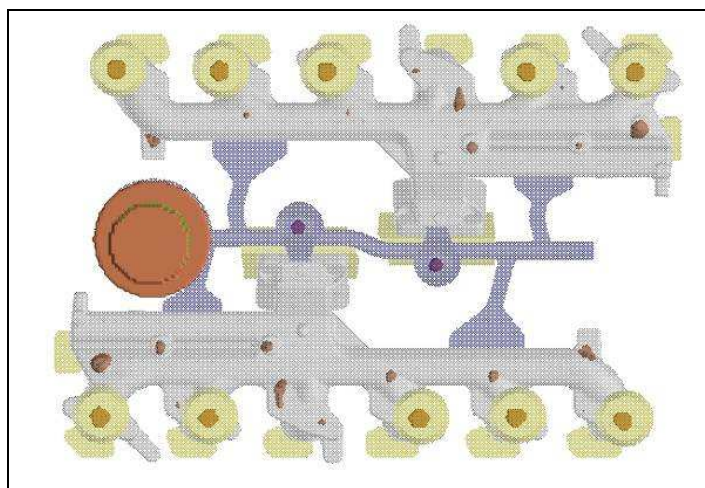


Figura 22 - Resultados obtidos com o parâmetro material density a 0,994.

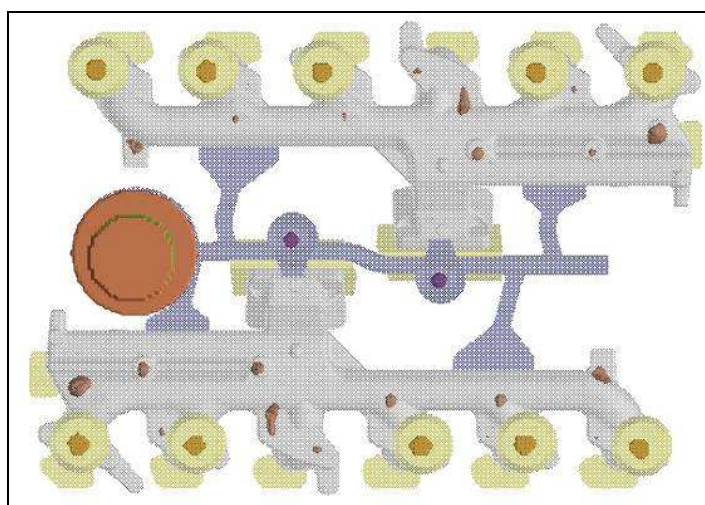


Figura 23 - Resultados obtidos com o parâmetro material density a 0,995.

Após terem sido obtidos resultados para toda a gama de valores sugeridos, passou-se a comparação de resultados. Para maior facilidade de compreensão apenas foram comparados os extremos da gama com os resultados reais.

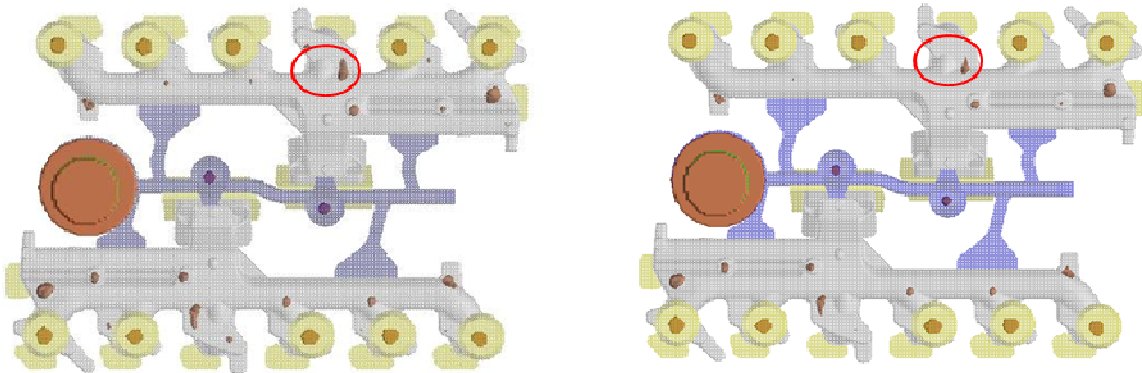


Figura 24 - Comparação de resultados obtidos no parâmetro *material density* 0,995 à esquerda e 0,990 à direita.

Como se pode verificar, o macro rechepe realçado com o *material density* a 0,995 não é verificado com o mesmo a 0,990. Comparando estes dados com a realidade, figuras 25 e 26, verifica-se que o valor mais indicado para análise de situações futuras é o de 0,990.



Figura 25 - Corte num colector produzido na Oliva1925.



Figura 26 - Detalhe dum colector produzido na Oliva1925.

Convém referir que apesar de se poderem verificar alguns rechupes na peça, estes são aceitáveis pelo cliente, desde que não se encontrem nas zonas críticas assinaladas na figura 27.

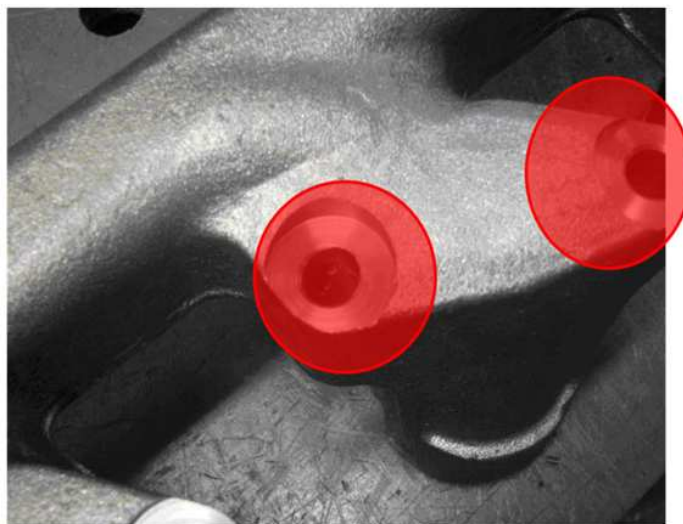


Figura 27 - Zonas críticas do colector.

#### Estudo de pontos quentes da peça

A utilização do software foi iniciada com um estudo dos pontos quentes do colector, este estudo foi realizado utilizando um novo wizard contido no programa.

Tabela II - Parâmetros da simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	200000 nós
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
Material Density	0.990
Tempo de Vazamento	Não aplicável

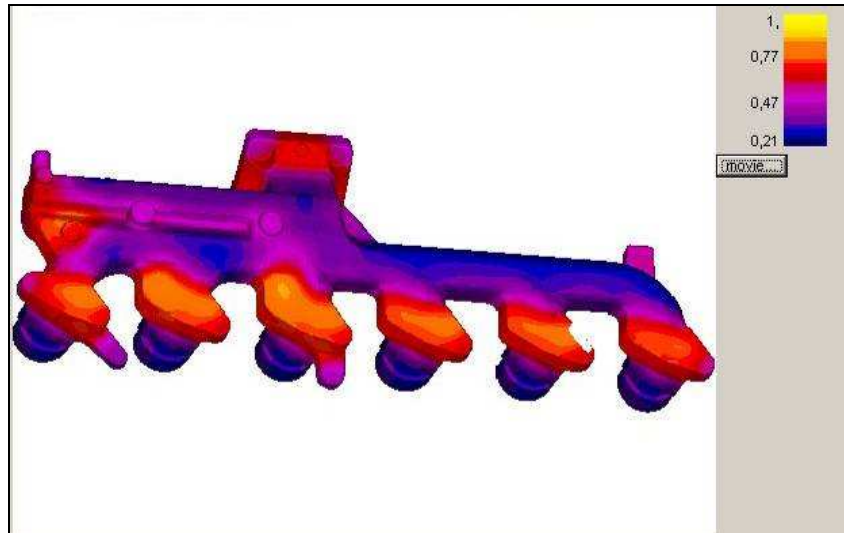


Figura 28 - Resultados obtidos dos pontos quentes do colectora.

Posteriormente foram obtidos resultados referentes ao parâmetro *material density*. Parâmetro este que nos indica as zonas onde existe uma maior probabilidade do aparecimento de rechupes.

