



Universidade do Porto  
**FEUP** Faculdade de  
Engenharia



Validação Comparada com os softwares MagmaSoft® e ProCast  
Para um equipamento BEDPLATE da Funfrap

Pedro André de Jesus Brito da Rocha  
2010/2011

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Dissertação realizada sob a supervisão do  
Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro,  
do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Prof. Carlos Silva Ribeiro pela orientação prestada e pela oportunidade de trabalhar na área de fundição numa empresa como a Funfrap.

Devo também agradecer ao Dr. Idálio Fernandes que tornou possível o desenvolvimento desta tese de Mestrado em ambiente industrial assim como aos contactos da empresa.

Quero também agradecer ao Eng. Martinho Fernandes como meu orientador na empresa, ao Luís Saraiva, Virgílio Ratola, João Castro, Paulo Silva, Eduardo Mortágua, Paulo Nunes e Rui Mendes que directamente me ajudaram, pelo tempo e paciência que disponibilizaram para me atender sempre que precisava.

Aos meus pais e irmã por nunca terem desistido de me ajudarem a cumprir um sonho. Pela paciência, pelo amor e pelas palavras de encorajamento que estiveram sempre presentes em todos os momentos.

À minha namorada Isabel Monteiro, que esteve sempre presente nos melhores e nos piores momentos, que sempre me apoiou e me encorajou em diversos momentos deste trabalho, assim como aos meus amigos e amigas.

A todos, muito obrigado

## Resumo

Este trabalho foi elaborado no âmbito da Tese de Mestrado do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em parceria com a empresa **Funfrap - Fundição Portuguesa S.A.**

Esta dissertação aborda o planeamento, montagem e implementação de um trabalho realizado com o objectivo de prever defeitos, possíveis problemas de alimentação, durante a fase de enchimento e solidificação de uma peça com recurso a dois softwares de simulação.

Os softwares de simulação utilizados foram o MagmaSoft e o ProCast, para validação da simplicidade e rapidez de utilização, assim como à antevisão do efeito da flutuabilidade do processo de fabrico, sobre a microestrutura, com ênfase para a porosidade e inclusões.

Durante a realização deste trabalho foi possível acompanhar alguns ensaios com a finalidade de validar os resultados obtidos em simulação, assim como uma aprendizagem do processo em geral a nível industrial. A par destas validações foi possível o primeiro contacto com o WCM – “World Class Manufacturing” no pilar do EEM – “Early Equipment Management” – gestão antecipada do produto e equipamento.

## Abstract

This work was done for master thesis of 5th year Master in Metallurgical and Materials Engineering of Faculty of Engineering of the University of Porto in partnership with Funfrap – Fundação Portuguesa, Sa.

This thesis describes the work done to predict problems of porosity and simulate the filling using two different simulation software called MagmaSoft® and Procast.

During this work was possible to follow some experimental validation of the different gating systems in study and to have the first contact with WCM - World Class Manufacturing in EEM, early equipment management.

Quality tools are used in Funfrap in order to ensure continuous improvement, to find causes and solve problems that are detected.

# Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo .....	iii
Abstract.....	iv
Índice.....	v
Índice de Figuras.....	vii
1. Introdução .....	1
1.1. Apresentação da empresa .....	1
1.2. Ferro Fundido.....	2
1.2.1. Composição Química .....	4
1.2.2. Ferro fundido Cinzento .....	4
1.2.3. Elementos de liga.....	6
2. Software de simulação .....	9
2.1. MagmaSoft® .....	9
3. Metodologia Experimental.....	13
3.1. Início do projecto.....	13
3.2. Análise da peça em estudo .....	14
3.3. Dados relativos às simulações.....	16
4. Apresentação e discussão dos resultados .....	21
4.1. Localização de Pontos quentes .....	21
4.2. Parte I – Nova formulação do sistema de gitagem.....	23
4.2.1. Etapa 1 .....	25
4.2.2. Etapa 2 .....	26
4.2.3. Etapa 3 .....	27
4.2.4. Etapa 4 .....	28
4.2.5. Etapa 5 .....	29
4.2.6. Etapa 6 .....	31
4.2.7. Etapa 7 .....	33
4.2.8. Etapa 8 .....	34
4.2.9. Etapa 9 .....	35
4.2.10. Etapa 10 .....	36
4.2.11. Etapa 11 .....	38
4.3. Parte II – Sistema de gitagem de série .....	39

4.3.1.	Etapa 12 .....	39
4.3.2.	Etapa 13 .....	40
4.3.3.	Etapa 14 .....	41
4.3.4.	Etapa 15 .....	42
4.3.5.	Etapa 16 .....	43
4.4.	Parte III – Simulação em ProCast.....	44
4.4.1.	Etapa 17 .....	44
4.4.2.	Etapa 18 .....	45
4.5.	Parte IV – Comparação de Resultados MagmaSoft® vs ProCast.....	45
4.5.1.	Etapa 19 – Comparação HTC = 800 W/m <sup>2</sup> .K.....	45
4.5.2.	Etapa 20 – Comparação HTC = tempiron .....	47
4.6.	Validação Experimental .....	48
	Conclusões.....	52
	Referências .....	54
	Anexo I .....	55
	Anexo II .....	56

## Índice de Figuras

FIG. 1- DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO Fe-C ATÉ UMA PERCENTAGEM DE 7% DE CARBONO [2].	3
FIG. 2 - DUAS MICROESTRUTURAS TÍPICAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO FERRÍTICO. MICROESTRUTURAS OBTIDAS DA PEÇA EM ESTUDO DA COM UMA RESOLUÇÃO DE 100X. A FIGURA A) CORRESPONDE A UMA MICROESTRUTURA SEM ATAQUE ENQUANTO A IMAGEM B) REPRESENTA A ZONA QUE FOI ATACADA QUIMICAMENTE.	4
FIG. 3 - GAMAS RECOMENDADAS DE CARBONO E SILÍCIO PARA OS DIFERENTES TIPOS DE FERROS FUNDIDOS.	6
FIG. 4 - EFEITO DO TEOR INICIAL DE ENXOFRE E DOIS NÍVEIS DE INOCULAÇÃO SOBRE O NÚMERO DE CÉLULAS.	7
FIG. 5 – ÁREA DE TRABALHO DO SOFTWARE MAGMASOFT®, ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR OS DIFERENTES MENUS.	9
FIG. 6 - OPÇÕES DISPONÍVEIS PARA DO MENU “PROJECT” DO MAGMASOFT	10
FIG. 7 - JANELA DO PRÉ-PROCESSADOR DO MAGMASOFT	10
FIG. 8 - JANELA DO MALHADOR ONDE ESTÃO VISÍVEIS AS OPÇÕES INICIAIS DISPONÍVEIS. CONSOANTE O MÉTODO DE ESCOLHA ACTIVAM-SE OUTRAS OPÇÕES.	11
FIG. 9 - OPÇÕES DISPONÍVEIS PARA ESCOLHA DO PROCESSO, E OBJECTIVO DA SIMULAÇÃO.	12
FIG. 10 - QUADRO PARA A DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.	12
FIG. 11 – MODELO 3D DE METADE DO SISTEMA DE GITAGEM UTILIZADO PARA O ESTUDO DA PEÇA EM QUESTÃO. DO LADO ESQUERDO O SISTEMA UTILIZADA NA PARTE I DO TRABALHO E DO LADO DIREITO A FORMULAÇÃO UTILIZADA NA PARTE II	13
FIG. 12 – MODELO DA PEÇA DE ESTUDO.	14
FIG. 13 - CORTES REALIZADOS NO MODELO ONDE SE EVIDENCIA A SUA VARIAÇÃO DE ESPESSURA.	15
FIG. 14 - IMAGEM REPRESENTATIVA DE UM DOS BLOCOS PRINCIPAIS DE MACHOS CONSTITUÍDO POR 4 SUBCONJUNTOS	16
FIG. 15 - IMAGEM DO SUBCONJUNTO DO BLOCO PRINCIPAL	16
FIG. 16 - UM DOS DEFEITOS MAIS ENCONTRADO NAS ZONAS DAS SAPATAS, BOLHAS.	17
FIG. 17 - DEFEITO ASSINALADO E CONSIDERADO COMO JUNTA FRIA.	17
FIG. 18 - CASÇÃO IDENTIFICADO EM ALGUNS MODELOS, TAMBÉM OCORRE JUNTO ÀS SAPATAS NA PARTE INFERIOR.	18
FIG. 19 - DEFEITO ENCONTRADO EM ALGUMAS PEÇAS APÓS CONTROLO POR ULTRA-SONS.	18
FIG. 20 - DIAGRAMA 4M PARA ANÁLISE DAS POSSÍVEIS CAUSAS QUE PROVOCAM BOLHAS.	19
FIG. 21 - GRÁFICO DA VARIAÇÃO TEMPERATURA/HTC CONTIDA NA BASE DE DADOS DO SOFTWARE MAGMASOFT.	20
FIG. 22 - MÓDULO DAS DIFERENTES PARTES DA PEÇA.	22
FIG. 23 - VELOCIDADE DE ENCHIMENTO COM UM TEMPO DE 15 SEGUNDOS.	23
FIG. 24 - VELOCIDADE DE ENCHIMENTO COM UM TEMPO DE 13 SEGUNDOS.	23
FIG. 25 – A) VELOCIDADE DE ENCHIMENTO NO PRIMEIRO ATAQUE A PEÇA. B) VELOCIDADE DE ENCHIMENTO A UMA PERCENTAGEM DE 60% DO ENCHIMENTO.	24
FIG. 26 - CORTE REALIZADO A FIG 23 COM INTUÍTO DE REALÇAR A TURBULÊNCIA DA PEÇA NA SAPATA.	25
FIG. 27 - DEFEITOS NA PEÇA AVALIADOS PELO CRITÉRIO “POROSITY”, ONDE SE OBSERVA A INEXISTÊNCIA DE DEFEITOS.	26
FIG. 28 - DEFEITOS NA PEÇA AVALIADOS PELO CRITÉRIO “POROSITY”, ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR NA ZONA ASSINALADA UM DEFEITO COINCIDENTE COM A VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.	27
FIG. 29 - DEFEITOS ASSINALADOS NO MODELO. FORAM AVALIADOS PELO CRITÉRIO "POROSITY" NUMA ESCALA DE 0 A 10%.	28
FIG. 30 - DEFEITOS ASSINALADOS NO MODELO SIMULADO AVALIADOS PELO MESMO CRITÉRIO E A MESMA ESCALA DA FIGURA ANTERIOR.	28
FIG. 31 - RESULTADOS AVALIADOS PELO CRITÉRIO DE POROSIDADE, ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR A EXISTÊNCIA DE MAIS DEFEITOS E O APARECIMENTO DE MAIS LOCALIZAÇÕES DE DEFEITOS.	29
FIG. 32 - RESULTADOS DO CRITÉRIO POROSITY EM 2 DOS MODELOS, ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR O APARECIMENTO DE DEFEITOS NAS ZONAS MAIS MACIÇAS DA PEÇA. ESTE APARECIMENTO DEU-SE COM A REDUÇÃO DO PARÂMETRO “GRAPHITE PRECIPITATION” DE 8 PARA 5.	30
FIG. 33 - PERCENTAGEM DA FASE LIQUIDA ATÉ TOTALMENTE SÓLIDO DA SIMULAÇÃO 1 E 2 RESPECTIVAMENTE A) E B)	31
FIG. 34 - VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS ATRAVÉS DO CRITÉRIO "POROSITY" DE UM DOS MODELOS, ONDE FOI POSSÍVEL OBSERVAR UMA OCORRÊNCIA MAIS ACENTUADA DE DEFEITOS E EM ALGUNS CASOS NAS MESMAS LOCALIZAÇÕES COM A REDUÇÃO DO VALOR PARA 2 DO PARÂMETRO EM ESTUDO.	32

FIG. 35 - RESULTADOS SEGUNDO O CRITÉRIO "POROSITY" ONDE É VISÍVEL, MESMO GARANTINDO UMA BOA INOCULAÇÃO COM UM VALOR DE 8 PARA "GRAPHITE PRECIPITATION", O APARECIMENTO DE DEFEITOS. ....	33
FIG. 36 - A) RESULTADOS DA SIMULAÇÃO ACTUAL. B) RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NÚMERO 1. ....	34
FIG. 37- CORTE EFECTUADO NUM DOS MODELOS PARA VISUALIZAÇÃO DE POSSÍVEIS DEFEITOS, REGISTA-SE UM AUMENTO DO NÚMERO DE DEFEITOS E SEUS TAMANHOS. ....	35
FIG. 38- CORTE EFECTUADO NUM DOS MODELOS PARA VISUALIZAÇÃO DE POSSÍVEIS DEFEITOS DE SALIENTAR QUE NÃO HOUVE GRANDES DIFERENÇAS ENTRE A ALTERAÇÃO DO VALOR DO "GRAPHITE PRECIPITATION" DE 5 PARA 2. ....	36
FIG. 39 - CORTE EFECTUADO APENAS NO MODELO 8, PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS. UTILIZADO O CRITÉRIO "POROSITY" REGISTOU-SE UM AUMENTO DE POSSÍVEIS DEFEITOS DE UM MODO GERAL EM TODOS OS MODELOS. ....	37
FIG. 40 - CORTE EFECTUADO NO MODELO 7 PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS. CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO UTILIZADO - "POROSITY", TAL COMO NO MODELO 8 NESTAS REGIÕES MAIS MACIÇAS TAMBÉM REGISTRARAM UM AUMENTO DE DEFEITOS. ....	37
FIG. 41 - RESULTADOS AVALIADOS PELO CRITÉRIO "POROSITY" DO MODELO 2 PARA UM VALOR DE "GRAPHITE PRECIPITATION" DE 5 ONDE ESTAO PRESENTES DEFEITOS EM TODAS AS PARTES MACIÇAS. TENDO-SE VERIFICADO QUE AFINAL A REDUÇÃO DO "INOCULATION METHOD" NÃO É VIÁVEL COMPARADO COM A PRÁTICA. ....	38
FIG. 42 - TEMPERATURA DE ENCHIMENTO DA PLACA MOLDE PARA UMA FASE CORRESPONDENTE A 50% DO ENCHIMENTO. ....	40
FIG. 43 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO QUANDO A CAVIDADE ESTÁ A UMA PERCENTAGEM DE 60%. ....	40
FIG. 44 - TEMPERATURA DO METAL QUANDO REALIZADO 50% DO ENCHIMENTO. ....	41
FIG. 45 - TEMPERATURA NO FIM DA ETAPA DO ENCHIMENTO. ....	41
FIG. 46- RESULTADO POROSIDADE NOS MODELOS 1 E 2, ONDE SE VERIFICA UM NÚMERO ACENTUADO DE DEFEITO PORÉM DE SALIENTAR SÓ EXISTIR NA PRÁTICA O DEFEITO ASSINALADO. ....	41
FIG. 47 - TEMPERATURA DOS MODELOS QUANDO ESTÁ REALIZADO A 50% DO ENCHIMENTO. ....	42
FIG. 48 - TEMPERATURA DO MODELO QUANDO ESTÁ FINALIZADA A ETAPA DE ENCHIMENTO. ....	42
FIG. 49 - VISUALIZAÇÃO DOS DEFEITOS DO SISTEMA DE GITAGEM DA PLACA DE SÉRIE ONDE É POSSÍVEL VER UM DOS DEFEITOS QUE CONTINUAM A APARECER NA PRÁTICA E QUE JÁ FOI MENCIONADO NA PARTE I. ....	43
FIG. 50 - CORTE EFECTUADO NO MESMO MODELO ANTERIOR PARA VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS DEFEITOS NO INTERIOR DA PEÇA EM ZONAS CRÍTICAS. ....	43
FIG. 51 - CORTE EFECTUADO NOS MODELOS SEGUNDO O CRITÉRIO POROSITY. ....	44
FIG. 52 - CORTE EFECTUADO NO SISTEMA DE GITAGEM NOS MODELOS MAIS AFASTADOS DO GITO DE DESCIDA. ....	44
FIG. 53 - CORTE EFECTUADO NO SISTEMA DE GITAGEM NOS MODELOS MAIS PERTO DO GITO DE DESCIDA. ....	44
FIG. 54 - CORTE REALIZADO NO MODELO PARA VISUALIZAÇÃO DA TEMPERATURA DO SISTEMA DE GITAGEM NOS CANAIS SECUNDÁRIOS MAIS AFASTADOS DO GITO DE DESCIDA. ....	45
FIG. 55 - CORTE REALIZADO NO MODELO PARA VISUALIZAÇÃO DA TEMPERATURA DO SISTEMA DE GITAGEM NOS CANAIS SECUNDÁRIOS MAIS PRÓXIMOS DO GITO DE DESCIDA. ....	45
FIG. 56 - CORTE EFECTUADO NO SISTEMA DE GITAGEM NOS MODELOS MAIS AFASTADOS DO GITO DE DESCIDA. ....	46
FIG. 57 - CORTE EFECTUADO NO SISTEMA DE GITAGEM NOS MODELOS MAIS PERTO DO GITO DE DESCIDA. ....	46
FIG. 58 - CORTE EFECTUADO NO SISTEMA DE GITAGEM NO MODELO MAIS AFASTADO DO GITO DE DESCIDA. ....	46
FIG. 59 - CORTE EFECTUADO NO SISTEMA DE GITAGEM NO MODELO MAIS PRÓXIMO DO GITO DE DESCIDA. ....	46
FIG. 60 - CORTE EFECTUADO NO SISTEMA DE GITAGEM NO MODELO MAIS AFASTADO DO GITO DE DESCIDA. ....	47
FIG. 61 - CORTE EFECTUADO NO SISTEMA DE GITAGEM NO MODELO MAIS PRÓXIMO DO GITO DE DESCIDA. ....	47
FIG. 62- TEMPERATURA DO METAL DURANTE A FASE DE ENCHIMENTO APÓS 3,8 SEGUNDOS DO INICIO DO ENCHIMENTO. ....	47
FIG. 63 - TEMPERATURA DO METAL DURANTE A FASE DE ENCHIMENTO APÓS 7,6 SEGUNDOS DO INICIO DO ENCHIMENTO. ....	47
FIG. 64 - DEFEITO DETECTADO, POSSIVELMENTE METAL FRIO NAS PEÇAS. ....	48
FIG. 65 - DEFEITO DETECTADO EM ALGUMAS MOLDAÇÕES, ACUMULAÇÃO DE GASES NAS PEÇAS. ....	48
FIG. 66 - ESQUEMA INDICATIVO DA REALIZAÇÃO DOS CORTES NA PEÇA PARA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS. ....	49
FIG. 67 - DEFEITO VISUALIZADO EM RAIOS-X APÓS ANÁLISE VISUAL. ....	49
FIG. 68 - CORTE EFECTUADO NUMA DAS ZONAS MAIS FINAS DO MODELO. VAZAMENTO DO SISTEMA DE GITAGEM DE SÉRIE. ....	49
FIG. 69 - CORTE EFECTUADO NUMA SEGUNDA SECÇÃO FINA DA PEÇA. ....	50
FIG. 70 - CORTE EFECTUADO NUMA TERCEIRA SECÇÃO FINA DA PEÇA. ....	50
FIG. 71 - CORTE VERTICAL DE UM MODELO PARA ANÁLISE DE PROBLEMAS NAS ZONAS MACIÇAS. ....	50
FIG. 72 - CORTE EFECTUADO NA NUMA OUTRA ZONA MACIÇA DA PEÇA. ....	51

FIG. 73 - CORTE EFECTUADO NA ZONA DA SAPATA DO MODELO.....	51
FIG. 74- DIAGRAMA 4M PARA ANALISE DAS CAUSAS PARA AS BOLHAS. ....	55
FIG. 75 - DIAGRAMA 4M PARA ANALISE DAS CAUSAS PARA AS INCLUSÕES DE AREIA. ....	55
FIG. 76 - CARTOGRAFIA UTILIZADA PARA A LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NAS RESPECTIVAS ANALISES DE SUCATA .....	56

## 1. Introdução

Este trabalho foi elaborado no âmbito da tese de Mestrado de Engenharia Metalúrgica e de Materiais em colaboração com a empresa Funfrap Fundação Portuguesa, SA.

Esta colaboração surgiu devido à necessidade de validar o desempenho do software MagmaSoft® no que diz respeito à simulação do enchimento e solidificação da peça em estudo. Este estudo foi realizado com uma peça em fase inicial de produção de modo a acompanhar todas as etapas deste projecto. Posteriormente montou-se uma estratégia de validação do funcionamento do software de modo a reproduzir com confiança os resultados da simulação.

