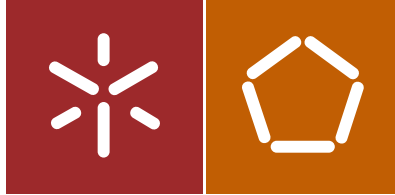




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Paulo Silva Ferreira

Simulação numérica e validação experimental
de sistemas de enchimento em fundição
injetada.



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Paulo Silva Ferreira

Simulação numérica e validação experimental
de sistemas de enchimento em fundição
injetada.

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Joaquim Carneiro Barbosa

DECLARAÇÃO

Nome: João Paulo Silva Ferreira

Endereço eletrónico: a52788@alunos.uminho.pt; jptebosa@gmail.com Telefone: 919391296

Número do Bilhete de Identidade: 13456320

Título dissertação:

Simulação numérica e validação experimental de sistemas de enchimento em fundição injetada.

Orientador:

Professor Doutor José Joaquim Carneiro Barbosa

Universidade do Minho

Ano de conclusão: 2014

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Área de especialização: Tecnologias da Manufatura

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus profundos agradecimentos a todas as pessoas que de certa forma contribuíram e apoiaram na concretização deste trabalho, e particularmente:

- Ao meu orientador, Professor José Joaquim Carneiro Barbosa, por toda a disponibilidade demonstrada não só durante o decorrer desta dissertação, mas também ao longo dos últimos anos, exprimo os mais sinceros agradecimentos pela dedicação e pelos ensinamentos que transmitiu com base em todo o seu conhecimento e experiência nesta área;

- À empresa TESCO, especialmente aos Engenheiros responsáveis pelo setor da fundição: Rui Gonçalves, Nuno Martins e Gerson Castro, ao responsável pelo departamento da garantia da qualidade Eng. Artur Costa;

- Às minhas filhas Mariana e Leonor que sempre foram a minha fonte de inspiração e são a causa de todo este esforço e empenho durante esta reta final do meu percurso académico;

- Aos meus pais Manuel Carlos e Maria de Fátima, pelo apoio desde sempre, pela educação e valores que estiveram na base da minha formação e realização pessoal;

- Aos meus avós Gaspar e Eugénia, pelo carinho e incentivo, e à restante família, especialmente às minhas tias Cândida e Adelaide.

- Finalmente, aproveito para agradecer a todos os colegas de curso e colegas da Tesco, com quem me relacionei durante este estágio, e aos amigos que me acompanharam ao longo desta experiência inesquecível e enriquecedora.

RESUMO

A simulação numérica do processo de fundição é cada vez mais uma técnica fundamental para a competitividade das empresas, promovendo redução dos tempos de desenvolvimento e otimização de placas molde, resolução de defeitos de fundição e planeamento dos parâmetros de processo envolvidos.

Contudo, em termos laboratoriais, a utilização com caráter pedagógico deste tipo de aplicação informática não é simples nem expedita, uma vez que é necessário calibrar o software através da experimentação, sendo necessário realizar previamente estudos sobre modelos físicos com a finalidade de ajustar as variáveis envolvidas no processo de simulação.

Pretende-se avaliar preventivamente a viabilidade de novos projetos, antes de efetivar a encomenda dos respetivos moldes, com a finalidade de projetar sistemas de enchimento mais eficientes e evitar o aparecimento de possíveis defeitos de fundição. Deste modo será possível evitar retrabalho desnecessário, reduzindo o número de peças de aquecimento das máquinas de fundição injetada, evitar correções na cavidade das moldações permanentes em aço, reduzir os prazos de entrega e o número de inconformidades.

O trabalho complementar-se-á com um estudo numérico e validação experimental do processo de fundição injetada de novos projetos.

ABSTRACT

The numerical simulation of the casting process is increasingly becoming a key to the competitiveness of enterprises, promoting the reduction of development time of mold plates, resolution of casting defects and optimization of process parameters.

However, under laboratory, the use of such pedagogical computer application is neither simple nor expedient, so it becomes necessary to calibrate the software through experimentation, being necessary to study the finished product in order to adjust the variables involved in the simulation process.

