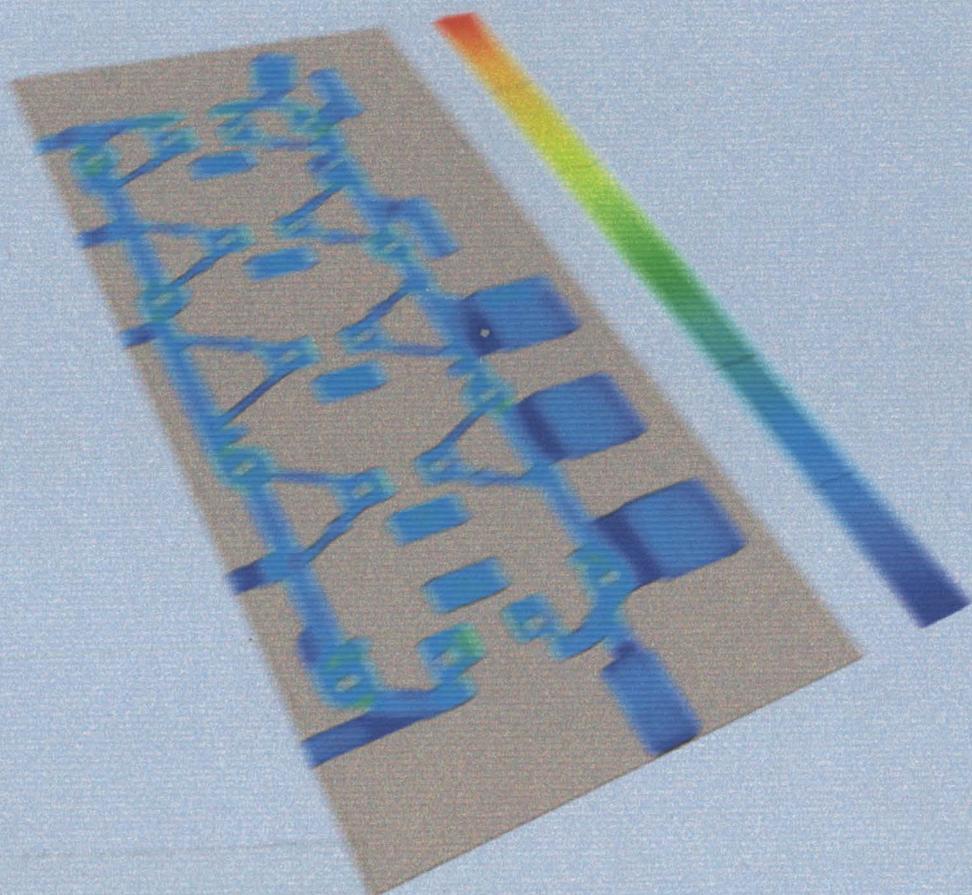


10-01-2008

Disciplina de Estágio

Metodologia e aplicação de softwares de simulação do enchimento e solidificação à indústria de fundição



669(047.3)
LEMM 2001/SOUh



FEUP Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

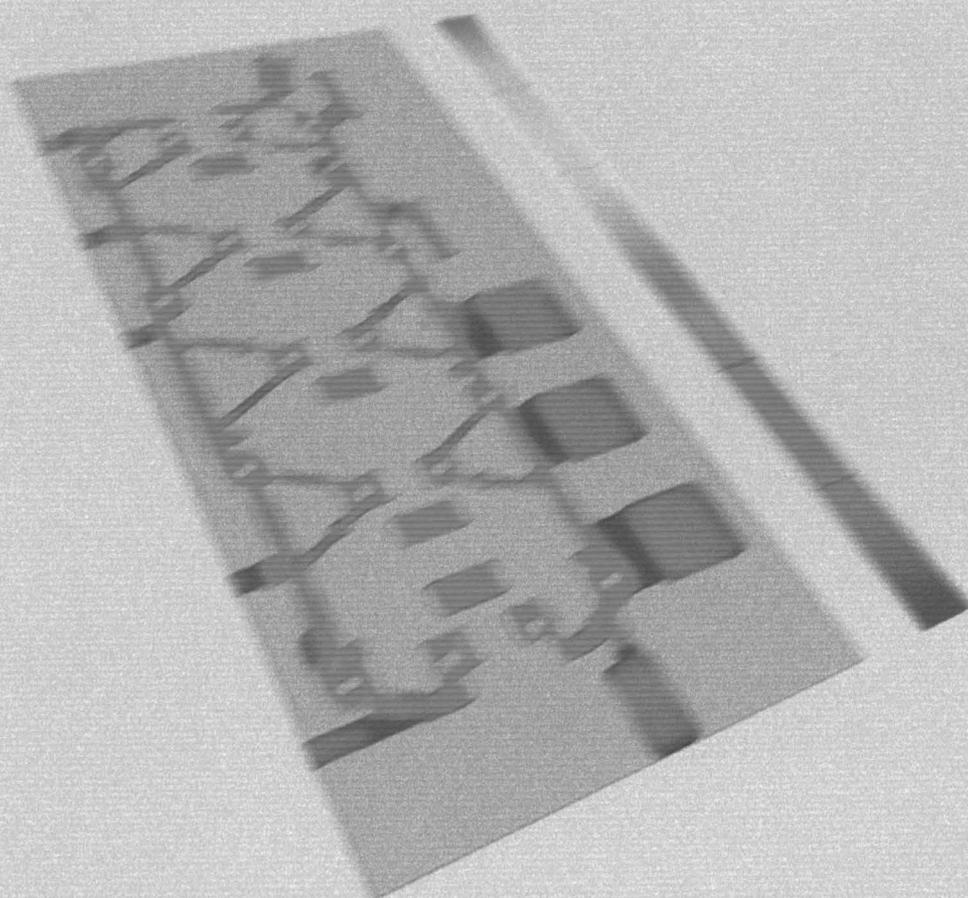
Departamento de Engenharia Metalúrgica e De Materiais

Realizado por:
Hugo Sousa
Orientado por:
Eng.º Silva Ribeiro



Disciplina de Estágio

Metodologia e aplicação de softwares de simulação do enchimento e solidificação à indústria de fundição



FEUP Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Metalúrgica e De Materiais

Realizado por:
Hugo Sousa
Orientado por:
Eng.º Silva Ribeiro



669(047.3)/LEHM 2001/500h

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca	
Nº	71224
CDU	669(047.3)
Data	13/08/2007

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Eng.º Carlos Silva Ribeiro, por ter proporcionado a realização deste trabalho e por todo o seu incansável apoio. Um agradecimento especial à Küpper & Schmidt e a Fusag, por terem disponibilizado o material usado neste trabalho.

Prólogo

Neste trabalho de Estágio foram aplicados *softwares* de simulação de enchimento e solidificação na indústria de fundição como ferramenta de desenvolvimento.

Através de uma cooperação entre o GMM-IMAT, a Küpper & Schmidt e a Fusag, foi possível utilizar tais *softwares* como parte integrante do desenvolvimento e optimização do processo produtivo. Ainda, em cooperação directa entre o GMM-IMAT e o INEGI, realizou-se um estudo de enchimento e solidificação de um processo de fundição em coquilha de uma liga de alumínio. Contudo, as circunstâncias ditaram a impossibilidade de apresentação dos resultados referentes a este processo.

De uma forma geral, o trabalho está dividido em dois temas (ou partes) distintos. A dissertação do primeiro, consiste na explicação da metodologia usada na preparação das simulações. O segundo tema, corresponde à descrição e discussão dos resultados das várias simulações obtidas ao longo deste Estágio. Sendo um aprofundamento ao trabalho realizado na disciplina de Seminário, sob o tema "*Utilização do software Flow-3D® no estudo do enchimento e solidificação de banhos*", não se pretende aqui proceder a uma explicação exaustiva das variáveis e métodos utilizados, já que estes conceitos foram esclarecidos no passado.

Assim, neste estágio, serão apresentados os estudos relativos a duas peças já em fase de produção, um relativo a fundição injectada e outro a fundição em areia. Será descrito todo o procedimento tomado na preparação das simulações, ideias relativas à optimização dos processos, não descurando ainda a discussão dos resultados obtidos para as situações actuais bem como, os resultados obtidos referentes aos processos de optimização propostos.

Índice

1 – Objectivo	Pág. 1
2 – Introdução	Pág. 2
3 – Flow-3D® versão 8. Novos modelos e métodos	Pág. 3
4 – Preparação e procedimento do processo de simulação	Pág. 8
4.1 – Peça 285, Küpper & Schmidt	Pág. 8
4.1.1 – Preparação da geometria	Pág. 9
4.1.2 – Preparação da simulação	Pág. 9
4.2 – Polia D400, Fusag	Pág. 11
4.2.1 – Preparação da geometria	Pág. 12
4.2.2 – Preparação da simulação	Pág. 12
5 – Resultados e Discussão	Pág. 15
5.1 – Peça 285, Küpper & Schmidt	Pág. 15
5.1.1 – Enchimento e solidificação	Pág. 15
5.1.2 – Peça 285, alterações propostas (alteração número 2 e número 8)	Pág. 22
5.2 - FUSAG	Pág. 26
5.2.1 - POLIA D400	Pág. 26
5.2.2 – Polia D400 – Alteração Proposta.	Pág. 31
6 – Conclusão	Pág. 33

1 – Objectivo

O objectivo deste estágio consistiu na análise do impacto e metodologia de aplicação de *softwares* de simulação à fundição injectada e fundição em areia. Para tal, foram usados dois *softwares* de simulação nomeadamente: o Flow-3D® para simulação do enchimento e solidificação, e o AFSolid 2000® para simulação da solidificação em moldações em areia.

2 – Introdução

A utilização de *softwares* de simulação pela industria de fundição torna-se hoje em dia essencial. A sua implementação nos departamentos de engenharia apresenta-se como uma mais valia a todo o nível empresarial. Não só é permitido identificar com maior rapidez e precisão as condições nefastas de produção que levam à ocorrência de deficiências, como também, através do estudo de várias alterações ao desenho do produto é possível aumentar o rendimento do metal vazado e, dessa feita, aumentar a rentabilidade do processo produtivo.

Advém também do uso de *softwares* de simulação uma melhoria da qualidade do produto final, já que todas as deficiências detectadas em análises preliminares são passíveis de um procedimento correctivo.

Numa perspectiva económica, a diminuição do tempo de desenvolvimento do produto, bem como o aumento da sua qualidade aliado à racionalização da quantidade de metal vazado, torna-se preponderante no sucesso industrial numa Europa, onde a competitividade assume elevadas proporções.

Para um uso eficaz dos *softwares* de simulação, é requerido ao operador um elevado domínio sobre os assuntos concernentes aos processos envolvidos. Este, deve estar apto a compreender o significado e influência das variáveis utilizadas no processo e, sobretudo, proceder a uma análise crítica dos resultados fornecendo um conjunto de alternativas que levem à melhoria deste.

3 – Flow-3D® versão 8. Novos modelos e métodos

O lançamento da versão 8 do *software* Flow-3D® permitiu que fossem suprimidas certas lacunas existentes em versões anteriores. Foram introduzidas novas funcionalidades e modelos matemáticos no intuito de melhorar o seu carácter generalista na solução de problemas que envolvam fluídos. Assim, a resolução de novos problemas tornou-se mais expedita, obtendo-se um comportamento mais fidedigno do fluído. Desta forma, e para quem segue a continuação deste trabalho, que teve a sua origem na disciplina de Seminário, seria uma grande lacuna não descrever de modo sucinto e breve as novas capacidades introduzidas nesta versão.

Sendo o objectivo deste estudo a aplicação do Flow-3D® como ferramenta de auxílio de desenvolvimento de produto na indústria de fundição, interessa apenas referir modelos com possível aplicação directa a esta área, apesar das novas potencialidades introduzidas serem inúmeras.

Uma grande extensão às capacidades do Flow-3D® foi a introdução do modelo de malha multibloco. Este modelo, permite um uso mais eficiente dos recursos do *software* e *hardware* quando o objectivo concerne a modelação de fenómenos de fluxo complexos que envolvam o uso de um número total de células extremamente elevado. É possibilitado deste modo um malhamento diferencial localizado, permitindo a definição de dimensões de células distintas em locais diferentes: menor dimensão em locais onde se exige maior detalhe e malhas de maior dimensão nos locais de menor exigência, reduzindo-se assim o número total de células por simulação.

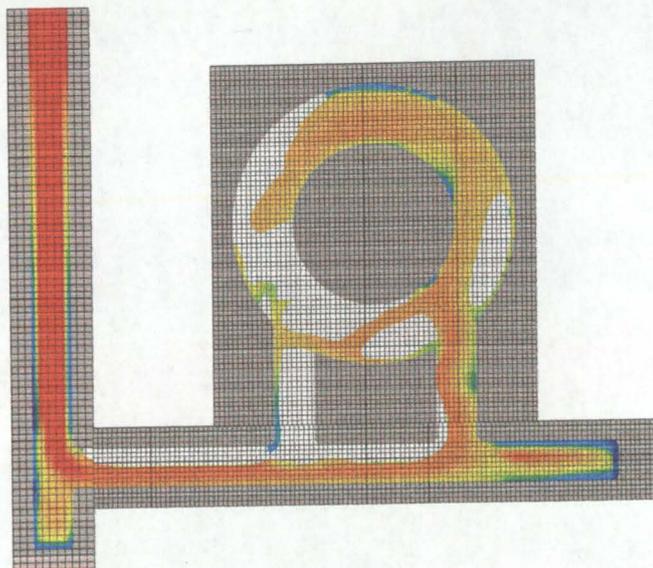


Figura 3.1 – Simulação de um processo de fundição em areia recorrendo ao uso da malha multibloco. De notar a diferença do tamanho de malha entre a gítagem e a peça.

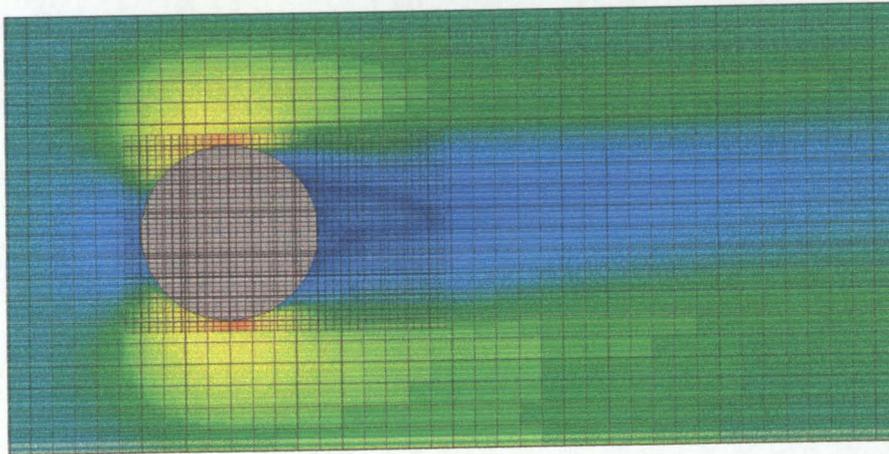


Figura 3.2 – Devido à técnica multibloco permite-se uma definição elevada de resultados apenas em áreas específicas sem distorção das células envolventes.

O uso de vários blocos só é possível mediante a definição de um novo tipo de fronteira que permita a passagem de informação entre os diversos blocos predefinidos. Este algoritmo permite que vários blocos com tamanho de célula diferente se sobreponham combinando o mesmo espaço físico. Perante tal situação, o algoritmo apenas o usa como referência para o cálculo as células de menor dimensão, permitindo assim uma elevada redução do tempo de utilização do CPU. Contudo, uma vez que as condições de fronteira multibloco são definidas aplicando a solução da iteração anterior, algumas variáveis podem dessincronizar-se durante as passagens entre blocos. De modo a resolver a passagem de uma célula de tamanho superior para células de tamanho inferior, é introduzido um ajuste na velocidade a cada espaço de tempo, permitindo uma maior estabilidade da solução *velocidade/pressão* provocando, no entanto, um pequeno erro à solução. Sendo um método ainda de aplicação embrionária, certos modelos matemáticos não funcionam correctamente, como é o caso do modelo de Contração Rápido (Rapid Shrinkage Model, *RSM*) e do pós-processamento de gráficos tridimensionais, que apenas suportando o uso de um único bloco de malha.

Uma lacuna existente no modelo de solidificação do Flow-3D® foi finalmente colmatada com o lançamento da versão 8. Fazendo parte do conhecimento geral, é sabido que entre o metal e a moldação existe um coeficiente de transferência de calor substancialmente diferente daquele existente entre a moldação e o meio ambiente. Este facto deve-se exclusivamente ao modo como as transferências de calor se processam nestas interfaces. Nas versões subsequentes à versão 8, a moldação era caracterizada como um obstáculo rodeado de fronteiras, sendo estas consideradas parte integrante do obstáculo. Deste modo, qualquer transferência de calor entre o obstáculo e a fronteira não era passível de ser simulada. Obviamente

que em qualquer processo de fundição existe uma transferência de calor entre o obstáculo e o meio ambiente, sendo que, esta transferência é agora passível de ser simulada já que as fronteiras deixam de ser parte integrante do obstáculo.

Outra característica introduzida foi o conceito de *compressibilidade limitada automática*. Este conceito é de extrema importância na solução de problemas onde a convergência da solução *pressão/velocidade* se torna muito crítica dado que envolve elevadas pressões e velocidades, concorrendo para o insucesso da simulação através de um erro fatal. O uso desta função permite que durante o decorrer de uma simulação, quando a convergência da solução supracitada se torne demasiado crítica, o fluido possa assumir um certo grau de compressibilidade, permitindo a evolução com sucesso. Sendo esta compressibilidade limitada, a componente essencialmente incompressível do fluido não é alterada, logo o erro introduzido é desprezável.

É sabido que quando um fluido com uma determinada viscosidade e velocidade entra em contacto com uma qualquer superfície, desenvolve-se uma tensão de corte na interface. Esta tensão aplicada irá ser responsável por um desgaste nessa mesma superfície. A versão 8 introduz um novo modelo matemático que permite simular a interacção entre o fluido e a superfície de contacto, assumindo que esta é constituída por partículas sólidas. A aplicação deste modelo é bastante útil para simulações de fundição em areia dado ser permitido antever com eficiência o desgaste da cavidade de moldação devido à erosão.

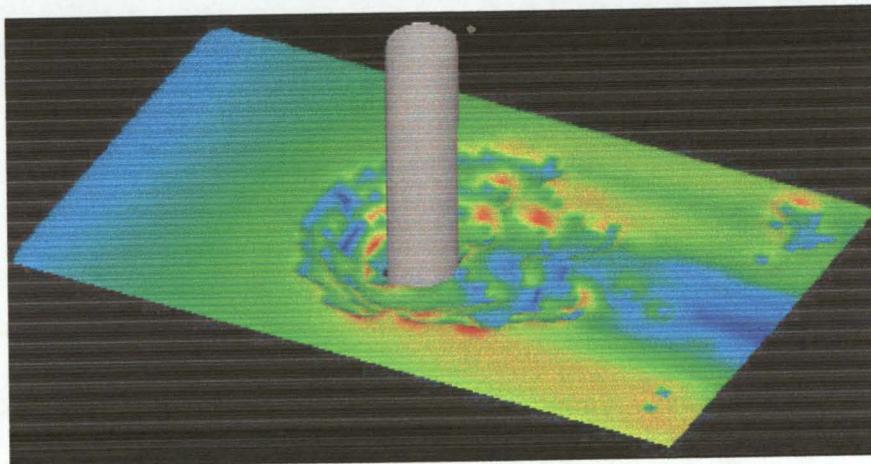


Figura 3.3 – Uso do modelo de erosão. A figura representa a erosão de um leito em torno de um cilindro sob a influência da passagem de um fluido.

Uma conclusão já assumida no trabalho de seminário correspondeu à imprevisão do tamanho final do ficheiro de resultados no decurso do procedimento de simulação. Apesar de ser possível obter um largo espectro de variáveis como resultados (pressão, temperatura, velocidade, etc..), estas são gravadas num único ficheiro.

Fácil será compreender que quando se pretende obter um conjunto de resultados espaçados com um curto intervalo de tempo, o tamanho do ficheiro cresce exponencialmente. Esta situação levou amiúde a que o limite do sistema operativo Windows de 4 GB por ficheiro fosse ultrapassado, resultando num termino antecipado da simulação dado que a sua escrita se tornava impossível. Agora, mediante uma selecção prévia dos resultados a serem gravados, é possível antever o tamanho do ficheiro tendo em atenção a que nunca ocorra o fim prematuro da simulação devido ao limite de tamanho por ficheiro.

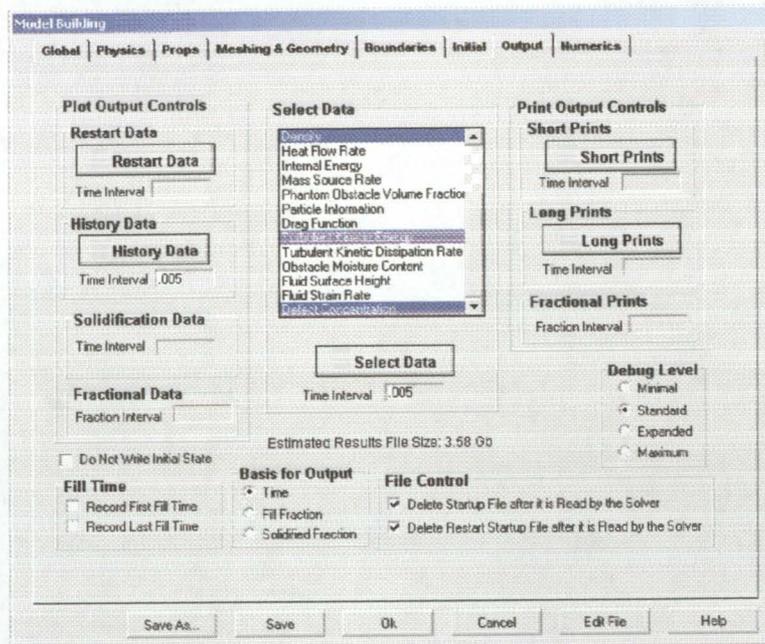


Figura 3.4 – Previsão do tamanho final do ficheiro de resultados.

4 – Preparação e procedimento do processo de simulação

4.1 – Peça 285, Küpper & Schmidt

Respondendo ao apelo da empresa Küpper & Schmidt, foi realizado um estudo de validação e optimização do processo de injeção de um componente para a indústria automóvel. Segundo informações gentilmente cedidas pela empresa, a peça objecto de análise sofreu, já no passado, algumas tentativas de optimização com graus de êxito bastante elevados, mas, a solução ainda não satisfaz os técnicos da empresa dado que as meias luas existentes no centro da peça persistem em apresentar pequenos microrrechupes esporádicos.

Esta peça é um componente de motor possuindo uma geometria, em termos de solidificação, desfavorável, dado que apresenta paredes de pequena espessura anexas a zonas maciças. Estes aspectos morfológicos concorrem para a propensão da ocorrência de defeitos. Para além disso, devido à complexidade geométrica, não se pode esperar um enchimento suave e laminar, criando-se uma situação nefasta para o processamento de ligas oxidáveis, como é o caso das ligas de alumínio.

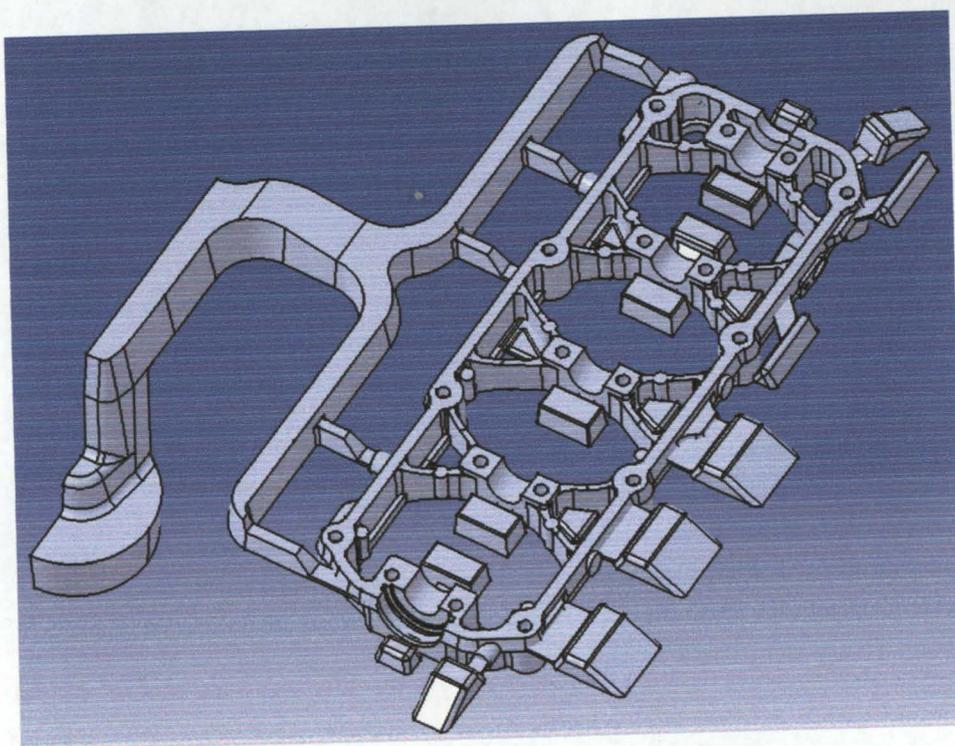


Figura 4.1 – Modelo tridimensional do cacho, apresentando-se somente metade já que o cacho apresenta um carácter simétrico.