### 1.1. Apresentação da empresa

A Funfrap é uma fundição especializada no desenvolvimento e produção de componentes em diversas classes de ferro fundido para a indústria automóvel. Grande parte da produção incide na produção de carter, blocos de motor, cambotas, colectores, turbo-colectores e caixas de diferencial. A empresa é uma das oito fundições que compõe o grupo Italiano Teksid.

A Teksid detém a maior parte do capital da Funfrap, sendo apenas 14% do capital pertencente a investidores nacionais.

A Funfrap é certificada pelas normas ISO/TS 16949, VDA 6.1 e ISO 14001. Os principais clientes são grandes marcas como Caterpillar, CDC, Cummins, Deutz, EEA, Iveco, Mack para camiões, enquanto para automóveis ACI, Chrysler, Fiat, MagnetiMarelli S.S., Opel, Renault [1].

Tem uma capacidade de produção de peça de 30 000 toneladas por ano e toda a sua produção é para o mercado externo. Está equipada com:

- 4 Fornos eléctricos com capacidade de 7 300 kg cada;
- 3 Instalações eléctricas de 4 500 kVA;
- 1 Máquina de moldação automática - Osborn 1000 x 900 x (300 + 300) mm
- 1 Máquina de vazamento automático – Mezger;
- 10 Máquinas de machos, 2 caixa quente e 8 caixa fria;

- 16 Robots (pintura, montagem de machos, carregamento e descarregamento de paletes;)

## 1.2.Ferro Fundido

Os ferros fundidos são materiais muito utilizados na fundição devido à sua composição química que lhes confere uma elevada vazabilidade quando comparados com outras ligas ferrosas (no qual são classificadas de acordo com o seu teor em carbono superior a 2%) [2].

Os parâmetros aos quais se deve dar uma primordial atenção, para a solidificação dos ferros fundidos, são a composição química e a velocidade de arrefecimento,

De acordo como diagrama de equilíbrio (Fig. 1) é possível verificar que este material sofre a reacção eutética durante a solidificação e pode solidificar segundo duas versões: a metaestável e a estável. Na primeira versão a reacção ocorre a uma temperatura de equilíbrio de 1148°C traduzindo-se pela seguinte equação:  $L (4,30\%C) = \gamma (2,11\%C) + Fe_3C (6,67\%C)$ . Enquanto na segunda versão, a reacção eutética que ocorre a uma temperatura de equilíbrio de 1154°C, traduz-se pela equação  $L (4,26\%C) = \gamma (2,08\%C) + C_{grafite} (100\%C)$  [2].

Elevados teores em carbono e silício, simultaneamente com leis de arrefecimento lentas, favorecem a solidificação segundo a versão estável, ocorrendo, a formação de um eutético grafitico, do qual resultam ferros fundidos cinzentos. Inversamente, baixos teores em carbono e silício, juntamente com leis de arrefecimento rápidas, favorecem a solidificação segundo a versão metaestável, com formação de ledeburite, originando ferros fundidos brancos [2].

Consoante o arrefecimento pode-se obter dois tipos de estrutura com a presença de grafite, produtos transformados de austenite e carbonetos. Se o arrefecimento se processar, total ou parcialmente, segundo o sistema estável obtêm-se ferro fundido cinzentos, destacada pela precipitação de grafite. Se ocorrer segundo a metaestável, obtêm-se ferros fundidos com uma superfície de fractura de cor branca, denominada por ferro fundido branco [2].

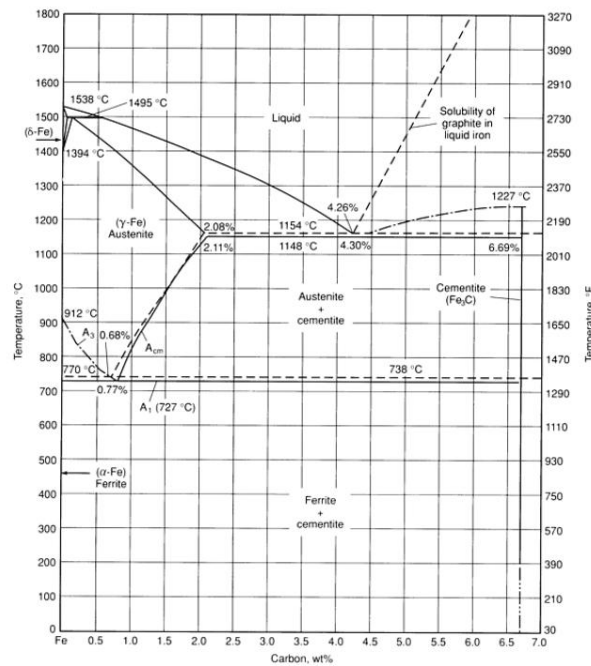


Fig. 1- Diagrama de equilíbrio Fe-C até uma percentagem de 7% de carbono [2].

A velocidade de arrefecimento tem também um papel importante, pois dois ferros com a mesma composição química, como referido anteriormente, podem solidificar segundo diferentes velocidades, dando origem a microestruturas e superfícies de fractura distintas. A lei de arrefecimento é influenciada pelos seguintes parâmetros:

- Espessura da peça a produzir,
- Natureza da moldação em que a peça é vazada.

Espessuras maiores de peças levam a uma menor velocidade de arrefecimento do metal dentro da cavidade da moldação. No que diz respeito à moldação, quanto maior for a condutividade térmica melhor será a extracção do calor, aumentando assim a velocidade de arrefecimento [2].

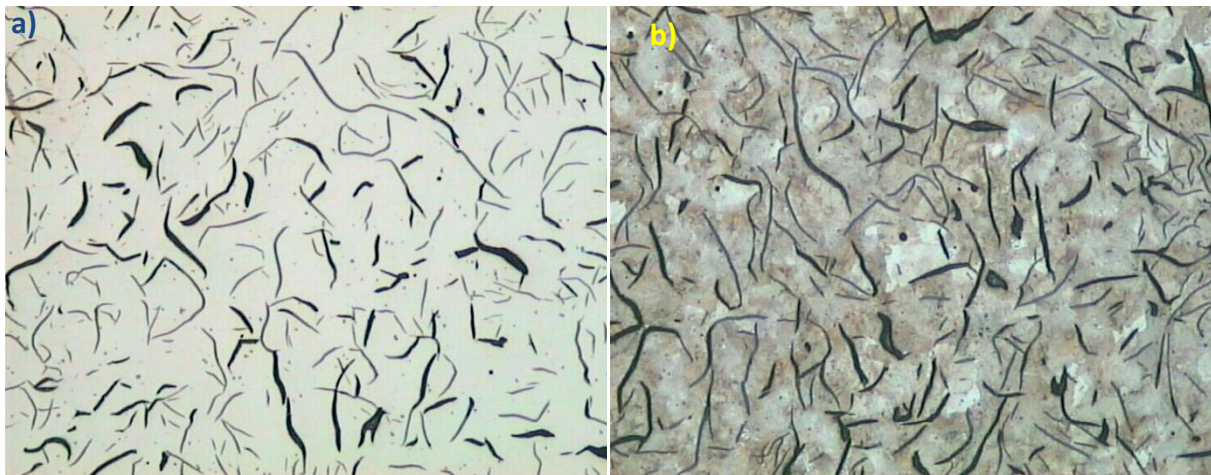
A obtenção destas ligas provém da adição de elementos que tornam a cementite instável, denominados grafitizantes como o silício, e anti-grafitizantes como o manganês [3].

### 1.2.1. Composição Química

Os ferros fundidos podem designar-se ligados e não ligados. A diferença que os distingue incide nos teores de alguns elementos tais como o silício, o manganês, o cromo e o níquel. Neste material pode-se encontrar carbono quer sob a forma de cementite quer sob a forma de carbono livre – grafite. O carbono baixa consideravelmente a temperatura de fusão até às temperaturas eutéticas. O aumento do teor de carbono favorece a solidificação segundo o sistema estável, devido à precipitação de grafite que é favorecida por altos teores de silício, pese embora haja um limite acima do qual é prejudicial pelo encruamento originado na ferrite [3].

### 1.2.2. Ferro fundido Cinzento

Como referido anteriormente esta é uma liga ferro-carbono que solidifica segundo a versão estável, isto é, em que o carbono eutético precipita sob a forma de grafite [4], e na sua composição contém um alto teor em silício [3]. A sua estrutura é basicamente constituída por grafite inserida numa matriz perlítica, com possibilidade de aparecer ferrite e cementite que pode ser vista na Fig.2 uma estrutura típica de uma liga deste tipo [4].



**Fig. 2 - Duas microestruturas típicas de ferro fundido cinzento ferrítico. Microestruturas obtidas da peça em estudo da com uma resolução de 100X. A figura a) corresponde a uma microestrutura sem ataque enquanto a imagem b) representa a zona que foi atacada quimicamente.**

Devido à elevada fluidez no estado líquido que esta liga apresenta, torna-se capaz a produção de peças finas e de forma complexa. Ao contrário da maioria das ligas fundidas, durante a solidificação, a formação de grafite provoca uma expansão que contraria a

contração metálica inerente à solidificação, originando peças sãs e com excelentes rendimentos de metal se a moldação for suficiente rígida para a suportar. Esta pode-se traduzir segundo a equação seguinte:

$$\Delta V (\%) = 2 \times (\%C \text{ grafítico} - 2,80); \quad \text{Eq. 1}$$

Onde  $\Delta V$  representa a variação de volume durante este processo [5].

A Fig. 3 representa as gamas recomendadas de C e Si dos diferentes tipos de ferro fundido. Nela é possível observar duas linhas distintas a tracejado onde a linha superior representa um valor de carbono equivalente de 4.3% [6]. Esta linha define uma transição entre as condições hipo e hipereutéticas. Este valor é calculado através da equação seguinte:

$$CE \approx \%C + \%Si \div 3 \quad \text{Eq. 2}$$

A composição eutética pode ser influenciada pelo teor de silício; a forma de exprimir essa influência é através de um índice denominado “grau de saturação eutética  $\equiv S_c$ ” cuja definição é:

$$S_c = \%C \div (4,26 - 0,31 \times \%Si) \quad \text{Eq.3}$$

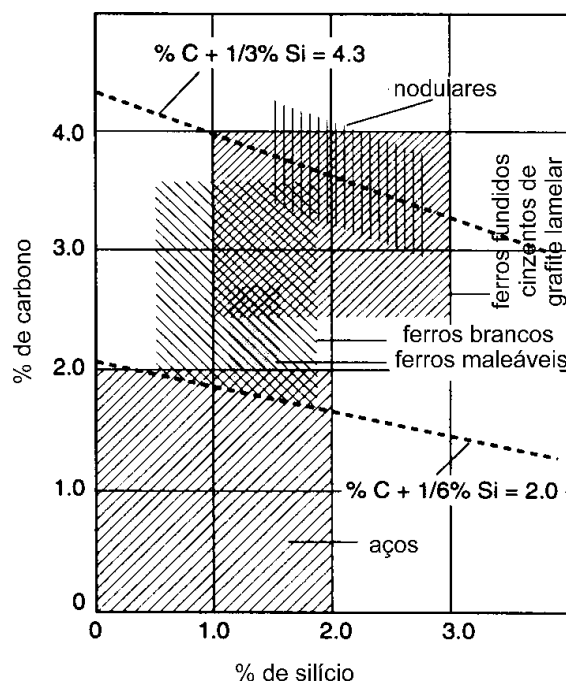


Fig. 3 - Gamas recomendadas de carbono e silício para os diferentes tipos de ferros fundidos.

### 1.2.3. Elementos de liga

Esta liga é uma liga de Fe-C-Si, contendo outros elementos em pequenas quantidades. Os níveis de carbono e silício variam consoante os valores presentes na Tabela I.

Tabela I- Níveis de carbono e silício nos ferros fundidos cinzentos comerciais [7].

Tipo de ferro	% total de C	% Si
Classe 20	3,40 – 3,60	2,30 – 2,50
Classe 30	3,10 – 3,30	2,10 – 2,30
Classe 40	2,95 – 3,15	1,70 – 2,00
Classe 50	2,70 – 3,00	1,70 – 2,00
Classe 60	2,50 – 2,85	1,90 – 2,10

Os ferros fundidos cinzentos variam significativamente nas suas propriedades físicas e mecânicas, devido a uma grande variedade de factores de processamento que influenciam a sua solidificação e, conseqüentemente, as transformações no estado sólido [4].

Na composição química desta classe de ferros fundidos os elementos principais são o C e Si, outros como o fósforo, o manganês e o enxofre são os elementos que se apresentam

em menor quantidade. Têm um papel importante no processamento deste material e a sua presença deve-se tanto a uma adição propositada quer à presença em matérias-primas, sendo que fazem sempre parte da composição química dos ferros fundidos cinzentos [7].

**Fósforo** – É raramente adicionado, devido á proveniência normal da sucata e lingotes usados na produção do banho. O seu teor base, na maioria da produção de ferros, varia entre 0,02 a 0,10%, porém, para satisfazer necessidades de elevada resistência pode-se elevar este valor até 0,15%. Este elemento tem um papel importante na solidificação do ferro fundido pois aumenta a vazabilidade e baixa o ponto de fusão consoante se aumenta a sua percentagem. Quando em excesso promove a formação do eutético fosforoso, a esteadite, que fragiliza as peças [7].

**Enxofre** – Responsável pela formação de sulfureto de ferro que precipitará no final de solidificação, fragilizando a estrutura devido à sua distribuição. Juntamente com o manganês a formação de sulfuretos complexos de ferro e manganês é inevitável no inicio da solidificação. A sua distribuição é aleatória ao longo da matriz, não provoca alterações significativas nas propriedades mecânicas. A percentagem de enxofre no ferro cinzento é muito importante devido ao papel que desempenha na nucleação da grafite, como se pode ver na Fig. 4, onde se encontra representado o efeito do enxofre sobre a taxa de germinação (densidade de células eutécticas) em ferros cinzentos inoculados e não inoculados [7].

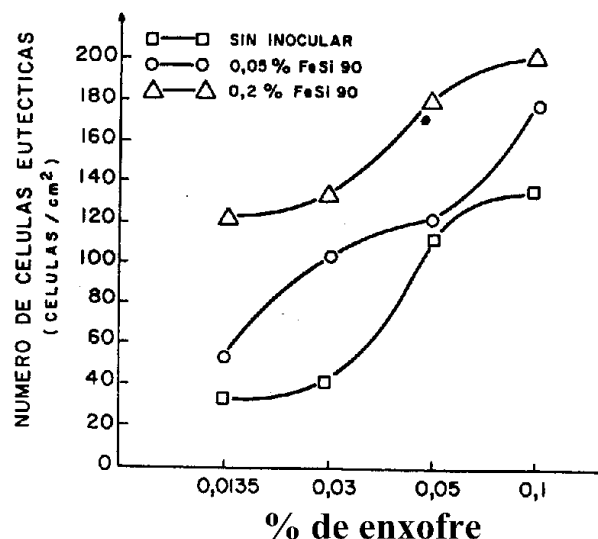


Fig. 4 - Efeito do teor inicial de enxofre e dois níveis de inoculação sobre o número de células.

**Manganês** – De símbolo químico (*Mn*), é um elemento perlitizante, ou seja, favorece a obtenção da estrutura perlítica à temperatura ambiente. Recomenda-se a utilização das

seguintes relações entre os teores de manganês (Mn) e de enxofre (S) nos ferros fundidos cinzentos de estrutura lamelar [7]:

$\% \text{Mn} = \% \text{S} \times 1,7$  (percentagens equivalentes de S e Mn para a formação de sulfureto de manganês (MnS));

$\% \text{Mn} = \% \text{S} \times 1,7 + 0,15\%$  (para estruturas essencialmente ferríticas, com um mínimo de perlite);

$\% \text{Mn} = \% \text{S} \times 3 + 0,35\%$  (para estruturas essencialmente perlíticas).

Poder-se-á dizer que o principal papel do manganês, consistirá na neutralização do enxofre pois, em certos casos em que este se encontra em teores elevados, dá origem à precipitação de sulfureto de ferro (por insuficiência de Mn), podendo ocorrer o fenómeno designado por *têmpera invertida*. Tal facto é devido à segregação de enxofre nas zonas mais maciças das peças (últimas a solidificarem) o que origina, devido ao seu efeito antigrafitizante, o aparecimento de uma estrutura branca [7].

## 2. Software de simulação

A simulação hoje em dia desempenha um papel extrema importância no desenvolvimento de novos projectos. O número de ensaios em regime fabril realizados até á produção em série de peças é reduzido significativamente. Para além dos factores anteriormente mencionados aquando do estudo de novas formulações para o sistema de gitagem, consegue-se com alguma rapidez observar as diferenças entre os casos em estudo.

### 2.1.MagmaSoft®

Este software utiliza no malhamento o método de diferenças finitas, onde subdivide o modelo 3D em diversos cubos com tamanho de aresta definida pelo utilizador.

Este software apresenta uma área de trabalho como pode ser visualizada na Fig. 5, nesta são perceptíveis os menus principais que compõem este software. São eles o menu projecto, o pré-processador, o malhamento, simulação, pós-processador, base de dados e a ajuda.



Fig. 5 – Área de trabalho do software MagmaSoft®, onde é possível observar os diferentes menus.

No primeiro menu é possível executar todas as operações de base de cada projecto: abrir projectos, criar projectos, criar versões, apagar resultados e ver informações. É importante destacar a versatilidade da opção, criar versões, que permite aproveitar todos os ficheiros, que já se encontrem introduzidos, para novas simulações. Na Fig. 6 é possível visualizar todas as opções deste menu.

open project
create project
create version
delete results
delete version / project
rename project
project info
1: ---
2: ---
3: ---
4: ---
5: ---
exit MAGMASOFT

Fig. 6 - Opções disponíveis para do menu “project” do MagmaSoft

Logo de seguida encontra-se o menu do pré-processador, “preprocessor”, este menu activa o módulo, “MAGMApre”. Aqui é realizada a importação dos ficheiros CAD e o desenho de algumas geometrias necessárias, como por exemplo, a caixa de moldação e o “inlet” que representa a entrada do banho no gito de descida. Na Fig. 7 é possível visualizar a janela do menu mencionado anteriormente. É neste menu que se encontram disponíveis também algumas ferramentas, que permitem operações como o controlo das vistas e a escolha do tipo de material.

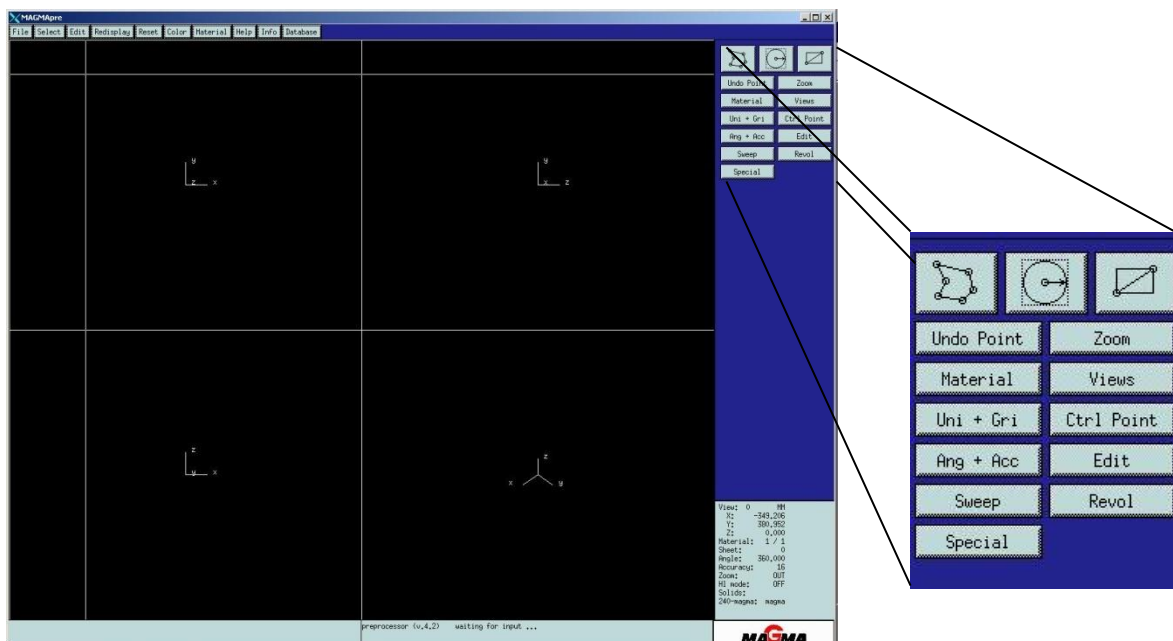


Fig. 7 - Janela do pré-processador do MagmaSoft

No que diz respeito à importação dos ficheiros só é possível importar em formato STL através da opção “Import SLA”. Previamente a esta acção deve-se escolher o tipo de material que cada ficheiro representa pois a cada tipo estão associadas propriedades diferentes aos materiais.