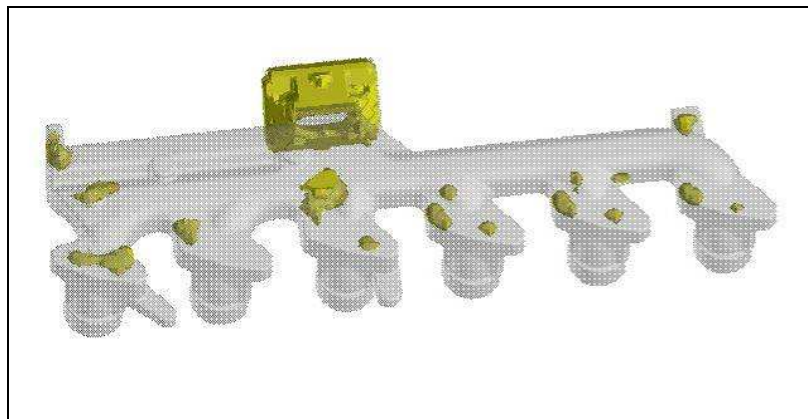


Figura 29 - Representação do parâmetro *material density* no colectora.

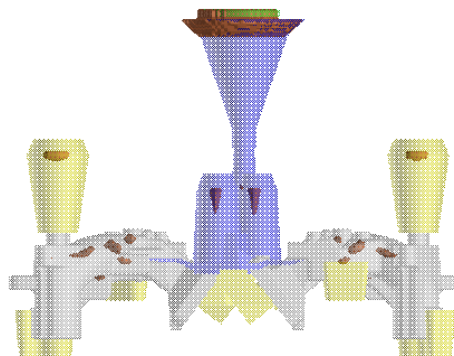
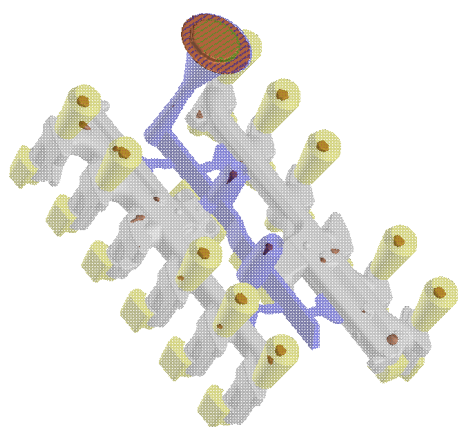
Resolveu-se então testar a situação de alimentação e gitagem praticada actualmente na empresa.

### Validação da situação actual

Foi simulada a situação actual, com o intuito de validar os resultados e afinar parâmetros para simulações futuras. Nesta situação toda a alimentação e gitagem foi calculada tendo por base parâmetros teóricos previamente descritos. Na tabela III são apresentados os parâmetros utilizados nesta situação.

Tabela III - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	12seg
Camisas	Propriedades Empresa 1( )
Condutividade Térmica	0,65 W/mK
Calor específico	1500 J/KgK
Densidade	720 Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de Queima	1650°C
Tempo de Queima	3min
Temperatura de Ignição	600°C



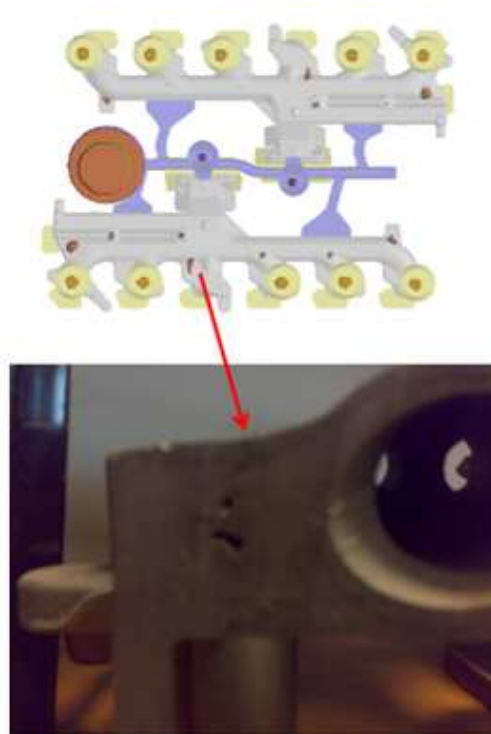


Figura 30 - Resultados obtidos na simulação, e comparação com a situação real, este rechupe é aceite pelo cliente uma vez que não se encontra em zona crítica.

Segundo testemunhos da empresa e através da observação da figura 30 estes resultados estão fortemente vinculados aos obtidos na realidade, o que nesta fase é suficiente para validar os resultados de simulações futuras.

De seguida, e já com o uso do software validado, passou-se ao estudo de situações concretas de alimentação e gitagem.

### Hipótese 1

Nesta hipótese foi testada uma situação semelhante á praticada actualmente na empresa mas com alimentadores frios às bocas e sem a utilização de camisas exotérmicas.

Tabela IV - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferritico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	7seg

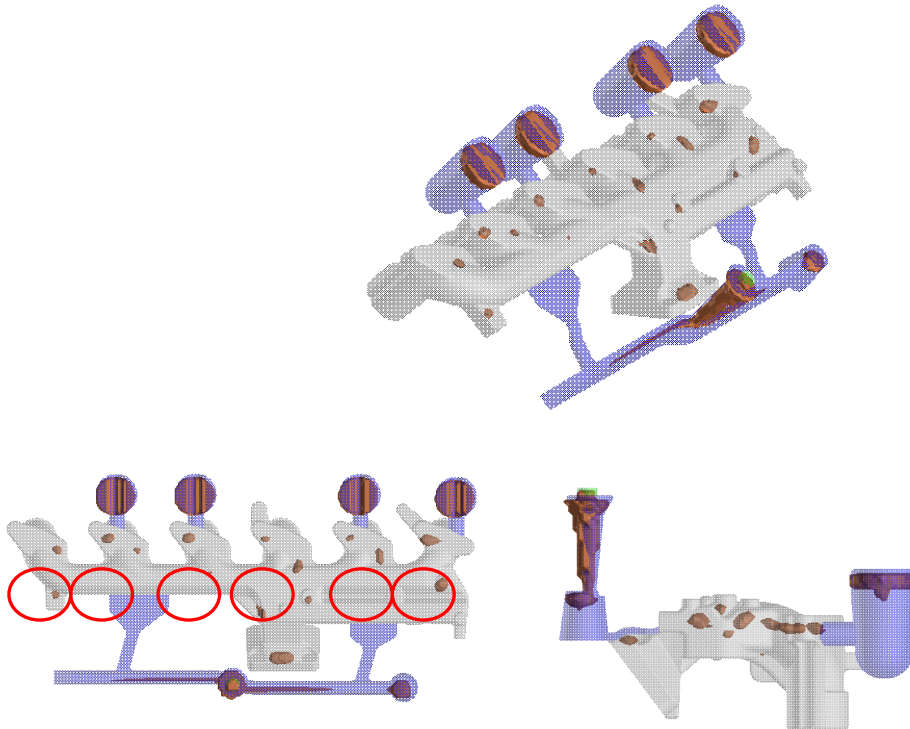


Figura 31 - Resultados da simulação

Após análise desta hipótese verificou-se que esta não era viável, devido ao forte probabilidade de aparecerem rechupes em zonas críticas, assinaladas a vermelho nas figuras 31, e procedeu-se de imediato à concepção de novas hipóteses.

## Hipótese 2

Nesta proposta foi simulada uma alimentação às bocas e alimentadores colocados acima da linha de apartação.