4.1.1 – Preparação da geometria

O modelo tridimensional da peça 285 foi fornecido pelo Departamento de Engenharia da Küpper & Schmidt em formato STL (compatível com o Flow-3D®). Contudo, um defeito de exportação originou uma geometria com faces não planares e sobrepostas, inviabilizando várias simulações em Flow-3D® já que introduziu bastantes erros na malha. Assim, após a detecção deste problema foi recebido o mesmo modelo em formato IGES, que serviu como base para a modelação de um novo modelo o qual foi então exportado para o formato STL, desta feita, com ausência de erros. Apesar deste trabalho adicional, esta modelação permitiu que fosse criado um modelo paramétrico capaz de ser alterado de forma a ter em conta as várias modificações que a peça 285 veio ou venha a sofrer.

4.1.2 – Preparação da simulação

Sendo este um processo de fundição injectada, para além da caracterização termofísica da liga, foi necessário recolher o máximo de informação possível sobre as características do processo de injeção. Para tal, foi disponibilizado pela Küpper & Schmidt um manual de informações, fundamentais para a correcta modelização do processo, e que se resumem na tabela 4.1 e 4.2 e 4.3

Liga Al-12Si

Temperatura de <i>solidus</i>	847	K
Temperatura de <i>liquidus</i>	855	K
Temperatura de vazamento	973	K
Condutibilidade térmica	1e7	erg/s/cm/K
Densidade do sólido	2.45	gm/cm ³
Densidade do líquido	2.36	gm/cm ³
Calor específico	1.08e7	erg/gm/K
Viscosidade	0.0119	poise
Calor latente de fusão	3.89e9	erg/gm
Fracção crítica de sólido	0.3	

Tabela 4.1 – Características termofísicas da liga Al-12Si.

Tempo de injeção	0.083	s
Pressão do metal	140	bar
Velocidade do pistão	3.55	m/s
Tempo de solidificação	16	s

Tabela 4.2 – Variáveis do processo fornecidas pela Küpper & Schmidt.

Condutibilidade térmica	2.97e5	erg/s/cm/K
Temperatura	473	K
Coef. de transferência de calor	1e8	erg/s/cm ² /K

Tabela 4.3 – Características termofísicas do molde, aço H13.

Dada a característica simétrica do cacho apenas foi incluída na simulação metade deste, especificando para tal uma fronteira simétrica que permite deste modo uma redução do tempo de simulação para metade.

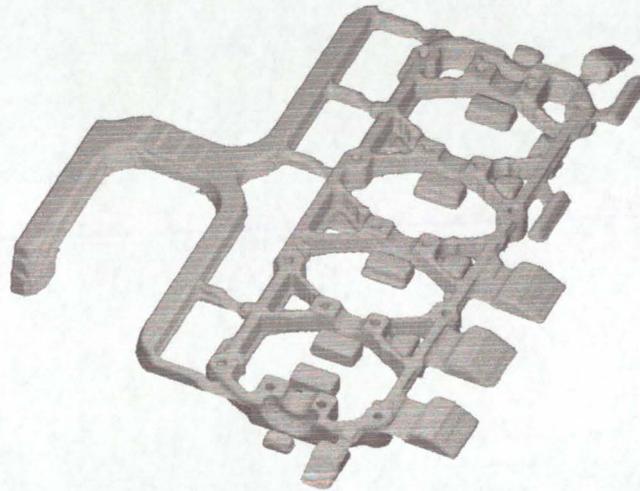


Figura 4.2– Malha do cacho gerada pelo Flow-3D® com 2 milhões de células.

De modo a que todos os detalhes geométricos fossem incluídos na malha, dado que a peça apresenta zonas de pequena espessura, foi necessário usar um elevado número de células, que rondou a casa das 2 milhões células.

Ao contrário da modelização de processos de fundição em areia, cuja superfície se apresenta sempre rugosa, os moldes nos processos de injeção são metálicos e de superfície lisa. Assim, o modelo de rugosidade superficial não foi incluído pois a sua aplicação é desnecessária.

Apesar de se ter constatado em simulações anteriores que o enchimento do processo é de natureza turbulenta, este modelo não foi incluído na simulação final. De acordo com o suporte técnico, o facto de existirem zonas onde a parede apresente três ou menos células conduz a uma inviabilização dos modelos de turbulência pois não é possível obter resultados fidedignos. Deste modo, foi sugerido aumentar a grandeza da viscosidade num factor de 100 (1.19 poise contra os 0.0119 poise característicos das ligas de alumínio) permitindo tomar em consideração a influência da ocorrência de vórtices característicos de processos turbulentos no comportamento do fluido.

Como é normal, foi usado o modelo de concentração de defeitos superficiais para a previsão das zonas onde a oxidação da liga possa ocorrer, bem como prever juntas de solda deficiente.

Foi ainda aplicado o modelo de bolha adiabática simulando desta forma o efeito de aprisionamento e arrastamento de gás durante o processo de injeção. Também se

assumiu que a cavidade de moldação se encontrava à pressão ambiente, de $1.013e6$ Pa.

Como parâmetros adicionais, especificou-se que as variáveis ITMAX (limite máximo de erros permitidos na solução da variável pressão) e EPSADJ (critério de convergência da solução) apresentassem valores de 1000 e 1 respectivamente. Os comentários sobre a influência destas variáveis no sucesso da simulação serão tecidos na conclusão deste trabalho.

Após a conclusão da simulação de enchimento, foi realizada a simulação de solidificação através de um *Restart*, alterando-se unicamente os parâmetros relativos ao modo de conclusão da simulação (término quando a fracção solidificada for igual a 1.0). Refira-se que o modelo de solidificação utilizado foi o RSM, permitindo reduzir o tempo das simulações de solidificação.

4.2 – Polia D400, Fusag

Foi solicitado pela empresa Fusag o estudo das peças Polia D400 e Isoria Dn300, que já se encontravam em fase de produção. Sendo peças problemáticas em termos de sanidade, o Departamento de Engenharia optou por um sobredimensionamento da alimentação que recorre ao uso extensivo de camisas isotérmicas. Só assim se tornou possível uma redução do microrrechupe, que ocorria de forma bastante alarmante no interior destas peças.

De forma a rentabilizar ainda mais o processo, tornou-se necessário a redução ou mesmo a eliminação da quantidade de camisas utilizadas, evitando simultaneamente a ocorrência do microrrechupe. Foram levadas a cabo algumas alterações à alimentação por parte do Departamento de Engenharia da Fusag as quais foram novamente simuladas.

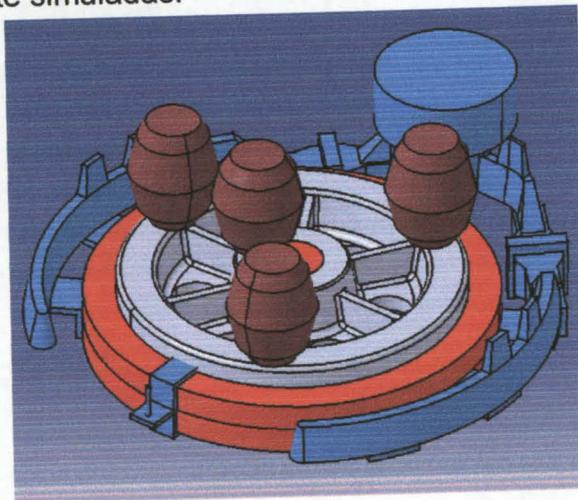


Figura 4.3 – Geometria do cacho Polia D400 , incluindo a gitagem, machos e camisas isotérmicas.

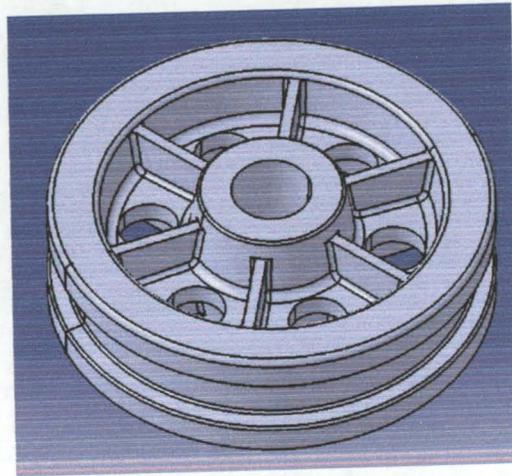


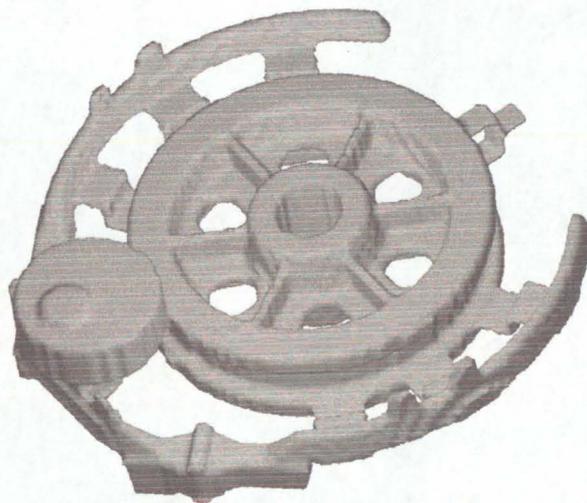
Figura 4.4 – Geometria da peça Polia D400 .

4.2.1 – Preparação da geometria

Após a recepção dos desenhos técnicos do “*layout*” das duas meias moldações, foram modelados os cachos, bem como os machos e camisas, exportando-se estes diversos elementos para o formato STL de forma a serem recebidos pelo Flow-3D® . A necessidade de se modelar os machos e as camisas é facilmente compreensível já que estes apresentam características termofísicas bastante diferentes da moldação, permitindo deste modo uma modelização correcta do sistema.

4.2.2 – Preparação da simulação

Após a modelação dos cachos de ambas as peças, o primeiro passo a ser tomado foi o seguinte: verificar a existência de influências do enchimento na origem destes



defeitos.

Figura 4.5 - Malha do cacho gerada pelo Flow-3D® com 1 milhão de células.

Sendo um processo de fundição em areia, o procedimento de simulação é bastante expedito, não sendo necessário alterar as variáveis de convergência da solução (EDSADJ e ITMAX) já que esta classe de simulações apresentam, normalmente, baixas velocidades e pressões de enchimento, sendo executadas de forma estável. Foi então iniciado o processo de simulação, usando para o efeito as características termofísicas e de processo indicadas nas tabelas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Polia D400 – Liga Ferro Fundido GGG70

Temperatura de <i>solidus</i>	1426	K
Temperatura de <i>liquidus</i>	1446	K
Temperatura de vazamento	1658	K
Condutibilidade térmica	3e6	erg/s/cm/K
Densidade do sólido	7	gm/cm ³
Densidade do líquido	6.7	gm/cm ³
Calor específico	9e6	erg/gm/K
Viscosidade	0.03	poise
Calor latente de fusão	2.6e9	erg/gm
Fracção crítica de sólido	0.55	

Tabela 4.4 – Características termofísicas da liga GGG 70

Condutibilidade térmica	1.5e5	erg/s/cm/K
Temperatura	295	K
Coef. de transferência de calor	4e6	erg/s/cm ² /K

Tabela 4.5 – Características termofísicas da areia verde

Condutibilidade térmica	7.1e4	erg/s/cm/K
Temperatura	295	K
Coef. de transferência de calor	2e5	erg/s/cm ² /K

Tabela 4.6 – Características termofísicas da areia de machos (ColdBox)

Condutibilidade térmica	3.45e4	erg/s/cm/K
Temperatura	295	K
Coef. de transferência de calor	4e3	erg/s/cm ² /K

Tabela 4.7 – Características termofísicas das camisas isotérmicas

Pressão do metal	1.015e6	Pa
Pressão ambiente	1.013e6	Pa
Temperatura Ambiente	298	K

Tabela 4.8 – Resumo das variáveis do processo

Durante a simulação de enchimento, como foi já referido, visava somente determinar a existência de propensões para a ocorrência de defeitos derivados do processo de enchimento, não foram incluídas as camisas isotérmicas.

Relativamente ao número de células utilizados e, como consequência do detalhe geométrico apresentado pela peça, não foi necessário usar uma quantidade de células tão elevadas como as usadas no cacho da Küpper & Schmidt. Desta forma a geometria Polia D400 considerou-se necessário utilizar um número de células igual a 1000000 de modo a que a placa central apresentasse mais do que quatro células de espessura.

Sendo este um processo de fundição em areia, foi incluído ainda a rugosidade superficial, já que influência certamente o comportamento do fluido.

Incluiu-se igualmente o modelo de turbulência RNG (Reanormalized Group Theory), por forma a prever a ocorrência de enchimento turbulento, que poderá eventualmente contribuir para a erosão da cavidade de moldação. Como é normal, foi aplicado o modelo de concentração de defeitos superficiais para a previsão das zonas onde possa ocorrer acumulação de impurezas.

Foi também assumido que a cavidade de moldação se encontrava à pressão ambiente, de $1.013e6$ Pa e a uma temperatura de 298 K.

Após o termino da simulação de enchimento, procedeu-se de modo análogo às simulações executadas para a Küpper & Schmidt, realizando-se a simulação de solidificação através de um *Restart*.

Contudo, face aos elevados tempos de processamento relativos à execução da simulação de solidificação em Flow-3D® (cerca de 5 horas), optou-se pela utilização do *software* AFSolid 2000® visto que um conjunto de alterações predominantes seriam ainda executadas podendo, caso contrário, comprometer cronologicamente o estudo.

Não obstante da utilização de outro programa, foram claramente respeitadas as variáveis termofísicas utilizadas no Flow-3D®, criando-se assim novas definições de materiais. Desta forma não se recorreu ao uso dos materiais pré definidos na base de dados do AFSolid 2000®.

Aqui, já foram incluídos os machos e as camisas isotérmicas, uma vez que têm influências notórias na evolução da solidificação. De referir que se especificou uma malha em AFSolid 2000® com 1 milhão de células.

5 – Resultados e Discussão

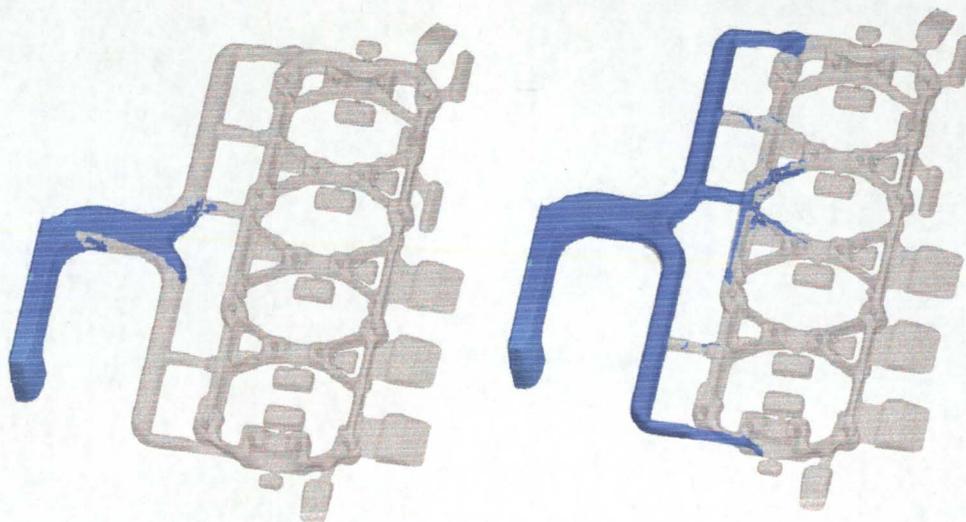
Neste capítulo serão apresentados e discutidos apenas os resultados mais relevantes obtidos durante a execução do estágio; os restantes serão apresentados em anexo. Devido à limitação de espaço apresentam-se somente os resultados alusivos à última modificação fornecida pela empresa Küpper & Schmidt, os resultados das alterações propostas à peça 285 da Küpper & Schmidt, e, finalmente, os resultados alusivos à Polia D400 da empresa Fusag bem como a alteração proposta. No anexo C encontram-se os resultados relativos à Isoria Dn300.

Salienta-se ainda que todas as unidades apresentadas encontram-se no sistema CGS.

5.1 – Peça 285, Küpper & Schmidt

5.1.1 – Enchimento e solidificação

Após um tempo de simulação de cerca de 120 horas para o enchimento, acrescentado de um tempo de simulação de 14 horas para a solidificação, foi possível obter vários resultados. Dar-se-à ênfase aos mais relevantes, no entanto, no Anexo A é possível consultar resultados de menor relevância para esta discussão.



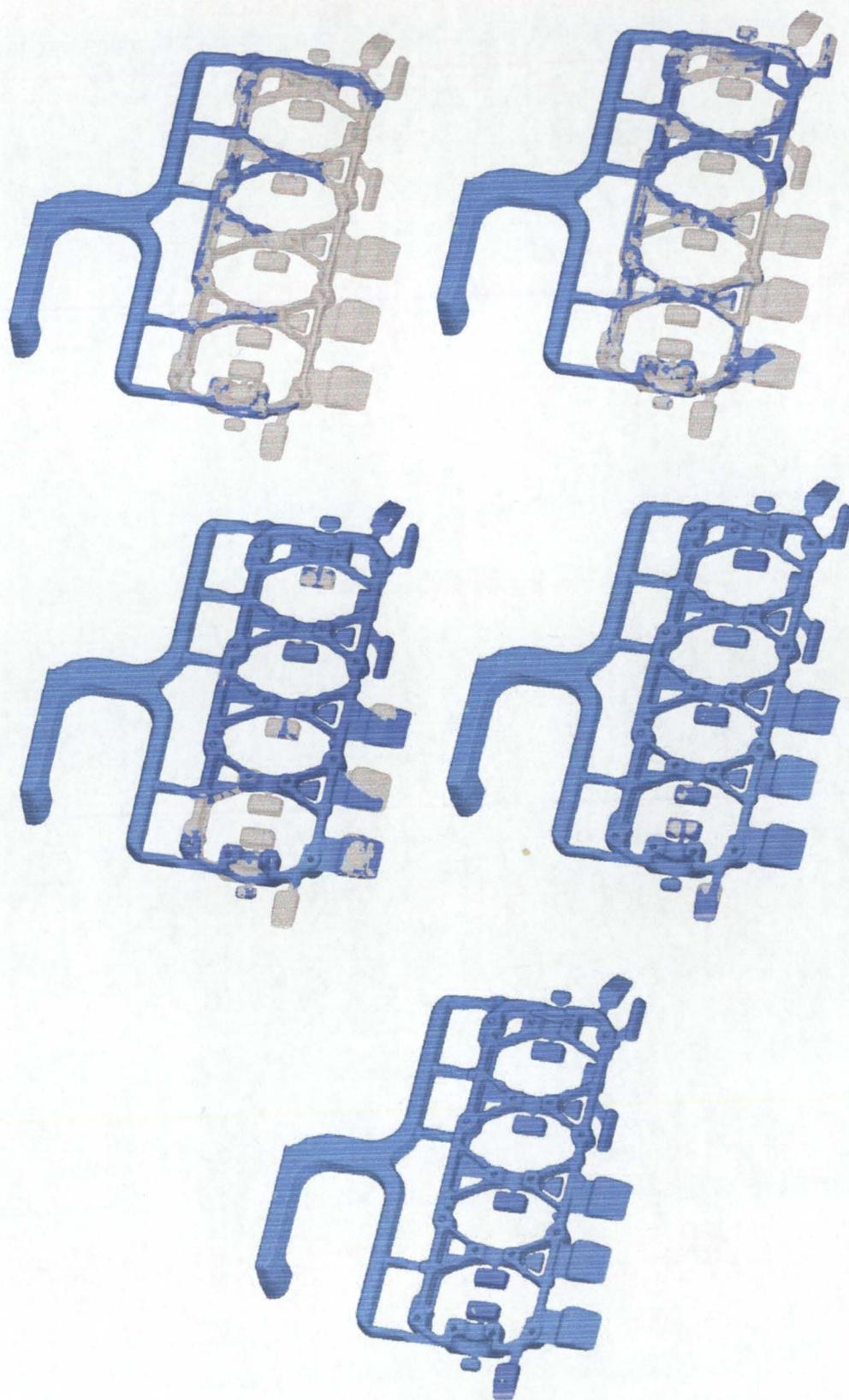


Figura 5.1 - Sequência do enchimento. Imagens coloridas pela variável pressão. Os tempos apresentados correspondem a 0.009 s, 0.018 s, 0.025 s, 0.034 s, 0.040 s, 0.058 s e 0.061 s respectivamente.

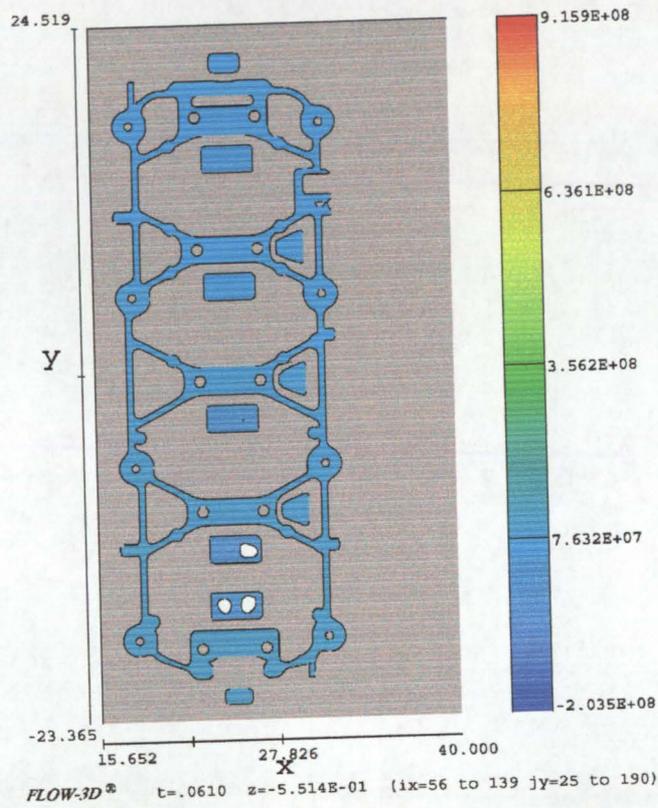


Figura 5.2 – Distribuição de pressão no final do enchimento (tempo de 0.061 segundos). Corte efectuado a 5.5 mm abaixo do plano de apartação.

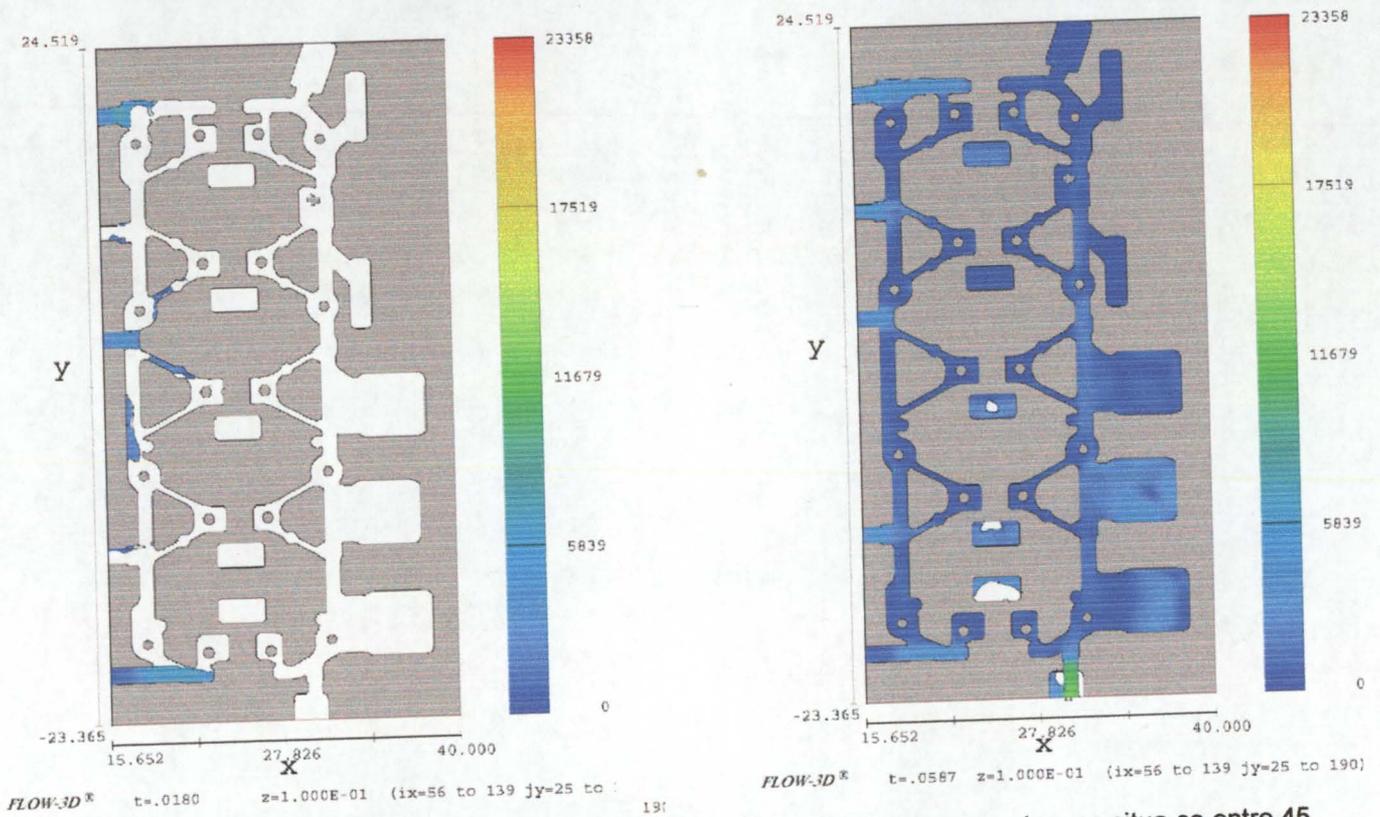


Figura 5.3 – Variação da velocidade no enchimento. Velocidade média nos ataques situa-se entre 45 – 80 m/s. Cortes efectuados no plano de apartação.