Quando se processa a importação dos ficheiros para o software é necessário indicar qual o tipo de material. Esta etapa é também realizada com recurso ao menu disponibilizado, Fig. 9. O MagmaSoft disponibiliza algumas opções para escolha: o “gating”, “casting”, “feeder”, “feederneck”, “sandm”, “filter”, “cutbox”, respectivamente sistema de gitagem, metal, alimentador, ataque do alimentador, areia de moldação. O único que não foi mencionado é o “cutbox” que nos possibilita definir o plano de simetria para divisão do modelo de modo a reduzir o tempo de simulação [9].

O menu seguinte, o “enmeshment”, disponibiliza diversas opções que possibilitam a operação de malhamento. É possível fazê-lo de um modo automático ou de um modo otimizado (Fig. 8). Se a opção for automático, é necessário apenas indicar um número de elementos para todo o modelo, quanto maior este valor mais perfeita será a descrição do modelo. Caso não se escolha o automático existem mais três opções possíveis, o “standard”, o “advanced” e o “advanced2”. Em cada uma destas opções existem 4 submenus: o “accuracy”, “wall thickness”, “element size” e “options”. Através destes submenus é possível realizar a otimização da malha segundo os eixos ortonormados x,y e z [9].

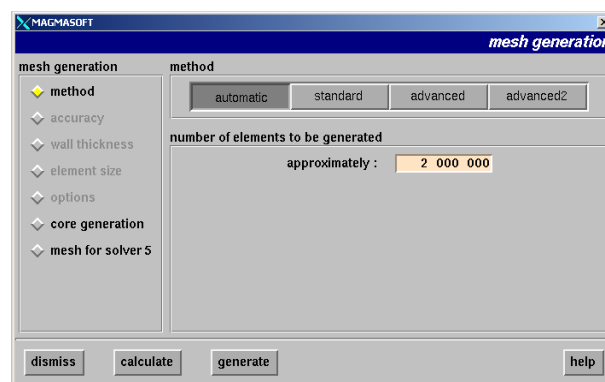


Fig. 8 - Janela do malhador onde estão visíveis as opções iniciais disponíveis. Consoante o método de escolha activam-se outras opções.

O menu seguinte, o “simulation”, apresenta diversos parâmetros a definir antes do início de qualquer simulação. A escolha inicial de cada simulação é o tipo de processo, neste

caso concreto, moldação em areia. Existe a possibilidade de simular apenas umas das fases do processo, o enchimento ou a solidificação, Fig. 9.

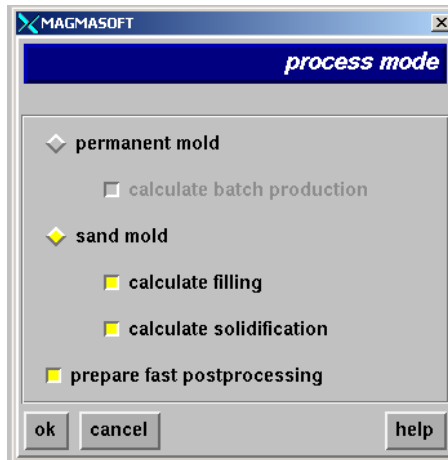


Fig. 9 - Opções disponíveis para escolha do processo, e objetivo da simulação.

Por fim, o menu pós-processador permite visualizar todos os resultados da simulação, através de um módulo próprio o “MAGMApost”. Todos os resultados são exportados pelo próprio programa em formato de imagem. A sequência das imagens pode ser definida em termos de tempo, e/ou percentagem, Fig. 10. Esta operação realiza-se antes de dar início à simulação e é definida no menu “simulation” onde se indicam os parâmetros da simulação [9].

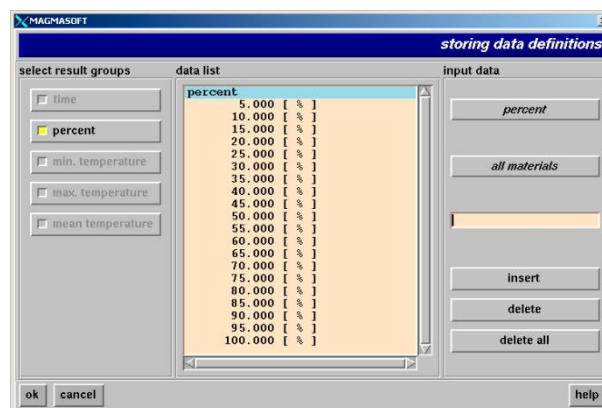


Fig. 10 - Quadro para a definição dos intervalos de aquisição de imagens.

### 3. Metodologia Experimental

Para a realização deste trabalho, utilizaram-se diversos “softwares” CAD e CAE. No trabalho utilizou-se o software de modelação de sólidos, Solidworks 2010, para a concepção do cacho completo e o Unigraphics 6.0 para corrigir alguns problemas existentes na peça. A geometria da peça fornecida foi criada através de superfícies e quando se importou a mesma para o Solidworks, foram detectadas zonas que não estavam fechadas totalmente.

No que diz respeito ao software de simulação utilizou-se o MagmaSoft 4.4 e o ProCast 2010<sup>1</sup> para as diversas simulações de enchimento e solidificação apresentadas ao longo deste trabalho.

#### 3.1. Início do projecto

A abordagem prática para este trabalho iniciou a partir do momento em que foi recepcionada a peça, já modelada, em ficheiro CAD. Procedeu-se ao desenho das diversas hipóteses para o estudo, Fig. 11, seguido da importação das geometrias para os softwares de simulação onde se realizaram os diversos cálculos.

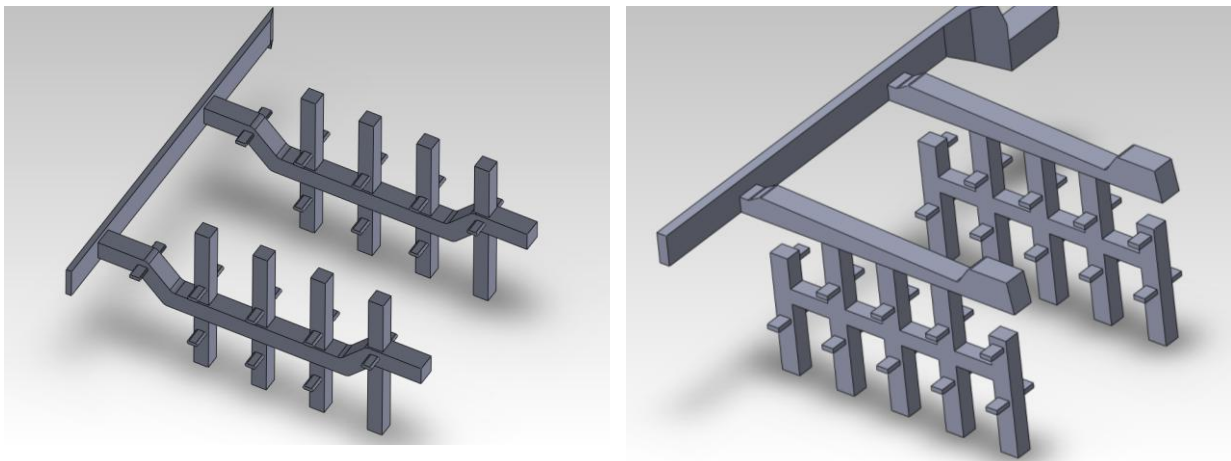


Fig. 11 – Modelo 3D de metade do sistema de gitagem utilizado para o estudo da peça em questão. Do lado esquerdo o sistema utilizada na Parte I do trabalho e do lado direito a formulação utilizada na Parte II.

Alguma parte do tempo foi dispendida na aprendizagem do MagmaSoft® visto que para mim era novo. Tendo em conta a adaptação a um ambiente industrial, a exigência, a dimensão do modelo e o equipamento disponível ao fim de aproximadamente um mês e meio conseguiu-se obter resultados das primeiras simulações. A aprendizagem deste software no

---

<sup>1</sup> O ProCast foi utilizado para a realização do relatório de seminário onde foi estudado e descrito.

início incidiu no estudo dos manuais disponíveis na empresa e em parte usando o método tentativa erro. Como exemplo explicativo, a ordem pelos quais elementos se dispõem no MagmaSoft® tem uma influência directa no arranque da simulação.

### 3.2. Análise da peça em estudo

A peça em estudo é um cárter conforme se pode ver na Fig. 12, é de elevada importância para a Funfrap visto que representará uma grande quota da produção, em quantidades de aproximadamente 270 000 peças por ano, com um possível aumento do volume de produção de cerca de 15%.

Para a produção existe em cada moldação um total de oito peças, com um peso de cacho de aproximadamente 160 Kg. Na Tabela II encontram-se alguns dados relevantes para o estudo em causa.

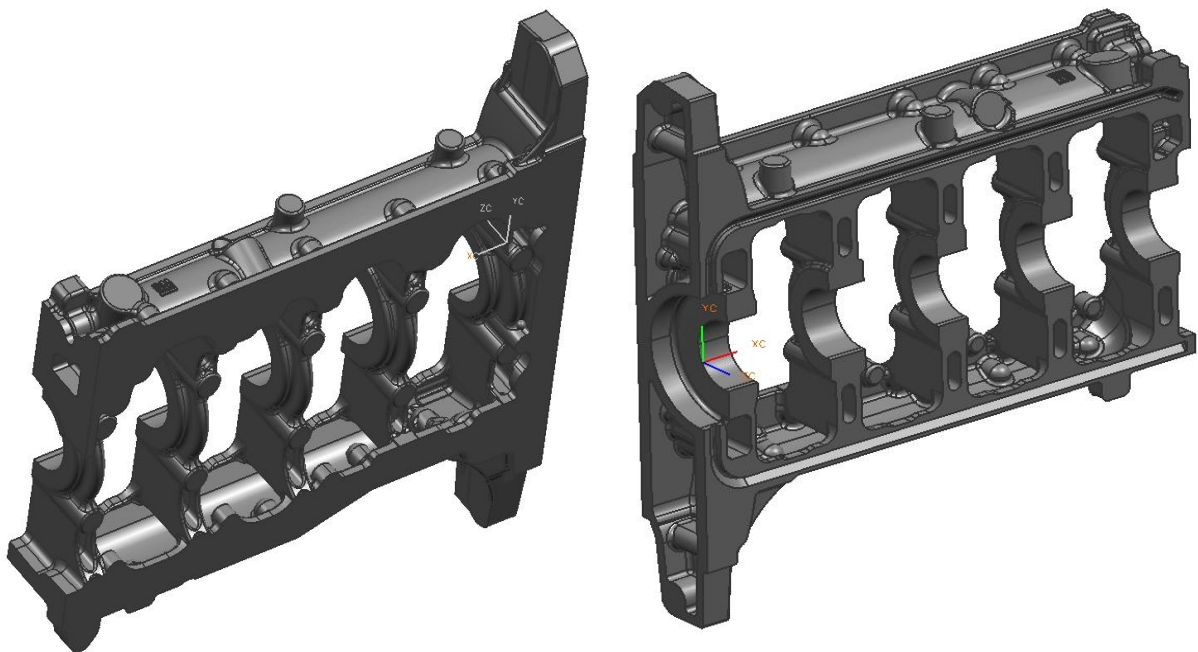


Fig. 12 – Modelo da peça de estudo.

A peça designada como cartar ou “bedplate” apresenta zonas de variação brusca de espessura como é possível observar na Fig. 13. Com estas variações de espessura torna-se real uma dificuldade no enchimento das peças, juntamente com paredes finas que provocam um arrefecimento mais rápido durante a solidificação.

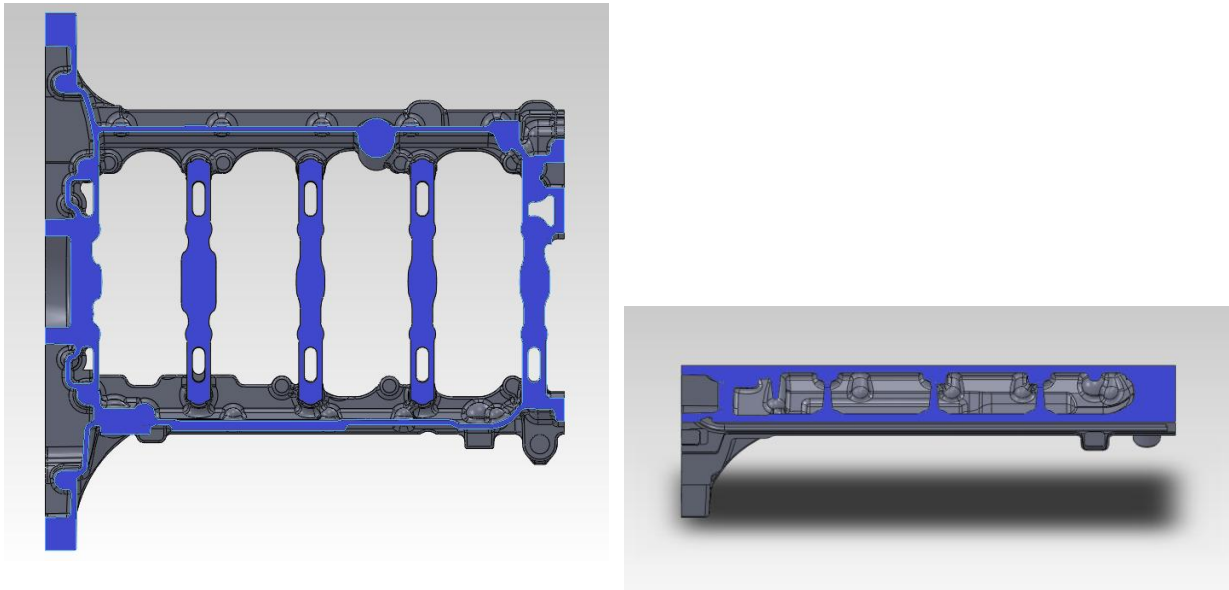


Fig. 13 - Cortes realizados no modelo onde se evidencia a sua variação de espessura.

Tabela II - Dados relativos à peça em estudo.

Comprimento	368 mm
Largura	376 mm
Altura	60 mm
Peso	10.7 kg

Estes dados foram obtidos juntamente do Eng.º Martinho com recurso a uma documentação existente e elaborada para a produção da peça em estudo.

### 3.2.1. Composição Química

Na Tabela III estão reunidos e apresentados os elementos químicos principais para a produção da peça, “bedplate”. Tal como os dados apresentados na Tabela II estes foram fornecidos pela empresa.

Tabela III - Composição química da liga utilizada para o fabrico da peça em estudo.

Elemento químico	C	Si	Mn	Cu	Cr	P	S
Teor em %	3,1-3,45	1.85-2.6	0.45-0.90	≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 0,10	≤ 0,16

### 3.2.2. Moldação e Machos

No que diz respeito a caixa de moldação esta tem as seguintes dimensões, Tabela IV:

Tabela IV – Dimensões da caixa de moldação.

Comprimento	1000 mm
Largura	900 mm
Altura	600 mm

Esta peça é feita por blocos de machos, cada caixa de moldação é constituída por dois blocos principais conforme a Fig. 14 e cada bloco é constituído por 4 subconjuntos demonstrados na Fig. 15.



Fig. 14 - Imagem representativa de um dos blocos principais de machos constituídos por 4 subconjuntos

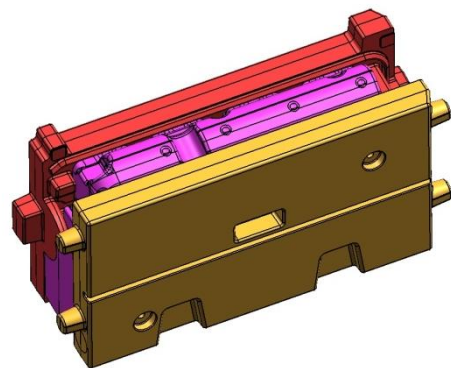


Fig. 15 - Imagem do subconjunto do bloco principal.

### 3.3. Dados relativos às simulações

Para este estudo realizou-se a recolha de mais dados relativos a peça e ao processo. Estes dados foram necessários para a realização das diversas simulações, conforme representado na Tabela V.

Tabela V - Dados recolhidos e utilizados em todas as simulações.

Material	Ferro Fundido Cinzento GJL 250
Tipo de Areia	Areia Verde
Temperatura de Vazamento	1400 °C
Tempo de vazamento	≈ 13s
Temperatura da Areia	40° C
Dimensões da caixa de moldação	1000 x 900 x (300 + 300) mm

Aquando início deste projecto a Funfrap já tinha efectuado alguns ensaios, destes, constatou-se que os defeitos com maior prevalência eram bolhas, inclusões, cascão e juntas frias. Na Fig. 16 e Fig. 17 podem ser visualizadas algumas fotografias representativas desses defeitos.



**Fig. 16 - Um dos defeitos mais encontrado nas zonas das sapatas, bolhas.**



**Fig. 17 - Defeito assinalado e considerado como junta fria.**



Fig. 18 - Cascão identificado em alguns modelos, também ocorre junto às sapatas na parte inferior.



Fig. 19 - Defeito encontrado em algumas peças após controlo por ultra-sons.

Para a resolução destes problemas foram elaborados fluxogramas através de uma ferramenta da qualidade denominada “5HIW”, ou em português os “5 porquês”, com a definição das causas possíveis do problema e com as respectivas acções.

Elaborou-se também o diagrama de “Ishikawa” ou mais comumente designado “Causa Efeito”, ou “4M” que permitiu de uma forma gráfica, identificar, organizar e apresentar de modo estruturado as possíveis causas de cada um dos problemas.

As causas dividem-se em 4: a Mão-de-obra, a Matéria-prima, a Máquina e Método, daí a designação 4M. Na Fig. 20 está representado um dos diagramas realizados para um dos problemas. No Anexo I estão representados os outros diagramas realizados pelo departamento da qualidade.

O uso destes fluxogramas e diagramas resulta da necessidade de detectar quais as causas que poderiam ser previstas através da simulação.

## Análise 4 M

Assunto: Análise da sucata interna do Carter Chapéu 779

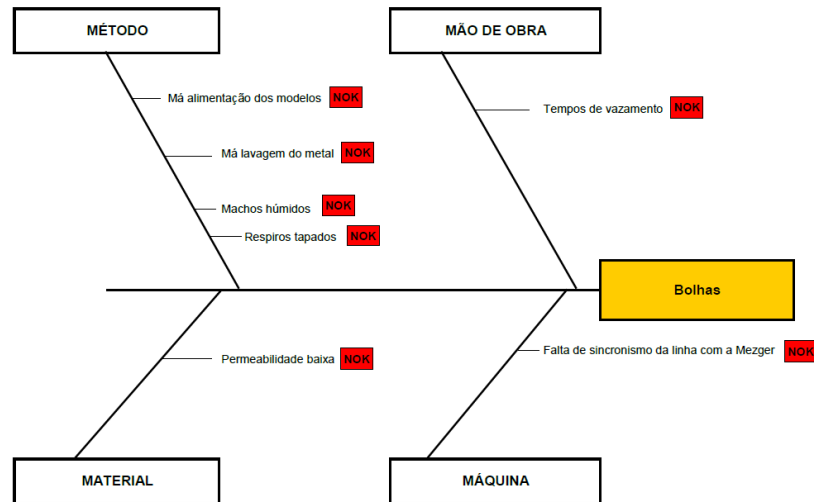


Fig. 20 - Diagrama 4M para análise das possíveis causas que provocam bolhas.