The propose of this work is to proactively assess the viability of new projects, before taking the purchase order of the respective molds, in order to design more efficient ingate systems and avoid the appearance of possible casting defects. This will prevent unnecessary rework, decreasing the number of heating parts of high pressure die casting machines, avoiding corrections in the cavity of the permanent steel molds, reducing the lead time and the number of non-conformities.

The work will complement with a numerical study and experimental validation of the high pressure die casting process of new parts with different geometries.

Palavras-chave: fundição injetada sob pressão; molde; simulação numérica; validação experimental.

Key-words: high pressure die casting; mold; numerical simulation; experimental validation.

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Ângulo de saída	Inclinação das paredes do molde e dos pinos moldantes que facilitam a desmoldação ou extração dos machos.
Bolacha	Deve ser a última zona a solidificar, representa uma massa de metal destinada a compensar a contração volumétrica durante a fase de compactação.
Câmara de injeção	Componente da máquina de injeção dotado de um orifício por onde o metal é vazado, sendo este posteriormente injetado para o interior do molde por ação de um pistão.
Cavidade moldante	Forma do negativo da peça no molde.
Contração	Diminuição do volume do metal ou liga metálica durante o arrefecimento e solidificação.
Exatidão	Grau de conformidade de um valor medido, relativamente ao valor nominal especificado
Expansão	Aumento do volume
Fluidez	Caraterística do metal que é vazado, aptidão do metal fundido para fluir pelos canais da cavidade do molde.
Fundição de precisão	Processos de fundição a partir dos quais é possível obter fundidos com as caraterísticas próximas às do produto acabado ("near net shape").
Fundição injetada	Processo de Fundição de precisão em que o metal é injetado sob pressão no interior de uma moldação metálica.
Fundido de precisão	Peça obtida por um processo de Fundição de

	Precisão, caracterizada pela elevada exatidão dimensional, geométrica e qualidade metalúrgica.
Sistema de enchimento	Conjunto de canais que conduzem o metal no estado líquido no interior da cavidade do molde.
Linhas de água	Canais presentes no interior no molde, localizados nas zonas mais espessas ou mais quentes, destinados à circulação forçada de água fria para facilitar o seu arrefecimento.
Masselote	Pormenor da cavidade moldante, normalmente localizado antes dos canais destinados à saída de gases, que consiste num aumento da área de secção dos canais com a finalidade de reduzir a velocidade do escoamento do metal fundido, impedindo que este solidifique e obstrua o sistema de vácuo
Moldação/Molde	Conjunto de componentes que quando montados entre si contêm a cavidade destinada a receber o metal fundido, que após solidificar resulta numa peça com a configuração pretendida.
Moldação permanente	Molde vulgarmente designado de coquilha metálica, que pode ser utilizado inúmeras vezes sem comprometer a qualidade dos fundidos.
“Near net shape”	Caraterística de determinados processos que permitem obter consistentemente o produto final envolvendo o menor número de operações intermédias, sem comprometer a elevada qualidade dimensional e geométrica requerida.

Porosidade	Defeito de fundição que ocorre devido à presença do ar que fica retido no seio do metal fundido, que após a solidificação dá origem a espaços vazios na estrutura da peça.
Pintura refratária	Substância resistente a altas temperaturas, utilizada para revestir a cavidade do molde, evitando que o metal fundido agarre na sua superfície
Pino moldante	Macho que faz parte da moldação, normalmente utilizado para modelar furos na peça, pode ser fixo ou móvel.
Saídas de gases (Chillvents)	Canais destinados a promover o escape dos gases presentes no interior da cavidade, devem ser localizados na última zona a ser preenchida com metal e conter uma reduzida área de secção, fazendo com que o metal solidifique mais rapidamente.
Simulação numérica	Processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender o seu comportamento e/ou avaliar estratégias para a sua operação. Pegden (1990)
Sistema de enchimento	Conjunto de canais projetados para promover o enchimento da cavidade moldante.
Sistema de vácuo	Sistema que promove a sucção do ar do interior da câmara de injeção (vácuo da injeção) e da cavidade moldante (vácuo central), minimizando a quantidade de ar aprisionada no interior do fundido.
Spray desmoldante	Substancia que é pulverizada sobre a cavidade moldante após a remoção do fundido com a finalidade de evitar que o