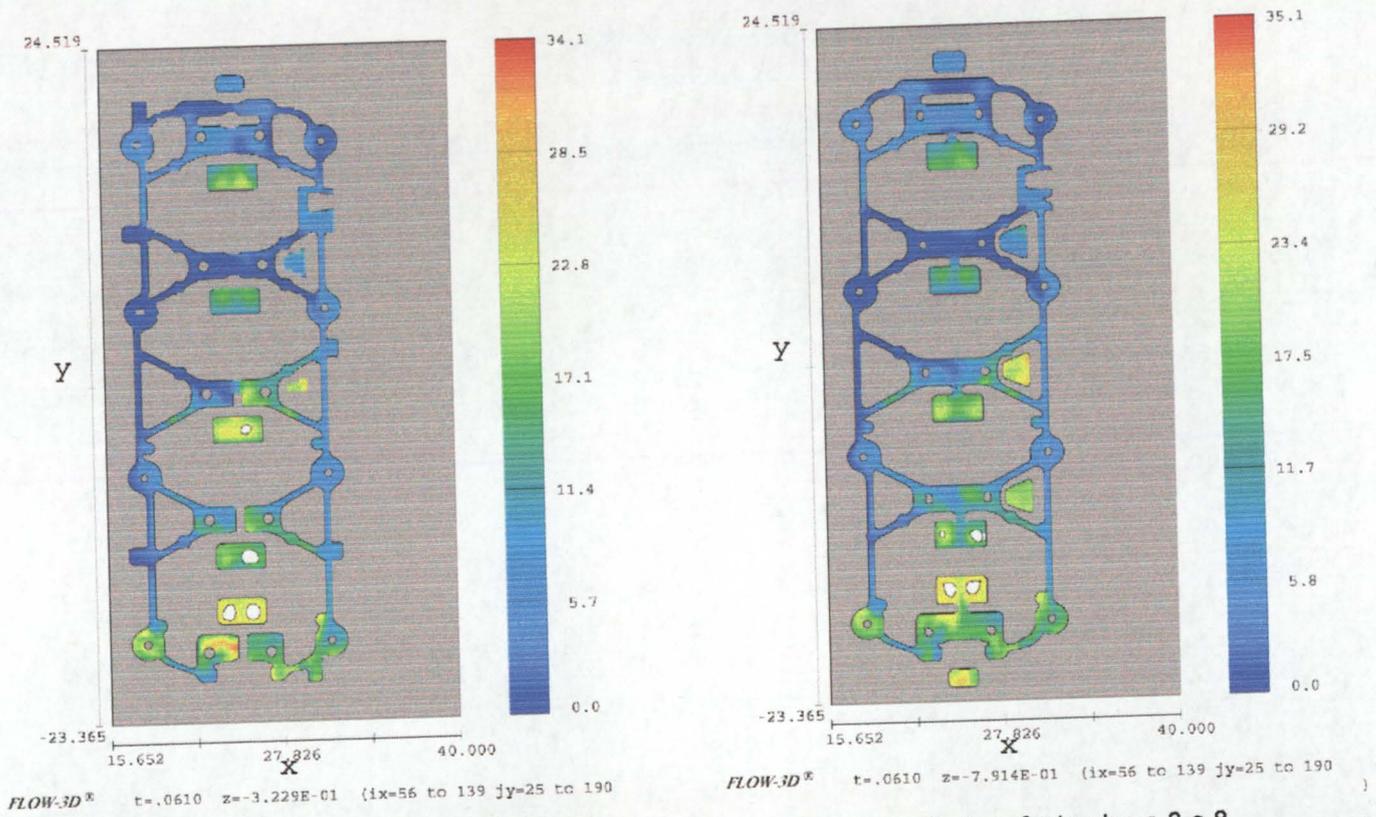


Figura 5.4 – Concentração de defeitos no fim do enchimento. Cortes efectuados a 3 e 8 mm abaixo do plano de apartação.

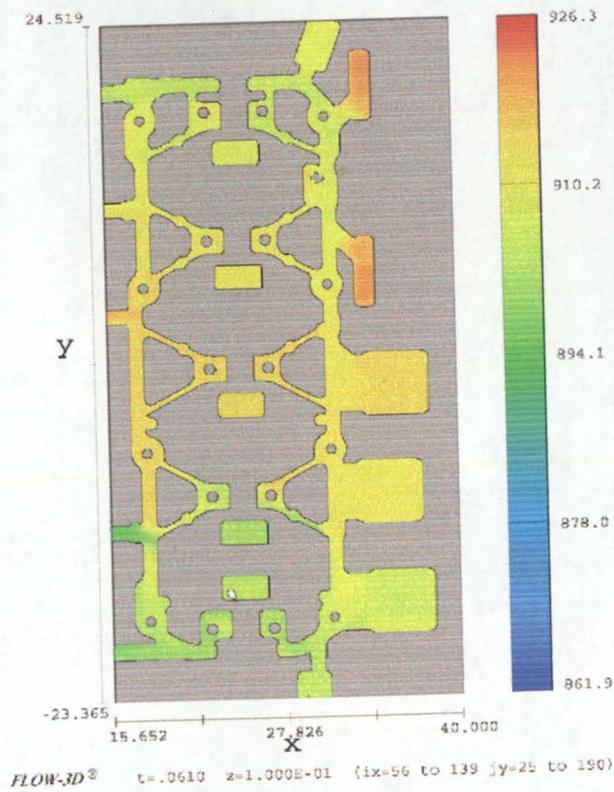


Figura 5.5 – Distribuição de Temperaturas no fim do enchimento. Corte efectuado no plano de apartação.

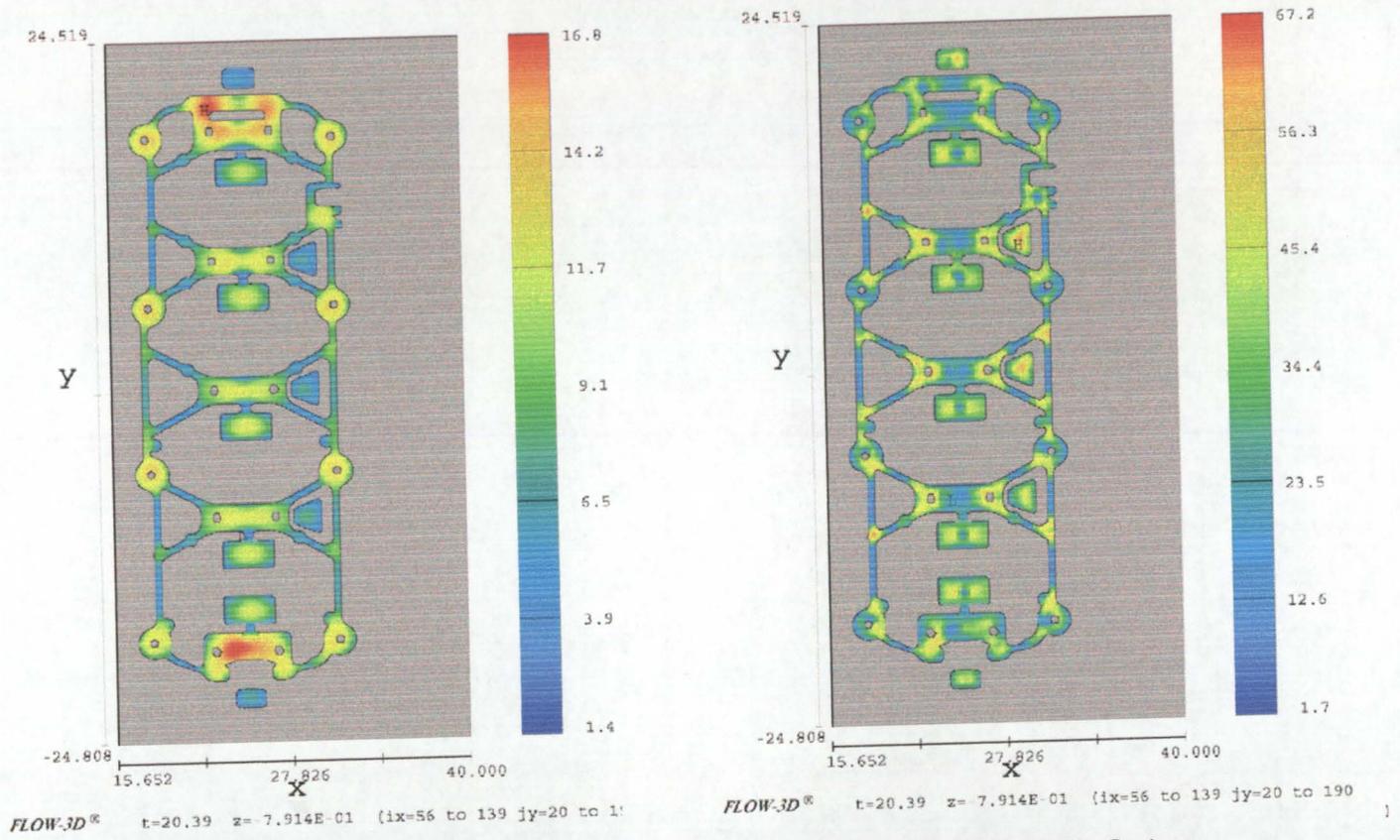


Figura 5.6 – Tempo local de solidificação e Gradiente térmico na solidificação. Corte efectuado a 8 mm abaixo do plano de apartação.

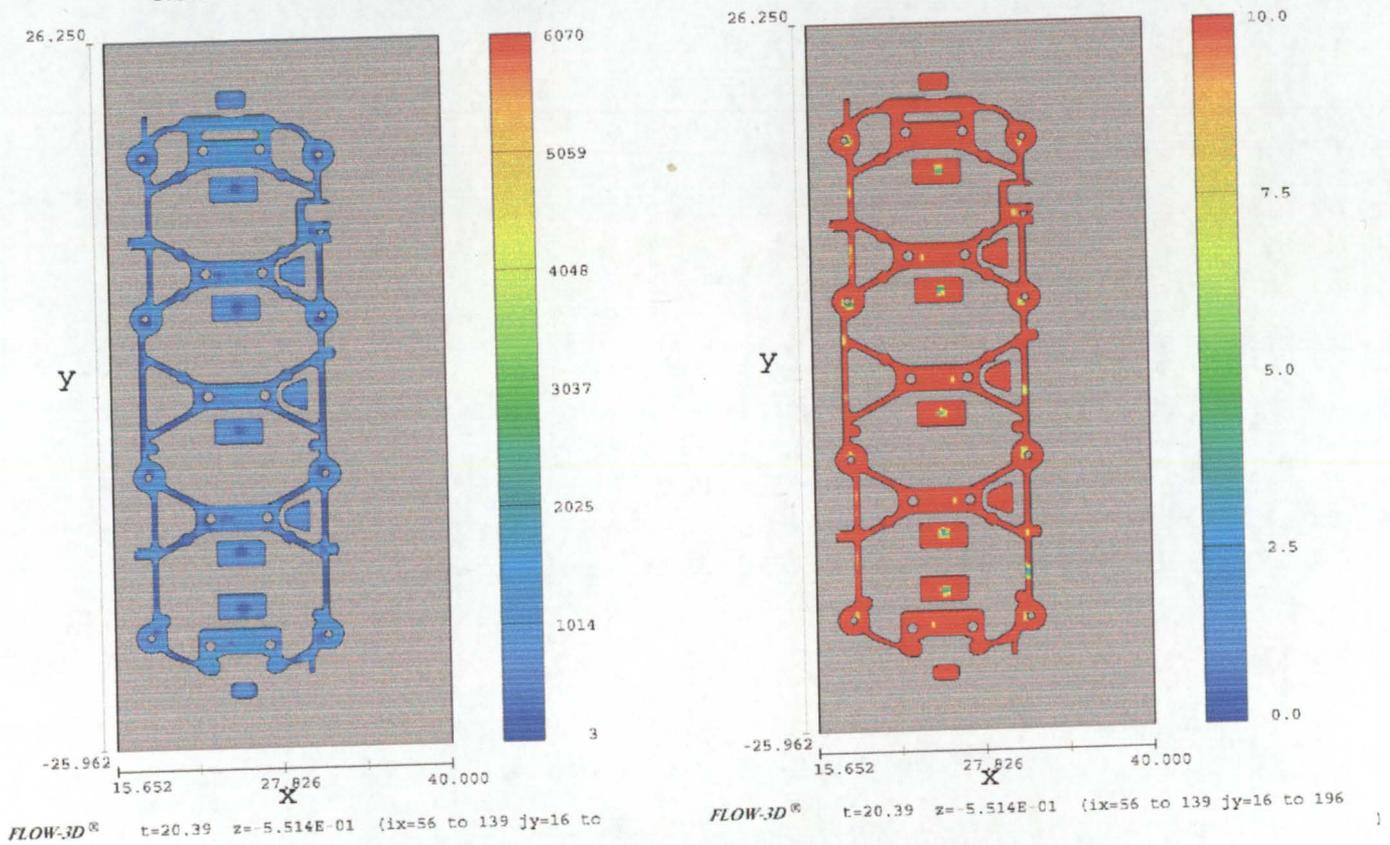


Figura 5.7 - Critério de microporosidade LCC e Niyama. Corte efectuado a 5.5 mm abaixo do plano de apartação.

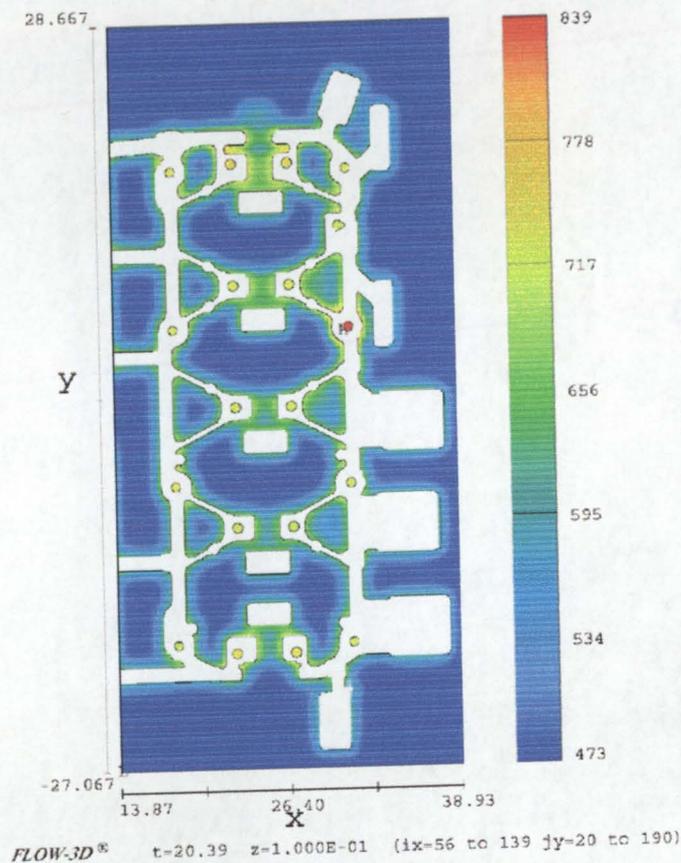


Figura 5.8 – Distribuição de temperaturas no molde no fim da solidificação.

Como se constata pelos resultados referentes à simulação de enchimento, o processo é de natureza turbulenta contribuindo para um enchimento não suave e não uniforme do cacho. Esta afirmação é facilmente corroborada pelos resultados apresentados na figura 5.1, relativos aos tempos de 0.025 e 0.034 segundos, onde ocorre considerável dispersão do fluido, aumentando a sua superfície livre. Ao contrário do que seria de esperar, verifica-se que a zona da parede entre os dois ataques inferiores é uma das últimas zonas a encher. É de igual forma visível no início do enchimento (0.009 s e 0.018 s), a formação de uma bolha de ar na zona entre a bolacha e os ataques, que será transportada no decorrer do enchimento até aos “masselotes” da zona central inferior. Esta situação é melhor compreendida visualizando os resultados de um corte efectuado 5 mm abaixo do plano de apartação (figura 5.2).

A velocidade de enchimento situa-se de um modo geral, entre os 20 e 116 m/s, sendo a velocidade média nos ataques de cerca de 60 m/s (Figura 5.3).

É claramente visível nos resultados apresentados na figura 5.4 e na figura A.4 do anexo A, a existência de uma elevada concentração de defeitos nas meias luas inferiores, bem como no interior dos “masselotes” inferiores. A análise dos resultados obtidos permite concluir que irá ocorrer nas três meias luas inferiores um encontro de frentes de fluido, prejudicando desta forma a sanidade da peça.

Constata-se também o correcto posicionamento dos “masselotes”, já que a acumulação de defeitos é elevada no seu interior.

De acordo com a figura 5.5, a distribuição de temperaturas no fim do enchimento não é acentuada mas, a existência de um gradiente de temperatura na ordem dos 30 K no eixo Y comprova, mais uma vez, que a última zona a encher irá corresponder à zona inferior do cacho.

Em termos de solidificação, obteve-se um tempo simulado de 20.39 segundos para todo o cacho, e, de cerca de 16.9 segundos para a peça. Verifica-se que os pontos quentes (figura 5.6) encontram-se nas zonas maciças da peça.

Pelos resultados apresentados na figura 5.7, pode ser observada a situação real da peça, já que os critérios de previsão de microporosidade apontam para uma elevada probabilidade de ocorrência desta nas meias luas interiores. Apesar das paredes da peça apresentarem extrema tendência para a ocorrência de microporosidade, este facto deve ser ignorado pois somente duas células de espessura são pouco significativas para o cálculo dos critérios, podendo induzir erros elevados.

Observando a figura 5.8 verifica-se um elevado aquecimento do molde, com um gradiente térmico muito apertado. Este aquecimento não é realista pois os canais de arrefecimento não foram incluídos na simulação.

A comparação dos resultados simulados com os resultados reais leva ao aparecimento de discrepâncias. De facto, o erro no tempo de enchimento simulado (0.061 segundos em contraposição com 0.083 segundos da situação real) deriva exclusivamente do facto da assunção de uma velocidade de injeção uniforme de 3.5 m/s. Este pressuposto não é fidedigno já que o metal é injectado por um pistão que sofre uma aceleração. De modo a se obter o perfil de velocidade correcto, seria necessário proceder à simulação do sistema de injeção, recolhendo a variação da velocidade com o tempo. Contudo, dado que esta simulação envolve o uso de obstáculos em movimento, o conhecimento requerido de Flow-3D® para a sua modelização ainda não se encontra aprofundado.

Também, o tempo de solidificação de 20.39 segundos apresenta-se superior ao tempo de solidificação real de 16 segundos (vide tabela 4.2). A disparidade constatada deve-se à inexistência de canais de arrefecimento na simulação, podendo esta situação ser ultrapassada especificando um coeficiente de transferência de calor superior.

Relativamente à quantidade de gás aprisionado, verifica-se que este é excessivo. O valor da variável usado no modelo de bolha adiabática foi sugerido pelo suporte

técnico, já que não era possível a sua determinação experimental, existindo sempre a dúvida sobre a sua validade. No entanto, num caso real, as meias moldações não possuem um contacto perfeito, o que permite a que os gases encontrem um caminho de escape. Durante a modelização de qualquer processo de fundição, é sempre assumido um contacto perfeito entre as meias moldações, logo, os gases simulados não possuem tal caminho livre, sendo aprisionados nas últimas zonas a encher, impedindo enchimento total da cavidade.

5.1.2 – Peça 285, alterações propostas (alteração número 2 e número 8)

Como se verificou que as zonas propícias à ocorrência de microporosidade se situam nas imediações dos “masselotes”, partiu-se do pressuposto que se for aumentado o módulo do “masselote” e a secção da lamina entre este e a peça, cria-se um caminho de alimentação que irá reduzir a probabilidade da ocorrência deste defeito. Deste modo, foram testadas várias alternativas aumentando de forma gradual a secção da lamina e módulo dos “masselotes”, chegando-se por fim a uma situação, alteração 8, onde finalmente os resultados encontrados apresentam-se satisfatórios.

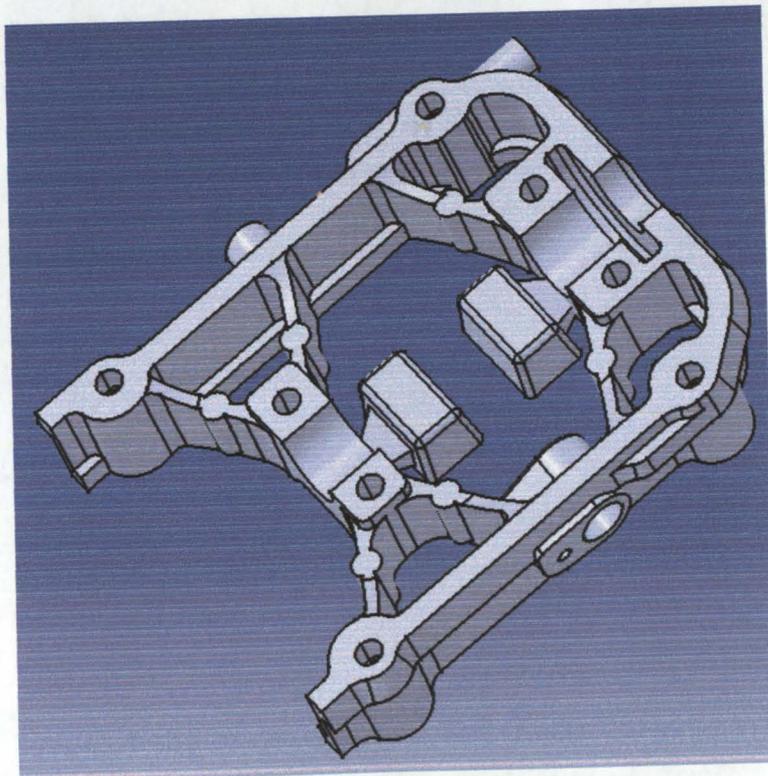


Figura 5.9 – Geometria referente à alteração número 2.

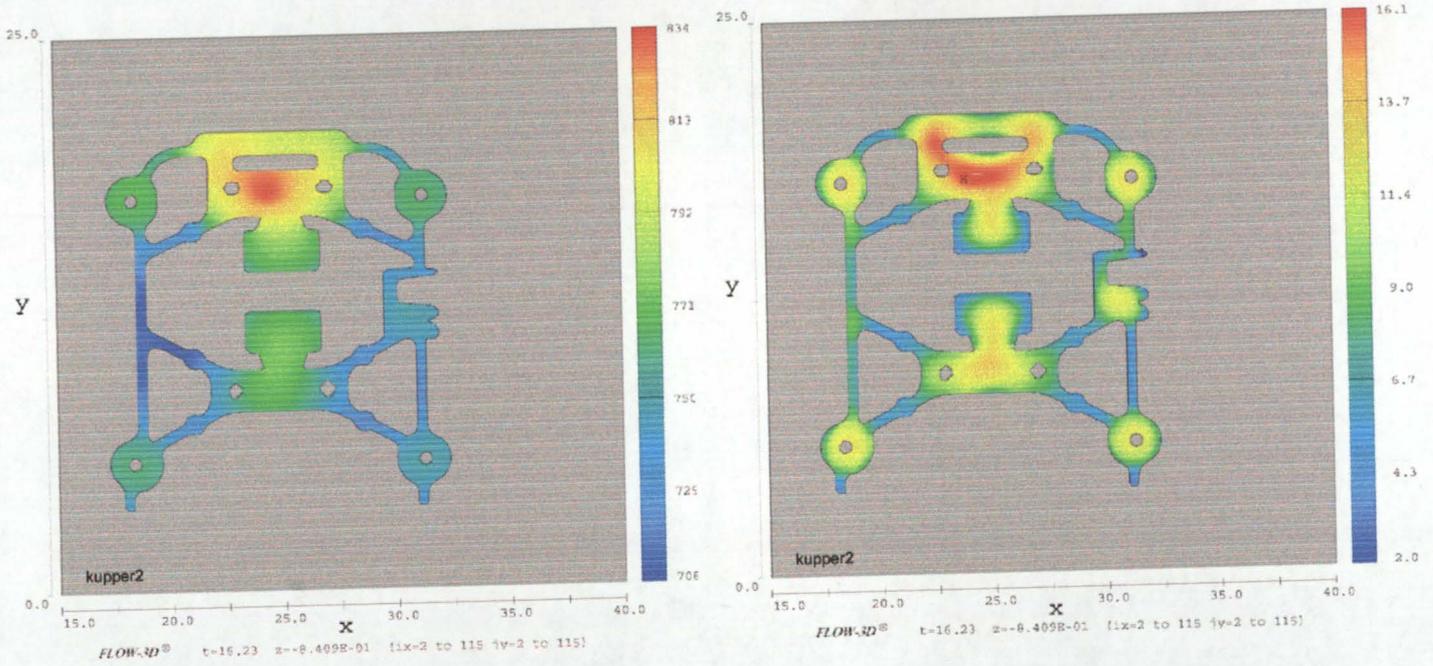


Figura 5.10 – Alteração número 2. a) Distribuição da temperatura no fim da solidificação. b) Tempo de solidificação.