Após identificados os pontos na qual a simulação pode contribuir para uma interpretação que beneficie a resolução destes problemas, realizaram-se diversas simulações após efectuar um estudo prévio do MagmaSoft®. Este serviu para aproximação dos resultados com a realidade onde foram variados os valores de temperatura e tempo de enchimento numa fase inicial e posteriormente parâmetros tais como “Graphite Precipitation”, “Feeding Effect”, “Treatment Yield” e “Inoculation Method”

Durante a primeira fase de simulações usaram-se alguns parâmetros que constam na Tabela VI, o HTC - coeficiente de transferência de calor e o “Inoculation Method”.

Tabela VI - Parâmetros do MagmaSoft® pré-definidos, para o início das simulações.

Parâmetro	Valor
Coeficiente Transferência de Calor - HTC	Tempiron
Inoculation Method	Very Good

O parâmetro “Inoculation Method” dispõe de 3 opções possíveis: “fair”, “good” e “Very Good”. Este parâmetro relaciona-se directamente com a inoculação como o próprio nome indica.

Como mencionado anteriormente, nas primeiras simulações utilizou-se a opção “very good” que se encontrava pré-definida. Segundo a bibliografia esta opção traduz uma inoculação “in-mold” e “in-stream” com pré-tratamento do banho [HH].

Utilizou-se também o parâmetro HTC - coeficiente de transferência de calor, com o valor denominado “Tempiron”.

Este parâmetro representa a forma como o fluxo de calor atravessa uma interface. Este valor influencia fortemente a evolução da solidificação e tem um papel importante na sanidade dos componentes produzidos [8], daí a importância e necessidade em validar o seu valor referência.

Neste trabalho foi usado um valor pré-definido no MagmaSoft® para representar a transferência de calor entre a peça e a areia de moldação. Esta interacção é denominada resistência térmica de contacto. Este parâmetro é descrito por uma curva que relaciona o valor do coeficiente de transferência de calor com a temperatura em vez de um valor constante. Esta curva está representada na Fig. 21.

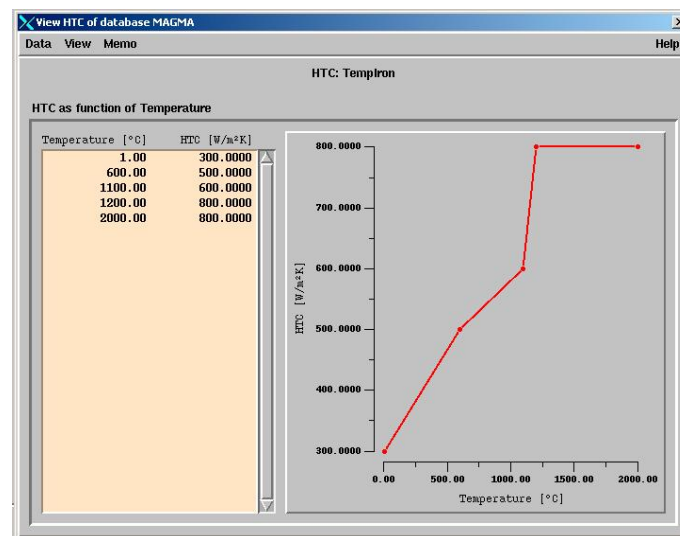


Fig. 21 - Gráfico da variação temperatura/HTC contida na base de dados do software MagmaSoft.

## 4. Apresentação e discussão dos resultados

Nesta parte do trabalho serão apresentados os resultados obtidos das diversas simulações efectuadas, bem como os parâmetros mais importantes utilizados.

A nível de resultados serão divididos em 4 partes:

- **Parte I** - utilizou-se a nova formulação do sistema de gitagem em estudo na empresa para compreender o comportamento de 2 parâmetros o “Feeding Effect” e o “Graphite Precipitation”.
- **Parte II** - usaram-se os parâmetros estudados na parte I para validar os valores escolhidos mas desta vez com o sistema de gitagem definido pela empresa
- **Parte III** - constam os resultados obtidos no software ProCast, contudo, nesta parte apenas se efectuaram simulações de enchimento com o intuito de avaliar o comportamento do metal descrito por este software para o sistema de gitagem definido na parte II.
- **Parte IV** - realizou-se a comparação de resultados entre o MagmaSoft® e o ProCast como também se realizaram simulações em ambos os softwares comparado o HTC – coeficiente de transferência de calor.

Esta ordem foi assim atribuída devido à necessidade de acompanhar o projecto e ensaios de uma nova reformulação do sistema de gitagem.

A maioria dos resultados apresentados, são da função pós-processamento “Porosity”. Este critério é normalmente utilizado para avaliar a sanidade dos fundidos conjuntamente com a função “x-ray”. Deste modo é possível visualizar as áreas do(s) fundido(s) que possam apresentar problemas devido à contracção do metal. Alternadamente é possível efectuar cortes nos modelos usando a função “Clipping” que permite visualizar com exactidão as zonas exactas onde ocorrem estes defeitos.

### 4.1. Localização de Pontos quentes

Antes de qualquer simulação iniciou-se uma fase de aprendizagem do MagmaSoft®. Após esta fase seguiu-se o estudo e determinação dos pontos quentes da peça. Na Fig. 22 apresentam-se os módulos relativos das diferentes partes da peça.

Após o vazamento do metal líquido na moldação, a solidificação inicia-se normalmente das paredes da moldação para o interior. O metal líquido arrefece inicialmente na periferia, onde existe um enorme gradiente térmico e a extracção de calor para o meio é maior. Por esta

razão, a última zona a solidificar, normalmente é a mais maciça da peça, onde não existe material para compensar a contracção durante solidificação, o que origina rechupes.

A localização das regiões mais prováveis de provocar defeitos é identificada pelo maior módulo da peça, que se traduz matematicamente através da razão entre o volume dessa secção da peça e a área de arrefecimento.

O caminho de solidificação em diversas direcções deve-se as diferentes espessuras existentes na peça. Estes dados foram importantes visto que permitiram uma troca construtiva de informações entre as pessoas envolvidas no projecto para compreensão da localização das zonas de ataque e alimentação.

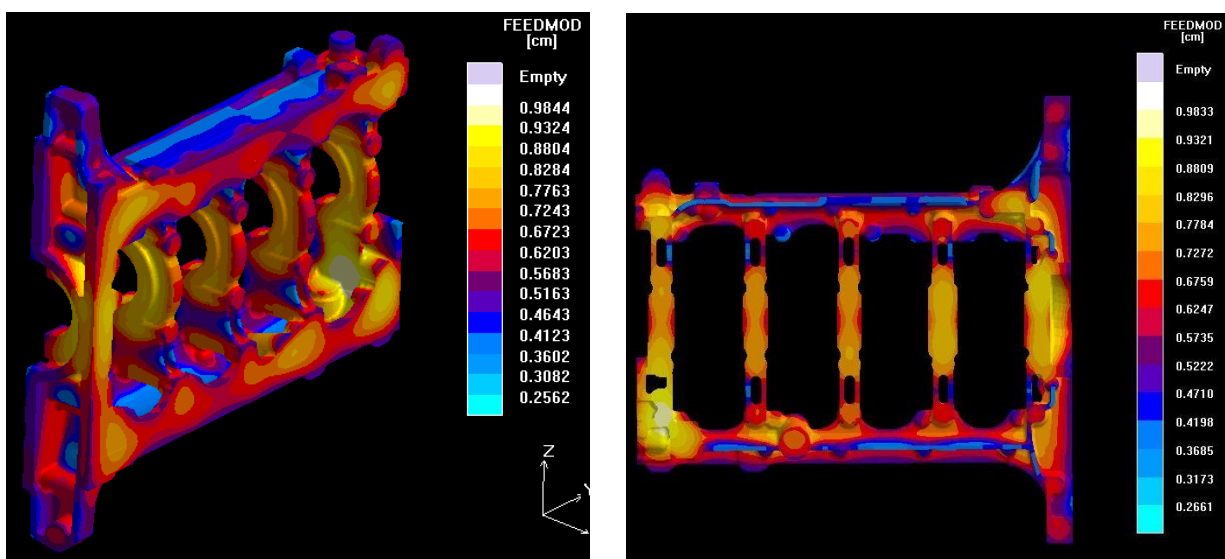


Fig. 22 - Módulo das diferentes partes da peça.

Com estes dados obtidos por simulação conseguiu-se antecipar possíveis locais de formação de defeitos na peça, assim como zonas quentes isoladas, permitindo uma troca de informação com as pessoas envolvidas no projecto.

Durante esta fase, como já tinham sido elaboradas placas molde e ferramentas não era possível, nem viável, estar a efectuar alterações, contudo, as observações foram bem aceites junto das pessoas envolvidas.

## 4.2. Parte I – Nova formulação do sistema de gitagem.

Para obter uma melhor percepção do que pode acontecer durante o enchimento, simulou-se o cacho com dois diferentes tempos de enchimento diferentes, 15 e 13 segundos respectivamente. Estes valores foram estipulados pela empresa e foram utilizados devido à necessidade de avaliar possíveis diferenças significativas.

Nas Fig. 23 e Fig. 24 é possível observar os resultados destas simulações no que toca a temperatura no fim do enchimento.

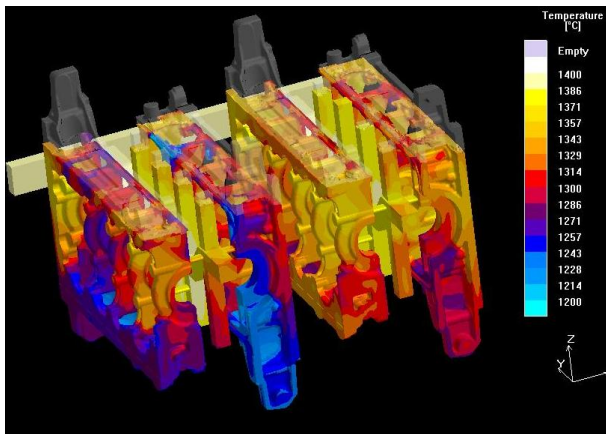


Fig. 23 - Velocidade de enchimento com um tempo de 15 segundos.

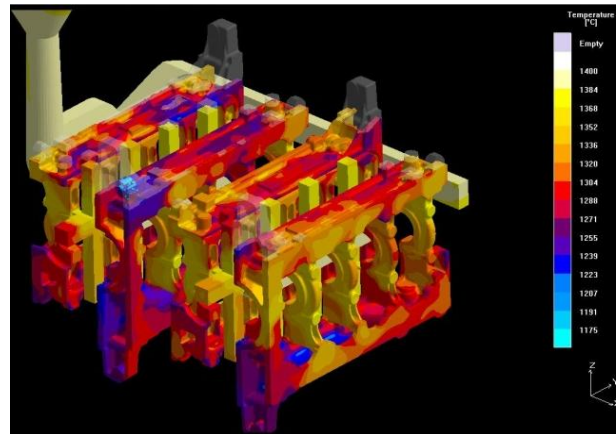
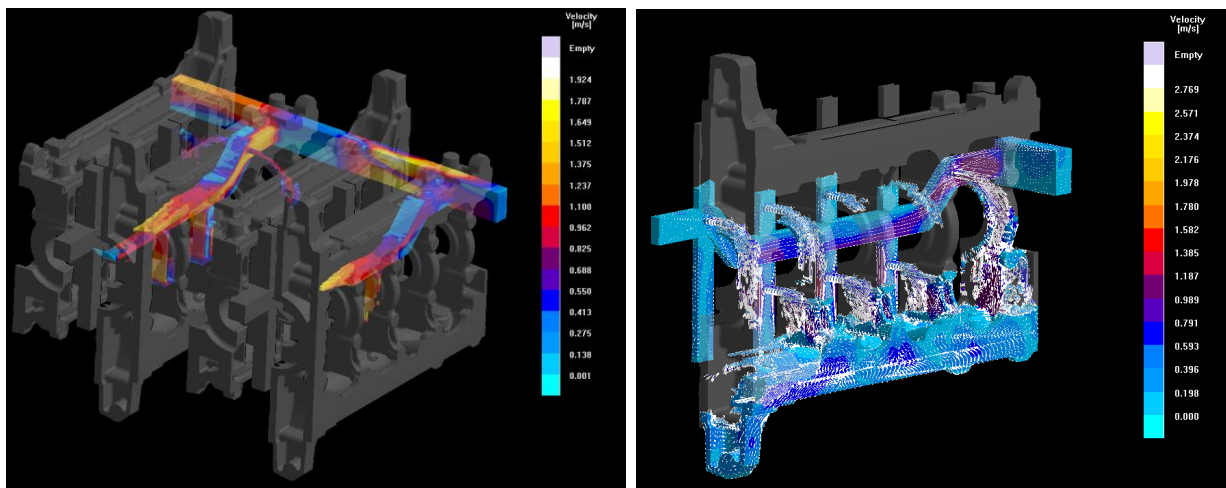


Fig. 24 - Velocidade de enchimento com um tempo de 13 segundos.

A escolha dos diferentes tempos de enchimento justifica-se com a diferença de tempos existente entre a primeira e a última moldação de cada colher.

Na Fig. 23 é notória uma zona de metal mais frio na extremidade do modelo, enquanto que com a redução de 2 segundos no tempo de vazamento a mesma zona sofre uma subida da temperatura na peça. Em suma, uma redução de dois segundos no tempo de enchimento, favorece a uniformização da temperatura dentro da moldação.

Tendo em conta os resultados obtidos anteriormente, continuou-se o estudo tendo como referência a simulação com um tempo de vazamento de 13 segundos. Desta vez analisou-se a mesma simulação mas segundo a sua velocidade de enchimento, Fig. 25.



**Fig. 25 – a) Velocidade de enchimento no primeiro ataque à peça. b) Velocidade de enchimento a uma percentagem de 60% do enchimento.**

No que diz respeito à velocidade de enchimento o modelo não apresentou problemas de relevância, isto é, ataque à peça em velocidade excessiva. Merece destaque apenas o primeiro ataque do canal secundário. Este inicia o seu enchimento primeiro que os restantes ataques, como é visível na Fig. 25. a) o que pode favorecer a solidificação do primeiro metal.

Após todo o canal preenchido com metal a velocidade nos ataques é reduzida permitindo um enchimento mais calmo do metal abaixo, dos 0.5 m/s, porém na imagem b) visualiza-se um ligeiro atraso de enchimento entre os modelos até uma percentagem de enchimento de 50%, na qual o enchimento de todos os modelos se iguala.

De um modo geral é de esperar um enchimento turbulento proporcionado pela localização dos ataques, levando a um enchimento em queda, Fig. 26.

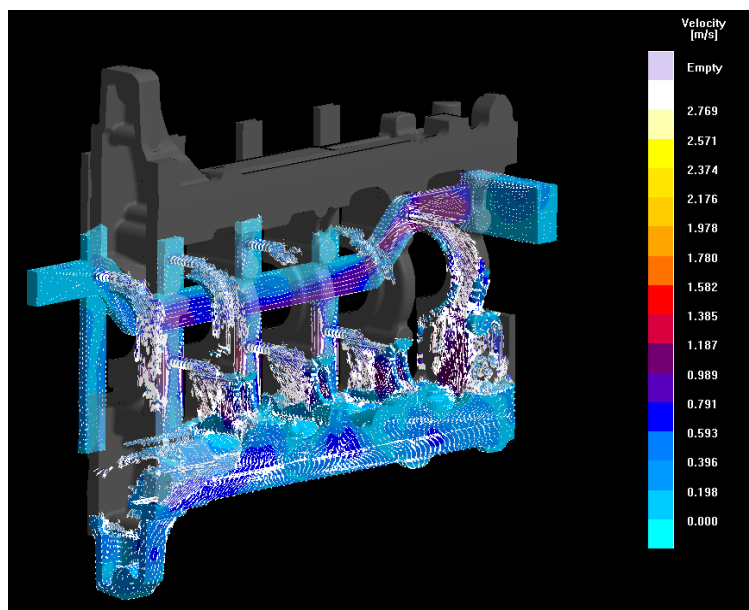


Fig. 26 - Corte realizado a Fig 23 com intuito de realçar a turbulência do metal na zona inferior , sapata.

Observou-se uma turbulência no que diz respeito aos modelos que se localizam com a sapata para a parte exterior da moldação. Na Fig. 25 b) e Fig. 26, é perceptível essa turbulência. O atraso que se nota durante a fase do enchimento, conjuntamente com a turbulência e salpicos, pode provocar defeitos devido a pequenas quantidades de metal que possam solidificar antes de ser totalmente preenchido o modelo.

Em vista à aproximação dos resultados das diversas simulações com as validações experimentais, tornou-se necessário conhecer a influência de alguns parâmetros no resultado final. Assim sendo, procedeu-se à realização de diversas simulações. Em todas foram usados os valores da Tabela V em complemento dos mencionados em cada uma das etapas.

#### 4.2.1. Etapa 1

Nesta etapa inicia-se o estudo do parâmetro “Graphite Precipitation” que representa o grau de precipitação de grafite no fim da solidificação, este parâmetro assume valores unitários numa escala de 1 a 10. O valor de 10 representa um valor máximo de expansão da grafite traduzindo-se numa baixa tendência para ocorrência de contracção metálica,

Iniciou-se a simulação deste sistema de gitagem com os parâmetros que constam na Tabela VII e registaram-se os resultados observados (Fig. 27).

Tabela VII - Valores utilizados para a simulação inicial e gama de valores permitidos.

Parâmetro	Valor utilizado	Gama de Valores
Inoculation Method	Very Good	Fair, Good, Very Good
Feeding Effectivity (%)	100	0 – 100
Treatment Yield (%)	100	>0
Mold Dilatation	Stable Mold	Die / Stable /Weak
Graphite Precipitation	10	0 - 10

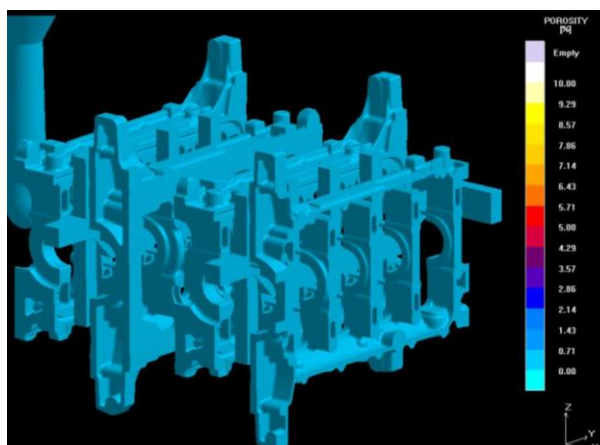


Fig. 27 - Defeitos na peça avaliados pelo critério “porosity”, onde se observa a inexistência de defeitos.

#### 4.2.2. Etapa 2

Seguidamente simulou-se a mesma formulação do sistema de gitagem, mas desta vez reduzindo o valor do “Graphite Precipitation” de 10 para 8, os valores da simulação encontram-se indicados na Tabela VIII.

Tabela VIII - Dados utilizados para a segunda simulação onde se reduziu o valor do "Graphite Precipitation"

Parâmetro	Valor utilizado
Inoculation Method	Very Good
Feeding Effectivity (%)	100
Treatment Yield (%)	100
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	8

Para este valor de “Graphite de Precipitation” foram observados os resultados e observou-se, Fig. 28, a ocorrência de defeitos na peça.

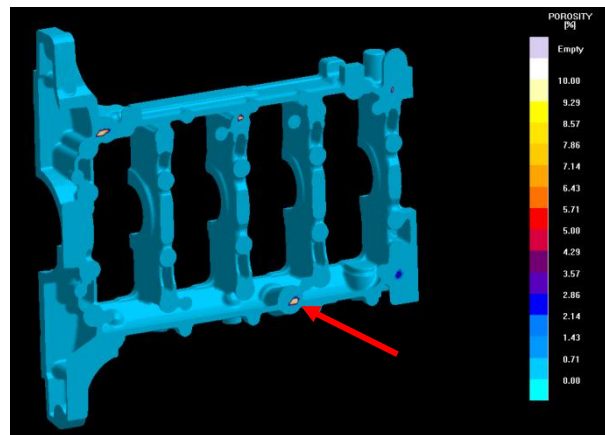


Fig. 28 - Defeitos na peça avaliados pelo critério “porosity”, onde é possível observar na zona assinalada um defeito coincidente com a validação experimental.