	Alumínio agarre à sua superfície, promovendo ainda o seu arrefecimento
Validação experimental	Avaliação dos resultados da análise ao modelo computacional, por analogia aos modelos reais ou padrões de referência, com a finalidade de aumentar o grau de confiabilidade do processo de simulação
Vazamento	Transferência do metal no estado líquido do forno para a câmara de injeção.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
GLOSSÁRIO DE TERMOS	vii
ÍNDICE.....	xi
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO	3
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO	5
2.1 Fundição em Moldações Permanentes.....	5
2.1.1 Vantagens e Desvantagens	6
2.1.2 Propriedades das ligas metálicas	6
2.1.3 Temperatura de vazamento	7
2.1.4 Intervalo de solidificação.....	7
2.1.5 Extração de ar da moldação.....	8
2.1.6 Pinos Extratores	8
2.1.7 Pinos Moldantes	8
2.1.8 Pino squeeze.....	9
2.1.9 Força de fecho das moldações.....	9
2.1.10 Pressão de injeção	9
2.1.11 Velocidade de injeção	10

2.1.12	Dimensionamento das secções do sistema de enchimento.....	10
2.1.13	Masselotes	13
2.1.14	Temperatura do molde	14
2.1.15	Sistemas de arrefecimento	14
2.1.16	Vida do molde.....	15
2.1.17	Material do molde	17
2.1.18	Troca de molde	17
2.1.19	Tratamento do banho de alumínio.....	17
2.2	Fundição Injetada	18
2.2.1	Requisitos e características das máquinas de injeção.....	19
2.2.2	Tipos de máquinas.....	20
2.2.3	Variáveis do processo.....	23
2.2.4	Defeitos de fundição.....	25
3	PROJETO PARA FUNDIÇÃO	27
3.1	Sistema de alimentação	27
3.2	Sistema de enchimento/injeção.....	28
3.2.1	Sistema de injeção.....	29
4	FERRAMENTAS INFORMÁTICAS DE SIMULAÇÃO	35
4.1	Princípios teóricos das aplicações informáticas de simulação do processo de fundição	36
4.2	Softwares fundamentados no método dos volumes finitos.....	37
4.3	Softwares fundamentados no método dos elementos finitos.....	38
4.4	Softwares fundamentados em diferenças finitas	38
4.5	Softwares de simulação numérica comercializáveis	39
4.5.1	Nova Flow & Solid	39
5	TRABALHO EXPERIMENTAL	45
5.1	Modelo "Cylinder Head 1720"	46

5.1.1	Parâmetros de simulação	47
5.1.2	CH 1720 - Arrefecimento e solidificação	56
5.1.3	CH 1720 – Análise de resultados	63
5.2	Modelo “Cilinder Head 1767”	68
5.2.1	CH 1767 – Processo de enchimento.....	68
5.2.2	CH 1767 – Arrefecimento e solidificação.....	77
5.2.3	CH 1767 – Análise de resultados.....	78
5.3	Validação Experimental	81
5.3.1	Porosidades no modelo CH 1720.....	82
5.3.2	Porosidades no modelo CH 1767.....	83
6	CONCLUSÕES	85
6.1	Sugestões para trabalho futuro.....	87
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
8	ANEXOS	91
	Anexo I – Calibração do software.....	91
	Anexo II – Controlo termográfico do processo de Fundição Injetada.....	93
	Anexo III – Análises no Espectrómetro.....	97
	Anexo IV – Procedimento para troca de molde	98

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 – Diagrama P-Q ²	12
Figura 2.2 – Máquina de injeção de câmara fria.....	20
Figura 2.3 – Máquina de injeção de câmara quente	21
Figura 2.4 – Buhler 660 EVOLUTION 66 Compact.....	22
Figura 2.5 – Gráfico de pressões de um programa de fundição.....	23
Figura 2.6 – Gráfico de velocidades de um programa de fundição.....	24

Capítulo 5

Figura 5.1 – Relação entre o tempo de solidificação e a espessura mínima do molde.....	47
Figura 5.2 – Zonas de menor espessura da peça	48
Figura 5.3 – Parâmetros de malha	48
Figura 5.4 – Parâmetros de enchimento da cavidade CH1720.....	51
Figura 5.5 – CH1720_Enchimento completo	53
Figura 5.6 – CH1720_Parâmetros de enchimento-2ºensaio.....	54
Figura 5.7 – CH1720_Perfil de Velocidades	54
Figura 5.8 –CH1720_ Duração da primeira fase do enchimento	55
Figura 5.9 – CH1720_Tempo de enchimento total	55
Figura 5.10 – CH1720_Ultimas zonas a serem preenchidas.....	56