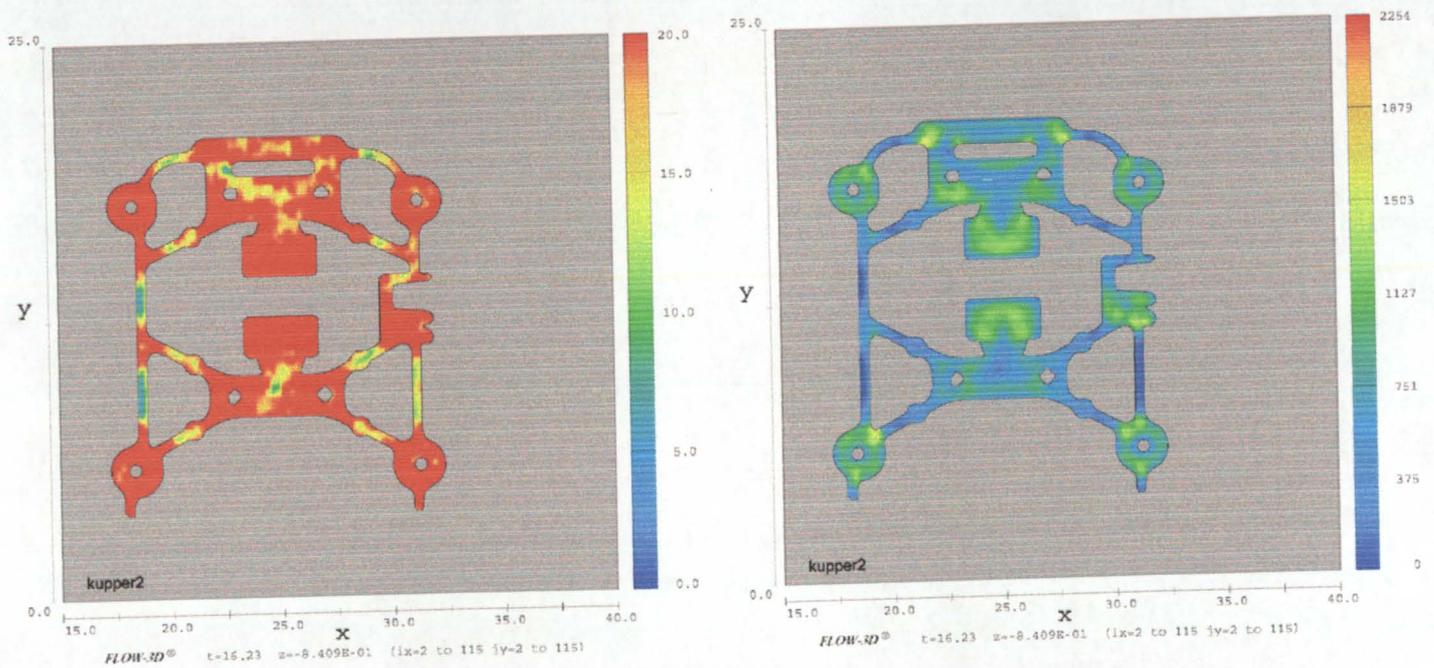


Figura 5.11 – Alteração número 2. Critério de microporosidade Niyama e LCC.

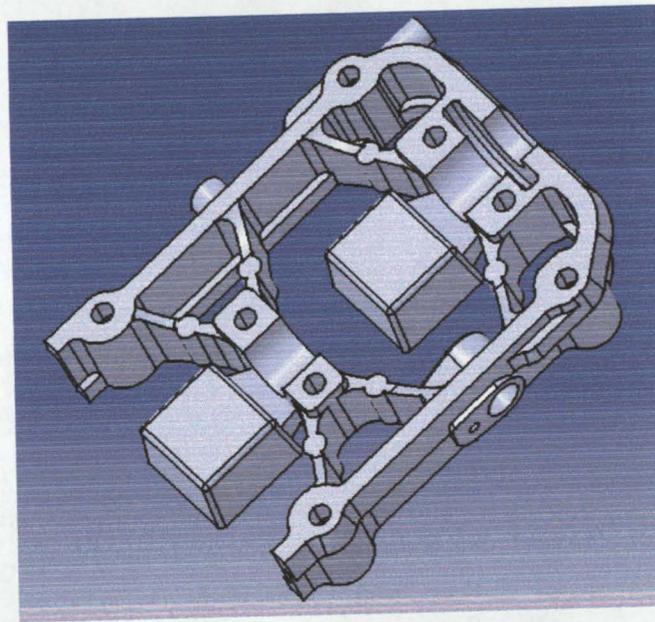


Figura 5.12 – Geometria referente à alteração número 8.

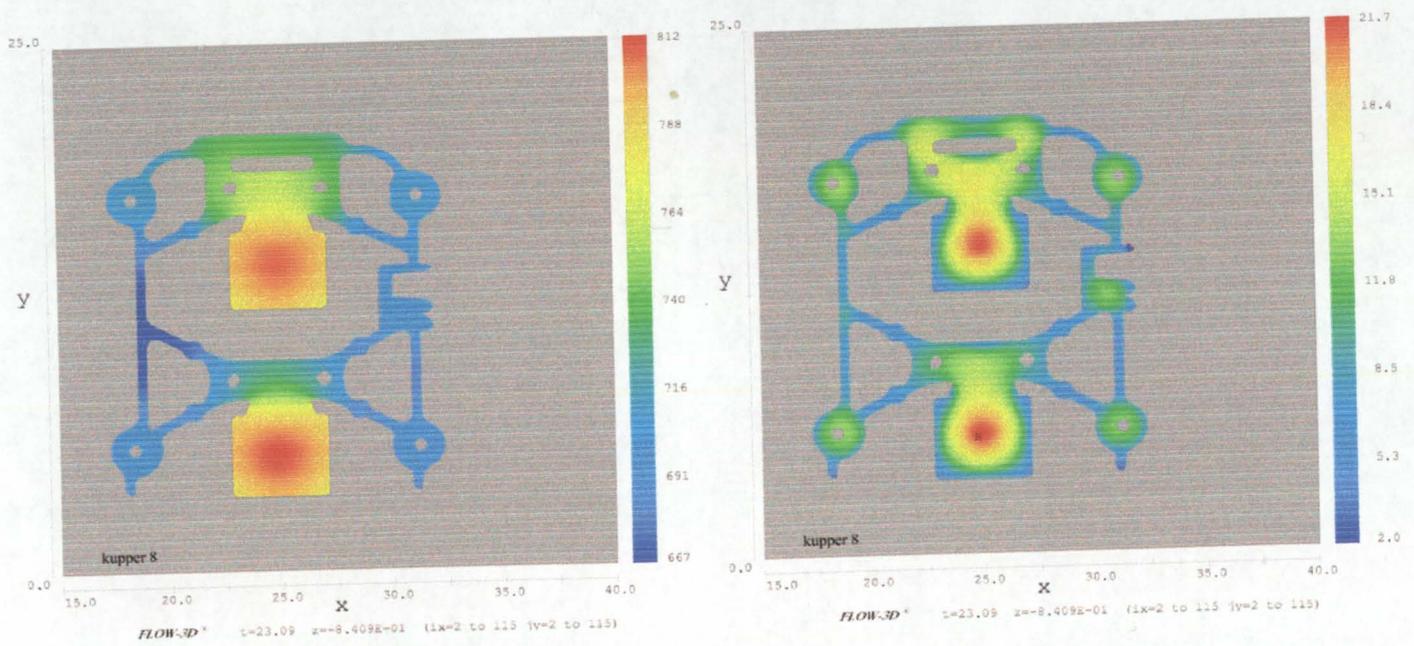


Figura 5.13 - Alteração número 8. a) Distribuição da temperatura no fim da solidificação. b) Tempo de solidificação.

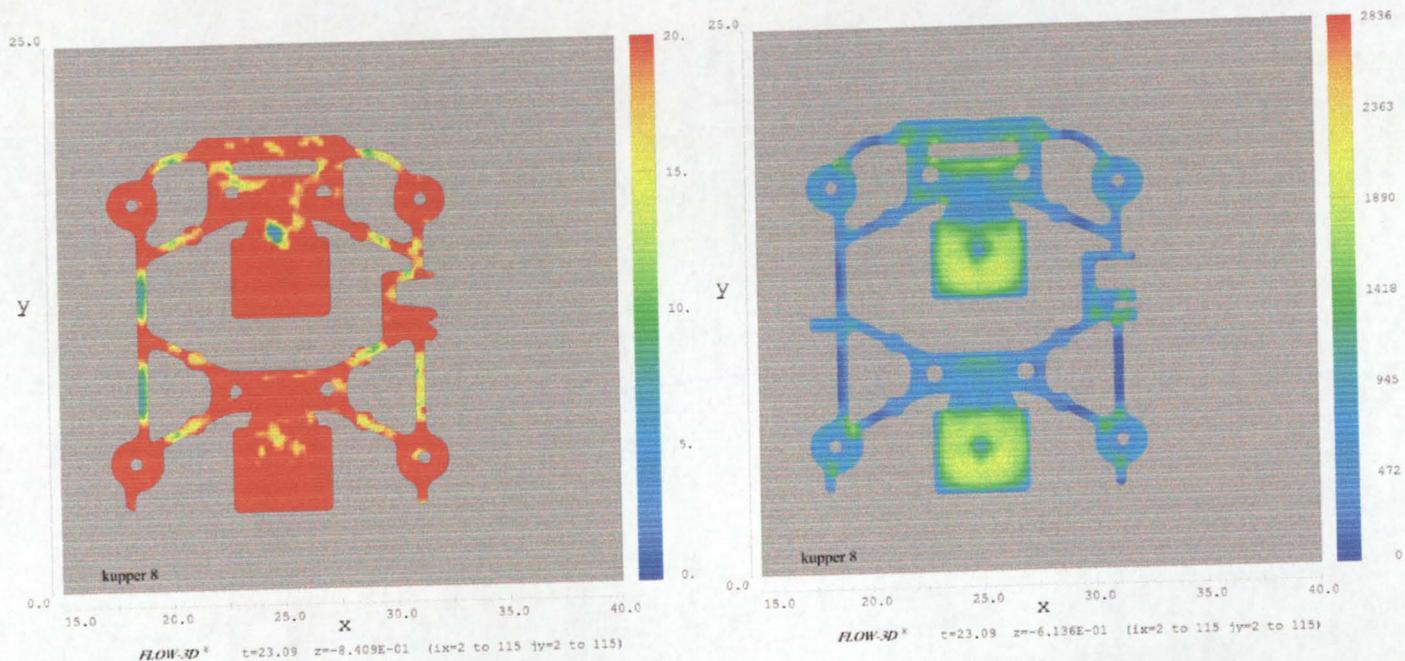


Figura 5.14 – Alteração número 8. Critério de microporosidade Niyama e LCC.

Deve ser referido que estas simulações foram efectuadas assumindo um enchimento instantâneo, com uma distribuição térmica uniforme inicial. Contudo, a temperatura inicial do banho (918 K) foi escolhida de acordo com a temperatura mínima registada na conclusão da simulação de enchimento apresentada na secção 5.1.1.

Através dos resultados referentes à variável temperatura e tempo de solidificação (figura 5.10 e 5.13), verifica-se que a última zona a solidificar (ponto quente) evolui para o interior dos “masselotes” criando desta forma o caminho de alimentação. Os resultados de microporosidade apresentados na figura 5.11 encontram-se próximos dos resultados obtidos após a simulação de solidificação inicial, contudo apresentam graus de microporosidade superiores devido à não existência de gradientes térmicos no início da simulação.

O sucesso da alteração proposta é confirmado pelos resultados de microporosidade apresentados na figura 5.14, indicando que as zonas propícias para a ocorrência destes encontram-se no interior dos “masselotes” e não nas meias luas.

5. 2 - FUSAG

5.2.1 - POLIA D400

Após um tempo de simulação de enchimento realizada em Flow-3D® , com a duração de 18 horas, apresentam-se seguidamente os resultados obtidos.

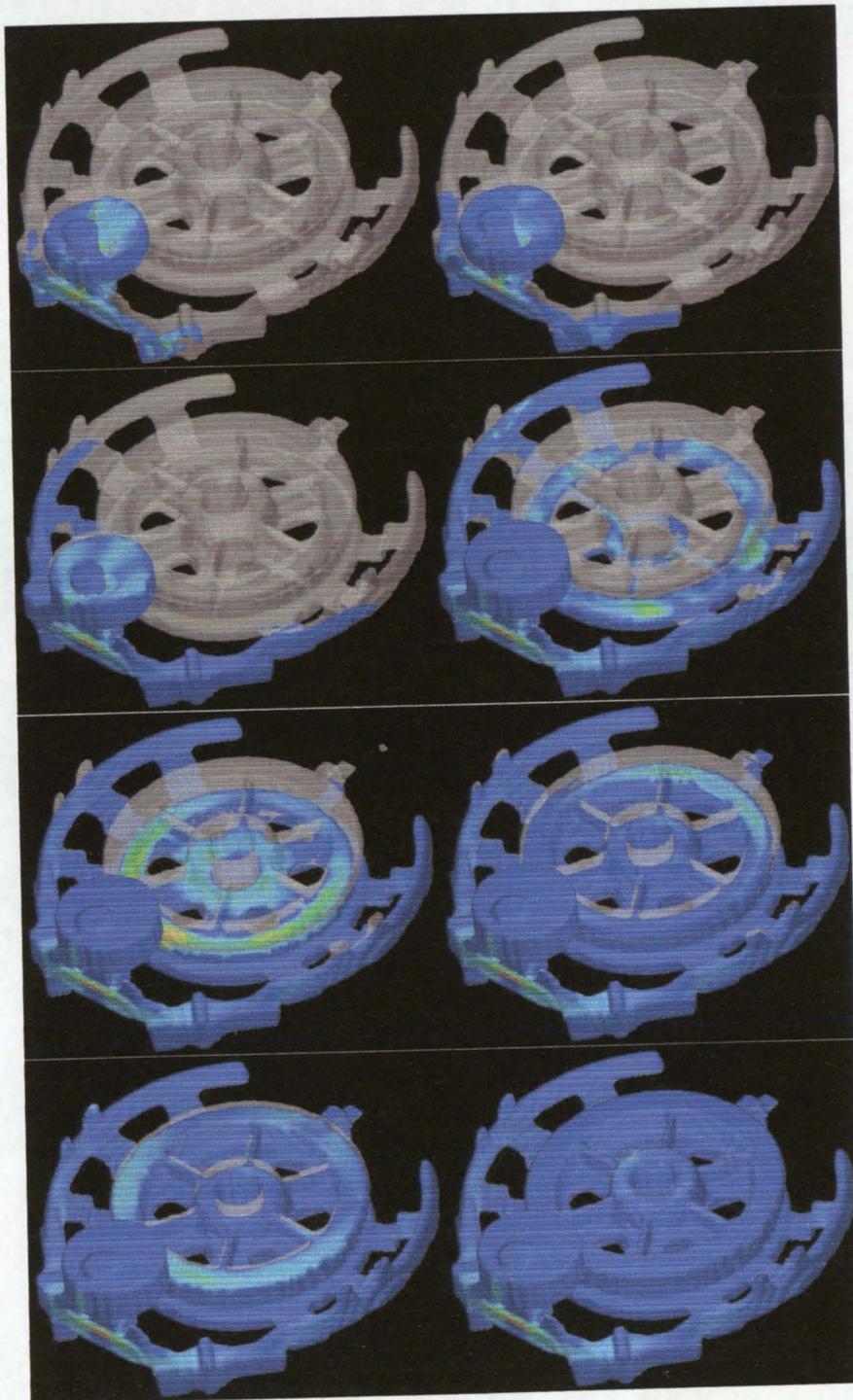


Figura 5.15 – Sequência de enchimento colorida pela variável turbulência, tempos de 0.7, 1, 2, 4, 6, 8, 9 e 10 segundos respectivamente.

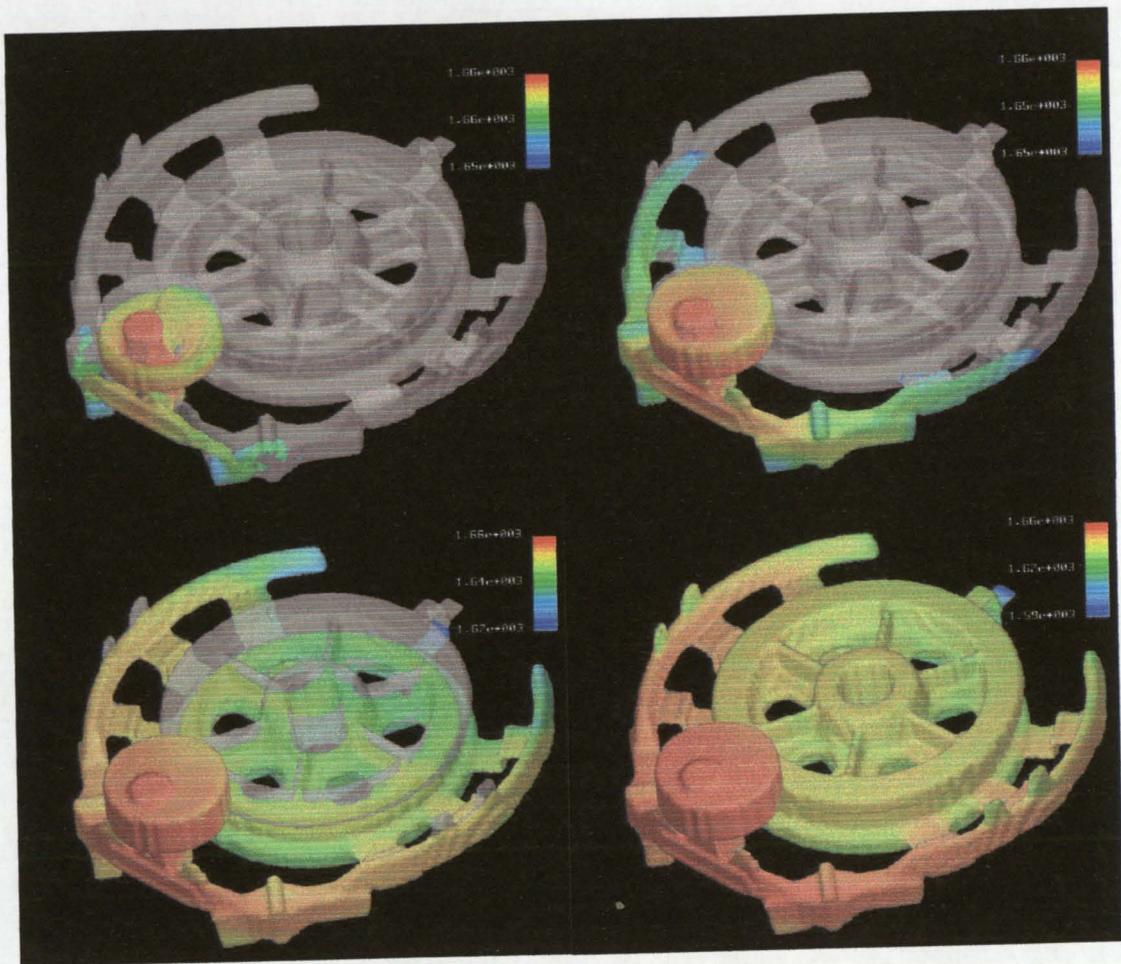
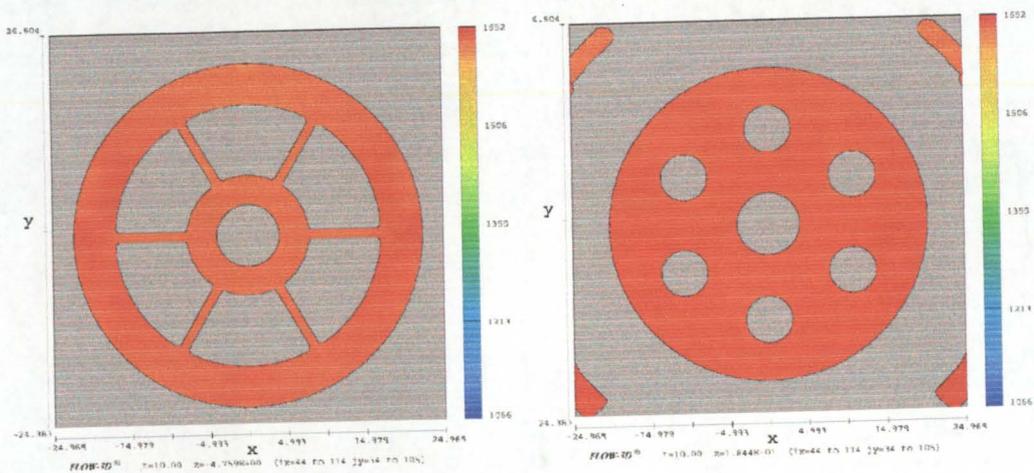


Figura 5.16 – Enchimento colorido pela variável temperatura para os tempos de enchimento de 0.7, 2, 6 e 10 segundos respectivamente



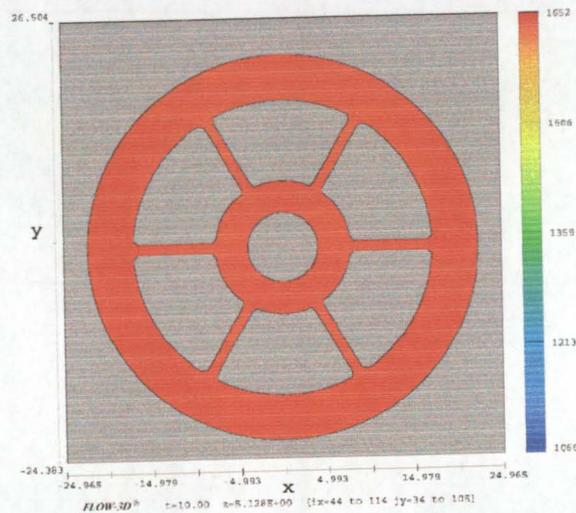


Figura 5.17 – Distribuição de temperatura no fim do enchimento. Cortes efectuados a -4 cm do plano de apartação, pelo plano de apartação e 5 cm acima do plano de apartação.

De acordo com os resultados apresentados que apontam para um tempo de enchimento de 10 segundos, constata-se que o enchimento da cavidade de moldação é um processo turbulento, contribuindo assim para a erosão da cavidade de moldação. Contudo, como não foram incluídos os filtros na simulação (devido à escassez de informação sobre os seus parâmetros físicos), é provável que este enchimento seja menos turbulento (figura 5.15). Verifica-se também que o gradiente térmico existente no seio da peça no final do enchimento é pouco acentuado, sendo que, a temperatura do banho no interior da peça cifra-se nos 1652 K. A inexistência de elevados gradientes térmicos (figura 5.17) concorreu para que as simulações de solidificação sem enchimento realizadas em AFSolid2000® fossem consideradas válidas.

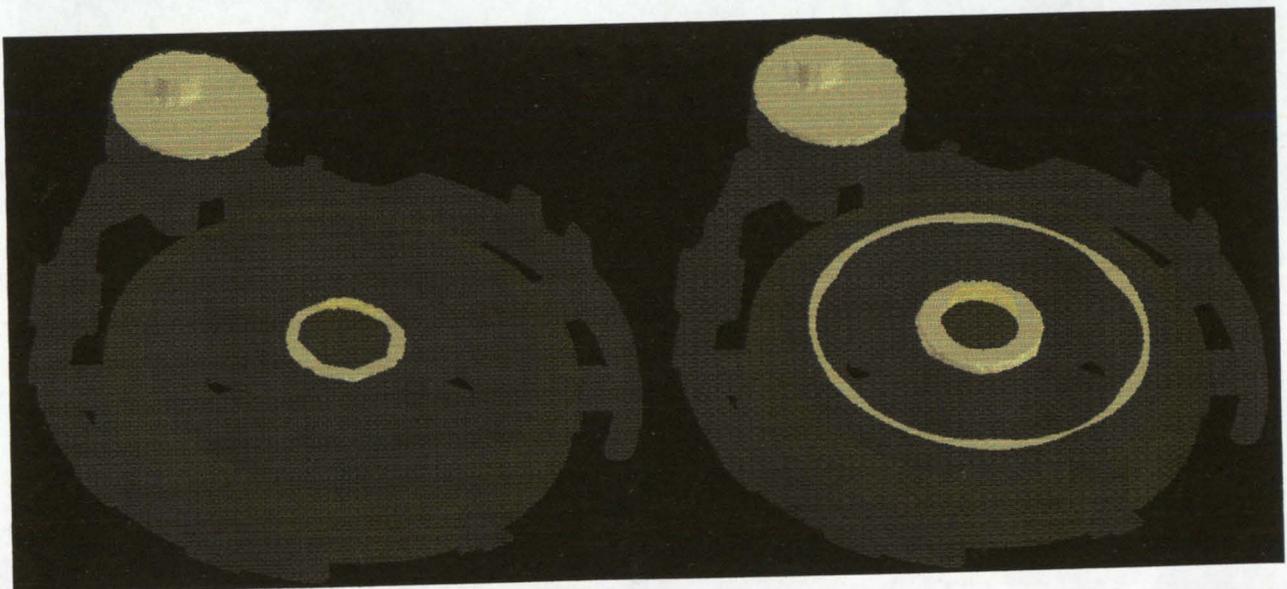


Figura 5.18 – Densidade do fundido. Vazamento a 1650 K. A figura da direita apresenta os resultados relativos a densidade igual a 0, a figura da esquerda apresenta os resultados relativos a densidade igual a 0.3. Simulação realizada em AFSolid 2000® sem o uso de alimentadores.