Tabela V - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	7seg

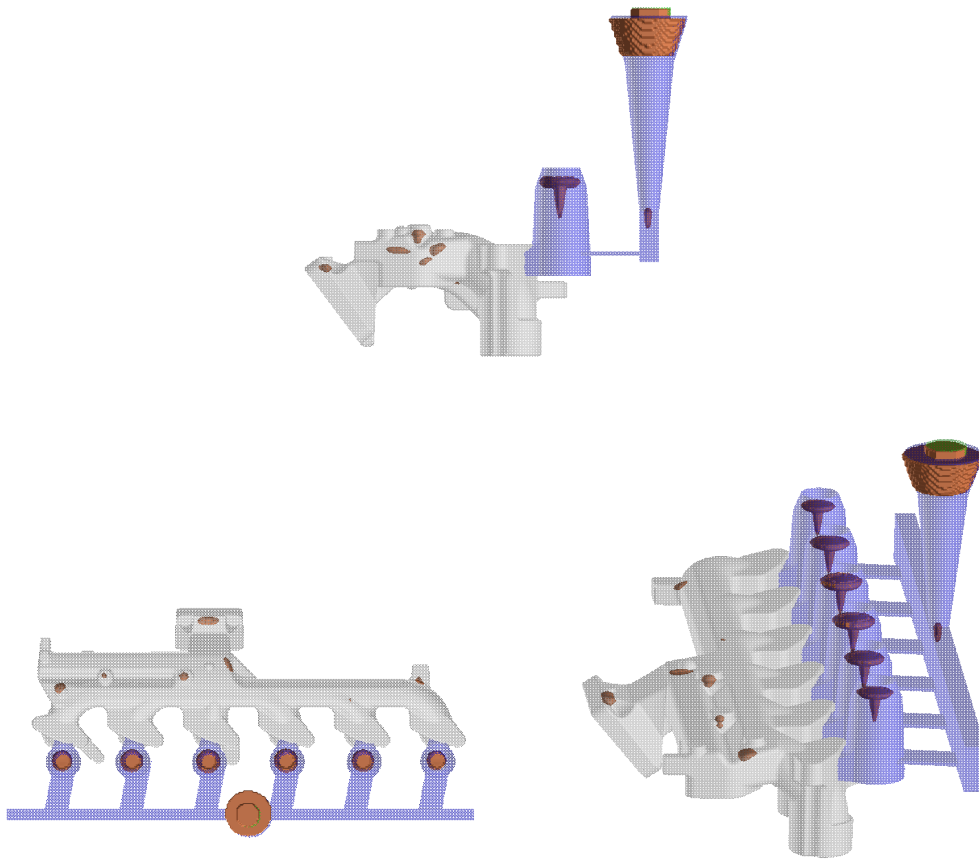


Figura 32 - Resultados da simulação.

Apesar dos bons resultados obtidos, esta situação não era tecnicamente viável, devido à localização da linha de apartação, e problemas com contra saídas. Foi então decidido enveredar por outro caminho e tentar estudar o efeito duma rotação da peça em 180° segundo o plano ZY. Esta inversão teve o objectivo de diminuir problemas como: inclusões de areias na parte das bocas do colecter, e ferro frio residual.

### Hipótese 3

Com o objectivo de se explorar todas as possibilidades de emplacamento do molde e respectiva gitagem (convém salientar que estávamos perante a possibilidade de execução de um molde novo) decidiu-se perceber a performance do molde do colecter invertido na placa do ponto de vista da solidificação, melhorando por outro lado a “pele” da peça visível ao cliente final.

Nesta situação foi testada o novo posicionamento da peça e uma temperatura de vazamento de 1370°C (posteriormente foram simuladas outras temperaturas e comparados resultados).

Tabela VI - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1370 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	7seg

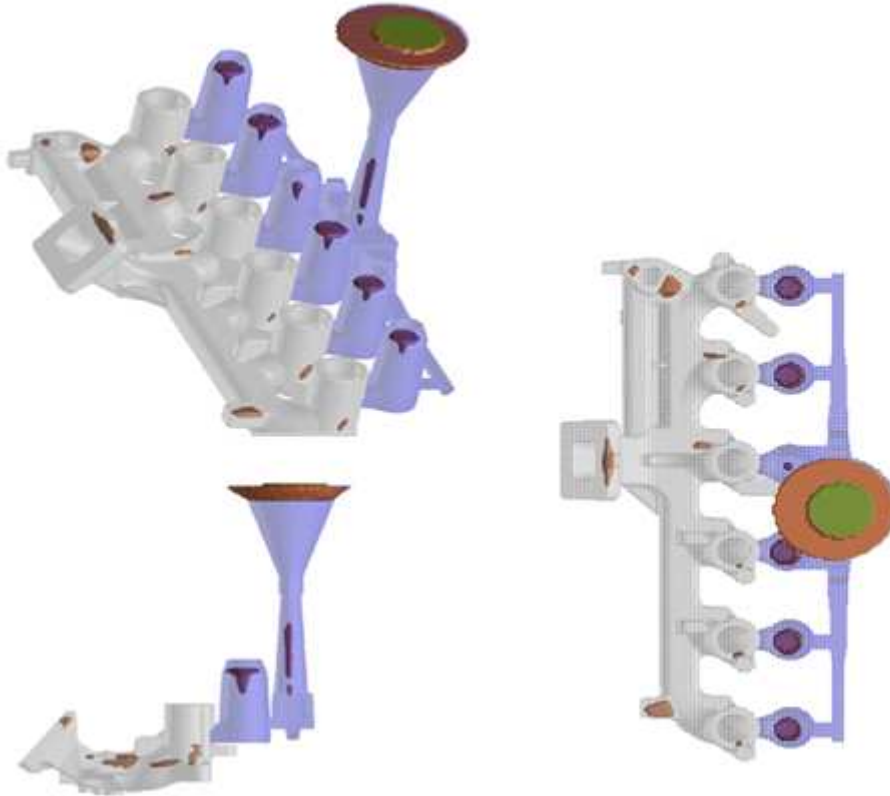


Figura 33 - Resultados da simulação.

#### Hipótese 4

Este projecto consistiu na mudança da temperatura de vazamento , esta foi realizada simulando um vazamento a 1410°C. Sendo utilizada posteriormente para comparação de resultados.

Tabela VII - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1410 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	7 seg

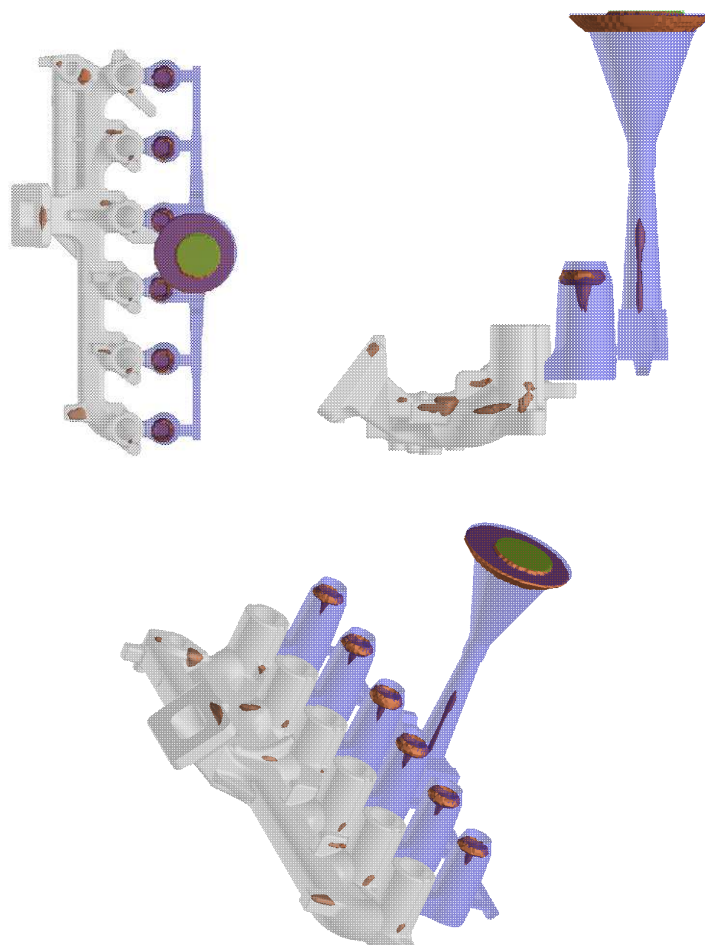


Figura 34 - Resultados da simulação.