Figura 5.11 – CH1720_Modelação 3D do perfil das linhas de água	57
Figura 5.12 – 3D Import_posicionamento do perfil das linhas de água.....	57
Figura 5.13 – Geração do plano de simetria	58
Figura 5.14 – Plano para definir a entrada e saída da água	58
Figura 5.15 – CH1720_Criação das linhas de água.....	59
Figura 5.16 – CH1720_Lista de materiais.....	60
Figura 5.17 – CH1720_ “Gating point” e parâmetros de enchimento	60
Figura 5.18 – CH1720_Interface de transferência de calor.....	61
Figura 5.19 – CH1720_Ciclos de arrefecimento.....	62
Figura 5.20 – CH1720_Condições fronteira nas saídas de gases	62
Figura 5.21 – CH1720_Pontos quentes	64
Figura 5.22 – CH1720_Taxa de rechupe.....	65
Figura 5.23 – CH1720_Aparecimento de zonas com porosidades.....	66
Figura 5.24 – CH1720_Tempo de solidificação.....	67
Figura 5.25 – CH1720_Perfil de temperaturas	67
Figura 5.26 – CH1767_Solidworks-Volume do modelo 3D da cavidade....	69
Figura 5.27 – CH1767_Parâmetros de enchimento (3 fases).....	72
Figura 5.28 – CH1767_Browser-enchimento (3 fases)	73
Figura 5.29 – CH1767_Parâmetros de enchimento (2 fases).....	74
Figura 5.30 – CH1767_Enchimento (2 fases)	74
Figura 5.31 – CH1767_Perfil de velocidades.....	75

Figura 5.32 – CH1767_Duração da primeira fase do enchimento	75
Figura 5.33 – CH1767_Tempo de enchimento total	76
Figura 5.34 – CH1767_Ultimas zonas da peça a serem preenchidas.....	76
Figura 5.35 – CH1767_Modelação 3D do perfil de linhas de água	77
Figura 5.36 – CH1767_Geração da malha.....	78
Figura 5.37 – CH1767_Pontos quentes	78
Figura 5.38 – CH1767_Formação de rechupe	79
Figura 5.39 – CH1767_Critério de Nyama	80
Figura 5.40 – CH1767_Tempo de solidificação.....	80
Figura 5.41 – CH1767_Perfil de temperaturas	81
Figura 5.42 – CH1720_Zonas críticas.....	82
Figura 5.43 – CH1720_Visualização de porosidades na caixa	82
Figura 5.44 – CH1720_Macroporosidade no tubo	83
Figura 5.45 – CH1720_Porosidades na zona de sucção	83
Figura 5.46 – CH1767_Zonas propícias ao aparecimento de poros	84

Capítulo 8

Figura II.1 – CH1720_Análise termográfica da parte móvel antes do spray.....	93
Figura II.2 – CH1720_Análise termográfica da parte móvel após o spray .	94
Figura II.3 – CH1720_Análise termográfica da parte fixa antes do spray ..	95
Figura II.4 – CH1720_Análise termográfica da parte fixa após o spray	95

Índice de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Ligas metálicas vs. Pressão de injeção	10
Tabela 2.2 – Características da máquina de injeção	22

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Valores da contração de solidificação para diversos metais ou ligas metálicas.....	29
Tabela 3.2 – Relação espessura da peça vs. tempo de enchimento.....	34

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Características mecânicas e térmicas da liga A413.....	45
Tabela 5.2 – CH1720_Parâmetros de funcionamento teóricos.....	50
Tabela 5.3 – Condições de funcionamento do sistema de vácuo	52
Tabela 5.4 – CH1767_Parâmetros de funcionamento teóricos.....	72

Capítulo 8

Tabela III.1 – Composição da liga de Alumínio HD2 BS1.....	97
Tabela III.2 – Qualidade da liga de fundição _CH1720.....	97
Tabela III.3 – Qualidade da liga de fundição _CH1767	97

1 INTRODUÇÃO

A fundição é uma técnica muito antiga que tem vindo a ser utilizada pelo homem desde os primórdios da humanidade, há mais de quatro milénios A.C., embora somente há cerca de quatro décadas, a solidificação dos metais e suas ligas tenha começado a ser estudada dentro dos esquemas da metodologia científica [1].