Figura 5.19 – Densidade do fundido. Vazamento a 1650 K. Resultados referentes a densidade igual a 0.3. Simulação realizada em AFSolid 2000® com o uso de camisas isotérmicas.

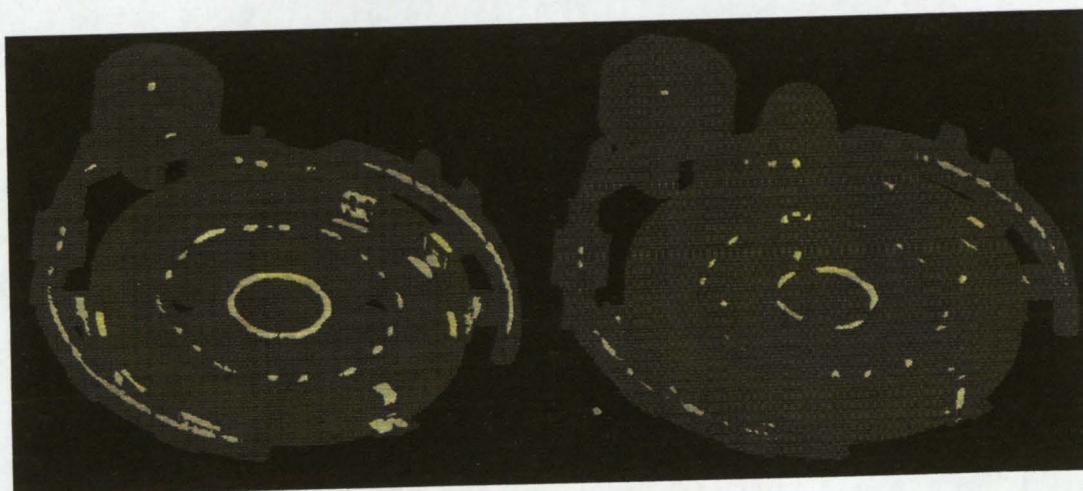


Figura 5.20 – Critério de Niyama. Resultados para o critério de 0,2. A figura da esquerda apresenta os resultados referentes à simulação executada em AFSolid 2000® sem alimentação, enquanto que a figura da direita apresenta os resultados relativos à simulação executada em AFSolid 2000® com camisas isotérmicas.

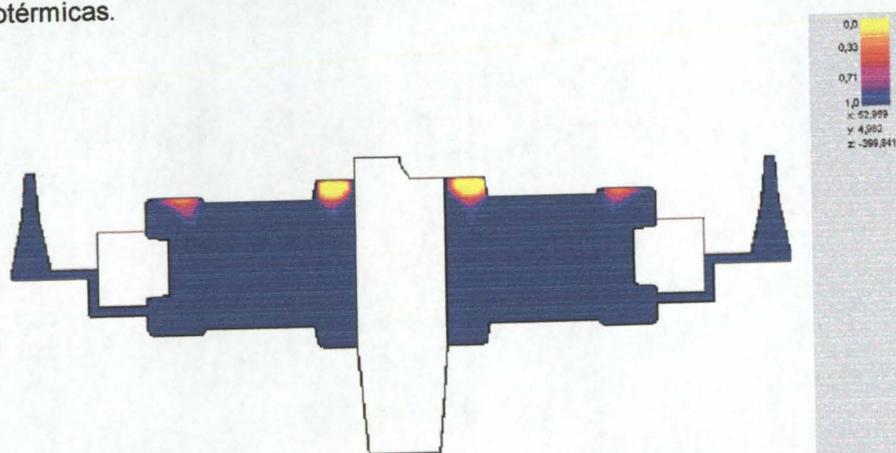


Figura 5.21 – Densidade do fundido. Corte em XZ na zona central do cacho. Simulação efectuada em AFSolid 2000® sem o uso de alimentação.

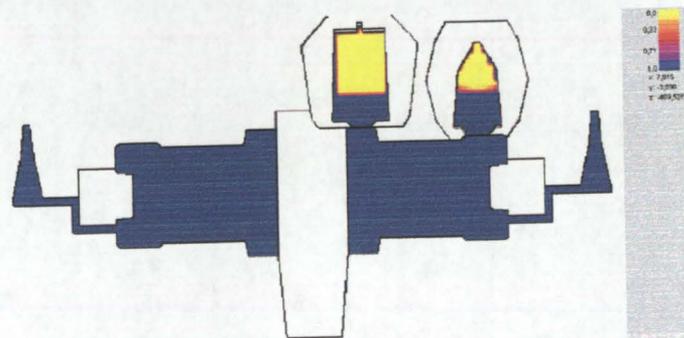


Figura 5.22 – Densidade do fundido. Corte em XZ na zona central do cacho. Simulação efectuada em AFSolid 2000® com o uso de camisas isotérmicas.

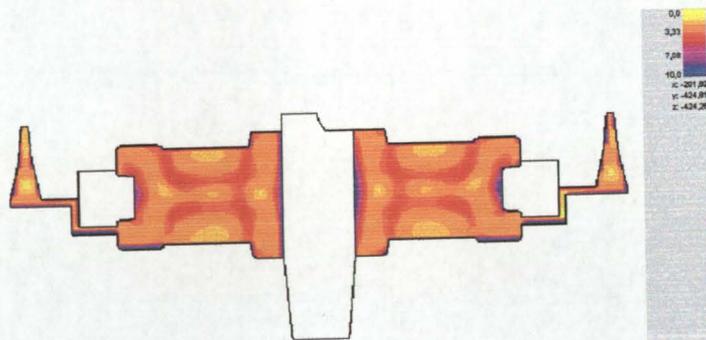


Figura 5.23 – Distribuição de pontos quentes. Simulação efectuada em AFSolid 2000® sem o uso de alimentação.

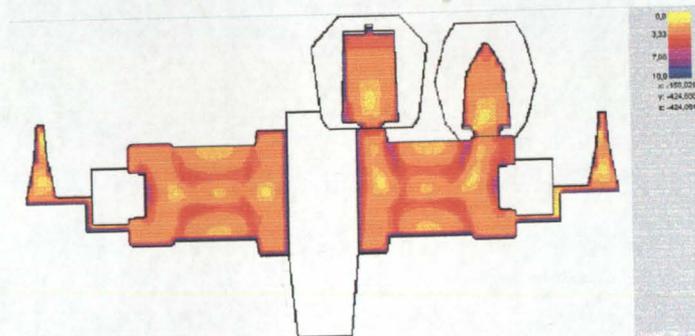


Figura 5.24 – Distribuição de pontos quentes. Simulação efectuada em AFSolid 2000® com o uso de camisas isotérmicas.

Com os resultados apresentados nas figuras 5.18 e 5.21, verifica-se que sem o uso de um sistema de alimentação ocorre rechupe na zona superior da peça. Esta situação foi resolvida pela Fusag, através do uso de camisas isotérmicas, como se verifica nas figuras 5.19 e 5.22. Contudo a figura 5.20 demonstra que a modificação levada a cabo pela Fusag não reduziu por completo a ocorrência de microrrechupes

na zona central da peça. Esta ocorrência deve-se à existência de pontos quentes junto ao plano de apartação.

No entanto, os níveis de microrrechupe obtidos na simulação são largamente superiores aos obtidos na realidade. Tal discrepância ocorre devido à composição da liga usada pela Fusag (GGG 70 modificada), que apresenta um teor em carbono equivalente superior ao normal. Contudo, devido à falta de informação relativa às características termofísicas da liga usada pela Fusag, não foi possível obter uma simulação completamente fidedigna.

5.2.2 – Polia D400 – Alteração Proposta.

A ocorrência dos microrrechupes é decorrente do desenho da peça. Da teoria é sabido que placas de elevado módulo unidas a placas de pequeno módulo originam a formação de pontos quentes, levando a problemas na sanidade do fundido. Assim, permitindo que o cilindro central (elevado módulo) tenha um arrefecimento mais lento, consegue-se que os pontos quentes sejam atenuados ou mesmo eliminados. Partindo do pressuposto teórico, decidiu-se enveredar por um sistema de alimentação um tanto ou quanto radical. Para tal, considerou-se que os machos seriam revestidos por uma tinta refractária (à base de zirconia), criando-se assim uma zona de arrefecimento mais lento. Também, para suprimir o rechupe apresentado na simulação sem sistema de alimentação (figura 5.18), foi adicionado um alimentador na zona superior do cacho, como se pode verificar na figura 5.25.

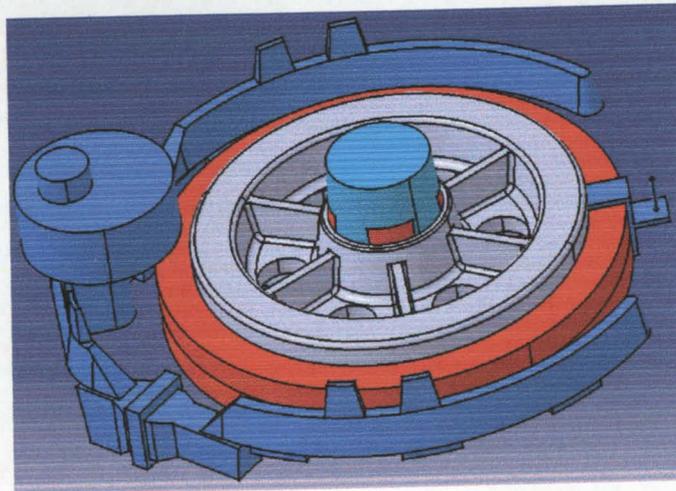


Figura 5.25 – Geometria da alteração proposta. A azul claro encontra-se o alimentador sugerido.

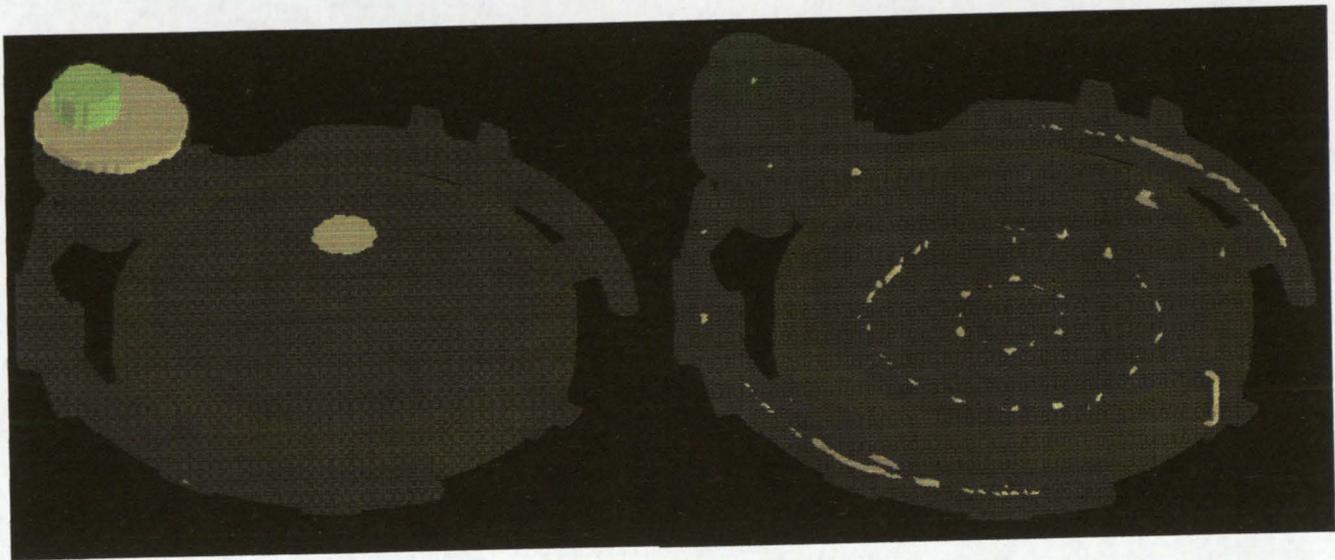


Figura 5.26 – Temperatura de vazamento de 1650 K. Imagem da esquerda apresenta a densidade do fundido com um valor igual a 0.3. A imagem da direita apresenta o critério de Niyama para um valor de 0.2. Simulação realizada em AFSolid 2000® .

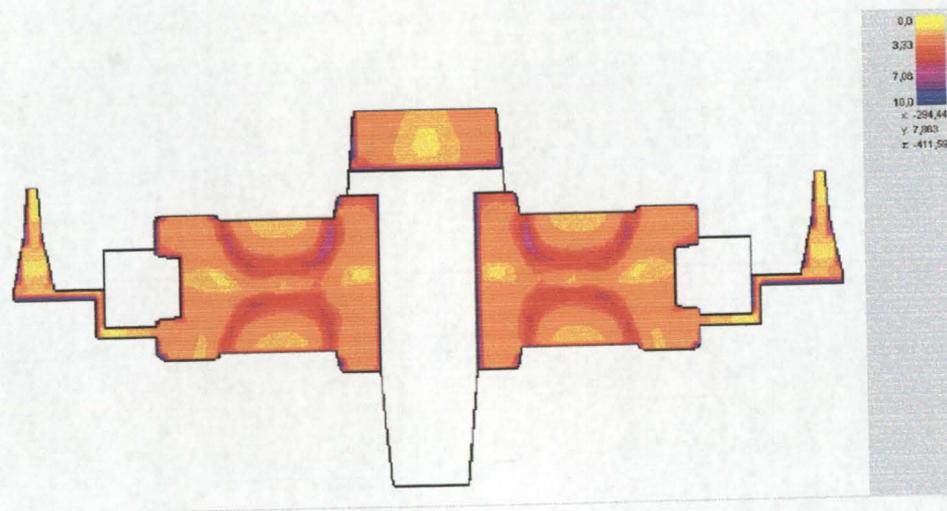


Figura 5.27 – Distribuição de pontos quentes. Corte XZ efectuada na zona central do cacho. Simulação realizada em AFSolid 2000® .

Assumindo que os resultados apresentados na secção 5.2.1 se encontram correctos, verifica-se através da figura 5.26 a diminuição do rechupe, encontrando-se este na zona do alimentador. Para além disso, de acordo com os resultados apresentados na figura 5.26, a ocorrência de microrrechupe é sem dúvida muito inferior à apresentadas nas simulações da secção 5.2.1, se bem que a localização dos pontos quentes não tenha sido alterada.

Aparentemente esta situação resolverá o excesso de uso de camisas isotérmicas, contudo até à data não foi possível por parte da Fusag realizar as alterações propostas.

6 – Conclusão

O uso do Flow-3D® em processos de fundição injectada revelou-se uma ferramenta eficaz, produzindo resultados em boa concordância com os resultados experimentais, quer a nível de enchimento quer a nível de solidificação. O procedimento de simulação não se revelou tarefa fácil. Dada a elevada velocidade do fluido inerente ao processo, certos pressupostos que advinham de simulações prévias para processos de fundição em areia, necessitaram de uma reformulação. Constatou-se que o valor usado nos parâmetros *ITMAX* e *EPSADJ*, têm uma influência preponderante no sucesso e rapidez da simulação. Uma incorrecta especificação destes levou ao insucesso de várias simulações no decurso do Estágio, sendo esta situação resolvida mediante o recurso ao suporte técnico. Até que ponto se pode alargar o critério de convergência obtendo-se uma solução fidedigna ainda não pode ser respondido. Através da análise dos dados fornecidos pelo suporte técnico da *Flow Science* verifica-se que estes valores são definidos em cada caso e desta forma, a aplicabilidade de um valor padrão torna-se inviável.

Como foi concluído no trabalho de seminário, a flexibilidade o Flow-3D® permite o seu uso em processo de fundição em areia. Devido a prazos de execução curtos para as simulações requeridas pela Fusag, só o enchimento foi estudado no Flow-3D®, já que as simulações de solidificação apresentaram um tempo de processamento muito superior às realizadas em AFSolid 2000®. Contudo, verificou-se alguma discrepância entre resultados. Apesar das simulações publicadas neste trabalho indicarem para a existência de porosidade, esta não foi detectada pelo Flow-3D®. Os níveis de microporosidade apresentados pelo Flow-3D® verificaram-se superiores aos apresentados em AFSolid 2000®, não correspondendo nenhum dos casos aos níveis obtidos na prática. Esta situação leva ao surgimento de dúvidas sobre o algoritmo de solução de ambos os programas. Uma consulta mais atenta aos parâmetros do processo requeridos pelo AFSolid 2000®, levam a crer que são parcos, contribuindo assim para uma solução de qualidade inferior já que certos fenómenos não são simulados.

Ficou claro que o uso de *softwares* de simulação resulta numa mais valia para processos de desenvolvimento de produto. Através do seu uso torna-se possível testar um largo espectro de alternativas ao processamento, permitindo-se uma elevada redução nos custos de desenvolvimento. Através da realização do Estágio foi possível constatar a dispersão de parâmetros relativos ao sucesso de cada simulação. Só a sistematização e a experiência do operador é que permitem validar com eficácia a resolução de novas situações.

Sem dúvida alguma que para processos de fundição injectada, o Flow-3D® é uma ferramenta indispensável apesar de apresentar um custo de certo modo proibitivo para algumas empresas.

Contudo, em processo de fundição em areia para peças que apresentem uma geometria simples, onde os fluxos do fluido e sua distribuição térmica final não têm uma influência preponderante no modo de solidificação, o AFSolid 2000®, incapaz de simular enchimentos, apresenta-se como uma alternativa eficiente ao processo de simulação de solidificação, respondendo de modo mais celere à necessidade urgente de se obter resultados.

7 - Bibliografia

AFS Solid 2000 WorkBook

Analysis of casting defects, American Foundrymen's Society, U.S.A., 1994

Auburn Solidification Design Center, Auburn University

Barkhudarov, M.R., *Advanced Simulation of the Flow and Heat Transfer Processes in Simultaneous Engineering*

Barkhudarov, M.R., *Multi-Block Gridding Technique for Flow-3D*, Flow Science Technical Note, FSI-02-TN59, January 2002

Barkhudarov, M.R., Hirt, C. W., *Tracking Defects*, 1st International Aluminum Casting Technology Symposium, Rosemont, IL, 1998

Barkhudarov, M.R., Williams, K., *Simulation of "Surface Turbulence" Fluid Phenomena During Mold Filling*, AFS 99th Casting Congress, Kansas City, MO, April, 1995

Casting ASM Handbook:15, ASM international, 1998

Flemings, M.C., *Solidification Processing*, McGraw-Hill, 1974

Flow-3D[®], Excellence in Flow Modeling Software; User's Manual.

Hirt, C.W., Barkhudarov, M.R., *Modeling the Lost Foam Process with Defect Prediction*, Flow Science Technical Note, FSI-97-TN45, 1997

Hirt, C.W., Ditter, J.L., *Injection Moulding of Polymer Materials*, Flow Science Technical Note, FSI-92-TN34, 1992

Hirt, C.W., *Sample Flow-3D Shot Sleeve Simulation*, Flow Science Technical Note, FSI-01-TN55, 2001

Hirt, C.W., *Simulation of a Thick-Part Injection Mold*, Flow Science Technical Note, FSI-92-TN37, 1992

International Commission 3.3: Computer Simulation of Casting Processes, World Foundrymen Organization

Manzari, M.T., Gethin, D.T., R.W. Lewis, *Optimization of Heat Transfer Between Casting and Mould*

Ribeiro, C. Silva, Pinto, Sandro, *Emprego de um programa de simulação de solidificação no aumento da eficiência de fabrico*, Revista APF nº220,2001

Shaw, C. T., *Using Computational Fluid Dynamics*, Prentice Hall, 1992

Souders, D.T, Hirt, C.W., *Modeling Roughness Effects in Open Channel Flows*, Flow Science Technical Note, FSI-02-TN60, May 2002

Tan, D., Croisonnier, G., J. Mak C. K., Kisielewicz, Dr. L. T., *Numerical Simulation of High Pressure Die Casting Process for an Iron Sole*

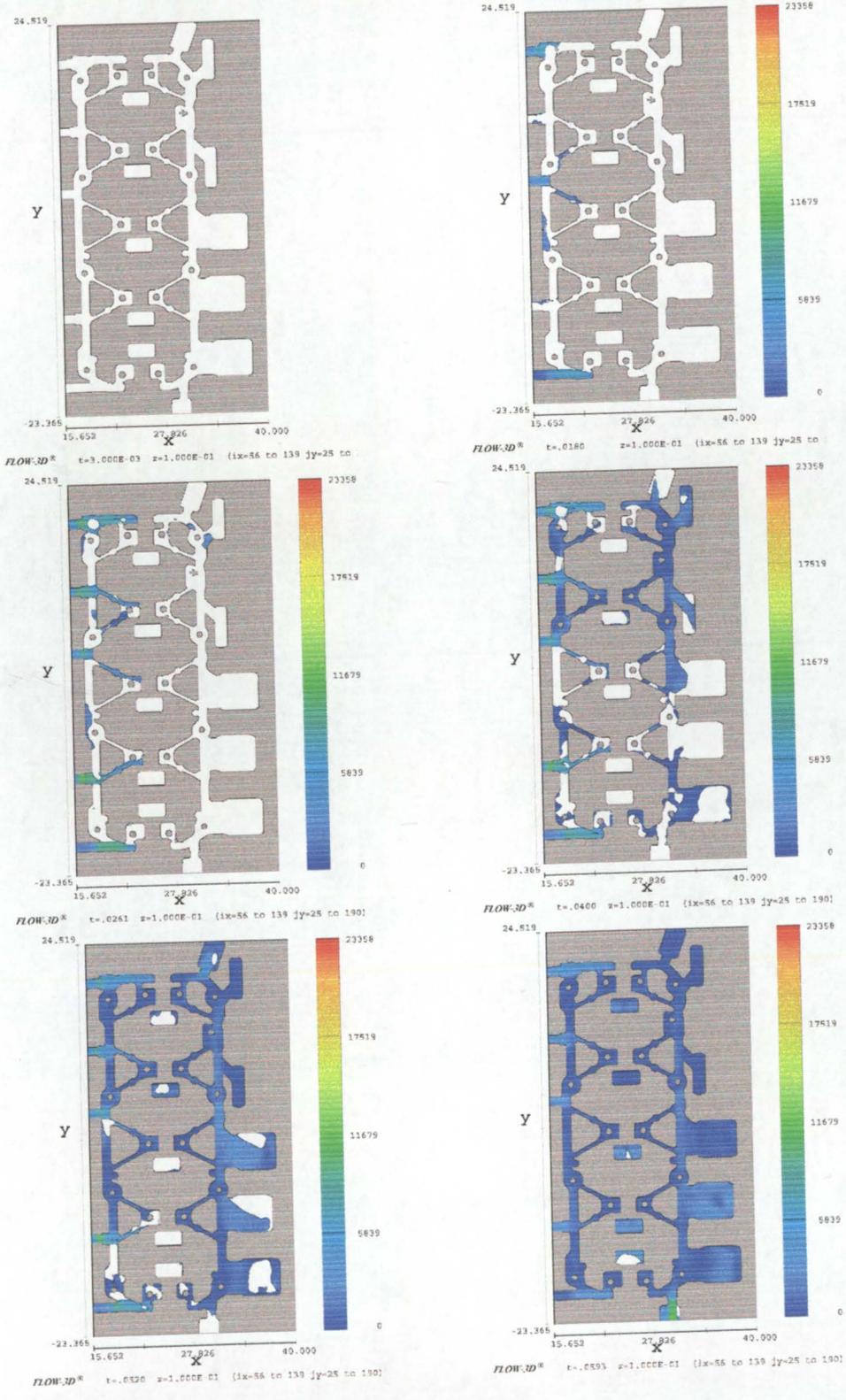
University of Michigan, *Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials*, R. D. Pehlke et. al, 1982

www.flow3d.com

ANEXOS



ANEXO A



Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

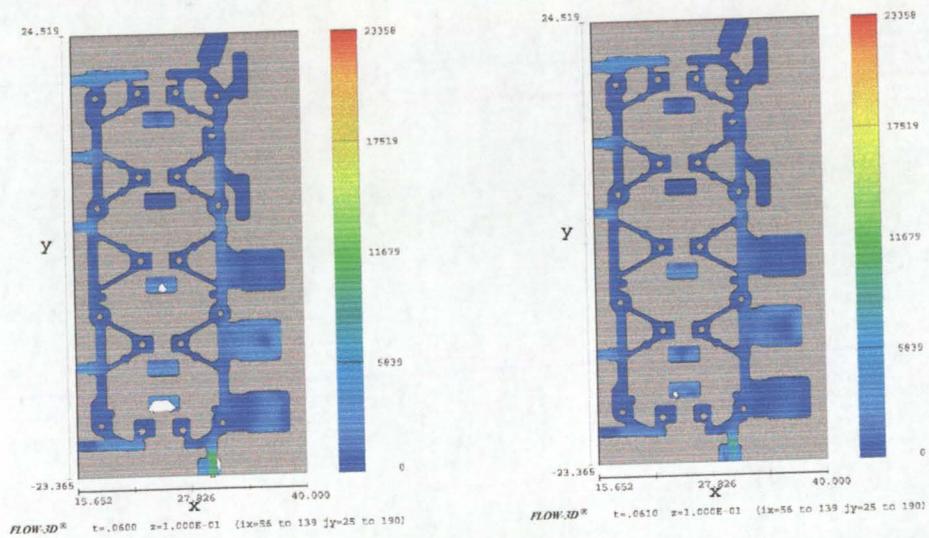


Figura A.1 – Sequência de enchimento colorida pela variável velocidade.