### Comparação entre as duas temperaturas

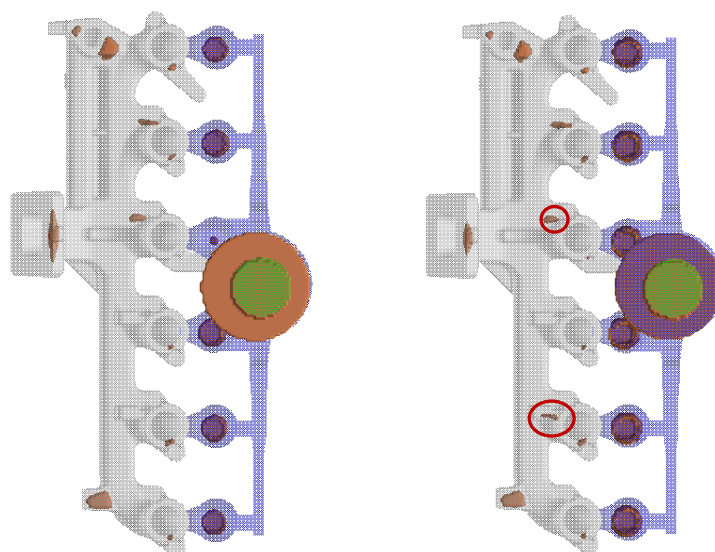
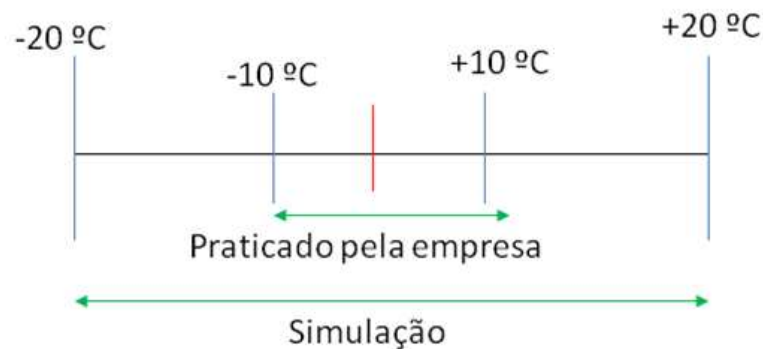


Figura 35 - Resultados da simulação.

Na figura 34 o vazamento a 1370°C está representado à esquerda, e o vazamento a 1410°C à direita, sendo esta situação claramente desfavorável pois existem rechupes que não existiam previamente. Esta situação foi estudada para verificar o efeito que a variação de temperatura poderia ter. Foi escolhido um intervalo de  $1390 \pm 20^\circ\text{C}$ , o dobro do habitualmente praticado na empresa ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ), de forma a salvaguardar qualquer variação no processo.



Verificou-se ainda que este sistema de alimentação e gitagem era o mais favorável de todos os analisados até ao momento. Havendo no entanto rechupes que poderiam ser eliminados.

### Hipótese 5

Com o objectivo de melhorar os resultados previamente obtidos foram efectuados acertos na altura (aumento de 10mm) e orientação dos alimentadores.

Tabela VIII - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
Material Density	0.990
Tempo de Vazamento	7seg

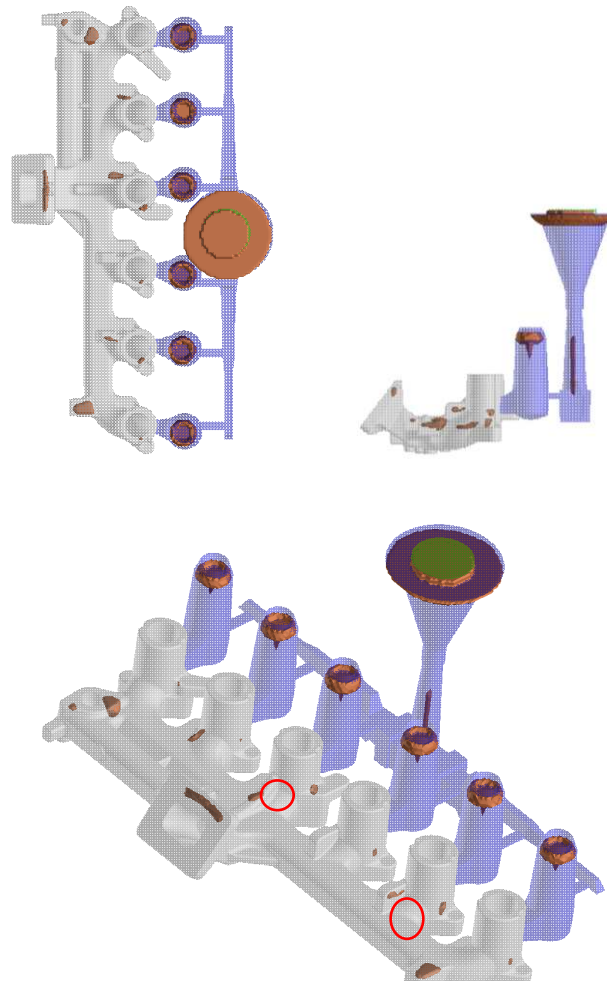


Figura 36 - Resultados da simulação.

Nesta situação já é visível um pequeno rechupe no fundo de cada uma das bocas, e vários na parte traseira da peça, estes seriam minimizados com a introdução de alimentadores na parte traseira da peça.

### Hipótese 6

Nesta situação foi adicionado um macho (por indicação da bibliografia [9] foi simulado o macho com propriedade de areia cromítica).

Tabela IX - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	2,5mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	7seg

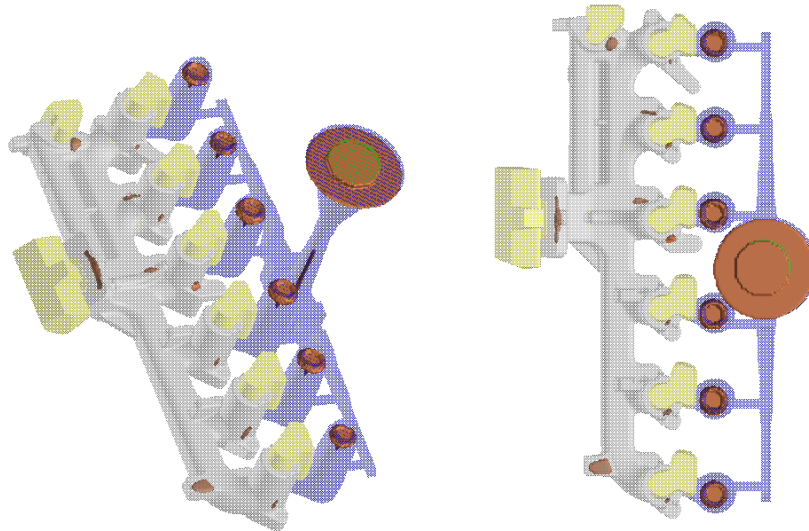


Figura 37 - Resultados da simulação.

### Comparação de resultados das simulações realizadas com e sem macho.

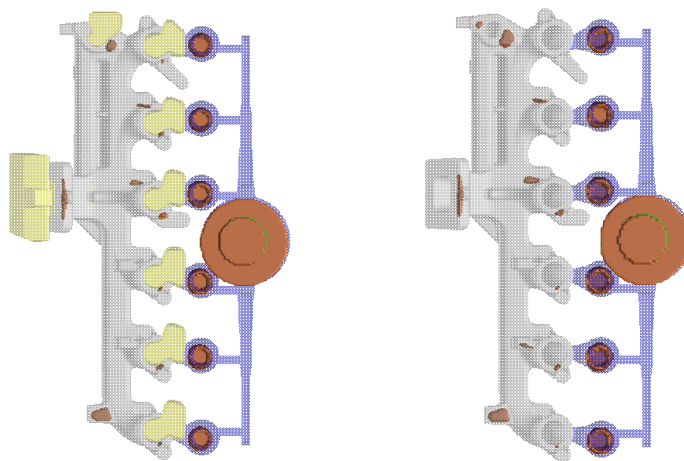


Figura 38 - Comparação de resultados obtidos com macho (à esquerda) e sem macho (à direita).

A inclusão do macho na simulação pouco alterou os resultados, podendo desta forma validar os mesmos em simulações sem macho. Mas de futuro serão apenas simuladas situações com machos.

Nesta fase o *task force* de desenvolvimento do produto decidiu analisar e otimizar apenas dois sistemas de alimentação e gitagem que se afiguravam de maior interesse para a empresa, e destes foram efectuadas novas simulações, com um malhamento menor. Estes sistemas definem-se como melhorias de duas hipóteses já previamente apresentadas, estas melhorias que consistem na adição de alimentares na parte traseira da peça (em

relação à hipótese 6) e acertos na linha de apartação, inclusão de alimentadores e macho (em relação à hipótese 2).