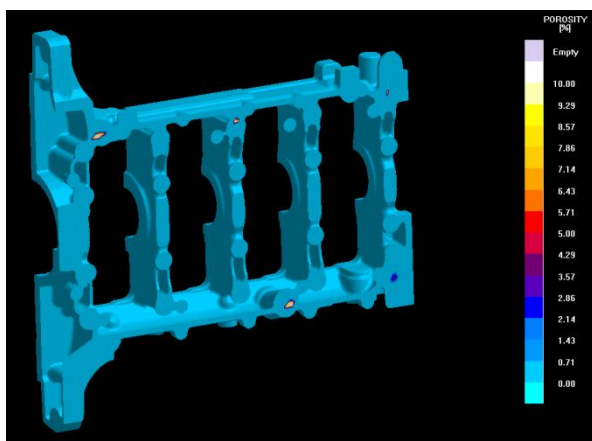
Nesta formulação do sistema de gitagem os defeitos assinalados não se reflectem na realidade. Existe porém uma zona assinalada na figura que representa uma das zonas responsáveis pela maior percentagem de sucata que actualmente se verifica pelo que se pode assumir uma boa adequação das condições experimentais.

### 4.2.3. Etapa 3

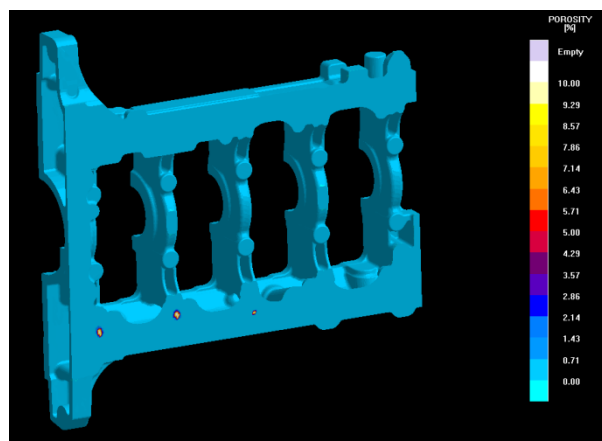
Seguidamente simulou-se a mesma formulação do sistema de gitagem, mas desta vez reduzindo o valor do “Graphite Precipitation” de 8 para 5. Os valores da simulação encontram-se indicados na Tabela IX e observou-se os resultados apresentados na Fig. 29 e Fig. 30.

Tabela IX - Dados utilizados para a segunda simulação onde se reduziu o valor do "Graphite Precipitation"

Parâmetro	Valor utilizado
Inoculation Method	Very Good
Feeding Effectivity (%)	100
Treatment Yield (%)	100
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	5



**Fig. 29 - Defeitos assinalados no modelo. Foram avaliados pelo critério "Porosity" numa escala de 0 a 10%.**



**Fig. 30 - Defeitos assinalados no modelo simulado avaliados pelo mesmo critério e a mesma escala da figura anterior.**

Observou-se novamente que a maioria dos defeitos são recorrentes, porém existe o aparecimento de outros defeitos assinalados. Na Fig. 30 é possível observar defeitos na zona inferior da peça nas “costas”, na prática este defeito não ocorre, por vezes, existem peças onde aparecem defeitos na costas mas na parte superior da peça atribuindo-se a causa a bolhas, pelo que se assume que o parâmetro do “Graphite Precipitation” mais apropriado é o que tem o valor de 8.

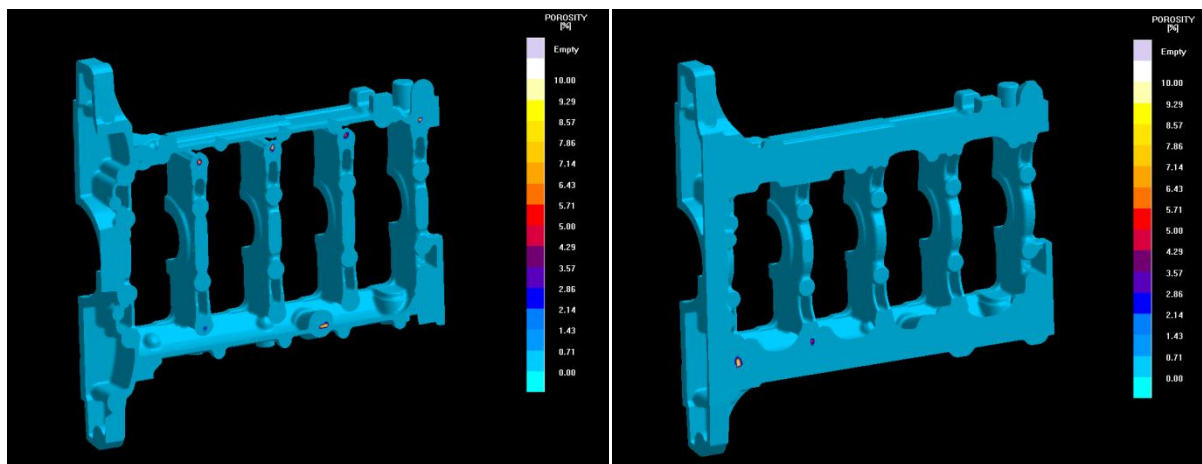
#### 4.2.4. Etapa 4

Nesta fase tendo em conta que os resultados não se aproximavam da prática com os valores tabelados, efectuou-se uma alteração. Inicialmente o valor do “Treatment Yield” era de 100 e alterou-se para um valor de 80. Este valor influencia o “Inoculation Method” através da percentagem que lhe é atribuída, isto é, se este parâmetro tiver o valor de 100% todo o valor é considerado, por outro lado, se o valor for de 80% apenas 80% do efeito do “Inoculation Method” é tido em conta.

**Tabela X - Valores definidos no MagmaSoft para a simulação inicial.**

Parâmetro	Valor utilizado
Feeding Effectivity (%)	100
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	8

Após concluída a simulação os resultados foram avaliados através do critério “Porosity” e com recurso à função “clipping”, permitiu efectuar diversos cortes nos modelos, Fig. 31.



**Fig. 31 - Resultados avaliados pelo critério de Porosidade, onde é possível observar a existência de mais defeitos e o aparecimento de mais localizações de defeitos.**

Foi possível observar que tendo uma redução de 20% no valor do “Inoculation Method” provocado pela redução do parâmetro “Treatment Yield” de 100 para 80% levou ao aparecimento de mais defeitos. Foi possível observar nas imagens que os defeitos apresentados incidiam em locais que não se verificam na prática.

Deste modo procedeu-se à alteração do parâmetro “Graphite Precipitation” para valores de 5 e 2 para perceber qual a influência destes no aparecimento de defeitos.

#### **4.2.5. Etapa 5**

Iniciou-se uma nova simulação, onde se efectuou a redução deste parâmetro de 8 para 5, como apresentado na Tabela XI.

**Tabela XI - Valor utilizado para a simulação 2, com um valor menor de "Graphite Precipitation"**

Feeding Effectivity (%)	100
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	5

Observou-se um comportamento dentro do esperado, isto é, com a redução da precipitação da grafite um aumento no aparecimento de defeitos. Estas zonas estão assinaladas com uma cor diferente. É visível na Fig. 32, zonas com uma coloração vermelha e amarelo claro, zonas de possíveis defeitos, correspondente a zonas mais maciças da peça.

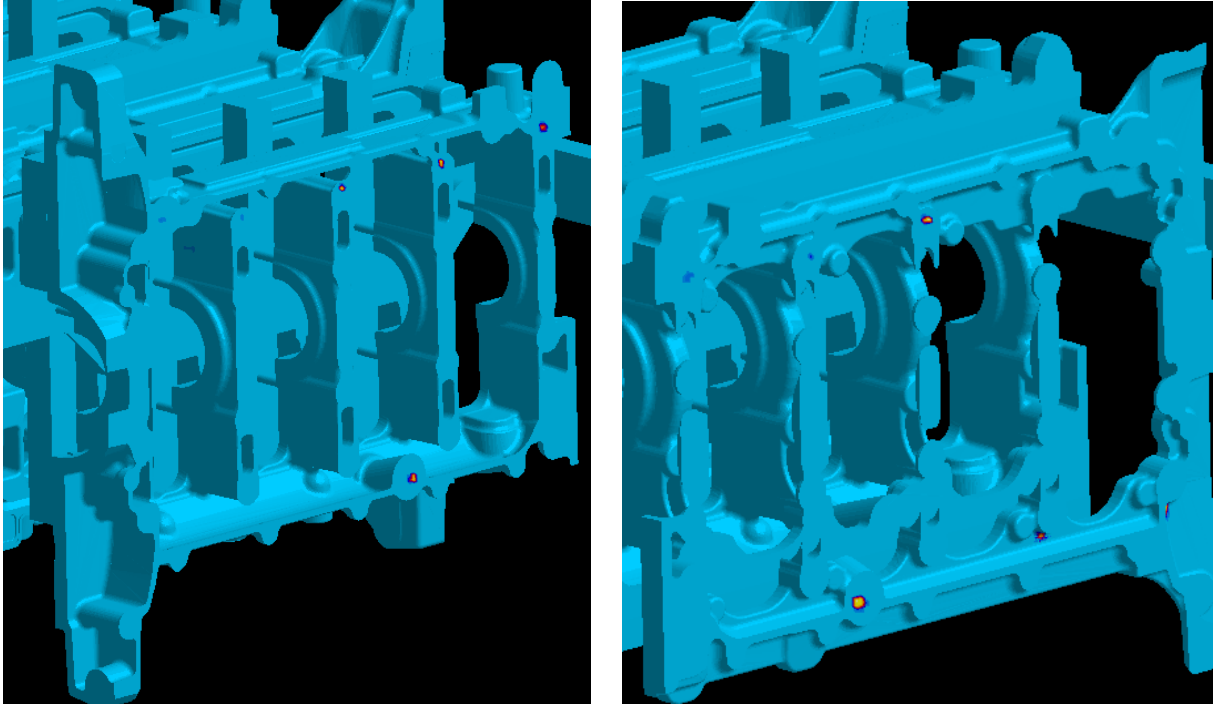


Fig. 32 - Resultados do critério Porosity em 2 dos modelos, onde é possível observar o aparecimento de defeitos nas zonas mais maciças da peça. Este aparecimento deu-se com a redução do parâmetro “Graphite Precipitation” de 8 para 5.

Para além da avaliação pelo critério “porosity” realizou-se uma comparação entre as duas simulações através de outro critério, denominado “FracLiq”, Fig. 33, que representa a percentagem, ou fracção, de metal que a dada temperatura se encontra no estado líquido, com o objectivo de determinar quais as zonas que sofriam maior arrefecimento e que poderiam suscitar relevância pelo facto de serem potenciais zonas de metal frio.

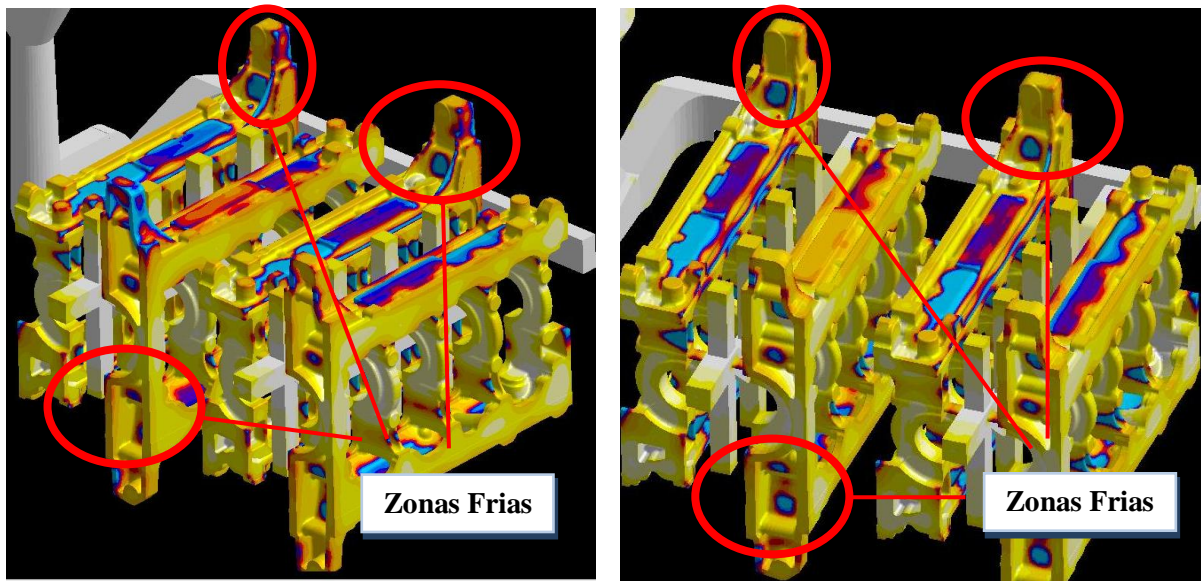


Fig. 33 - Percentagem da fase líquida até totalmente sólido da simulação 1 e 2 respectivamente a) e b)

Na Fig. 33 estão identificadas duas situações, a) e b) respectivamente, onde se observa notoriamente o caminho de solidificação de cada peça. Após a simulação do enchimento observaram-se resultados relativos ao enchimento e é possível constatar a existência de zonas frias isoladas em algumas partes da peça.

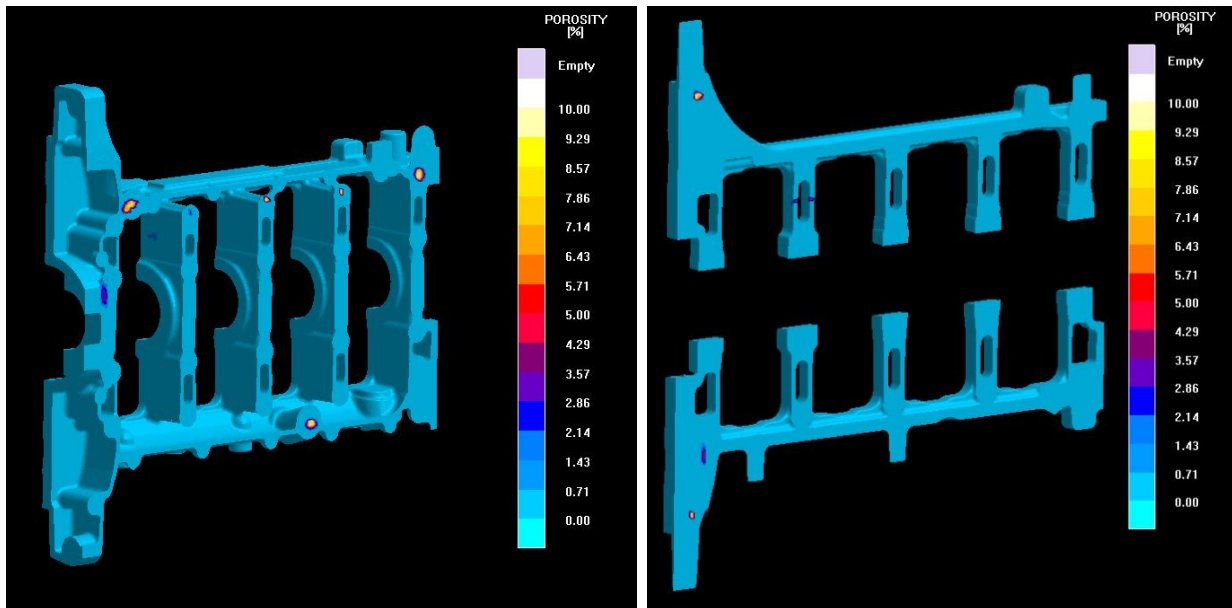
#### 4.2.6. Etapa 6

Seguidamente efectuou-se novamente a redução do valor “Graphite Precipitation” para o que consta na Tabela XII.

Tabela XII - Valores utilizados para a simulação.

Feeding Effectivity (%)	100
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	2

Foi possível observar que a ocorrência de defeitos tornava-se mais visível com a redução de 5 para 2 do “Graphite Precipitation”. Observou-se também que os defeitos ocorrem nas mesmas localizações e em alguns casos com dimensão um pouco maior, Fig. 34; observou-se também a ocorrência de defeitos maiores nas zonas maciças da peça, bossas e sapatas.



**Fig. 34 - Visualização dos resultados através do critério "Porosity" de um dos modelos, onde foi possível observar uma ocorrência mais acentuada de defeitos e em alguns casos nas mesmas localizações com a redução do valor para 2 do parâmetro em estudo.**

As peças retiradas dos ensaios de validação realizados foram inspeccionadas visualmente e apenas algumas a raios-x. A nível de porosidade a maioria apresentava resultados satisfatórios no que diz respeito a sanidade, ausência de defeitos de porosidade; os defeitos presentes continuavam a ser bolhas e cascão.

Com vista a melhorar e aproximar os resultados da simulação o mais possível do real, procedeu-se ao estudo de um outro parâmetro, o “Feeding Effectivity”.

Este parâmetro descreve a fracção solidificada do banho até a qual pode ocorrer alimentação á escala macroscópica, este valor exprime-se em percentagem, numa escala de 0 até 100. Para cada material contido na base de dados do MagmaSoft® existe um campo com o mesmo nome no qual tem um valor associado. Porém, no início de cada simulação de enchimento, é possível definir um valor diferente para este parâmetro. Após consulta, o valor pré-definido para esta liga era de 100%. Optou-se por reduzir este valor em 30% para uma melhor compreensão da contribuição nos resultados finais da simulação.

Procedeu-se assim a avaliação do efeito “Feeding Effect” variando do mesmo modo o valor “Graphite Precipitation”.

#### 4.2.7. Etapa 7

Com recurso aos valores presentes na Tabela XIII realizou-se uma nova simulação e observou-se que a alteração do parâmetro em estudo, tem uma influência directa nos resultados segundo o critério de avaliação “Porosity”. Na Fig. 35 é possível visualizar os resultados da aplicação deste critério.

Tabela XIII - Valores para a nova simulação para estudo do efeito do Feeding Effectivity.

Feeding Effectivity (%)	70
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	8

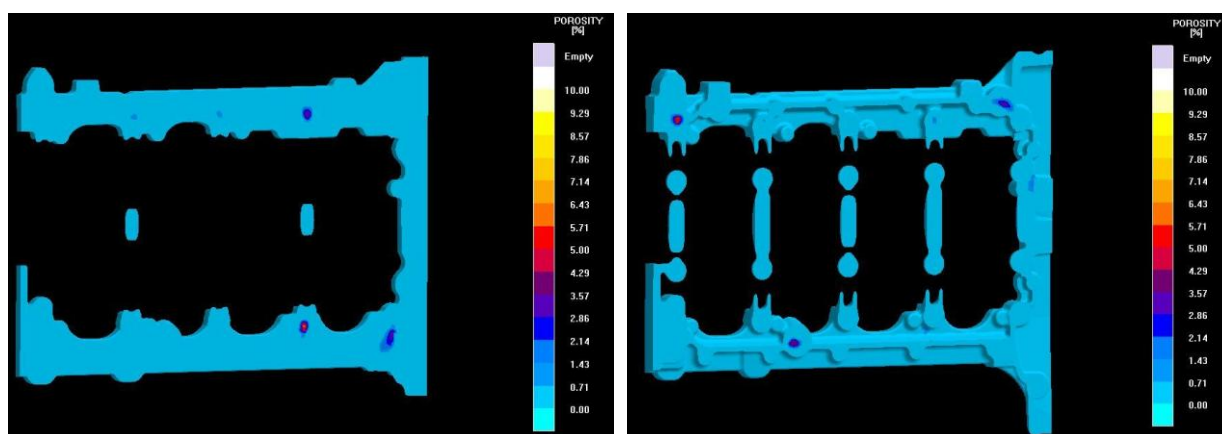
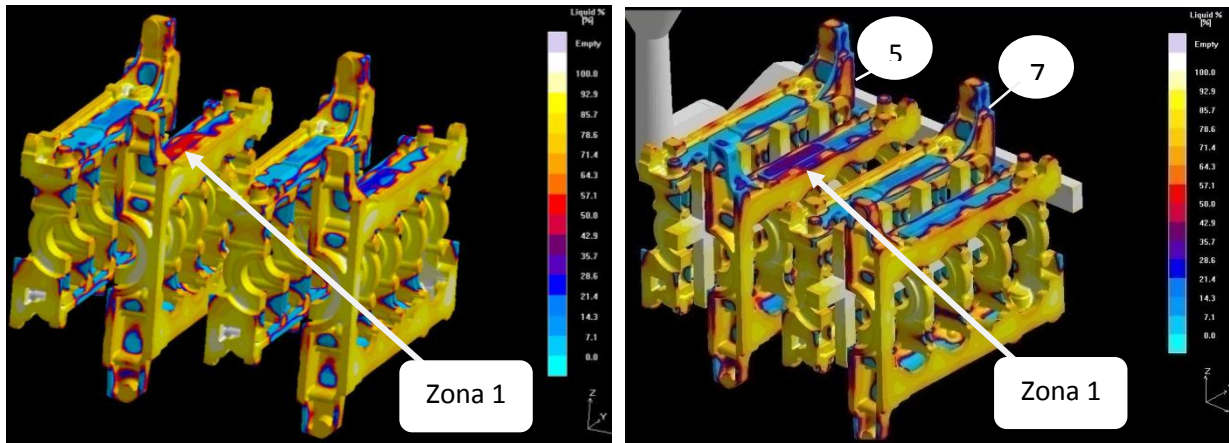


Fig. 35 - Resultados segundo o critério “Porosity” onde é visível, mesmo garantindo uma boa inoculação com um valor de 8 para “Graphite Precipitation”, o aparecimento de defeitos.