A tecnologia da fundição é um dos processos de conformação de metais mais importante e versátil, na medida em que permite a produção de componentes de geometrias mais complexas, de diferentes dimensões e em praticamente qualquer metal ou liga. A grande vantagem da sua utilização deve-se à otimização do fator económico devido a ser o caminho mais curto entre a matéria-prima e a forma final do produto [1].

O processo de fundição tem sido alvo de uma constante evolução face à demanda dos diversos setores industriais consumidores, que exigem peças de maior precisão dimensional, melhor acabamento superficial e com melhor sanidade metalúrgica. Tais qualidades ou requisitos de engenharia têm sido alcançados graças aos progressos tecnológicos que se tem desenvolvido no âmbito da fundição.

É certo que a qualidade das peças obtidas por vazamento está sempre dependente dos conhecimentos baseados na experiência do fundidor. Contudo, existem inúmeros problemas/defeitos associados aos parâmetros de processo envolvidos, que podem ser evitados/minimizados quando a sua origem é conhecida.

Assim, surge a necessidade de realizar todo um trabalho de projeto com vista a otimizar tais parâmetros, prevenir e resolver possíveis problemas. Nesse sentido, existem duas abordagens científicas que permitem analisar o comportamento do material fundido durante o vazamento e solidificação, sendo elas técnicas experimentais e numéricas.

Os métodos experimentais requerem equipamentos e laboratórios para testar os modelos, permitindo avaliar as propriedades mecânicas dos fundidos (rigidez, dureza, tensão de cedência, tensão limite de fadiga, etc.), através de ensaios de dureza, de tração e de fadiga. Também permitem detetar defeitos de fundição como rechupes, porosidades, imperfeições nas moldações, entre outros, através de técnicas não destrutivas como a de raios X e ultrassons, ou destrutivas por seccionamento das peças e micrografia.

Já os métodos de simulação numérica implicam meios computacionais e softwares cada vez mais desenvolvidos e formação qualificada. Contudo sua utilização

na indústria da Fundição traduz-se em menores perdas de tempo e dinheiro na medida em que permitem simular virtualmente todo o processo desde o vazamento até ao arrefecimento e solidificação, através de um software computacional, sem ter que fabricar as peças fundidas. Estes métodos são baseados na teoria dos elementos finitos, dos volumes finitos e das diferenças finitas, e têm revelado grandes progressos nesta área, promovendo a competitividade das empresas. A sua utilização permite reduzir os tempos de desenvolvimento de placas molde, prever e resolver defeitos de fundição e otimizar os parâmetros de processo envolvidos.

Porém, em termos laboratoriais, a utilização destes métodos computacionais não é simples nem expedita, uma vez que é necessário calibrar o software recorrendo à experimentação, sendo necessário realizar previamente estudos sobre produtos acabados com a finalidade de ajustar as variáveis envolvidas no processo de simulação.

Procura-se então com esta dissertação, proceder à “calibração” do software de simulação numérica, testando diferentes condições de simulação, até se conseguirem resultados idênticos aos esperados nos modelos produzidos (padronização do processo). Para além disto, pretende-se avaliar preventivamente a viabilidade de novos projetos, antes de efetivar a encomenda dos respetivos moldes, com a finalidade de projetar sistemas de enchimento mais eficientes e evitar o aparecimento de possíveis defeitos de fundição. Deste modo será possível evitar retrabalho desnecessário, evitar correções na cavidade das moldações permanentes em aço, reduzir os prazos de entrega e o número de inconformidades após maquinagem.

Para além disto, este trabalho complementar-se-á com a participação no projeto de novos modelos.

Finalmente, pretende-se culminar o trabalho com uma análise dos resultados, ou seja, comparar os modelos teóricos com os reais.