- Proposta 1:

Tabela X - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	2,5mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
Material Density	0.990
Tempo de Vazamento	7seg

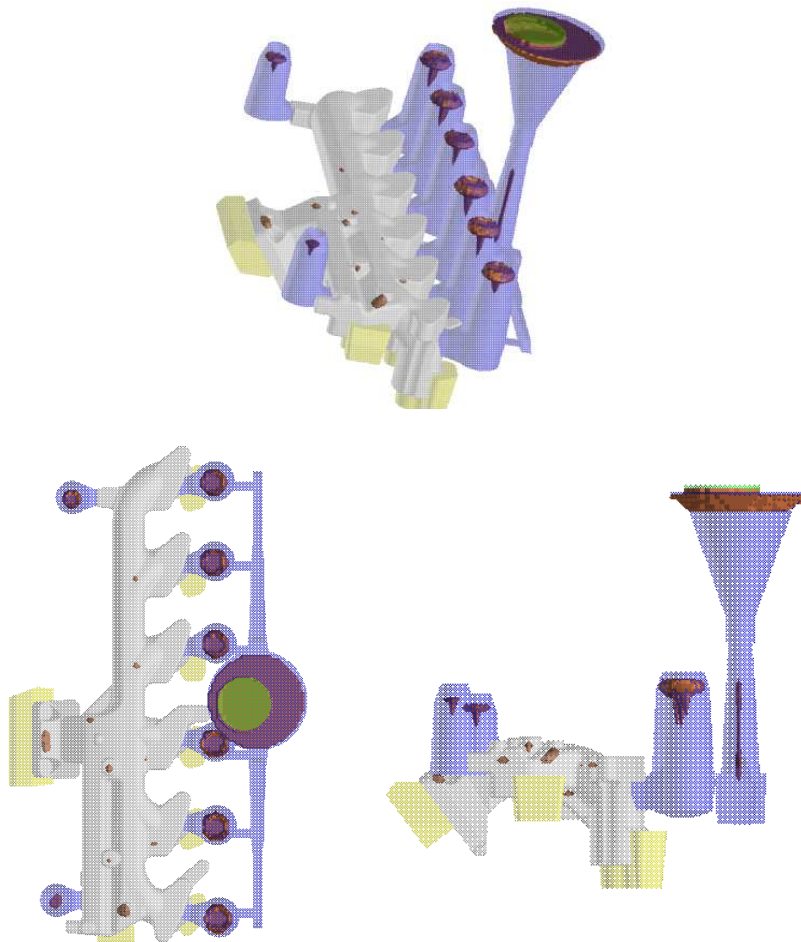


Figura 39 - Resultados da simulação.

Esta situação é bastante satisfatória visto que não apresenta rechupes em zonas consideradas críticas pelo cliente.

- Proposta 2:

Tabela XI - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	2,5mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
Material Density	0.990
Tempo de Vazamento	7seg

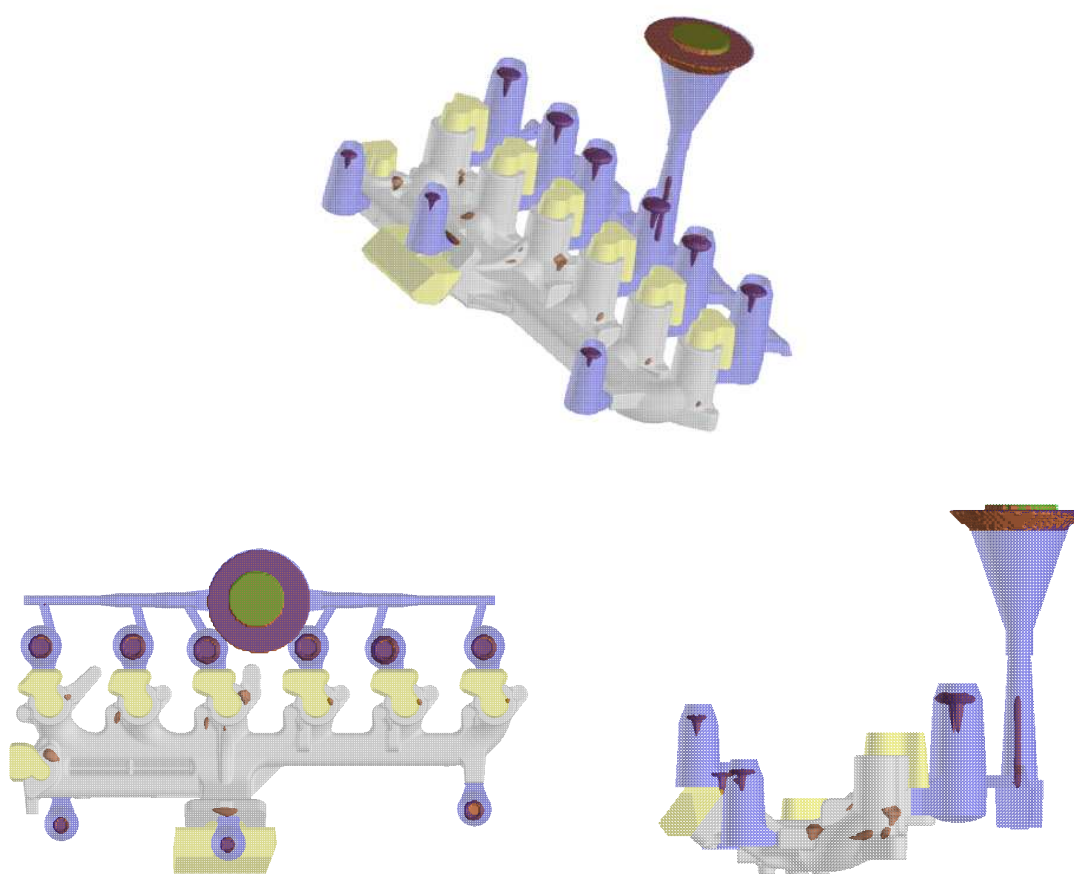


Figura 40 - Resultados da simulação.

Nesta situação são ainda visíveis alguns rechupes.