Após finalizadas as simulações efectuou-se uma comparação dos resultados obtidos desta simulação com os resultados da primeira simulação e analisou-se o efeito do parâmetro “Feeding Effectivity”, Fig. 36.



**Fig. 36 - a) Resultados da simulação actual. b) Resultados da simulação número 1.**

Na Fig. 36 a), em comparação com a simulação inicial, Fig. 36 b), para a mesma percentagem de tempo corrido, que corresponde a cerca de 15% da solidificação, denotam-se zonas cuja solidificação foi melhorada ou seja, zonas em que se nota um aumento da subida da temperatura de solidificação.

É através da matriz representada na Fig. 76, presente no Anexo II, que se identifica a localização dos defeitos nas moldações seguido de um registo. Foi possível observar que os modelos localizados com a sapata superior perto do canal de distribuição eram os que apresentavam bolhas, correspondendo aos modelos 5 e 7 assinalados na Fig. 36 b). As restantes moldações apresentavam cascão perto da sapata inferior. Observa-se que nas zonas assinaladas como “Zona 1”, ocorre um aumento da percentagem de líquido naquela zona. É uma parte da peça que tem uma espessura reduzida e é das últimas partes a encher justificando assim a ocorrência de uma solidificação mais lenta.

#### **4.2.8. Etapa 8**

Simulou-se novamente o mesmo sistema de gitagem mas desta vez com o valor do “Graphite Precipitation” tal como demonstrado na Tabela XIV.

**Tabela XIV - Valores definidos para a simulação 5.**

Feeding Effectivity (%)	70
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	5

Observou-se uma pequena ocorrência, no interior da peça na zona de apoio do retorno de óleo, como é possível observar na Fig. 37 a).

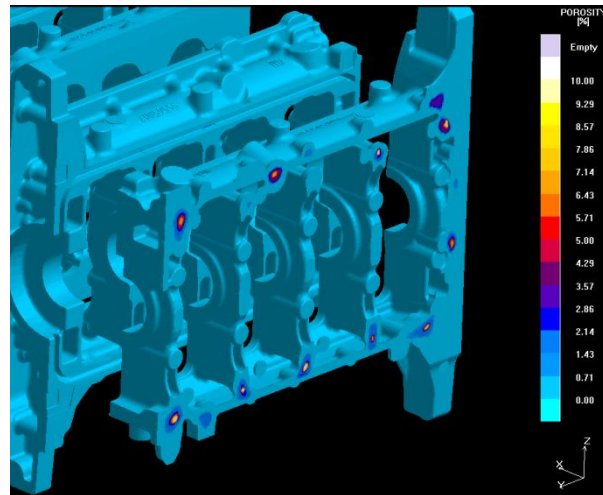


Fig. 37– Corte efectuado num dos modelos para visualização de possíveis defeitos, regista-se um aumento do número de defeitos e seus tamanhos.

#### 4.2.9. Etapa 9

Nesta simulação, tal como na simulação 3, foi possível observar que para valores baixo de “Graphite Precipitation” a ocorrência de defeitos não se altera de um modo significativo - contudo realizou-se uma simulação com os valores representados na Tabela XV

Tabela XV - Valores utilizados para a simulação com o valor de 2 para "Graphite Precipitation".

Feeding Effectivity (%)	70
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
GraphitePrecipitation	2

Na presente simulação observou-se novamente defeitos nos modelos - porém a sua dimensão é reduzida e localizados nos mesmos sítios, Fig. 38.

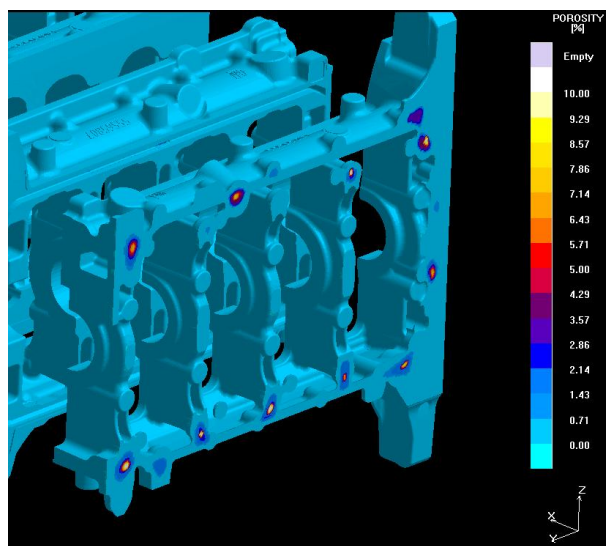


Fig. 38– Corte efectuado num dos modelos para visualização de possíveis defeitos de salientar que não houve grandes diferenças entre a alteração do valor do “Graphite Precipitation” de 5 para 2.

Com estas simulações observou-se que os valores atribuídos para o “Graphite Precipitation” permitiram constatar uma regressão no aparecimento de defeitos quando o valor deste parâmetro era reduzido de 8 para 2 destacando uma variação quase nula entre o valor de 5 e 2.

#### 4.2.10. Etapa 10

Tendo em conta os resultados obtidos anteriormente, escolheu-se outro parâmetro a fim de reunir o máximo de informação possível, este parâmetro é o “Inoculation Method”, nesta fase repetiu-se a variação do parâmetro “Graphite Precipitation” em três valores como nas etapas anteriores. Na Tabela XVI encontram-se os valores da simulação inicial para o estudo deste parâmetro.

Tabela XVI - Valores da simulação com efeito do estudo do parâmetro, "Inoculation Method".

Feeding Effectivity (%)	70
Inoculation Method	Good
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	8

A redução deste valor para “good” levou a um aumento de porosidade, estão presentes em baixo, na Fig. 39 e Fig. 40, sabendo que este parâmetro reflecte-se na inoculação, é possível observar defeitos nos modelos caso esta não seja realizada nas condições desejadas, ou por outra qualquer razão que não seja eficaz.

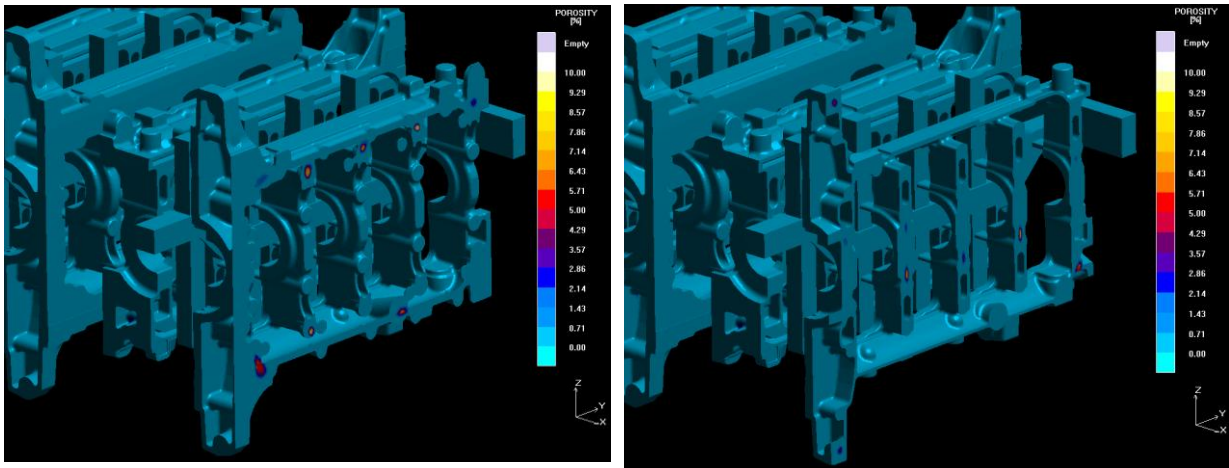


Fig. 39 – Corte efectuado apenas no modelo 8, para avaliação dos resultados. Utilizado o critério "Porosity" registou-se um aumento de possíveis defeitos de um modo geral em todos os modelos.

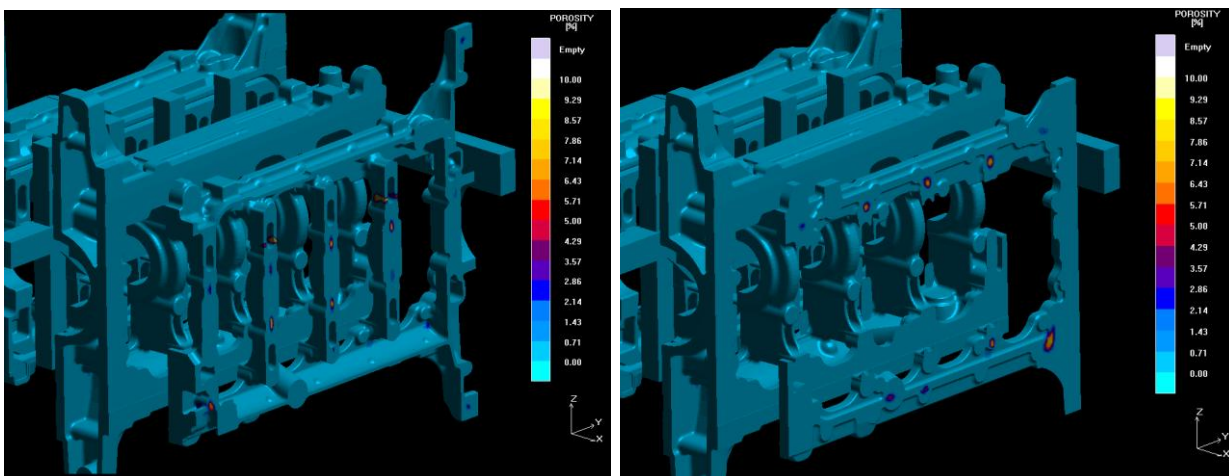


Fig. 40 - Corte efectuado no modelo 7 para avaliação dos resultados. Critério de avaliação utilizado - "Porosity", tal como no modelo 8 nestas regiões mais maciças também registaram um aumento de defeitos.

Após visualizados os resultados verifica-se que estes não são próximos da prática, a redução deste parâmetro de “Very Good” para “Good” leva a um maior aparecimento de defeitos e um aumento do seu tamanho.

#### 4.2.11. Etapa 11

Seguidamente efectuou-se uma simulação com os valores indicados na Tabela XVII. Nesta simulação ambos os modelos apresentam problemas nos mesmos locais quando se utilizou um valor de 8 para o “Graphite Percipitation”.

Tabela XVII - Valores da simulação com efeito do estudo do parâmetro, "Inoculation Method".

Feeding Effectivity (%)	70
Inoculation Method	good
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	5

Mais uma vez observou-se que em simulação quer utilizando um valor de “Graphite Precipitation” 2 ou 5 a ocorrência de defeitos é pouco alterada, Fig. 41. Esta situação também se verifica quer se use um valor “Very Good” ou um valor “good” para o parâmetro “Inoculation Method”.

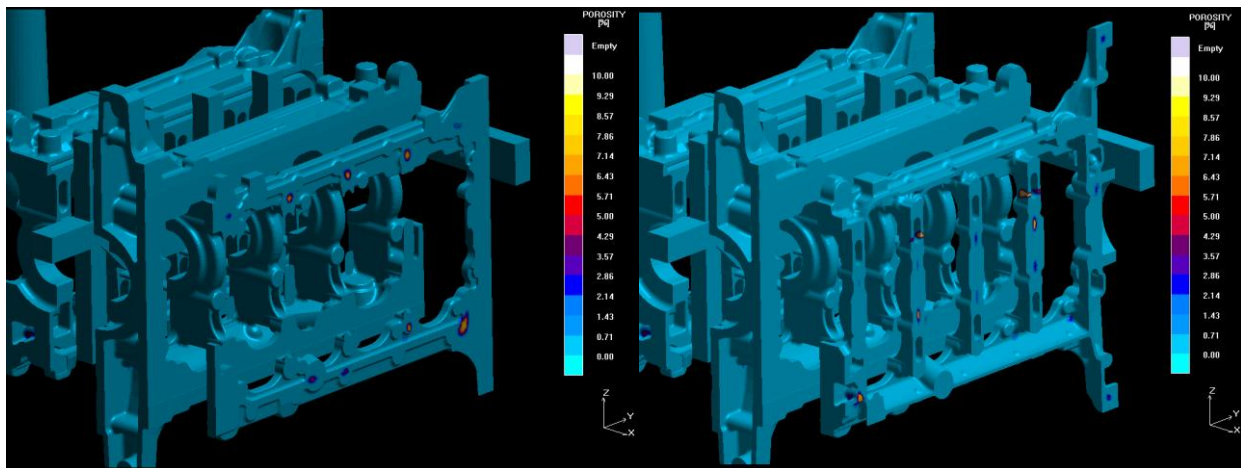


Fig. 41 - Resultados avaliados pelo critério "Porosity" do modelo 2 para um valor de "Graphite Precipitation" de 5 onde estão presentes defeitos em todas as partes maciças. Tendo-se verificado que afinal a redução do "inoculation Method" não é viável comparado com a prática.

Após reunidas as diversas hipóteses realizaram-se outras simulações desta vez com o sistema de gitagem que a Funfrap já tinha concebido.

Conjuntamente com as últimas simulações foi realizado um ensaio experimental deste sistema de alimentação. As peças foram desmoldadas e granalhadas. Seguidamente foi

realizada uma inspecção visual para detectar os defeitos visíveis a olho, como moldações defeituosas, pequenos arrancamentos de partes da peça, bolhas e inclusões de areia. As peças foram sujeitas a um pré-acabamento e posteriormente analisadas em ultra-sons, nas zonas susceptíveis de defeitos. Posteriormente foram submetidas ao controlo dimensional e a raios-x para detectar possível porosidade na peça.

### 4.3. Parte II – Sistema de gitagem de série

Na Tabela V estão representados os dados utilizados nas simulações desta parte do trabalho. Contudo outros parâmetros mantiveram-se inalterados, como o tipo de material, o tipo de moldação, e a temperatura da areia.

A quantidade de metal de cada colher permite o vazamento de algumas moldações mas existe uma variação de temperatura de aproximadamente 80 a 90°C entre a primeira e a última moldação. Tendo em conta este acontecimento essa diferença de temperatura foi considerada nas simulações.

Esta alteração de valores teve como objectivo estudar e prever o comportamento do metal durante a fase de enchimento, para uma duração de 13 segundos, variando as temperaturas de vazamento, numa tentativa de detectar possíveis locais da moldação onde a diferença de temperatura seja notória, permitindo assim antecipar possíveis problemas.

#### 4.3.1. Etapa 12

Efectuou-se uma simulação com os dados iniciais definidos, como apresentados na Tabela XVIII. Estes dados foram os pontos-alvo para a empresa poder rentabilizar todo o processo. A obtenção de peças com boa sanidade está directamente ligada com este factor devido ao facto já referido da diferença de temperatura da colher da primeira para a última moldação.

**Tabela XVIII - Valores da simulação para o sistema de gitagem em série.**

Tempo de Vazamento	13 s
Temperatura de Vazamento	1400°C

Nas Fig. 42 e Fig. 43 é possível observar a temperatura de enchimento que esta moldação tem em diferentes fases do enchimento.

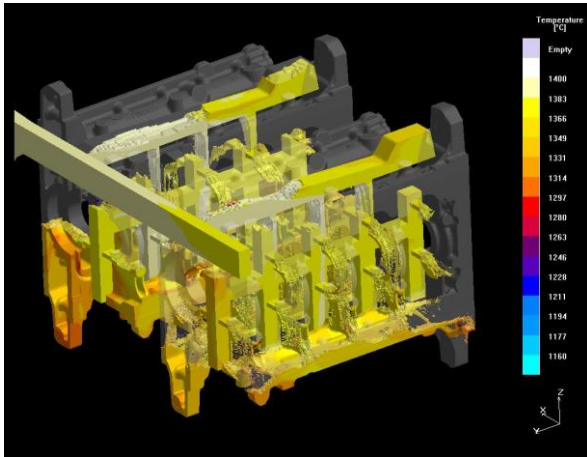


Fig. 42 - Temperatura de enchimento da placa molde para uma fase correspondente a 50% do enchimento.

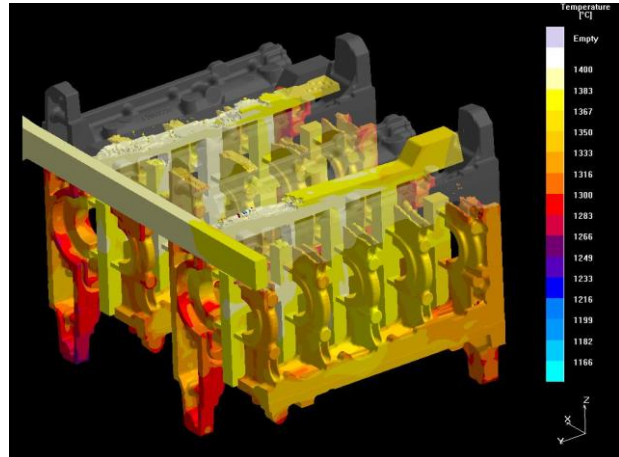


Fig. 43 - Resultados da simulação quando a cavidade está a uma percentagem de 60%.

Observa-se um atraso do enchimento, isto é, a 50% do enchimento, Fig. 42, as cavidades mais afastadas do gito de descida apresentam um ligeiro atraso, tal como no sistema inicial testado. Contudo quando a cavidade se encontra totalmente preenchida o gradiente térmico das peças não é significativo.

#### 4.3.2. Etapa 13

Tal como no primeiro sistema de gitagem estudado, o efeito da variação da temperatura e do tempo de vazamentos foram tidos em conta. Para isso realizaram-se algumas simulações onde se variaram tempos e temperaturas de vazamento.

Nesta etapa usaram-se os valores apresentados na Tabela XVIII e registaram-se as diferentes imagens durante este processo.

Tabela XIX - Valores da simulação para o sistema de gitagem em série.

Tempo de Vazamento	13 s
Temperatura de Vazamento	1370°C

Estão presentes na Fig. 44 e Fig. 45 dois resultados correspondentes a duas fases do enchimento, 50% e 100% respectivamente tal como na etapa anterior para comparação, onde é possível notar um arrefecimento na sapata do modelo mais à esquerda.

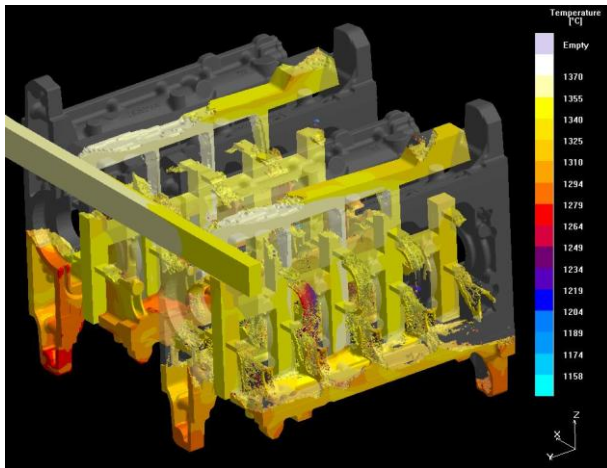


Fig. 44 - Temperatura do metal quando realizado 50% do enchimento.