Assim, o trabalho iniciar-se-á com um estágio de aprendizagem na empresa “TESCO – Componentes para automóveis Lda”, no setor produtivo da fundição, da maquinagem e por fim no departamento da garantia da qualidade, para conhecer o processo envolvido no fabrico dos componentes em questão, posto isto, será realizada uma pesquisa bibliográfica relacionada com as propriedades do tipo de liga metálica a vazar, e definir as diversas variáveis envolvidas, nomeadamente velocidades de injeção, tempos de enchimento, pressão de injeção e compactação, curso do pistão nas diversas fases, espessura da bolacha, força de fecho das máquinas, entre outros aspetos.

Seguir-se-á a fase de simulação de peças já produzidas, com analogia aos resultados práticos e ajuste de variáveis do software (calibração).

Numa quarta fase serão realizadas simulações de novos projetos para aprovação das respectivas cavidades dos moldes.

Finalmente, serão tecidas as devidas conclusões acerca das diversas análises obtidas.

1.1 MOTIVAÇÃO

A principal motivação deste trabalho está relacionada com a necessidade de recorrer aos métodos numéricos para simular o enchimento das cavidades moldantes e o respetivo processo de arrefecimento/solidificação do metal no seu interior, prever a ocorrência de defeitos e ajustar as variáveis do processo ao problema em causa de modo a evitar que surjam tais defeitos de fabrico.

Por outro lado, todo o trabalho de projeto para fundição e conceção dos respetivos modelos de placas molde revela-se fundamental para a formação e preparação pessoal capaz de enfrentar as adversidades no ambiente competitivo da indústria automóvel, por ser tão intransigente, quer ao nível dimensional, quer no que respeita à qualidade dos fundidos.

Para além disto, prevalece a necessidade em manter a credibilidade dos resultados obtidos nas simulações. Neste sentido, a necessidade de recorrer à experimentação torna o êxito deste trabalho um grande desafio.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho consiste na validação experimental dos resultados de simulação numérica do processo de fundição. Nesse sentido será simulado o processo de enchimento e solidificação da liga metálica no interior das referidas cavidades. Proceder-se-á à calibração do software de simulação numérica, recorrendo à analogia dos resultados teóricos obtidos das simulações de modelos idênticos já

fundidos, fazendo variar os parâmetros de processo definidos até que os resultados teóricos se aproximem do que ocorre na realidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Neste capítulo inicial, foi realizada uma breve introdução com o intuito de contextualizar o trabalho realizado.

No segundo capítulo, são abordados os fundamentos teóricos associados ao processo de fundição injetada, nomeadamente os cálculos envolvidos na determinação da taxa de enchimento da câmara de injeção, cursos e velocidades do pistão nas diferentes fases de enchimento, área de seção de alimentação, entre outros aspetos.

No terceiro capítulo são abordados alguns conceitos intrínsecos ao projeto de fundição, mais concretamente, regras de dimensionamento de sistemas de enchimento.

Posteriormente, no quarto capítulo, são abordados os principais softwares de simulação numérica utilizados no projeto de fundição, comparando os métodos de cálculo ou processamento que lhes são subjacentes.

O quinto capítulo descreve todo o procedimento levado a cabo na execução das simulações dos respetivos modelos em análise, integra também a otimização dos parâmetros de enchimento e arrefecimento/solidificação e as respetivas validações experimentais com análises concretas de modelos rejeitados

No sexto capítulo serão analisadas as simulações numéricas e os resultados experimentais das peças produzidas.

Finalmente no sexto capítulo são tecidas algumas conclusões relativamente à validação dos resultados teóricos recorrendo à experimentação, nos anexos constam ainda alguns métodos de controlo de parâmetros de fundição, nomeadamente a temperatura da cavidade moldante, o controlo da composição química dos elementos de liga do metal presente em determinadas amostras, e o método de calibração do software de simulação.

2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

2.1 Fundição em Moldações Permanentes

Os processos de fundição que usam moldações permanentes, distinguem-se dos restantes processos de fundição pelo facto de permitirem a obtenção de dezenas ou centenas de milhares de peças fundidas utilizando sempre o mesmo molde sem necessidade de reparação [2].

Neste tipo de moldações existe sempre a necessidade de extrair o fundido, após terminada a sua solidificação, do interior do molde sem danificar quer a peça, quer a cavidade do molde. Isto implica um maior grau de complexidade na fase de projeto, nomeadamente relacionado com moldes constituídos por vários elementos, dotados de sistemas de extração das peças.