### Comparação de resultados

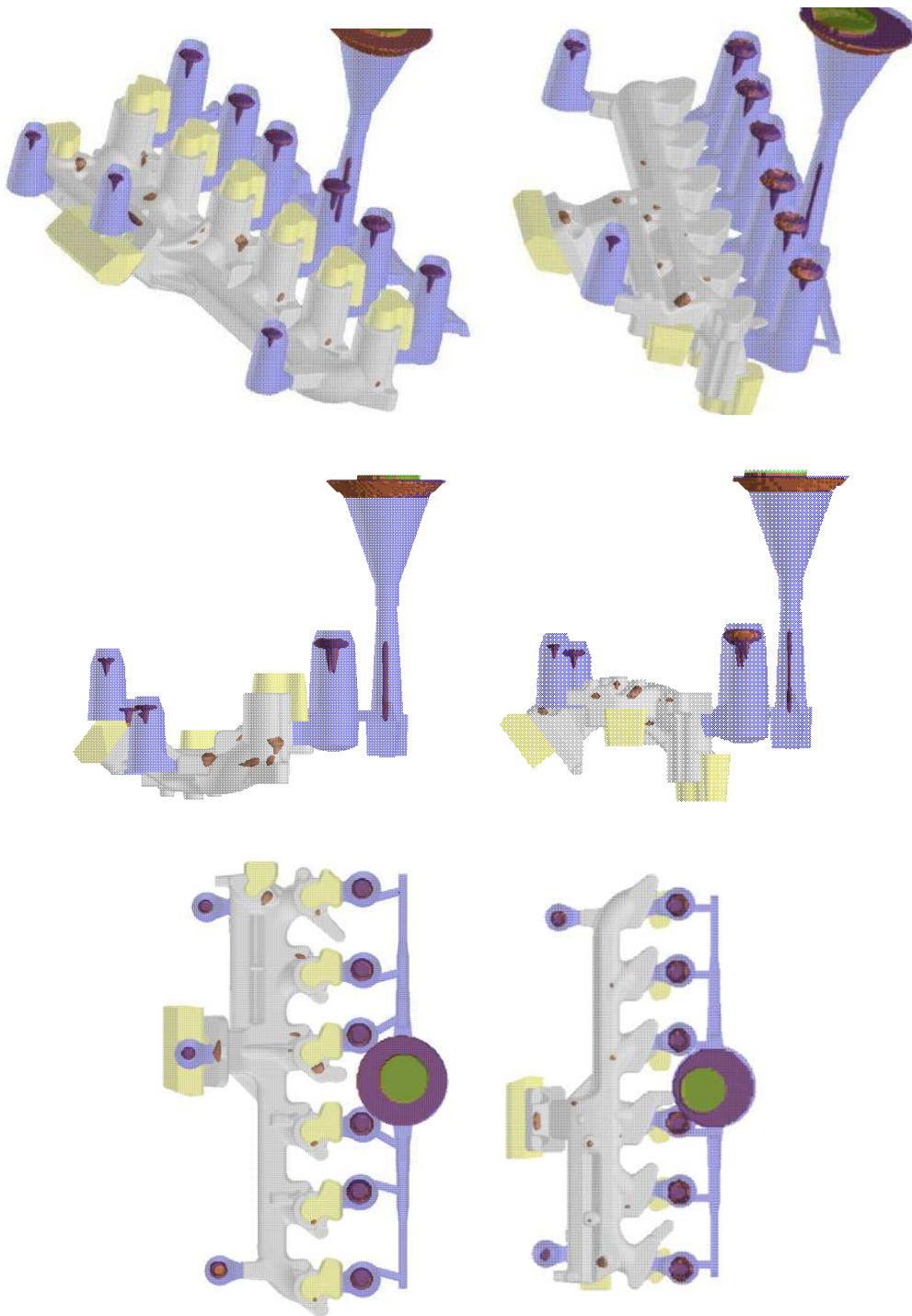


Figura 41 - Comparação entre resultados das duas propostas.

Como se pode verificar através da comparação das imagens, a situação 1 parece mais vantajosa pois apresenta uma menor incidência de rechupes, e maior rendimento, uma vez que utiliza menos um alimentador. A situação 2 tem ainda a desvantagem de apresentar rechupes em zonas consideradas críticas.

#### 4.1. Discussão de resultados (Colector)

Após analisadas todas as hipóteses acima apresentadas, foi decidido que a hipótese mais viável seria a da proposta 1. Visto que esta é a que apresenta menor probabilidade de rechupes. E dos rechupes que apresenta nenhum se encontra em zona crítica, contrariamente ao obtido na proposta 2.

Este projecto de passagem para 1 molde/placa está nesta altura a ser discutido com o cliente final, sendo que após aprovação será implementado internamente.

### 5. Resultados *Magnet housing*

Este projecto surge em resposta a reclamações do cliente: aparecimento de macroporosidades no interior da peça após operações de maquinação.

Desta forma, o departamento de engenharia de produto decidiu reanalisar o sistema de alimentação da peça, que não estava a assegurar a sanidade interna necessária, procurando encontrar modelos alternativos economicamente viáveis. Sendo assim, foram estudados durante o projecto de reengenharia 3 referências de camisas exotérmicas alternativas à utilizada até então, tendo sido ainda simulado um sistema de alimentação com alimentadores quentes sem recurso a camisas exotérmicas.

#### Sem camisas

Um vez que nesta fase a utilização do software já se encontrava validada. Foi testado um *layout* em que não estava contemplada a utilização de camisas exotérmicas.

Tabela XII - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	10seg
Camisas	Não utilizadas

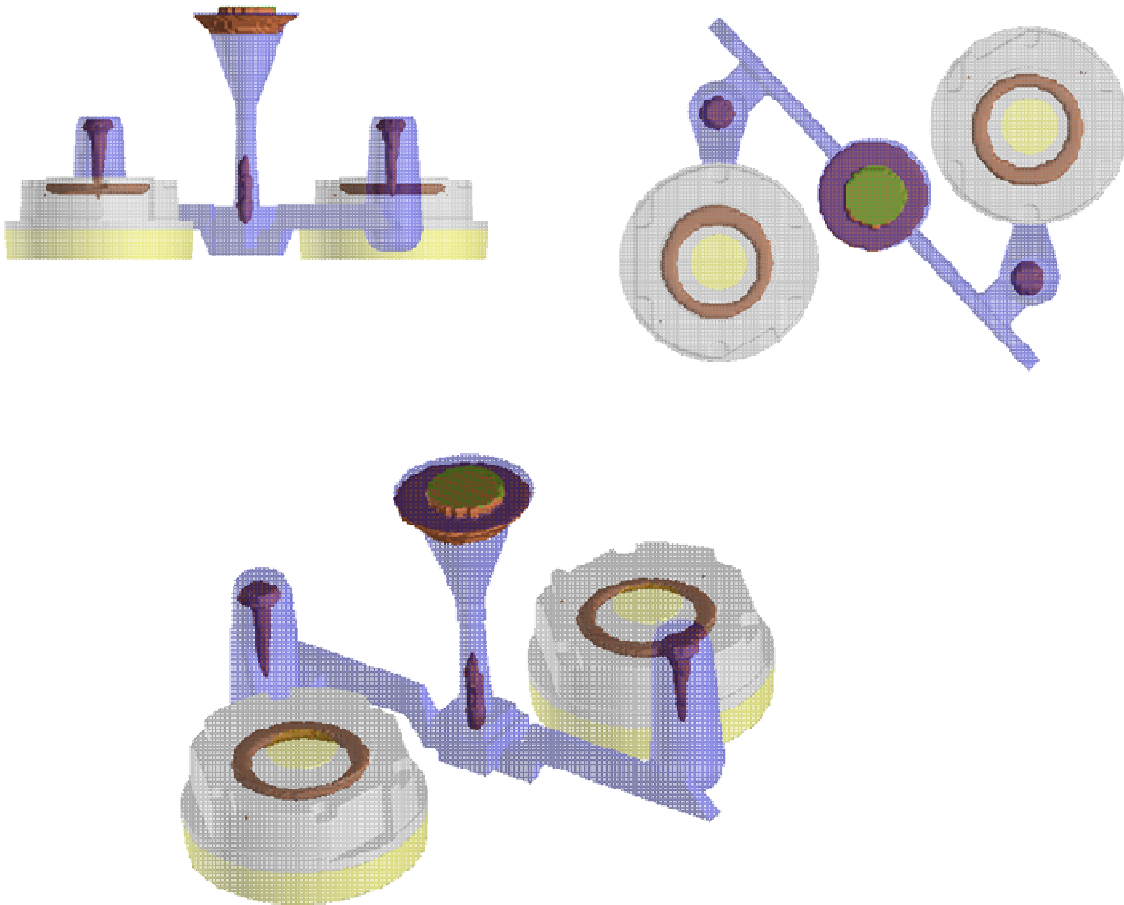


Figura 42 - Resultados da simulação.

Mediante os resultados obtidos exclui-se a hipótese de produzir esta peça apenas com alimentadores quentes.

Partiu-se de seguida para o estudo de várias hipóteses em que a utilização de camisas exotérmicas estava contemplada.

#### **Camisas *default* do software**

Para esta situação ficou acordado que seria testado, um *layout* com camisas exotérmicas, e em que estas teriam as propriedades termodinâmicas predefinidas pelo software SOLIDCast.