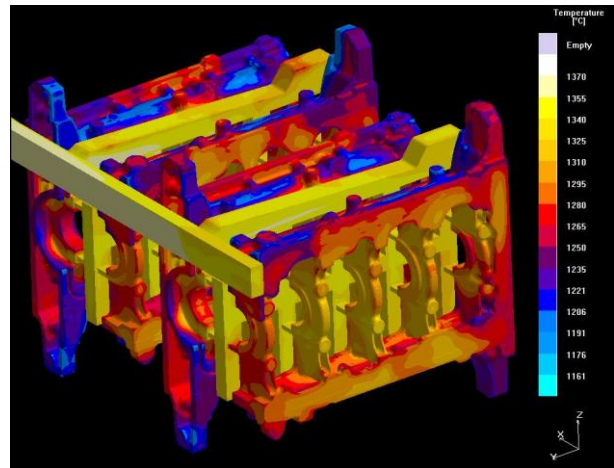


Fig. 45 - Temperatura no fim da etapa do enchimento.

Relativamente à porosidade nestes modelos é de notar porosidade nas mesmas zonas assinaladas em outras simulações, isto é, nas zonas mais maciças da peça como mostra a Fig. 46.

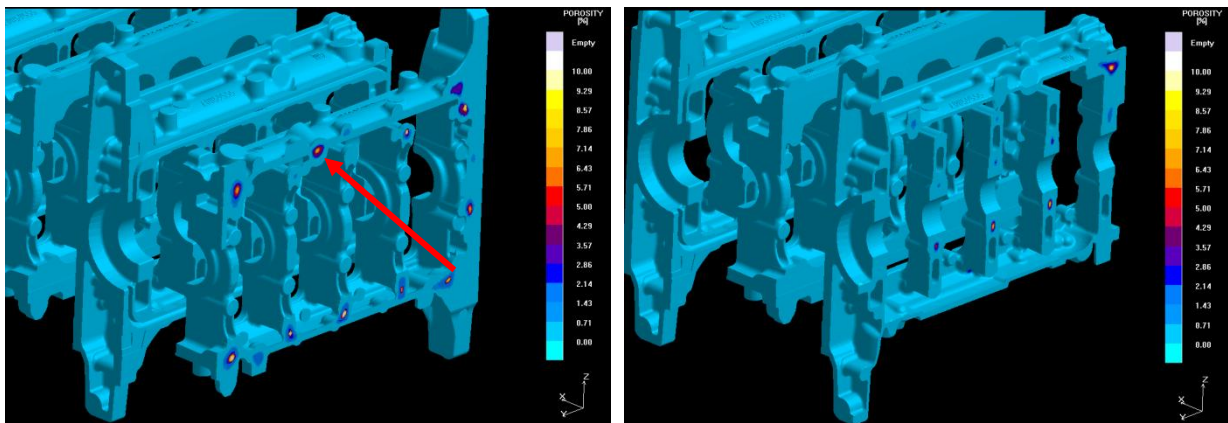


Fig. 46- Resultado da porosidade nos modelos 1 e 2, onde se verifica um número acentuado de defeito porém de salientar só existir na prática o defeito assinalado.

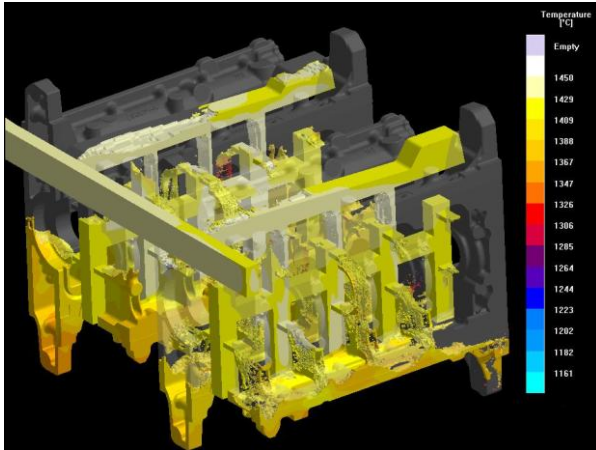
As figuras anteriores demonstram a localização dos defeitos na peça deste sistema de gitagem para os valores apresentados no início desta etapa

### 4.3.3. Etapa 14

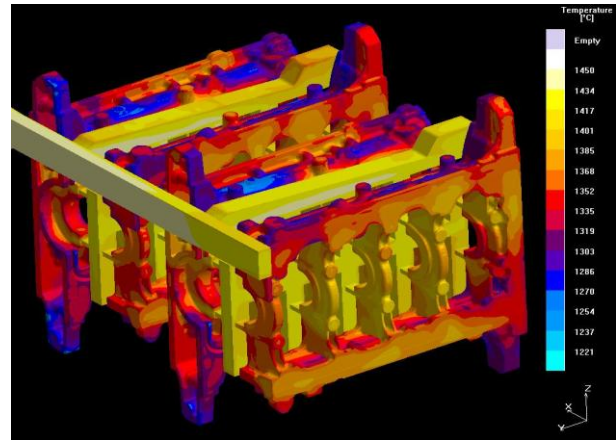
Para esta simulação foram usados os seguintes valores apresentados na Tabela XX e registaram-se as diferentes imagens durante este processo.

**Tabela XX - Valores da simulação para o sistema de gitagem em série.**

Tempo de Vazamento	13 s
Temperatura de Vazamento	1450°C



**Fig. 47 - Temperatura dos modelos quando está realizado a 50% do enchimento.**



**Fig. 48 - Temperatura do modelo quando está finalizada a etapa de enchimento.**

Nestes resultados é possível observar que a temperatura dos modelos é ligeiramente superior a 50% do material quando comparado com a Fig. 44. Assim é importante destacar que temperaturas baixas normalmente atribuídas às últimas moldações de cada colher não são benéficas.

#### **4.3.4. Etapa 15**

Tal como na primeira parte foi possível observar, os resultados obtidos a nível de porosidade mais próximos da realidade obtém-se com valores de “Feeding Effect” e “Graphite Precipitation” de 100 e 8 respectivamente. Assim sendo confirmar estes valores para este sistema de gitagem era importante. Indicou-se assim a uma simulação com os dados que se pode observar na Tabela XXI.

**Tabela XXI - Valores definidos no MagmaSoft para a simulação da placa serie.**

Feeding Effectivity (%)	100
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	8
Inoculation Method	Very Good

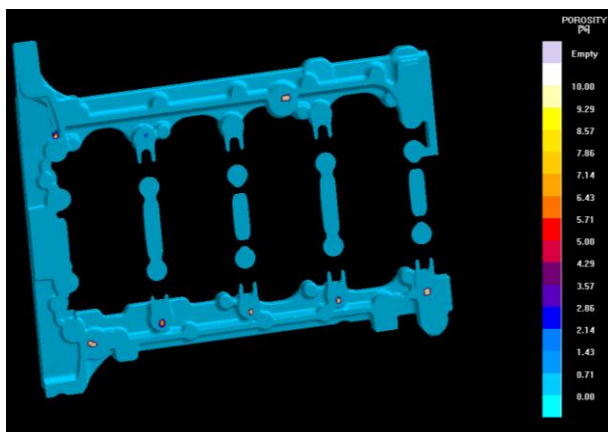


Fig. 49 - Visualização dos defeitos do sistema de gitagem da placa de série onde é possível ver um dos defeitos que continuam a aparecer na prática e que já foi mencionado na parte I.

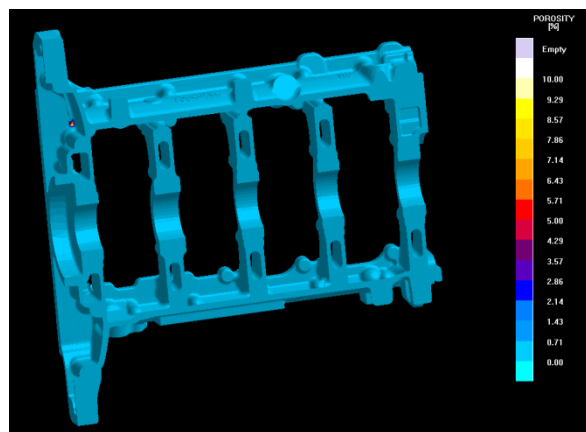


Fig. 50 - Corte efectuado no mesmo modelo anterior para visualização de alguns defeitos no interior da peça em zonas críticas.

Na Fig. 67 é possível observar o defeito assinalado nas figuras anteriormente apresentadas, os restantes defeitos apresentados na Fig. 49 na prática não se verifica.

#### 4.3.5. Etapa 16

Observados os resultados confirma-se este facto, valores de “Graphite Precipitation” conjugados com um valor de “Feeding Effect” de 100% reflectem quase na totalidade a realidade a nível de porosidade. Para confirmar esta decisão optou-se por simular novamente o cacho mas com os dados presentes na Tabela XXII cuja diferença incide na redução do valor de “Graphite Precipitation” para 5.

Tabela XXII - Valores definidos no MagmaSoft para a simulação da placa serie.

Feeding Effectivity (%)	100
Treatment Yield (%)	80
Mold Dilatation	Stable Mold
Graphite Precipitation	5
Inoculation Method	Very Good

Através dos resultados visualizados na Fig. 51, é possível observar alguma porosidade detectada, confirmando assim que o uso destes valores, tanto para este sistema de gitagem como para o sistema de gitagem da parte I, não é o mais indicado.

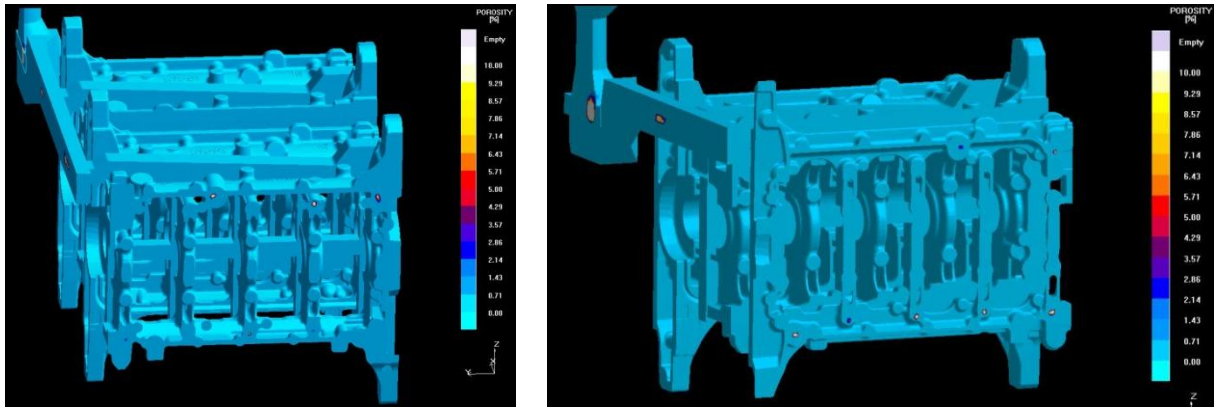


Fig. 51 – Corte efectuado nos modelos segundo o critério Porosity.

#### 4.4. Parte III – Simulação em ProCast

Nesta parte do trabalho foram realizadas algumas simulações relativas ao enchimento da peça. Inicialmente utilizaram-se os valores predefinidos do ProCast no que diz respeito a propriedades termofísicas. Destes valores pré-definidos no ProCast podem ser escolhidos diferentes valores, contudo escolheu-se para o coeficiente de transferência de calor entre as peças e a areia foi de  $800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

##### 4.4.1. Etapa 17

Iniciaram-se assim as simulações no software ProCast; nesta etapa como já referido anteriormente os valores assumidos para esta simulação foram os pré-definidos a destacar o valor usado para o HTC foi um valor constante de  $800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

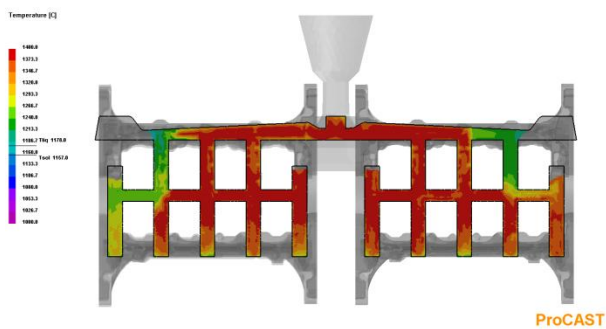


Fig. 52 - Corte efectuado no sistema de gitagem nos modelos mais afastados do gito de descida.

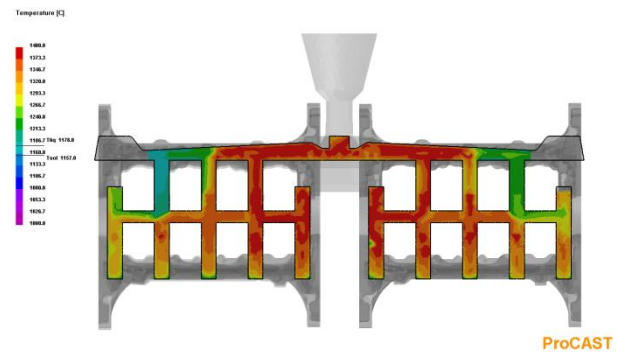


Fig. 53 - Corte efectuado no sistema de gitagem nos modelos mais perto do gito de descida.

Nesta simulação observou-se uma redução significativa da temperatura do sistema de gitagem durante o enchimento dos modelos como é previsível esta diferença de temperatura acentuar-se-á se o tempo de vazamento for menor.

#### 4.4.2. Etapa 18

Nesta etapa efectuou-se uma nova simulação que teve em conta a diferença do valor do HTC entre o ProCast e o MagmaSoft®. Os valores utilizados são os que constam na Fig. 21, onde está disponibilizado o gráfico e a tabela com os valores contidos na base de dados do software do MagmaSoft®, referentes ao valor “tempiron”. Criou-se então uma nova entrada no ProCast com estes valores e efectuou-se uma simulação.

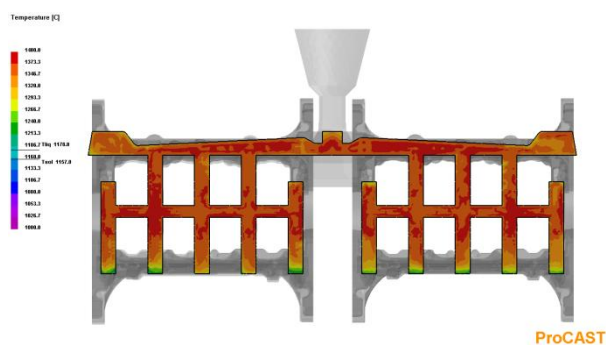


Fig. 54 - Corte realizado no modelo para visualização da temperatura do sistema de gitagem nos canais secundários mais afastados do gito de descida.

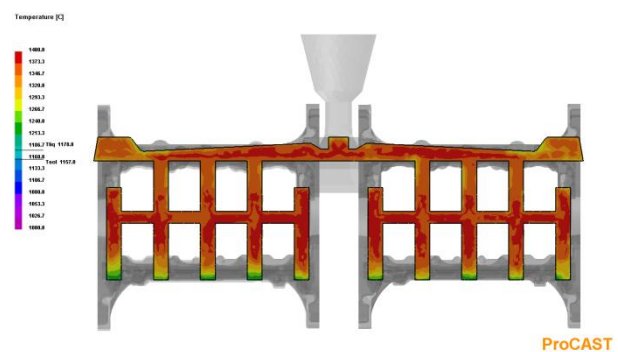


Fig. 55 - Corte realizado no modelo para visualização da temperatura do sistema de gitagem nos canais secundários mais próximos do gito de descida.

A simulação deste sistema de gitagem com o valor de HTC igual ao do MagmaSoft®, definido pela curva apresentada (Fig. 21), permitiu observar uma maior uniformidade de temperatura do sistema de gitagem.

### 4.5. Parte IV – Comparação de Resultados MagmaSoft® vs ProCast

#### 4.5.1. Etapa 19 – Comparação HTC = 800 W/m<sup>2</sup>.K

Foram realizadas simulações com os mesmos parâmetros em ambos os softwares, de modo a que se aproximassem o mais possível conseguindo assim observar eventuais problemas. Para tal foi escolhido o sistema de gitagem testado na parte II deste trabalho e realizou-se tanto no MagmaSoft® como no ProCast uma simulação com os valores presentes na Tabela XXIII.

Na Fig. 56 e Fig. 57 é possível observar os resultados da simulação realizada no ProCast, onde a queda de temperatura na extremidade do sistema de gitagem é acentuada.

Tabela XXIII - Dados Relativos às primeiras simulações em MagmaSoft® e ProCAST

Tempo de Vazamento	13 s
Temperatura de Vazamento	1400°C
HTC	800 W/m <sup>2</sup> .K

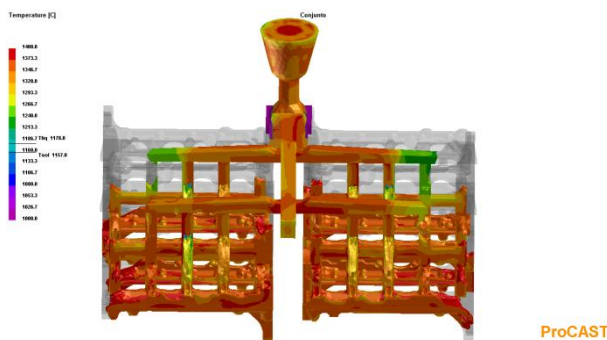


Fig. 56 - Corte efectuado no sistema de gitagem nos modelos mais afastados do gito de descida.

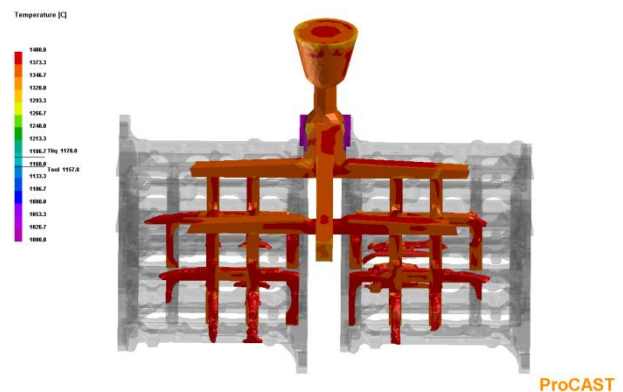


Fig. 57 - Corte efectuado no sistema de gitagem nos modelos mais perto do gito de descida.

Não se verifica na simulação realizada no MagmaSoft® o problema mencionado relativamente a simulação em ProCast, como pode ser visualizado na Fig. 58 e Fig. 59, nestas verifica-se uma uniformidade da temperatura em todo o sistema de gitagem.

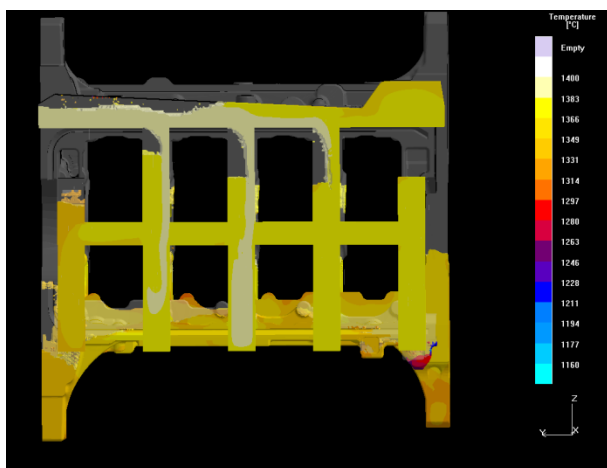


Fig. 58 - Corte efectuado no sistema de gitagem no modelo mais afastado do gito de descida.



Fig. 59 - Corte efectuado no sistema de gitagem no modelo mais próximo do gito de descida.

#### 4.5.2. Etapa 20 – Comparação HTC = tempiron

Através do software MagmaSoft® é possível observar que a uma percentagem de 50% do enchimento os canais de distribuição não estão completamente cheios, só são preenchidos quando o metal das peças atinge os ataques superiores.

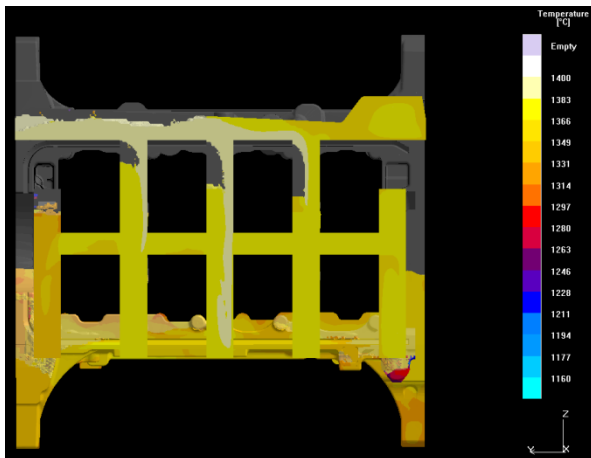


Fig. 60 - Corte efectuado no sistema de gitagem no modelo mais afastado do gito de descida.