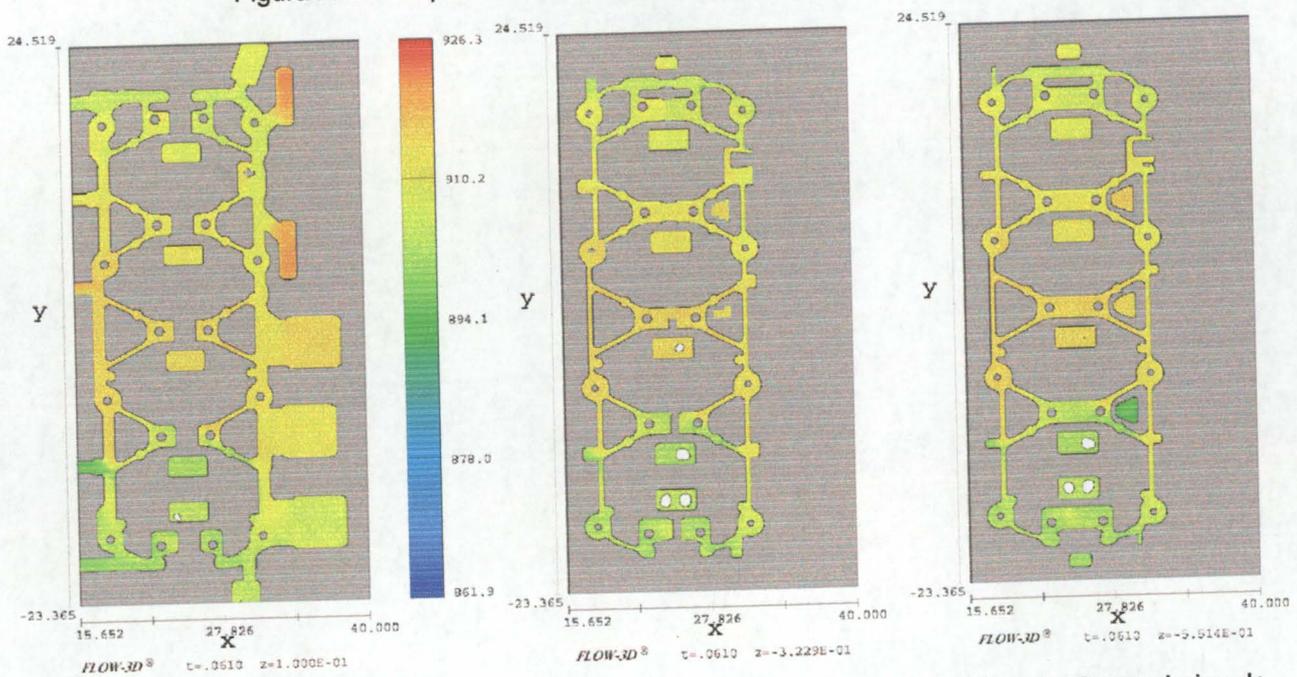


Figura A.2 – Gradiente térmico no fim do enchimento. Cortes efectuados a 1, 3 e 5.5 mm abaixo do plano de apartação.

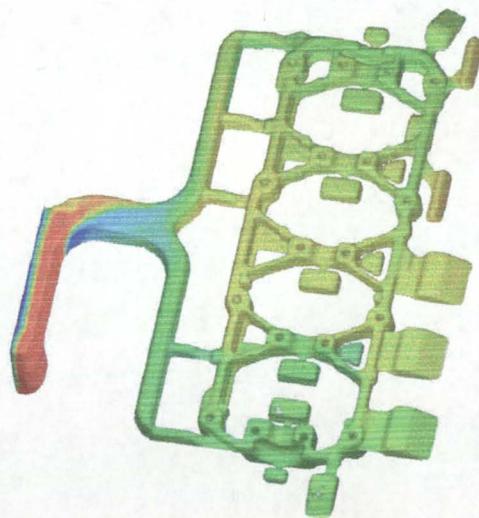


Figura A.3 – Distribuição de temperatura no fim do enchimento. Vista tridimensional do cacho.

Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

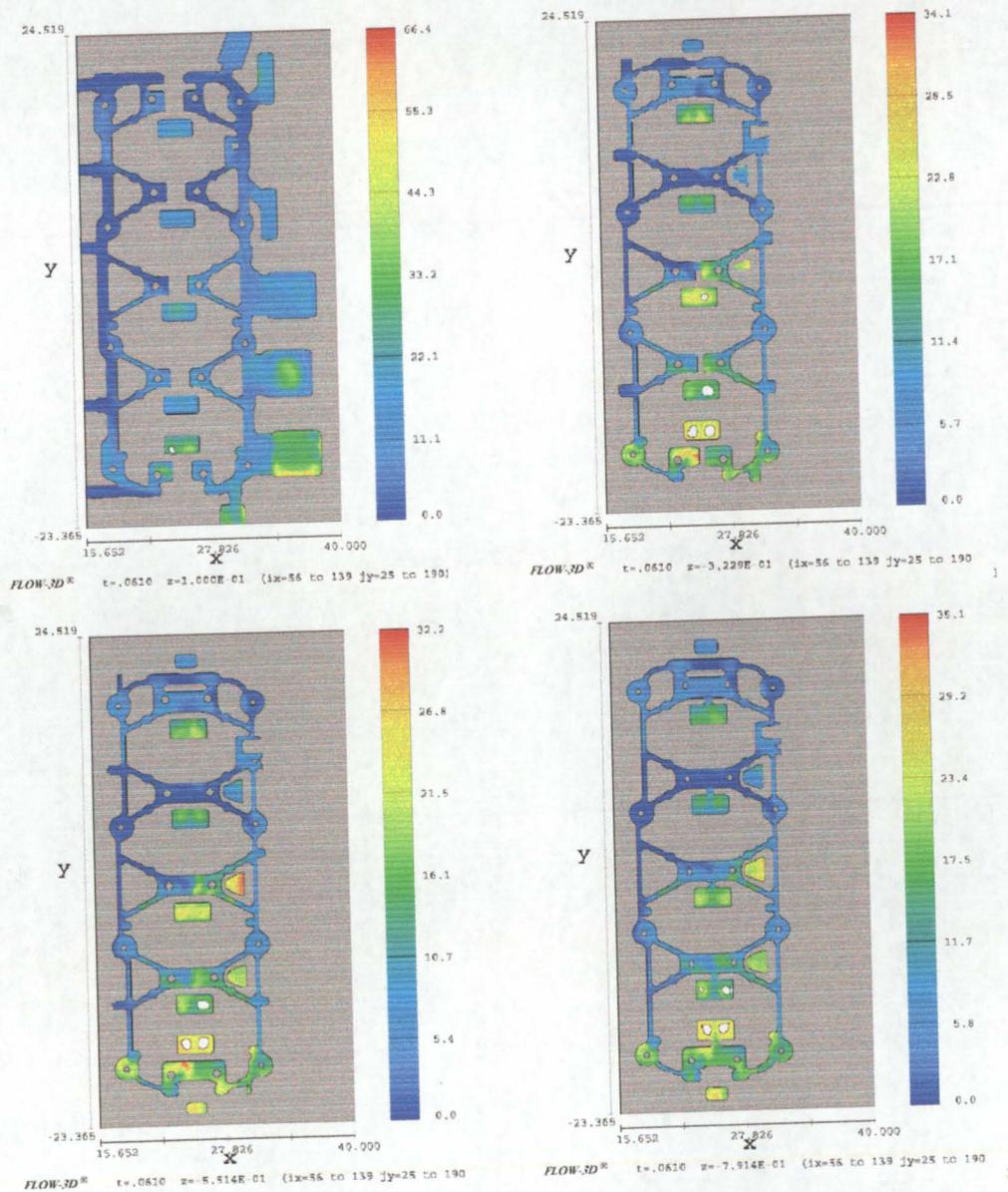


Figura A.4 – Concentração de defeitos no fim do enchimento. Cortes efectuados a 1, 3, 5.5 e 8 mm abaixo do plano de separação.

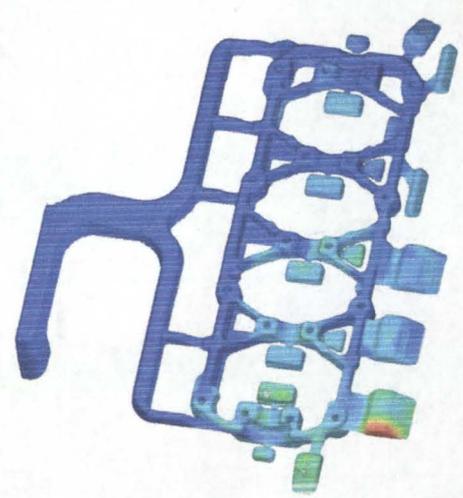


Figura A.5 – Concentração de defeitos no fim do enchimento. Vista tridimensional do cacho.
 Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

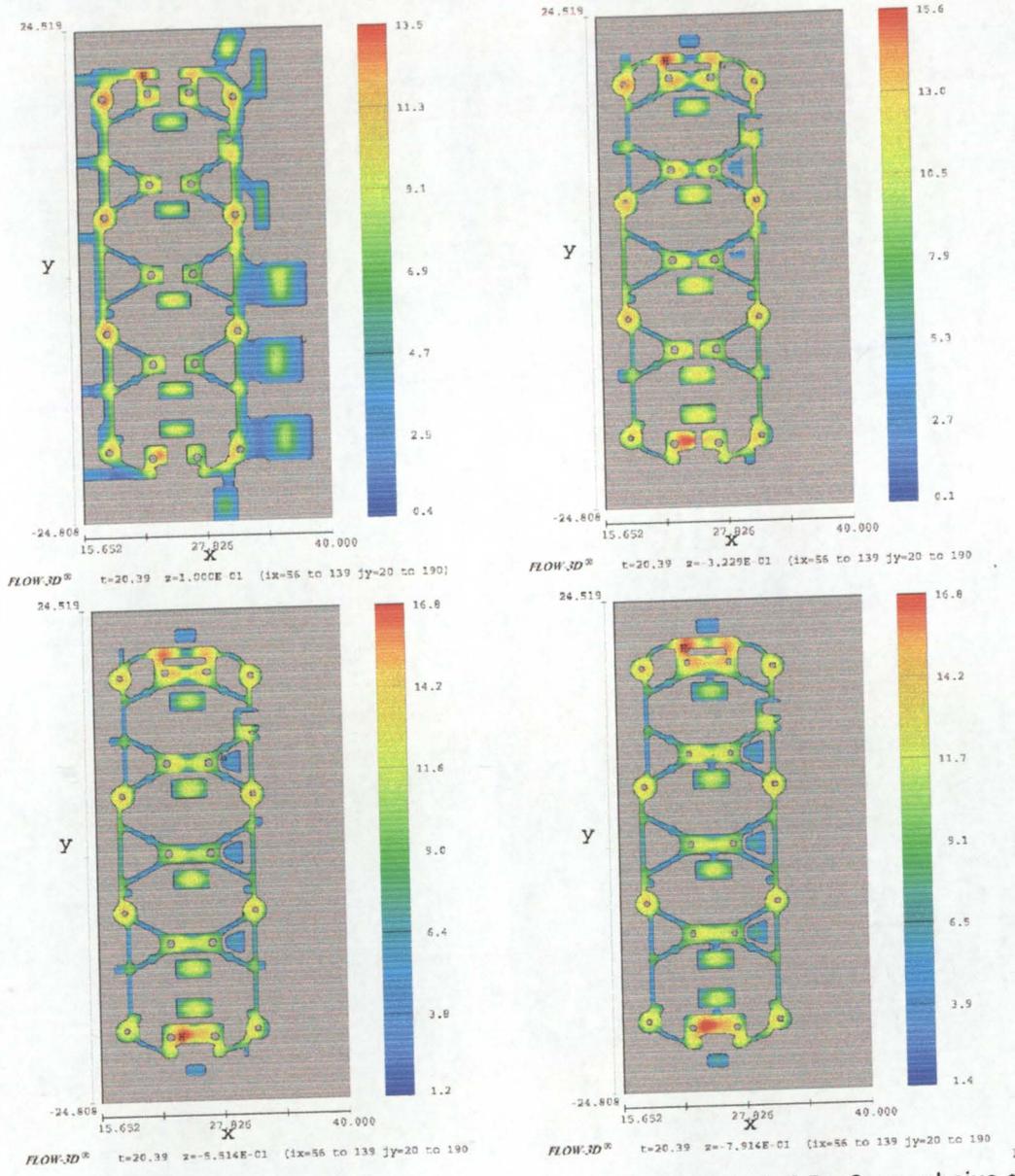
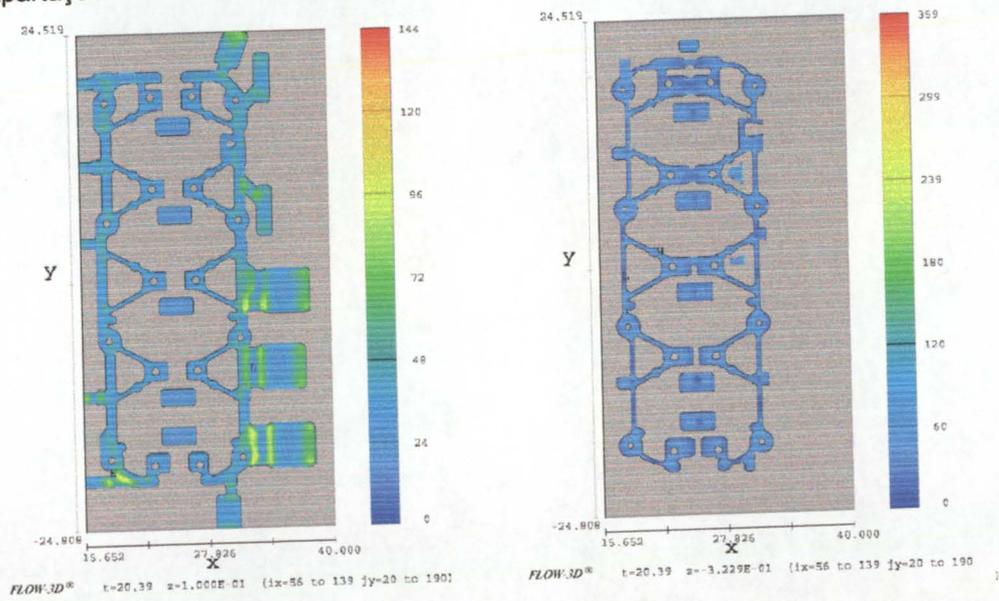


Figura A.6 - Tempos locais de solidificação. Cortes efectuados a 1, 3, 5.5 e 8 mm abaixo do plano de apartação.



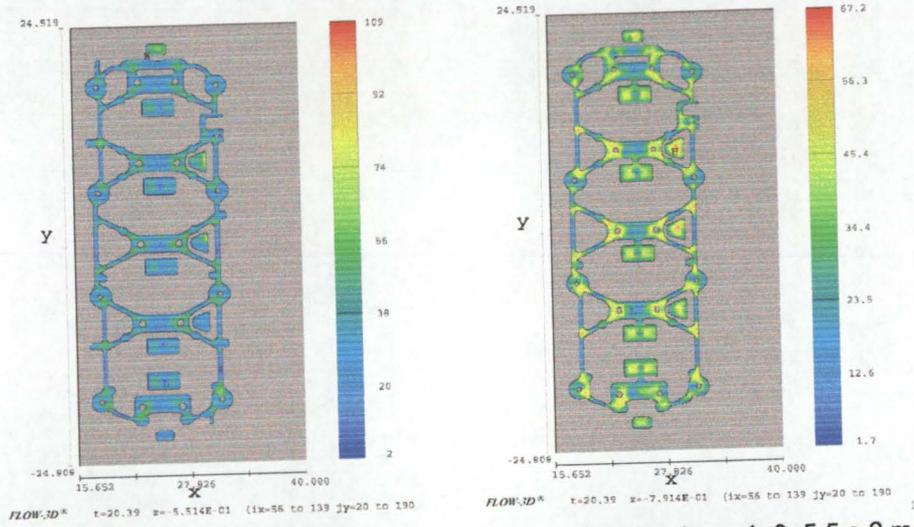


Figura A.7 – Gradientes térmicos na solidificação. Cortes efectuados a 1, 3, 5.5 e 8 mm abaixo do plano de apartação.

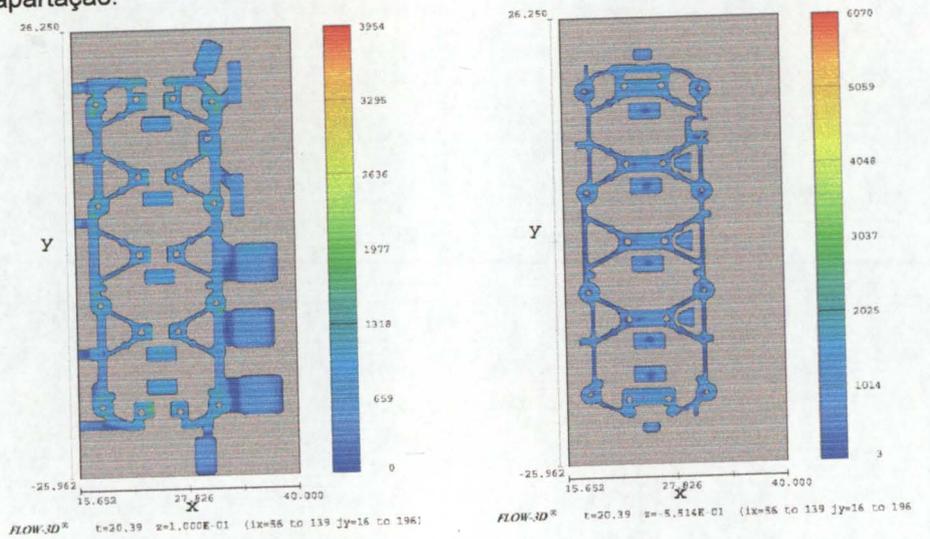


Figura A.8 - Critério de microporosidade LCC. Cortes efectuados a 1 e 5,5 mm abaixo do plano de apartação.

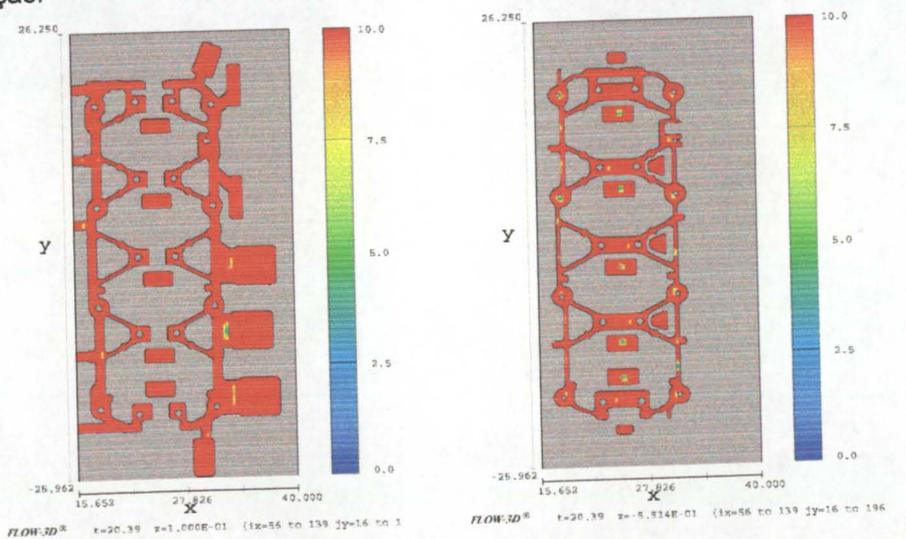


Figura A.9 – Critério de microporosidade Niyama. Cortes efectuados a 1 e 5,5 mm abaixo do plano de apartação.

Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

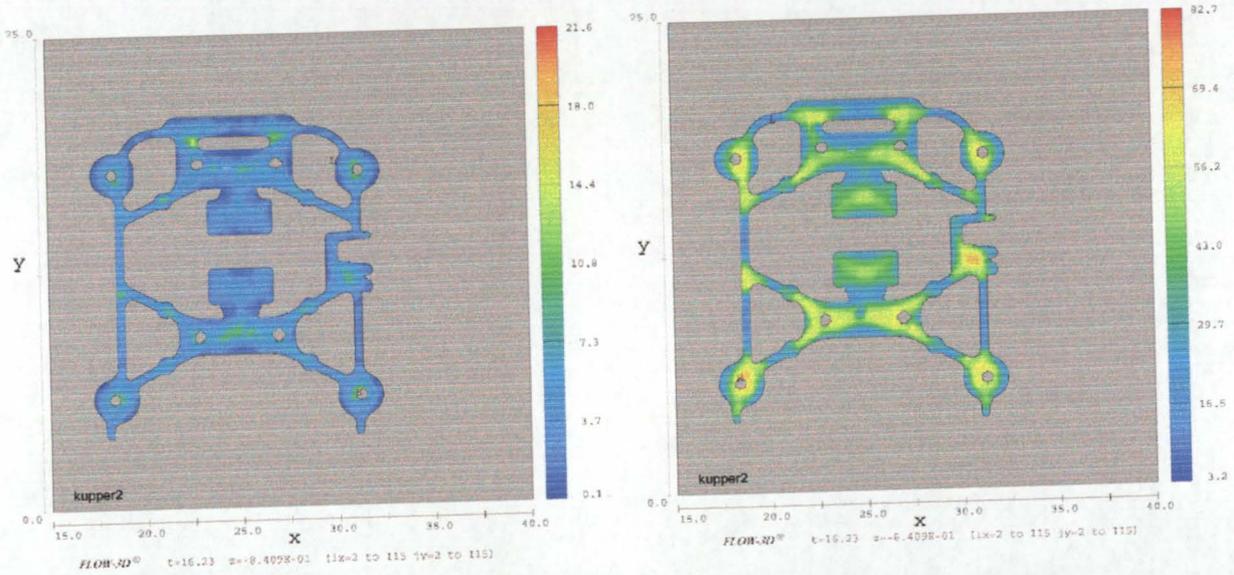


Figura A.10 – Alteração 2. A figura da esquerda corresponde à taxa de arrefecimento na solidificação, a figura à direita corresponde ao gradiente térmico na solidificação.

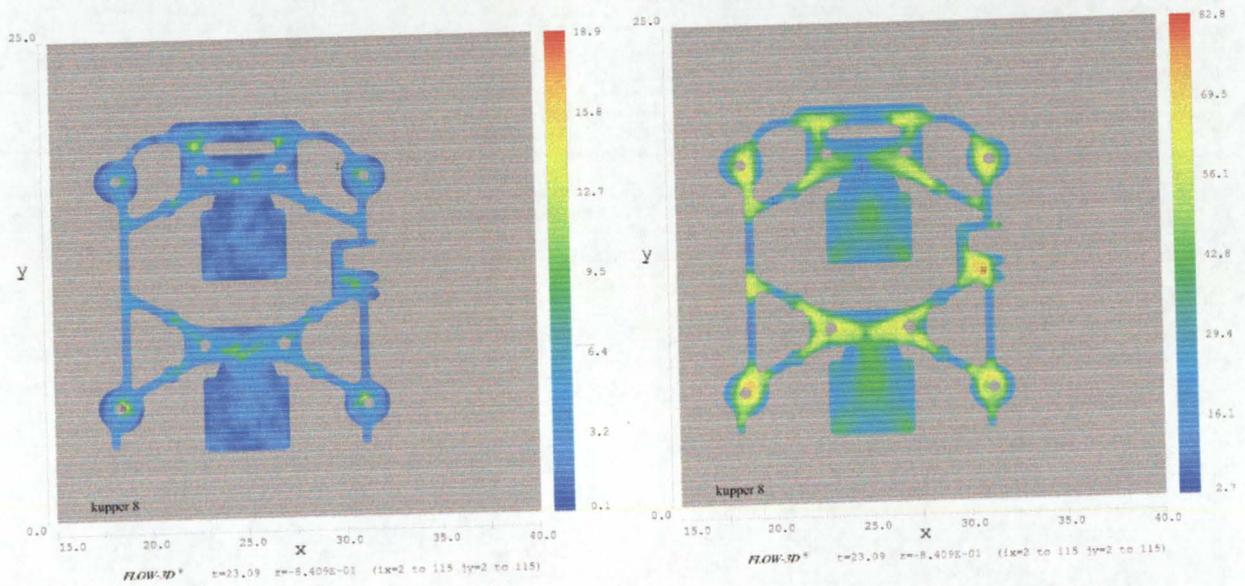


Figura A.11 - Alteração 8. A figura da esquerda corresponde à taxa de arrefecimento na solidificação, a figura à direita corresponde ao gradiente térmico na solidificação.