Tabela XIII - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	10seg
Camisas	Propriedades Default do software
Condutividade Térmica	0,5500 W/mK
Calor específico	1000 J/KgK
Densidade	720 Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de Queima	600°C
Tempo de Queima	3min
Temperatura de Ignição	398°C

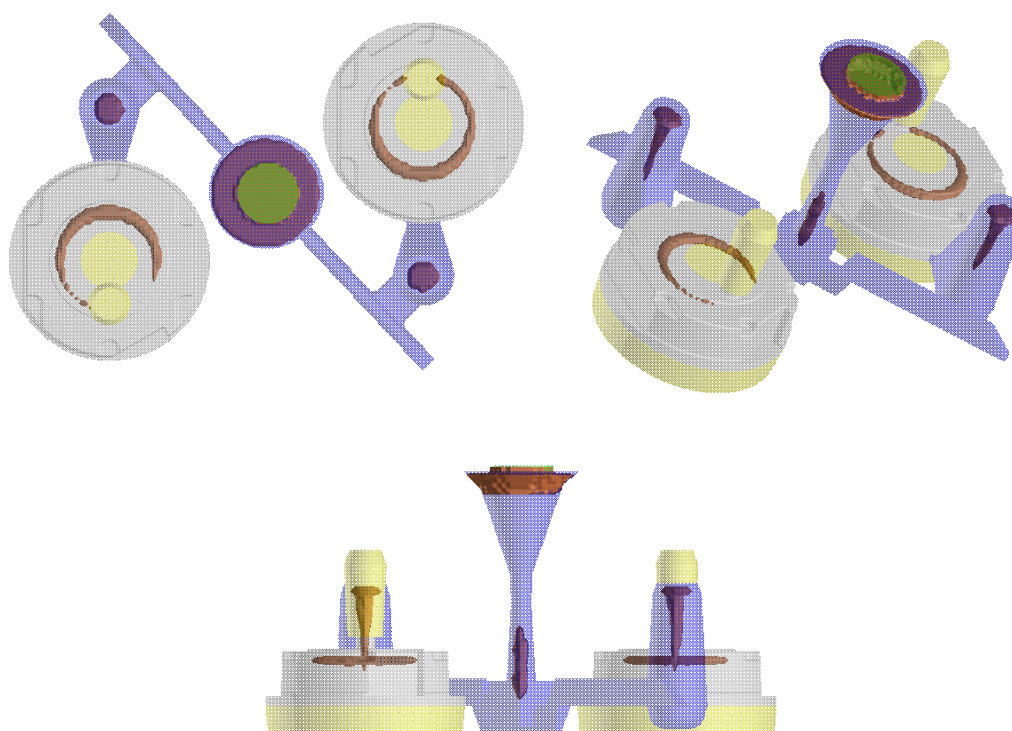


Figura 43 - Resultados da simulação.

Como pode ser verificado o resultado desta simulação não está de acordo com o esperado. Existe um acentuado macro-rechupe no topo da peça.

Esta situação poderá ser devida à temperatura de queima das camisas exotérmicas predefinida pelo software (600°C) ser desadequada à realidade, uma vez que o vazamento é feito a uma temperatura de 1390°C, não fazendo a camisa nenhum efeito.

De seguida foram contactados dois fornecedores de camisas exotérmicas, com o objectivo de disponibilizarem as propriedades térmicas referentes a cada uma das camisas definidas pelo chefe de projecto, com base no módulo da zona da peça a alimentar.

Com utilização de camisas foram efectuadas quatro simulações diferentes (com base em modelos 3D desenvolvidos especialmente para este efeito) três com uma camisa exotérmica e uma com duas camisas.

#### Camisa v45 Fornecedor1

Nesta situação foi testada uma camisa do Fornecedor 1.

Tabela XIV - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
Material <i>Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	10seg
Camisas	Propriedades Fornecedor 1
Condutividade Térmica	0,6500 W/mK
Calor específico	1500 J/KgK
Densidade	720 Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de Queima	1650°C
Tempo de Queima	3min
Temperatura de Ignição	600°C

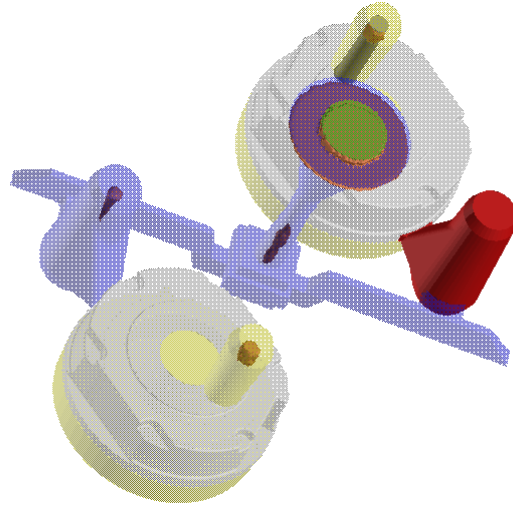


Figura 44 - Resultados da simulação.



Figura 45 - Peça obtida no vazamento experimental.

Após vazamento experimental, cinco moldações a  $1390 \pm 10^\circ\text{C}$ , verificou-se que a inclusão da camisa elimina por completo qualquer rechupe.

A validação deste ensaio surgiu por intermédio do controlo de qualidade interno após análise de cinco peças no ensaio através de ultra-sons.

## Camisa V 121 Fornecedor 1

Nesta situação foi testado um modelo de camisas diferente mas do mesmo fornecedor.

Tabela XV - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	10seg
Camisas	Propriedades Fornecedor 1
Condutividade Térmica	0,6500 W/mK
Calor específico	1500 J/KgK
Densidade	720 Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de Queima	1650°C
Tempo de Queima	3min
Temperatura de Ignição	600°C

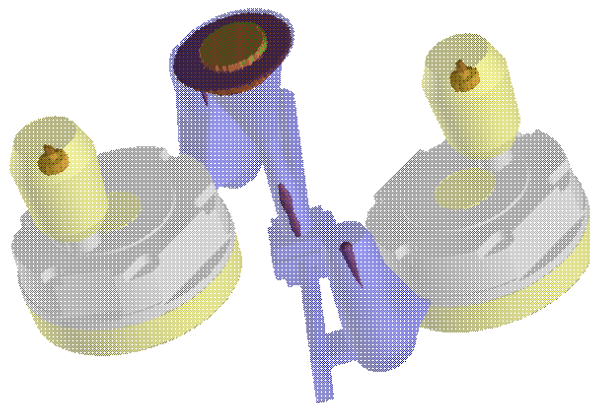


Figura 46 - Resultados obtidos na simulação.

Pode-se verificar que a inclusão de camisas elimina por completo qualquer macro-rechufe.

## Kmv-40q 16t Fornecedor 2

Nesta situação foi simulada uma camisa dum fornecedor diferente das anteriores.

Tabela XVI - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
<i>Material Density</i>	0.990
Tempo de Vazamento	10seg
Camisas	Propriedades Fornecedor 2
Condutividade Térmica	0,9300 W/mK
Calor específico	600 J/KgK
Densidade	540 Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de Queima	1650°C
Tempo de Queima	27seg
Temperatura de Ignição	500°C

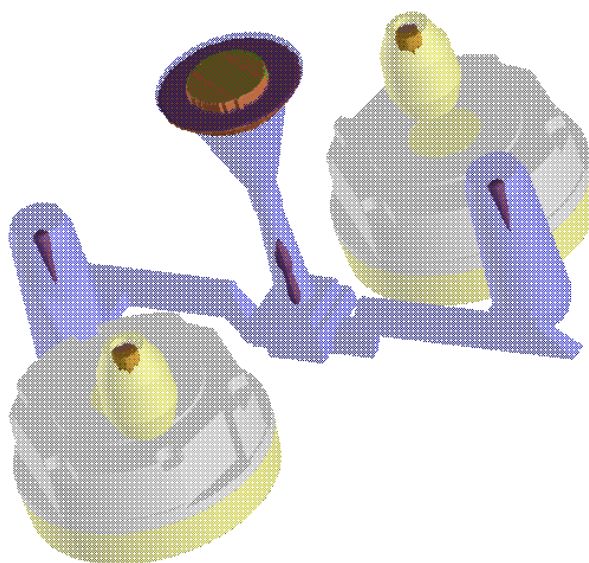


Figura 47 - Resultados obtidos na simulação.



Figura 48 - Peça obtida no vazamento experimental.

Após vazamento experimental, quatro moldações a  $1390 \pm 10^\circ\text{C}$ , verificou-se que a inclusão da camisa elimina por completo qualquer rechupe.

A validação deste ensaio surgiu por intermédio do controlo de qualidade interno após análise de quatro peças no ensaio através de ultra-sons.

## 2 Camisas v45 Fornecedor 1

Tabela XVII - Parâmetros utilizados na simulação.