Fig. 61 - Corte efectuado no sistema de gitagem no modelo mais próximo do gito de descida.

Comparando estes dados com os presentes na Fig. 54 e Fig. 55, que o enchimento no ProCAST não se comporta do mesmo modo. É possível observar também que o metal após atingir os três canais verticais leva um ligeiro atraso para preencher o canal secundário na zona da câmara de escória.

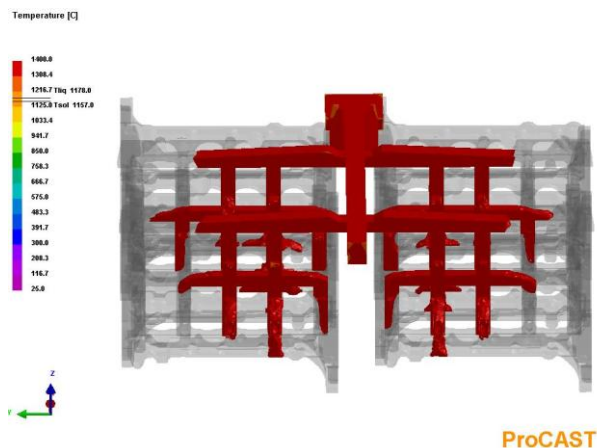


Fig. 62- Temperatura do metal durante a fase de enchimento após 3,8 segundos do início do enchimento.

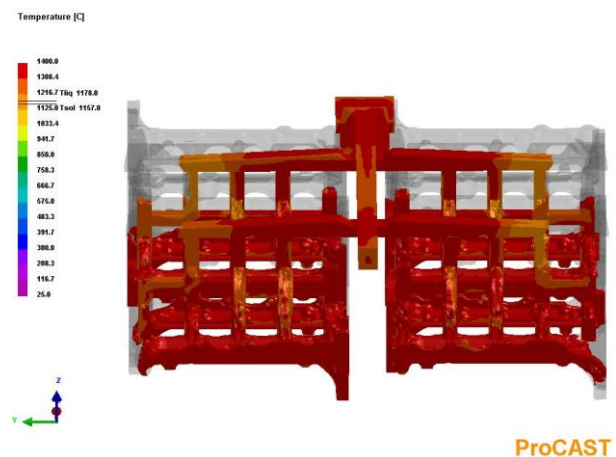


Fig. 63 - Temperatura do metal durante a fase de enchimento após 7,6 segundos do início do enchimento.

#### 4.6. Validação Experimental

A dificuldade em controlar o tempo de vazamento durante os ensaios foi uma constante, devido ao facto de que nestes casos o sistema de vazamento não ser totalmente automático e depender directamente da perícia do operador da “Mezger”.

Observaram-se todos os modelos, retirados dos cachos, com a excepção de uma moldação que ficou por separar. Foi possível observar a ocorrência de alguns defeitos. Dos defeitos observados destacam-se dois, o aparecimento de gotas frias e pequenos poros devido a acumulação de gases, visualmente identificados nas figuras Fig. 64 e Fig. 65.



Fig. 64 - Defeito detectado, possivelmente metal frio nas peças.



Fig. 65 - Defeito detectado em algumas moldações, acumulação de gases nas peças.

Na Fig. 67 é possível visualizar um dos defeitos observados após submetida a radiografia. Foram realizados cortes na peça, Fig. 66, em 2 modelos segundo o esquema apresentado para se obter uma validação dos resultados. Realizaram-se cortes nas zonas mais maciças e também mais finas, para observar eventuais problemas de porosidade e problemas de enchimento nessas respectivas zonas.

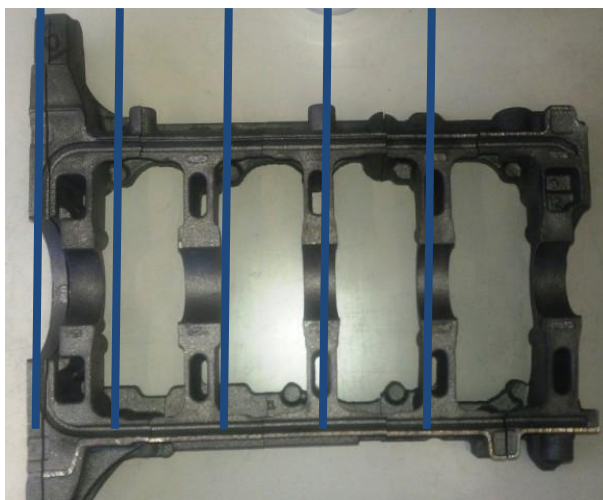


Fig. 66 - Esquema indicativo da realização dos cortes na peça para validação dos resultados.

É possível observar que as zonas mais finas da peça apresentam um enchimento total da cavidade sem apresentar defeitos. As Fig. 68, Fig. 69 e Fig. 70 são uma amostra dessa sanidade.



Fig. 67 - Defeito visualizado em raios-x após análise visual.



Fig. 68 - Corte efectuado numa das zonas mais finas do modelo. Vazamento do sistema de gitagem de série.

Em todas as figuras mencionadas é possível observar uma boa qualidade superficial da peça, uma inexistência de bolhas e de juntas frias e arrancamentos.



Fig. 69 - Corte efectuado numa segunda secção fina da peça.



Fig. 70 - Corte efectuado numa terceira secção fina da peça.

Na Fig. 71 é visível mais um corte do modelo que apresenta um bom enchimento da peça e uma solidificação completa sem que haja ocorrência de defeitos nas zonas maciças das sapatas, zonas estas que em maior parte das simulações foram apresentadas como problemáticas.

As zonas apresentadas em algumas simulações, tal como na Fig. 34 e Fig. 39, apresentam uma forte ocorrência de defeitos quando utilizados valores baixos de “Graphite Precipitation” e fraca inoculação.

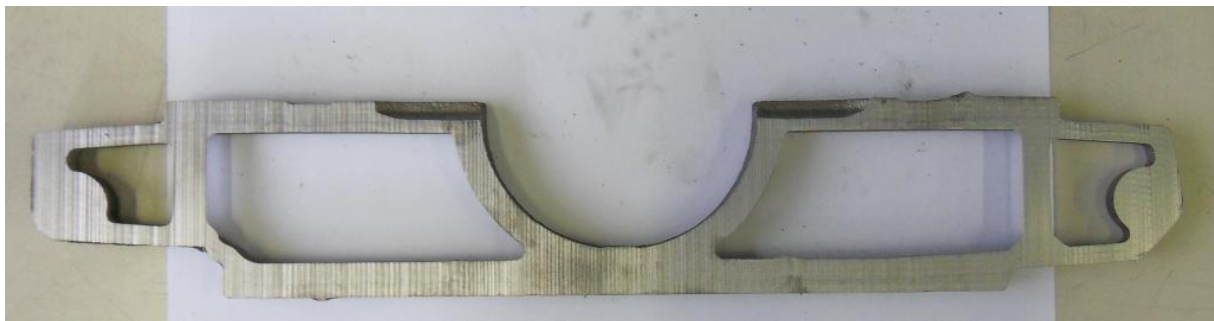


Fig. 71 - Corte vertical de um modelo para análise de problemas nas zonas maciças.

Tal como mencionado anteriormente, nos modelos analisados para esta validação, as zonas maciças da peça encontram-se sem qualquer problema.



Fig. 72 - Corte efectuado na numa outra zona maciça da peça.

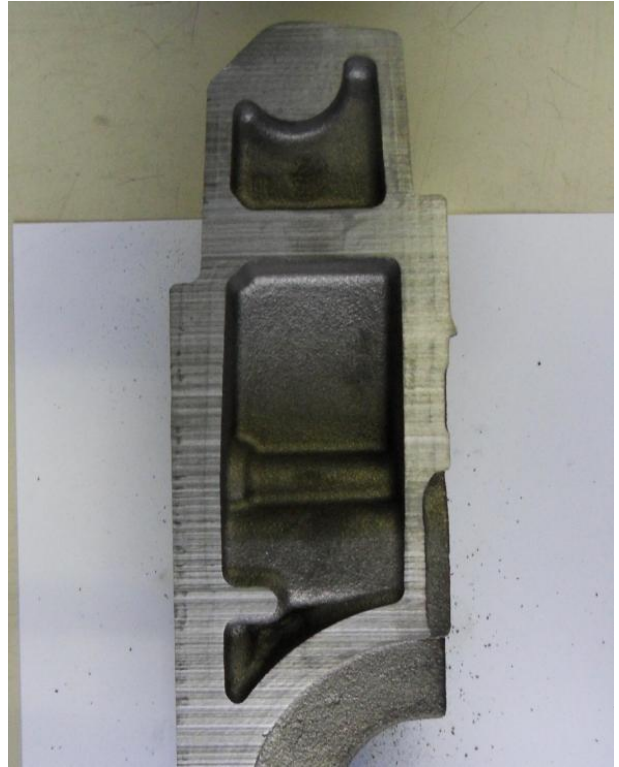


Fig. 73 - Corte efectuado na zona da sapata do modelo.

## Conclusões

A realização deste trabalho permitiu a aprendizagem de um software de simulação, MagmaSoft, conjuntamente com uma aproximação industrial.

1. Na Parte I do presente trabalho onde foi estudada a nova formulação do sistema de gitagem, pôde-se definir uma oportunidade de melhoria. Com recurso às simulações efectuadas relativas ao enchimento, visualizou-se um enchimento pouco uniforme e um atraso nos modelos mais afastados do gito de descida. Daí que uma redução da secção do canal principal após a primeira derivação dos canais secundários, que beneficiasse o enchimento em todas as peças.
2. Relativamente aos ensaios de validação realizados e em conjugação com as simulações realizadas, é de prever que um tempo mais longo de vazamento irá apresentar ocorrência de metal frio, como pode ser visto. Contudo se o tempo fosse reduzido para 13 segundos essa já se tornava quase nula.
3. Observou-se que diferenças de tempos de vazamento entre as colheres não é benéfico e a formação de zonas mais frias da peça propícia o aparecimento de defeitos.
4. Para valores fixos de “Feeding Effect” não há alteração quando avaliada pelo critério “Porosity” numa escala de 0 a 10%. Isto porque das diversas simulações efectuadas observou-se que para um valor fixo deste parâmetro e atribuindo valores de “Graphite Precipitation” entre 5 e 2 não houve aumento significativo da ocorrência de defeitos.
5. O parâmetro “Graphite Precipitation” tem uma influência directa nos resultados e conjugados com o “Inoculation Method” é possível observar o aparecimento de defeitos na peça. Tal como esperado reduzindo a taxa de inoculação, que na prática traduz-se na alteração do parâmetro de “Verry Good” para “Good”, reduz-se o efeito da inoculação. Esta alteração de parâmetro reflecte-se directamente no aparecimento de defeitos. Quanto menores os valores deste parâmetro maior o número e dimensão dos defeitos.
6. A simulação com os valores apresentados na Etapa 2 foi os que mais se aproximaram do verificado na prática.
7. Relativamente à comparação entre o ProCast e o MagmaSoft® foi possível evidenciar uma diferença de comportamento durante o enchimento, sendo que

o ProCast apresentava uma redução de temperatura maior nos canais de distribuição.

8. Comparando as simulações realizadas com o valor do coeficiente de transferência de calor de 800 e com o valor definido no MagmaSoft® pela curva mencionada anteriormente, é possível observar que utilizando um coeficiente fixo ao longo de todo o processo a temperatura de enchimento diminui significativamente o que não se verifica utilizando o valor “tempiron”.

## Referências

- [1] - <http://www.teksid.com/iron.htm>, “teksidiron”, acessado a 18 de Abril de 2011
- [2] Santos H.: *Aula 15 a 18 – Ferros Fundidos* disponível em Conteúdos disciplina Materiais Metálicos. Acesso em 14 de Dezembro de 2008.
- [3] Seabra, A.V., *Metalurgia Geral Vol. II*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil ; 1994
- [4] Ribeiro Carlos Alberto Silva, “Apontamentos de Fundição”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Porto, 2007
- [5] ASM Metals Handbook, Volume 1 - *Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys*, Cap. Cast Irons, Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron, 1992;
- [6] – J.W. MARTIN, *Concise Encyclopedia of the structures of the material*.
- [7] ASM Metals Handbook, Volume 9 - *Castings*, Cap. *Ferrous Casting Alloys* 1992 , p1365 - 1405.
- [8] Akar, N.; ahin, H. Mehmet; Yalçin, N.; Kocatepe, K..”Experimental Study on the Effect of liquid Metal Superheat and Casting Height on Interfacial Heat Transfer Coefficient”; *Experimental Heat Transfer*, 21; Pag. 83–98, 2008.
- [9] MAGMASOFT® Versão 4.1; User´s Manual; MAGMA Giesserei technologie GmbH; 2001
- [10] ESIGROUP, “ProCastUser Manual”, Versão 2010.0;

# Anexo I

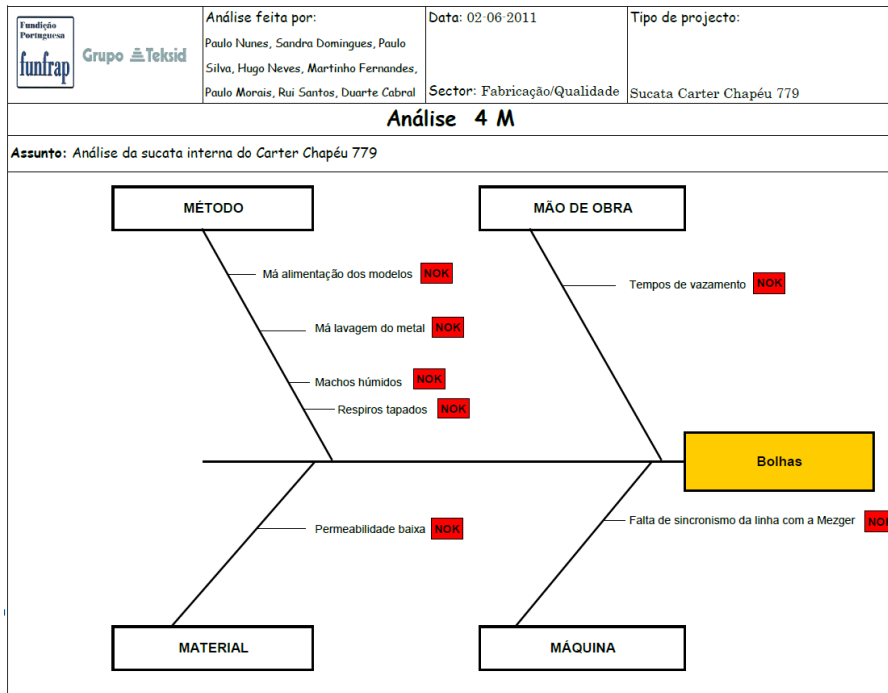


Fig. 74- Diagrama 4M para análise das causas para as bolhas.

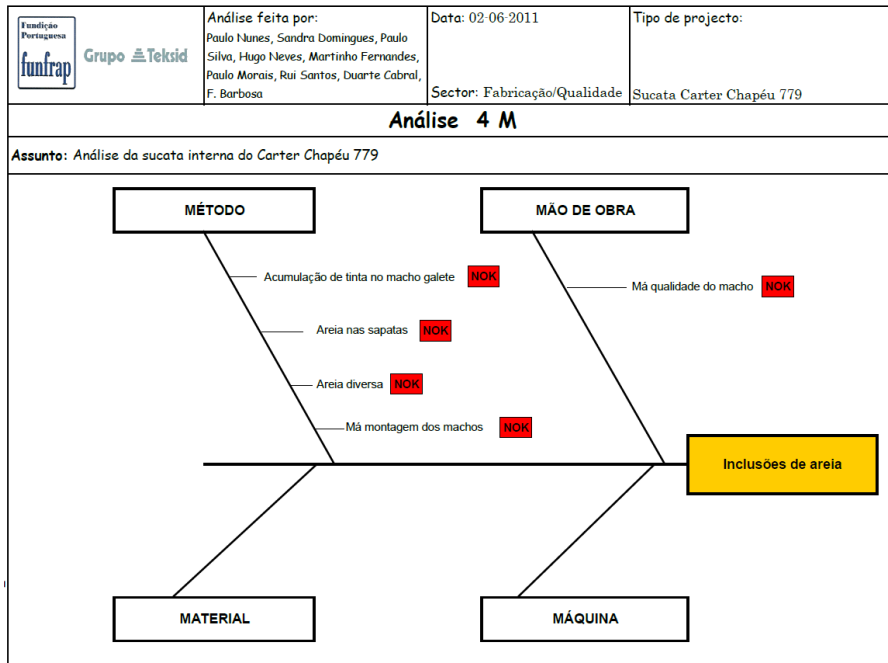


Fig. 75 - Diagrama 4M para análise das causas para as inclusões de areia.

## Anexo II

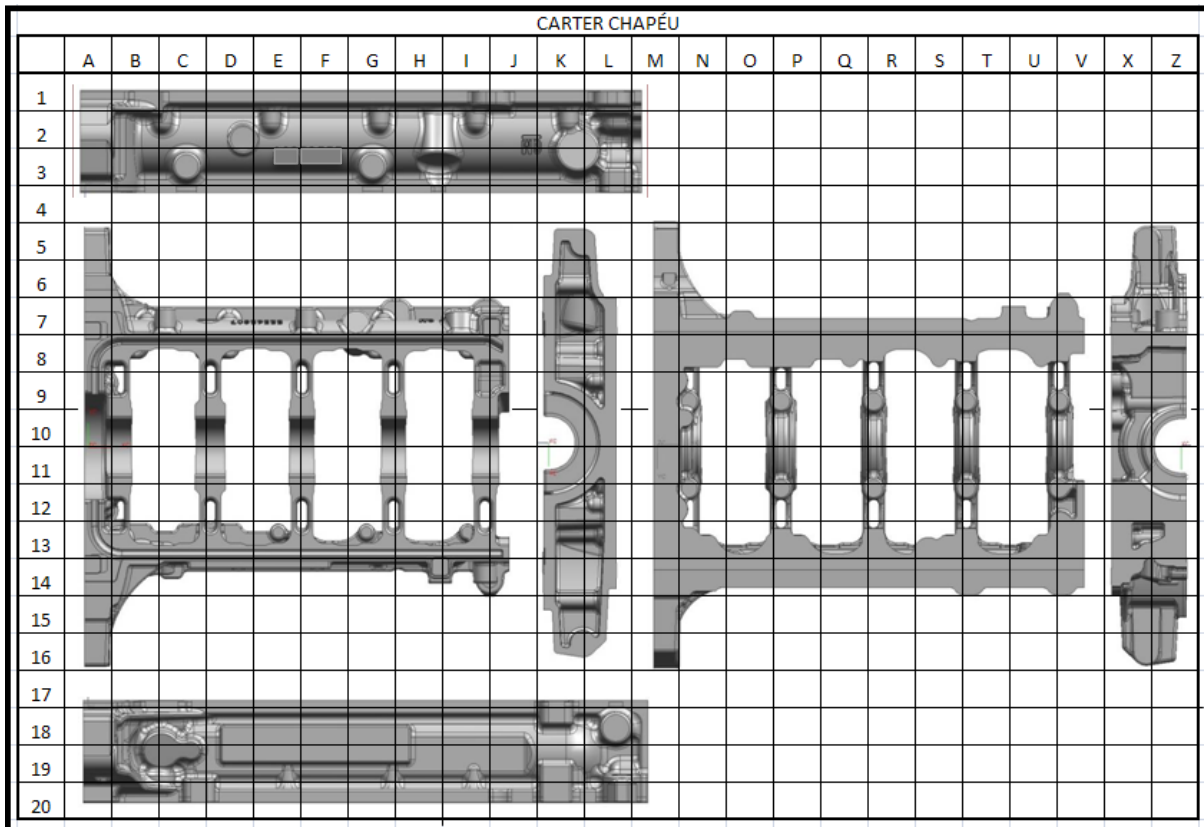


Fig. 76 - Cartografia utilizada para a localização de defeitos nas respectivas análises de sucata .