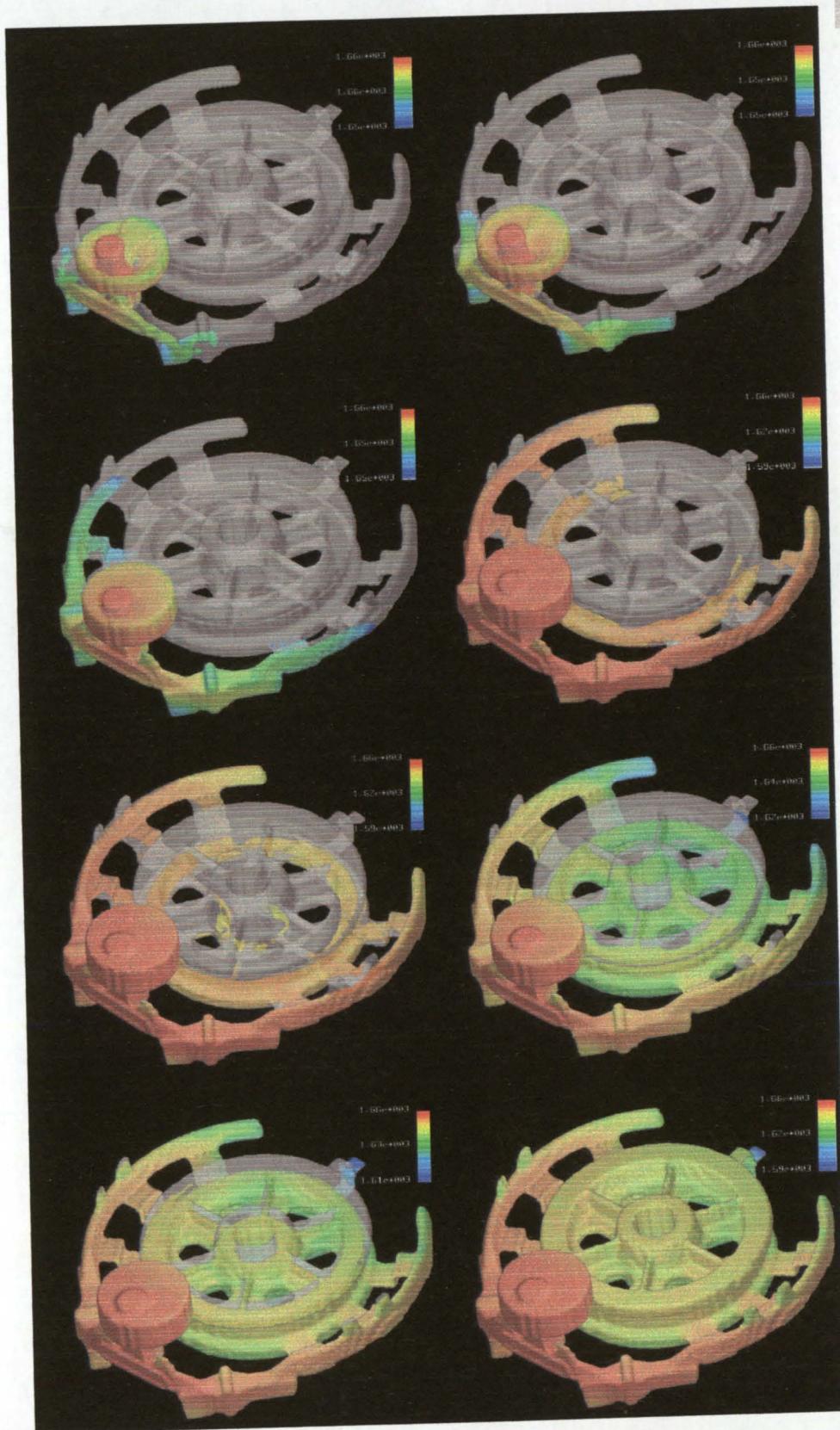


Figura B.1 - Sequência de enchimento colorida pela variável temperatura. Tempos de enchimento de 0.7, 1, 2, 3, 5, 6, 8 e 10 segundos respectivamente.

Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

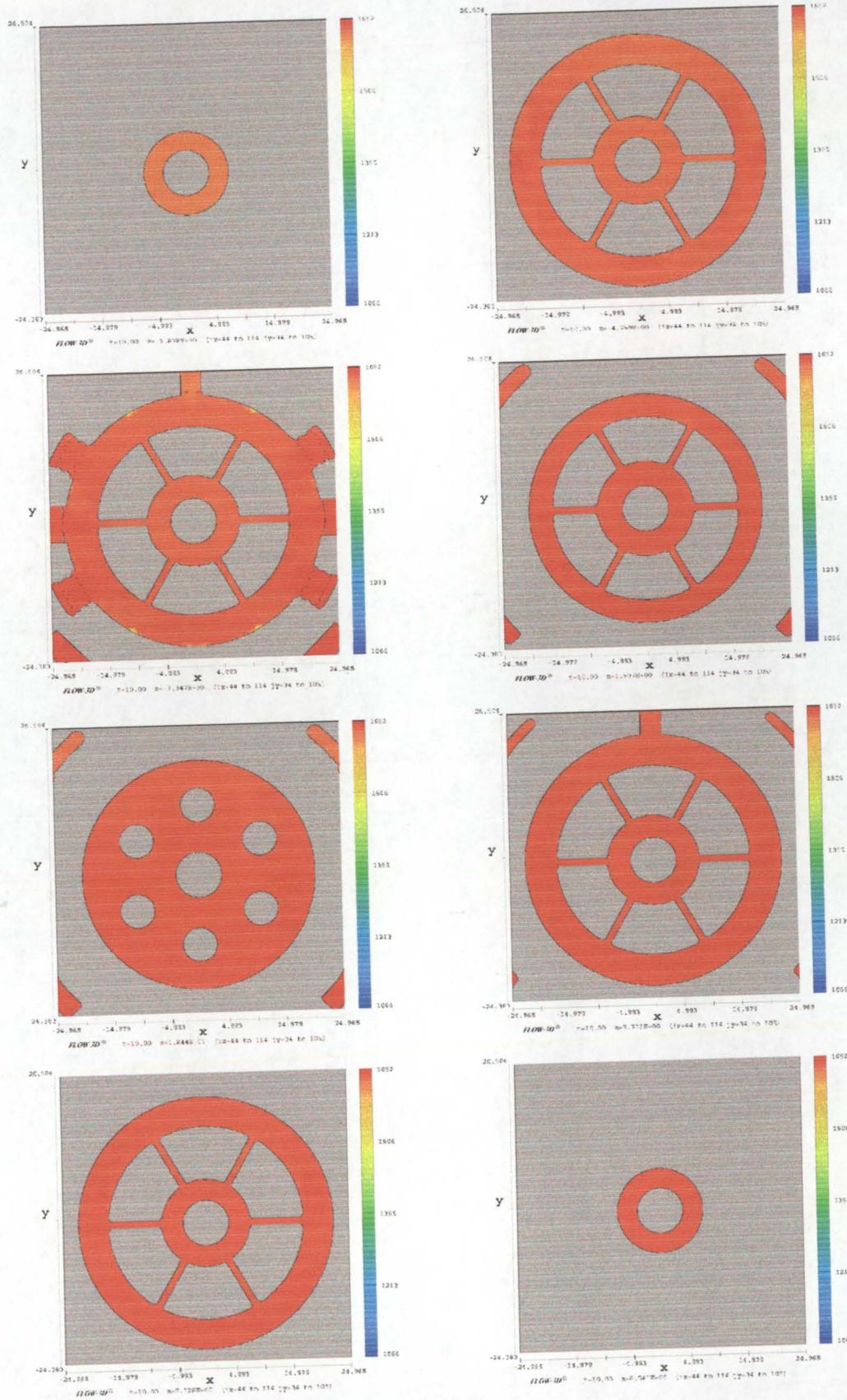


Figura B.2 – Distribuição da temperatura no fim do enchimento. Cortes efectuados no eixo Z a -6.8, -4.7, -3.3, 1.5, 1.8, 3.7, 5.1 e 6.5 cm respectivamente.

Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

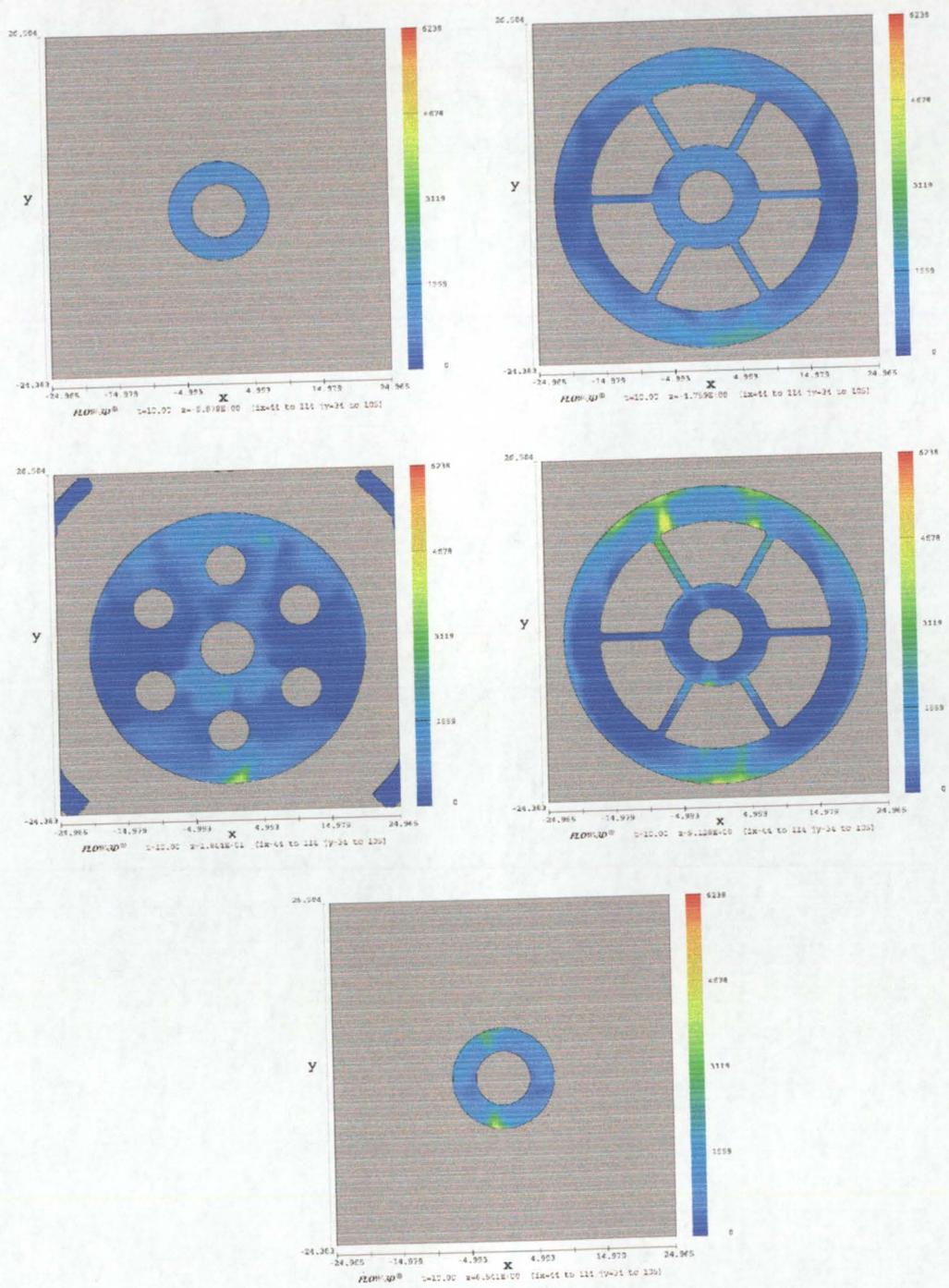


Figura B.3 – Concentração de defeitos no fim do enchimento. Cortes efectuados no eixo Z a -6.8, -4.7, 1.8, 5.1 e 6.5 cm respectivamente.

Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

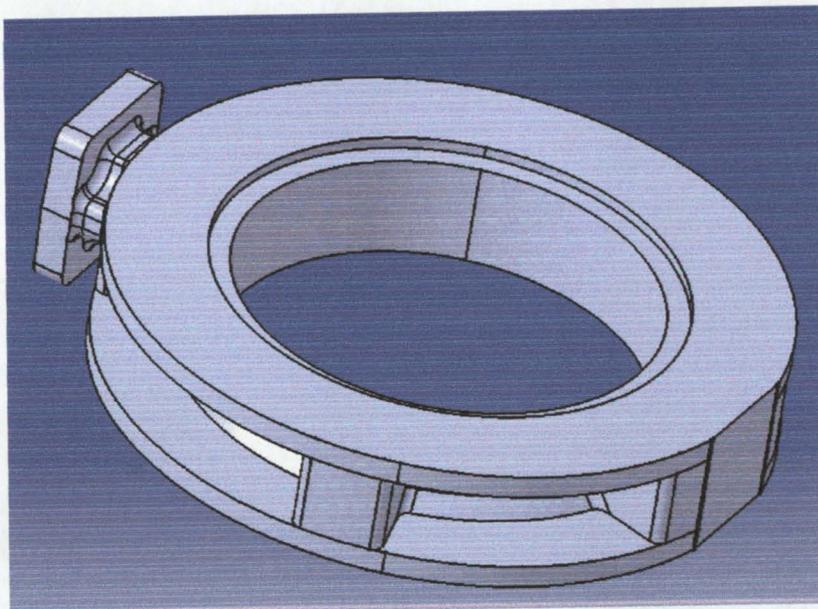


Figura C.1 – Geometria da peça Isoria Dn300

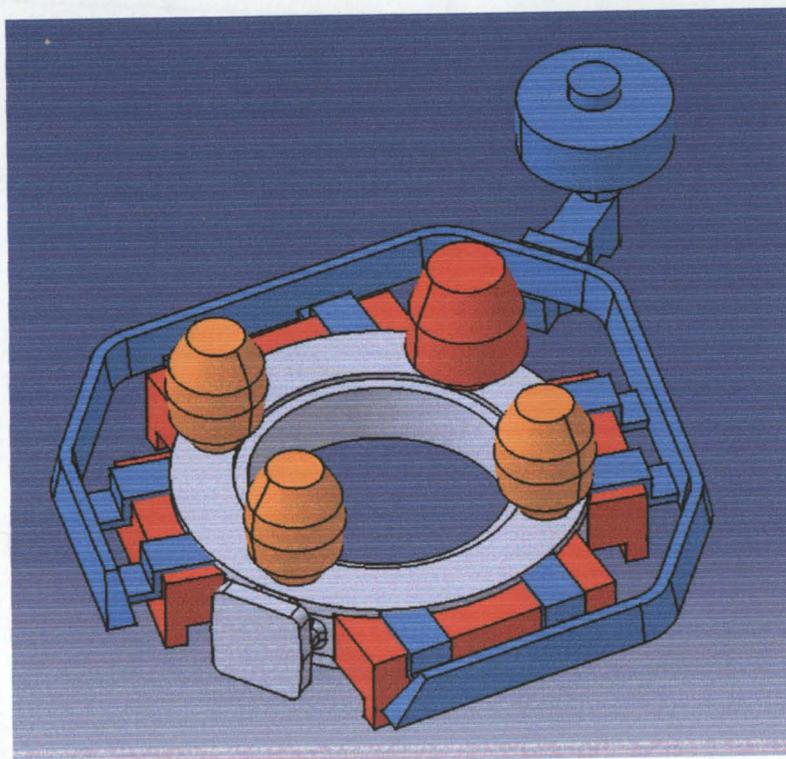


Figura C.2 – Geometria do cacho Isoria Dn300, incluindo a gigagem, machos e camisas isotérmicas

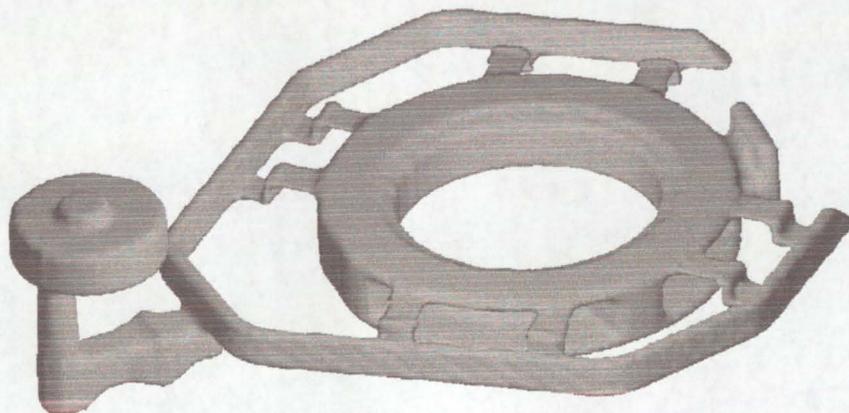


Figura C.3 - Malha do cacho gerada pelo Flow-3D com 800000 células.

Isoria Dn300 – Liga Ferro Fundido GGG40

Temperatura de <i>solidus</i>	1423	K
Temperatura de <i>liquidus</i>	1432	K
Temperatura de vazamento	1658	K
Condutibilidade térmica	3e6	erg/s/cm/K
Densidade do sólido	7	gm/cm ³
Densidade do líquido	6.7	gm/cm ³
Calor específico	9e6	erg/gm/K
Viscosidade	0.03	poise
Calor latente de fusão	2.6e9	erg/gm
Fracção crítica de sólido	0.55	

Tabela C.1 - Características termofísicas da liga GGG 40

Condutibilidade térmica	1.5e5	erg/s/cm/K
Temperatura	295	K
Coef. de transferência de calor	4e6	erg/s/cm ² /K

Tabela C.2 – Características termofísicas da areia verde

Condutibilidade térmica	7.1e4	erg/s/cm/K
Temperatura	295	K
Coef. de transferência de calor	2e5	erg/s/cm ² /K

Tabela C.3 – Características termofísicas da areia de machos (ColdBox)

Condutibilidade térmica	3.45e4	erg/s/cm/K
Temperatura	295	K
Coef. de transferência de calor	4e3	erg/s/cm ² /K

Tabela C.4 – Características termofísicas das camisas isotérmicas

Pressão do metal	1.015e6	Pa
Pressão ambiente	1.013e6	Pa
Temperatura Ambiente	298	K

Tabela C.5 – Resumo das variáveis do processo

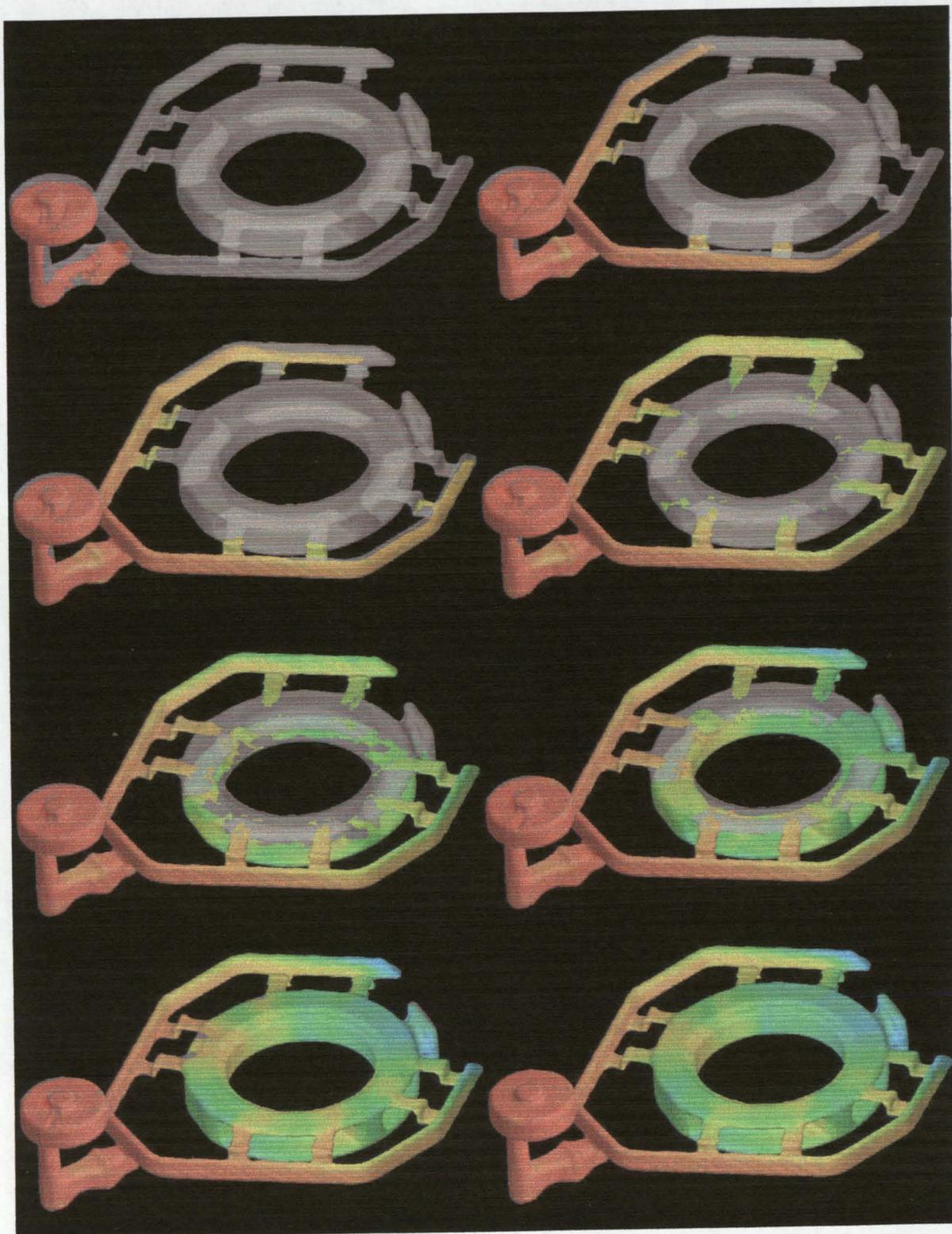


Figura C.4 – Sequência de enchimento colorido pela variável temperatura. Tempos de enchimento de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8.5 e 9 segundos respectivamente. Vista tridimensional do cacho.

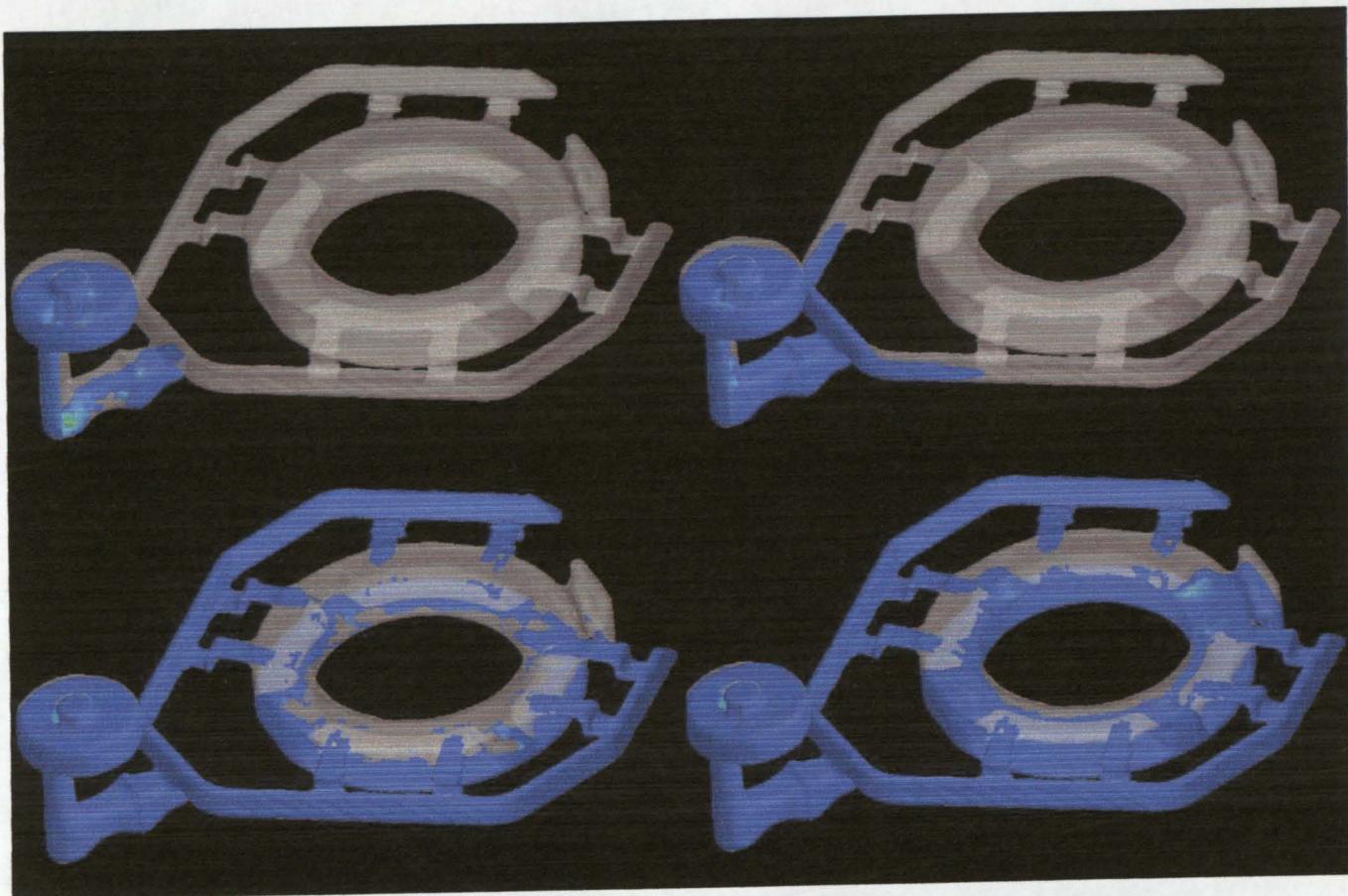


Figura C.5 – Sequência de enchimento colorida pela variável turbulência. Tempos de enchimento de 0.4, 1.5, 5 e 7 segundos respectivamente. Vista tridimensional do cacho.