Temperatura	1390 ° C
Malhamento	3mm
Material	Ferro Fundido Nodular Ferrítico
Material <i>Density</i>	0.99
Tempo de Vazamento	10seg
Camisas	Propriedades Fornecedor 1
Condutividade Térmica	0,65 W/mK
Calor específico	1500 J/KgK
Densidade	720 Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de Queima	1650°C
Tempo de Queima	3min
Temperatura de Ignição	600°C

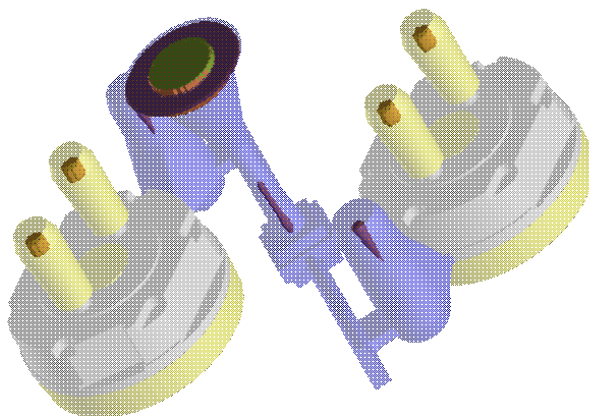


Figura 49 - Resultados obtidos na simulação.



Figura 50 - Peça obtida no vazamento experimental.

Após vazamento experimental, oito moldações a  $1390 \pm 10^\circ\text{C}$ , verificou-se que a inclusão da camisa elimina por completo qualquer rechupe.

A validação deste ensaio surgiu por intermédio do controlo de qualidade interno após análise de oito peças no ensaio através de ultra-sons.

### 5.1. Discussão de resultados (*Magnet Housing*)

Como pode ser verificado em todas as situações - simuladas e produzidas - a sanidade da peça é total, tendo optado a empresa pela solução economicamente mais vantajosa.

Em termos de projectos futuros é de extrema importância realçar a diferença de resultados obtidos quando os parâmetros térmicos das camisas são alterados. Por este motivo afigura-se como de extrema importância utilizar os correctos parâmetros das camisas utilizadas.

## 6. Análise crítica de resultados

Após todo o trabalho desenvolvido foi efectuada uma metodologia-tipo sugerida para empresas que pretendam implementar softwares de simulação na sua rotina de desenvolvimento de produto.

- 1.1. Validar experimentalmente os resultados do software, com várias peças produzidas na empresa.
  - 1.2. Optimizar parâmetros passíveis de serem optimizáveis (material a vazar, tempos de vazamento, temperaturas de vazamento, camisas exotérmicas utilizadas, parâmetros de pós-processamento, etc.).
  - 1.3. A partir deste ponto pode-se efectuar o ciclo de desenvolvimento de produto com recurso ao software de simulação.
2. Efectuar o projecto inicial de alimentação e gitagem com base nas regras apresentadas anteriormente, nos fundamentos teóricos essenciais.
    - 2.1. Proceder á importação para o software de modelos 3D referentes à alimentação, gitagem, machos e camisas exotérmicas se necessário.
    - 2.2. Introduzir no software as variáveis do processo como temperatura de vazamento, tempo de vazamento, etc.
    - 2.3. Geração da malha e posteriores cálculos da simulação.
  3. Fazer a recolha de resultados obtidos pela simulação, e interpretação dos mesmos conjuntamente com os chefes de projecto.
  4. Com base na interpretação dos resultados decide-se a aplicação imediata em ensaio industrial do sistema de alimentação e gitagem estudado, ou as necessárias acções de melhoria/optimização a introduzir no projecto inicial de forma a serem novamente simulados.

## 7. Conclusões

Durante a realização desta tese foi verificada a importância e utilidade que o software de simulação tem no processo de desenvolvimento de produto. Todas as situações estudadas demorariam bastante tempo a serem executadas com o método tradicional de tentativa erro, no entanto o uso software tornou este processo bastante mais expedito.

A precisão das simulações depende bastante dos parâmetros de *input*, dependendo também em grande medida, a interpretação dos resultados, das opiniões e conhecimento dos utilizadores, não se afigurando uma interpretação pacífica. Também aqui, a validação dos resultados obtidos, estará sempre ligada à experiência de utilização versus condições industriais.

Apesar das suas limitações, o SOLIDCast apresenta-se como uma ferramenta válida para a análise de solidificação e enchimento, podendo ser considerada uma mais-valia para empresas que decidam incluir este software no dia-a-dia do desenvolvimento de produto.

Convém notar que a validação de um sistema de alimentação e gitagem num software deste tipo deverá contemplar as normais variações do processo inerentes à actividade industrial de uma fundição, de forma a assegurar a sanidade das peças em diferentes condições produtivas aceites pelas gamas de produção.

No entanto devido à falta de tempo e disponibilidade do software nem todas as situações planeadas puderam ser testadas. Seria vantajoso se para cada situação pudessem ser testados intervalos de temperatura diferentes, à semelhança do feito nas hipóteses 3 e 4 do colector, assim variações na composição do material vazado tendo em conta a gama de cada tipo de material (gamas de ferro fundido cinzento, de grafite lamelar e ferro fundido cinzento de grafite nodular). Tendo em conta tais limitações, optou-se por centrar o estudo nas várias hipóteses de alimentação e gitagem.

## Referências bibliográficas

- [1] <http://www.oliva.pt/> Pagina da empresa Oliva1925;
- [2] <http://www.britannica.com/> Encyclopædia Britannica;
- [3] Apontamentos da cadeira de fundição 1 leccionada na FEUP, no âmbito do MIEMM;
- [4] Campbell, John, “The New Metallurgy of Cast Metals: Casting”, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, 2003;
- [5] Monteiro, Caetano, Alimentação, Departamento de Eng Mecânica da Universidade do Minho;
- [6] Callister, William, D., “Material Science and Engineering: An Introduction”, 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2006;
- [7] American Foundrymens´ s Society , Analysis of Casting Defects;
- [8] Monteiro, Caetano Enchimento, Departamento de Eng Mecânica da Universidade do Minho;
- [9] Muenprasertdee, Piyapong “Solidification Modeling of Iron Castings Using SOLIDCast”;
- [10] K. T. Ulrich & S. D. Eppinger “Product Design and Development”, McGraw-Hill, 3rd Edition, 2003 - ISBN 0071232737;
- [11] [http://www.esigroup.com/SimulationSoftware/Stamping\\_simulation/scintific%20publications/189.pdf](http://www.esigroup.com/SimulationSoftware/Stamping_simulation/scintific%20publications/189.pdf) / Ganhos de tempo try-out virtual;
- [12] Finite Solutions Inc., “SOLIDCast”, Training Course Workbook Version 6.3.39;
- [13] Finite Solutions Inc., “SOLIDCast”, Training Course Workbook Version 7.0.20;
- [14] Finite Solutions Inc., “Training Overview 6.3.39”, PowerPoint slides, January 15, 2005;
- [15] Shash, Y, Implementing an integrated foundry modeling system to combat some casting defects;
- [16] Modeling, Measurement and Control B 2000 69 5-6 35-49. 2000;
- [17] Takashi. Sergio ; Takashi Vania Passarini, Gestão de Inovação de Produtos;
- [18] Ludovico, AD Surace, R ; Computer aided foundry models design; ANNALS OF DAAAM FOR 2007 & PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL DAAAM; 2007 “Product

Design and Development” K. T. Ulrich & S. D. Eppinger, McGraw-Hill 2003, 3rd Edition - ISBN 0071232737;

[19] <http://auto.howstuffworks.com/question172.htm> / Funcionamento do um coletor

[20] [http://www.pelicanparts.com/bmw/techarticles/JFTech/BMW\\_E30\\_3\\_Series\\_Intake\\_manifold\\_painting.htm](http://www.pelicanparts.com/bmw/techarticles/JFTech/BMW_E30_3_Series_Intake_manifold_painting.htm) / Informações gerais sobre Colectores

[21] <http://www.freepatentsonline.com/429377.html> / Temperatura de Funcionamento de Colectores

[22] Magnetic circuit of electromagnet in drum-type electro-magnet brake for vehicles Quan Li Chinese Journal of Mechanical Engineering Dec. 2005 41 12 205-9 2005;

[23] Performance calculation for permanent magnet eddy-current brake with a solid steel disc Gieras, J.F. Symposium on Electromechanics and Industrial Electronics Applied to Manufacturing Processes 1985 257-63 1985;