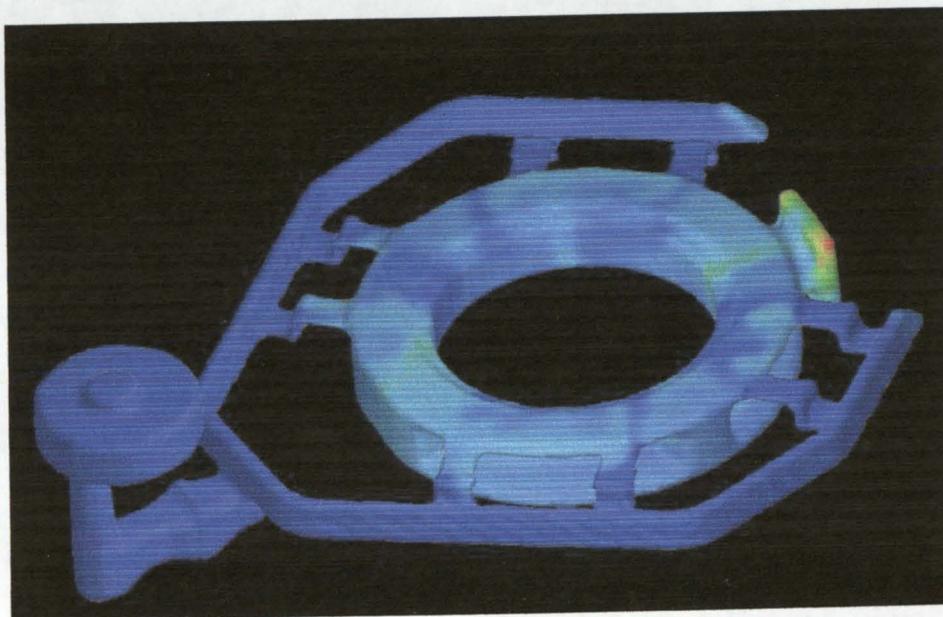


Figura C.6 – Concentração de defeitos no fim do enchimento. Vista tridimensional do cacho.

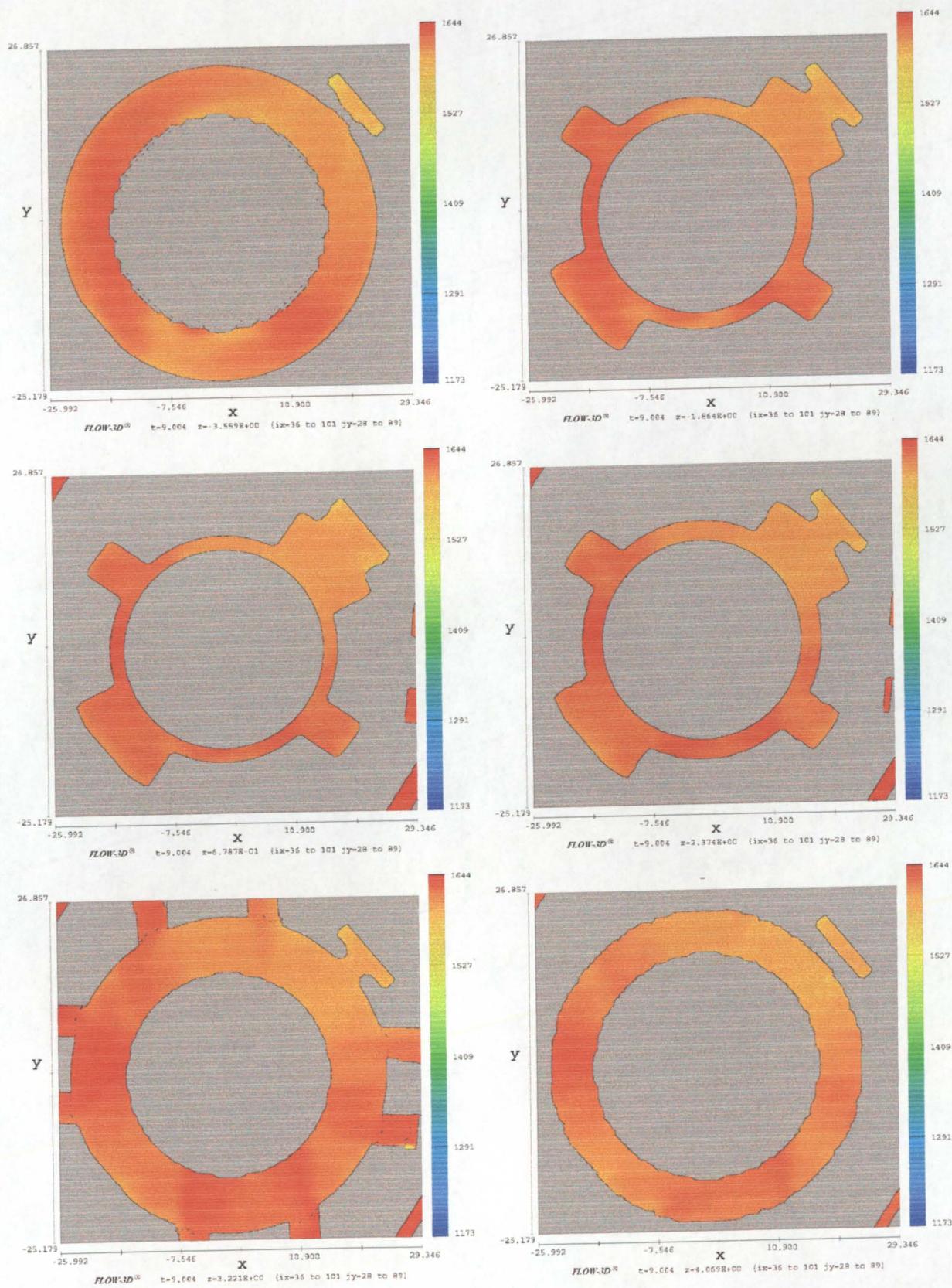


Figura C.7 – Distribuição de temperatura no fim do enchimento. Cortes efectuados no eixo Z a -3.5 , -1.8 , 0.6 , 2.3 , 3.2 e 4 cm respectivamente.

Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

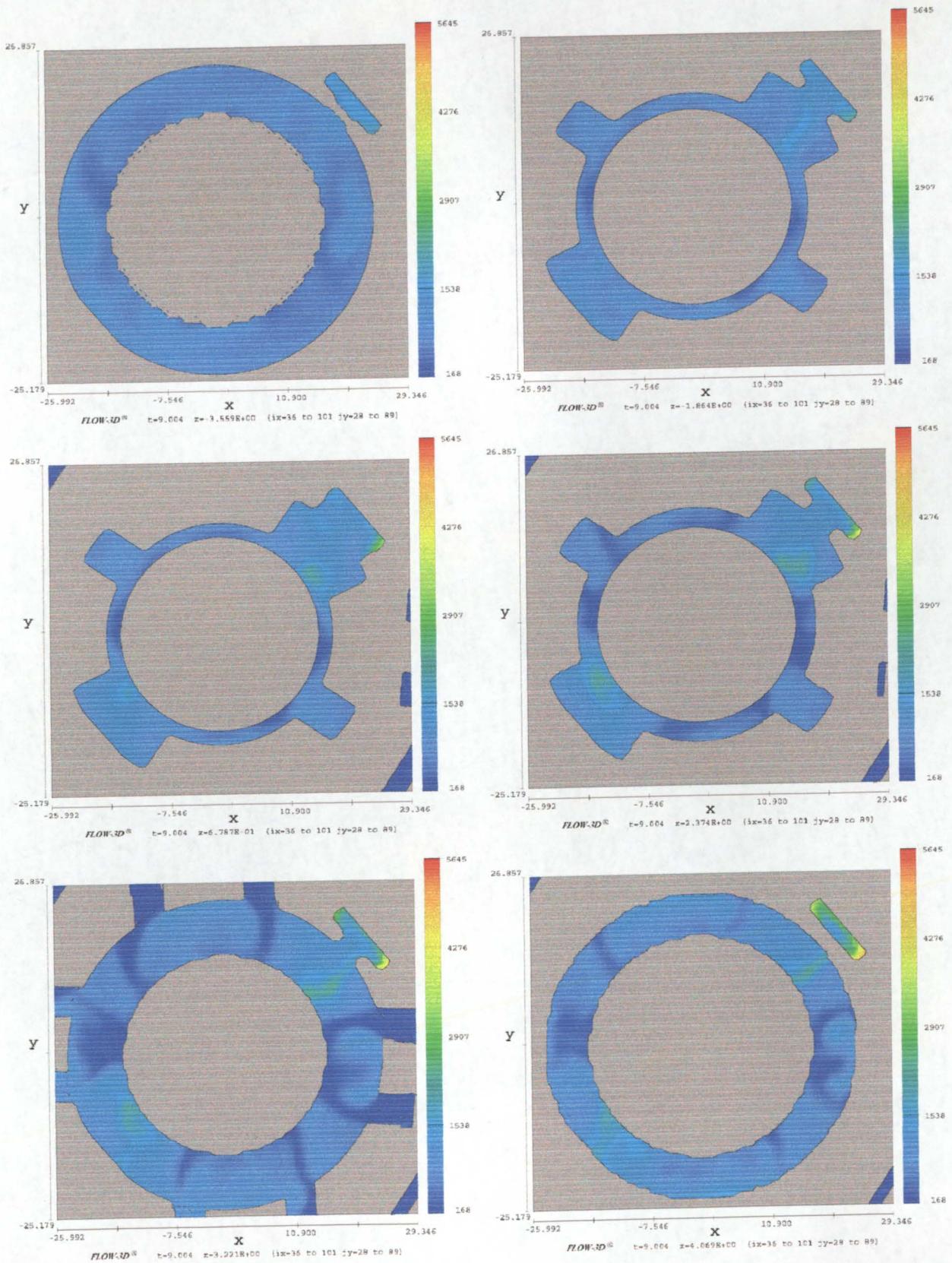


Figura C.8 – Concentração de defeitos no fim do enchimento. Cortes efectuados no eixo Z a -3.5 , -1.8 , 0.6 , 2.3 , 3.2 e 4 cm respectivamente.

Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS

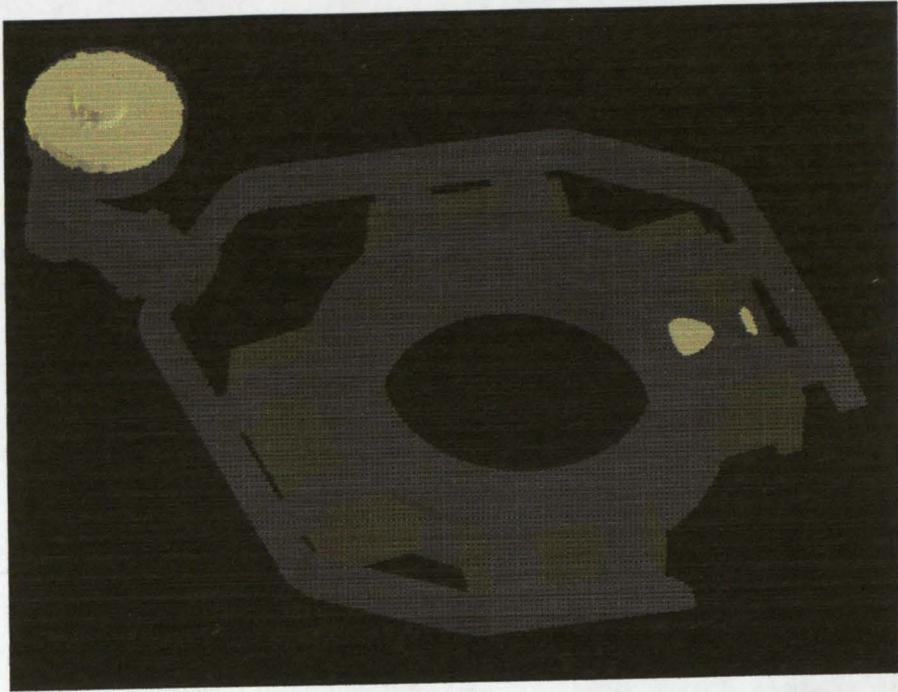


Figura C.9 - Densidade do fundido para um valor de 0. Vazamento a 1650 K. Simulação em AFSolid 2000® sem o uso de camisas isotérmicas.

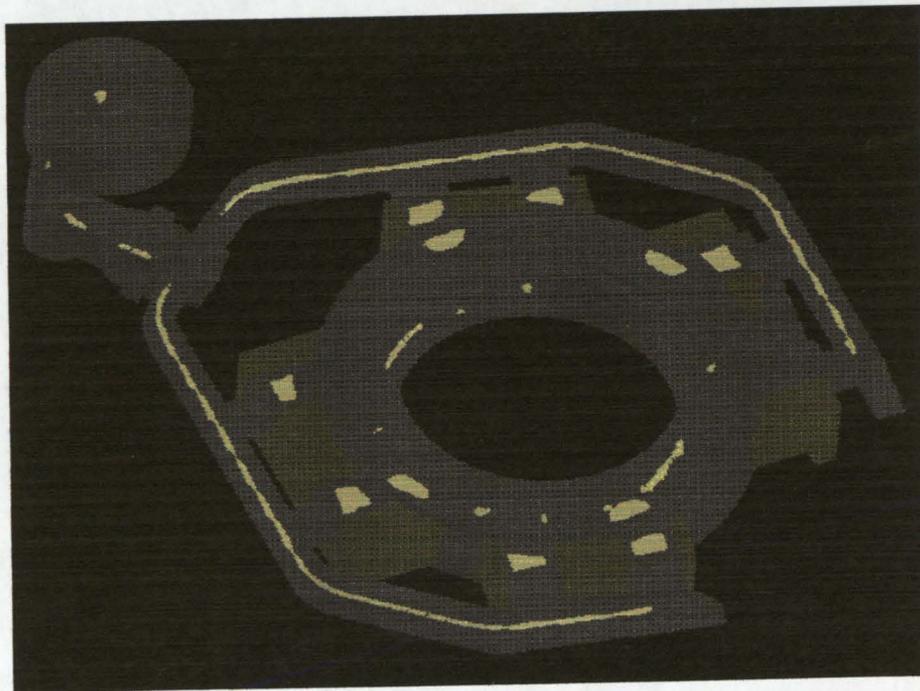


Figura C.10 – Critério de Niyama para um valor de 0.2. Simulação em AFSolid 2000® sem o uso de camisas isotérmicas.

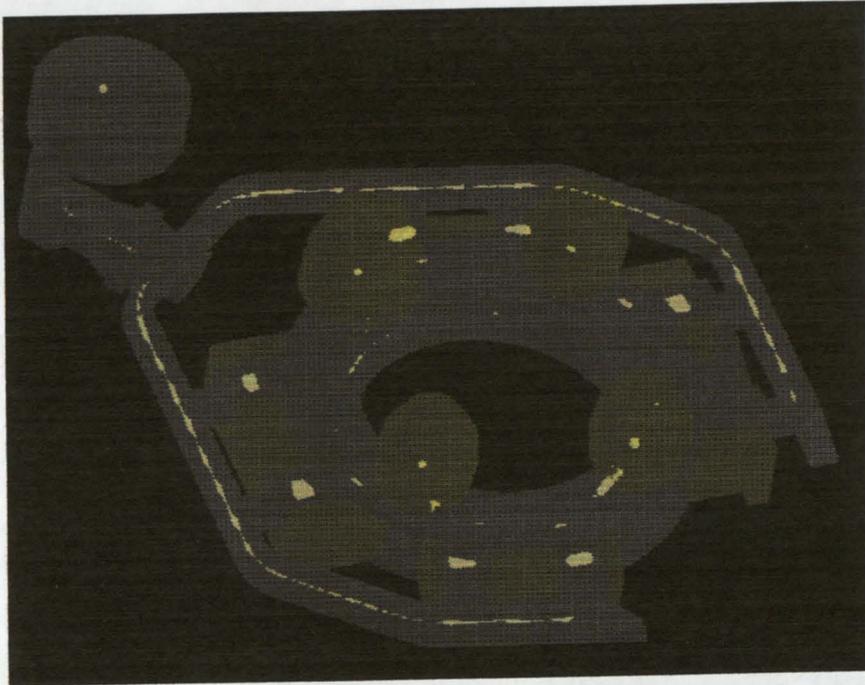


Figura C.11 - Densidade do fundido para um valor de 0. Vazamento a 1650 K. Simulação em AFSolid 2000® com o uso de camisas isotérmicas.



Figura C.12 - Critério de Niyama para um valor de 0.2. Simulação em AFSolid 2000® com o uso de camisas isotérmicas.

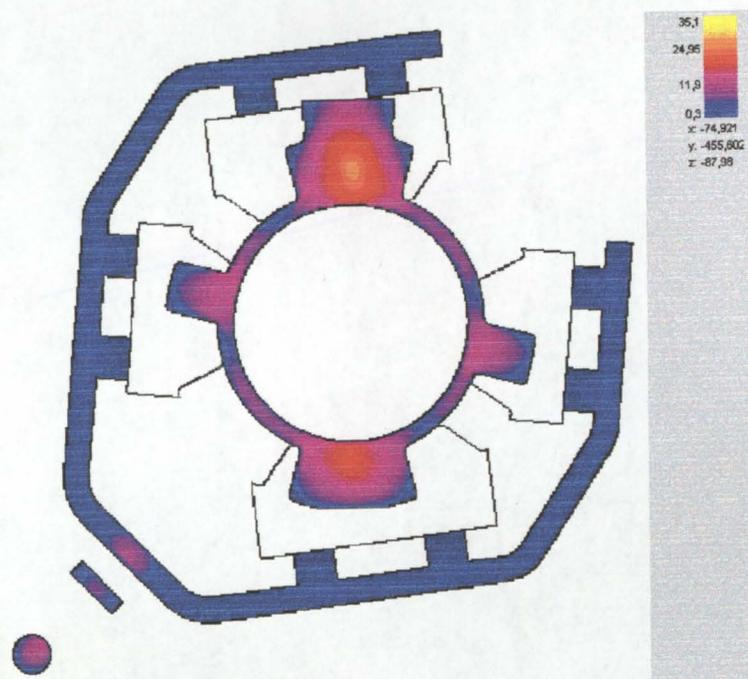


Figura C.13 – Tempo até atingir a fracção crítica de sólido. Corte realizado pelo plano de apartação. Simulação em AFSolid 2000® sem o uso de camisas isotérmicas.

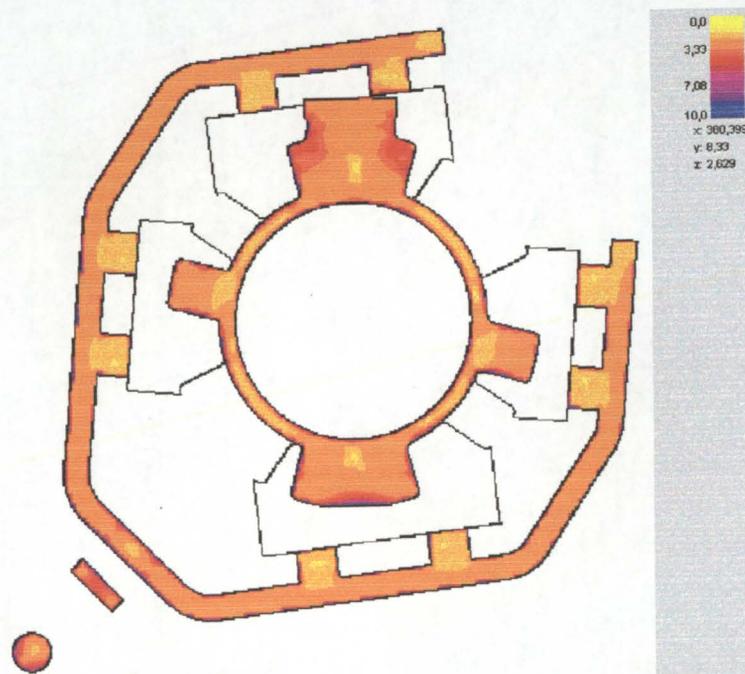


Figura C.14 – Pontos quentes. Corte realizado pelo plano de apartação. Simulação em AFSolid 2000® sem o uso de camisas isotérmicas.

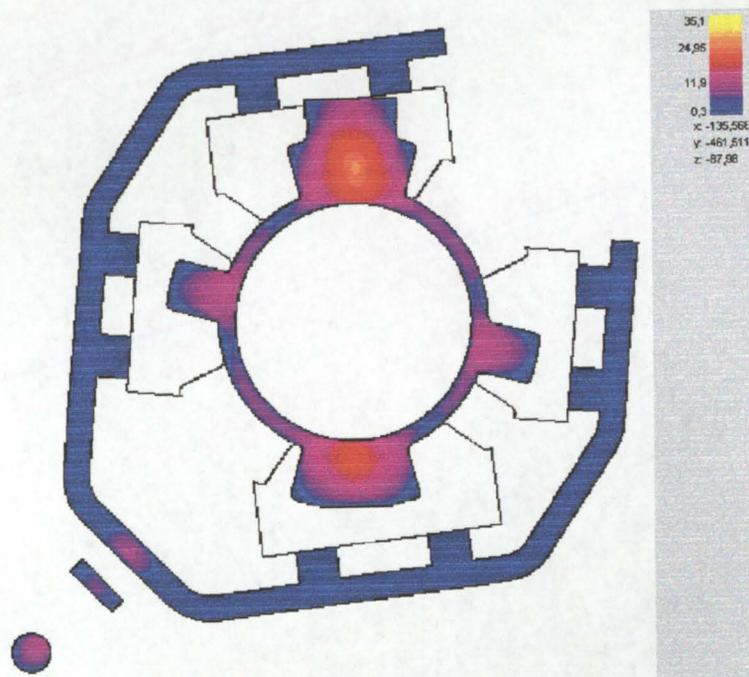


Figura C.15 – Tempo até atingir a fracção crítica de sólido. Simulação em AFSolid 2000® com uso de camisas isotérmicas. Corte realizado pelo plano de separação.

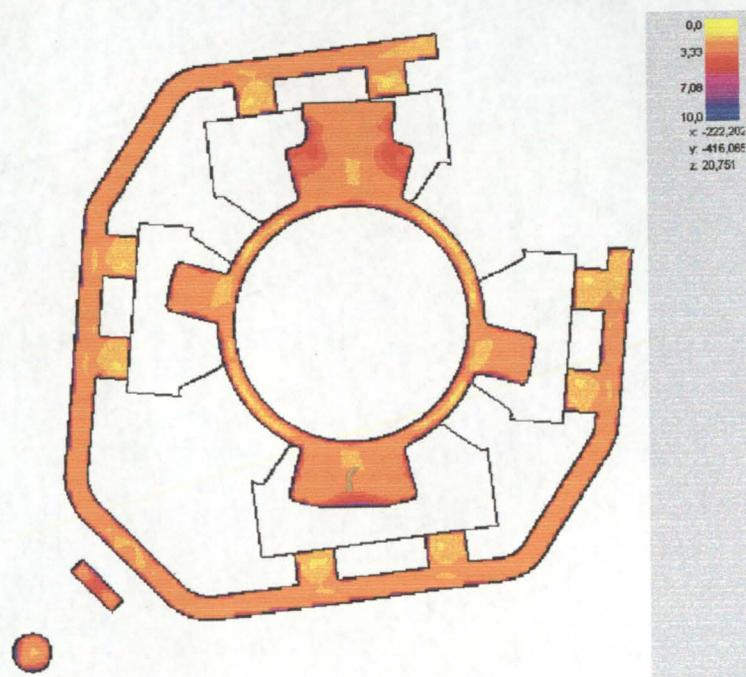


Figura C.16 – Pontos quentes. Simulação em AFSolid 2000® com o uso de camisas isotérmicas. Corte realizado pelo plano de separação.

Nota: Todas as unidades pertencem ao sistema CGS





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000091224