A temperatura do molde é um dos parâmetros que influencia as propriedades do fundido. A experiência dita que uma temperatura excessiva do molde conduz a uma velocidade de arrefecimento mais lenta do metal, traduzindo-se nas más propriedades mecânicas da peça (rigidez, ductilidade, etc) devidas a uma má formação dos constituintes metalográficos. O mesmo se passa para temperaturas muito baixas, o que conduz a um elevado choque térmico, gerando defeitos de solidificação como rechupes, devido à ineficácia do sistema de enchimento implementado.

Normalmente, neste tipo de moldações metálicas é feito um pré-aquecimento do molde, antes de iniciar o ciclo produtivo, de modo a evitar ou minimizar o choque térmico, que no caso da Tesco é efetuado através de um queimador de chama direta ou maçarico. Durante o ritmo de produção normal a temperatura funcional do molde é mantida (aproximadamente 300°C) por refrigeração do mesmo através de linhas de água, canais projetados no molde destinados à circulação forçada de água em circuito fechado.

2.1.1 Vantagens e Desvantagens

Os processos que utilizam moldações permanentes são mais vantajosos que os que utilizam moldações não permanentes na medida em que permitem:

- Ritmos de produção mais elevados;
- Menores custos de produção;
- Melhor arrumação do posto de trabalho;
- Automatização total do processo (menos mão-de-obra necessária);
- Menor rugosidade dos fundidos;
- Melhor acabamento superficial das peças;
- Obtenção de peças de maior complexidade geométrica;
- Maior rigor dimensional;
- Melhor qualidade e uniformidade das peças;
- Maior economia de metal vazado.

Contudo, também apresentam os seguintes inconvenientes:

- Elevado custo inicial das moldações;
- Equipamento mais caro, sobretudo no caso da fundição injetada;
- Demora no projeto e fabrico dos moldes;
- Compatibilidade restrita a ligas com ponto de fusão relativamente baixo;
- Limitações relacionadas com o peso e dimensões das peças devidas à capacidade das máquinas utilizadas, como por exemplo a capacidade de fecho no caso da fundição injetada.

2.1.2 Propriedades das ligas metálicas

No caso das moldações permanentes, as ligas metálicas consumíveis devem satisfazer os seguintes requisitos, sendo os três primeiros fundamentais [2]:

- Ponto de fusão relativamente baixo;
- Boa fluidez;
- Não atacar a moldação nem a máquina de injetar;
- Curto intervalo de tempo de solidificação;
- Não dissolver gases, ou então que não os liberte durante o arrefecimento;
- Não devem ser frágeis, especialmente a altas temperaturas;
- Baixo coeficiente de contração.

2.1.3 Temperatura de vazamento

O metal vazado deve respeitar um limite de tolerâncias da temperatura bem definido, daí a necessidade dos chamados fornos de manutenção no caso da fundição injetada. Estes limites são estabelecidos de acordo com a liga metálica a vazar, a espessura das paredes da peça, o peso e tamanho da peça, o sistema de arrefecimento do molde e o sistema de enchimento.

Caso a temperatura de vazamento seja inferior à mínima estipulada, a cavidade moldante não será completamente preenchida de metal, o fundido irá solidificar antes da última zona da peça e as secções mais finas solidificarão rapidamente, contrariando a direcionalidade da solidificação. Como consequência disto é muito provável que ocorram defeitos como insuficiência de enchimento, detalhes da peça mal definidos e gotas frias.

Quando a temperatura de vazamento exceder o limite máximo, a peça irá contrair, e o molde distorcer, perdendo a sua precisão dimensional. Quanto maior for esta temperatura, maior será a erosão do molde e mais facilmente o metal do molde pode ser dissolvido pela liga metálica. No caso de existirem elementos de liga que se tornem voláteis a alta temperatura, a qualidade do fundido não será tão boa. Em suma, elevadas temperaturas de vazamento encurtam o intervalo de solidificação, reduzem o tempo de vida útil do molde por fadiga térmica e facilitam a fissuração da cavidade moldante.

Para as ligas de Alumínio, a temperatura de vazamento deve variar entre os 650°C e os 790°C, sendo que no caso de peças de parede fina pode ascender até aos 845°C. É correto admitir uma tolerância de $\pm 10^\circ\text{C}$ à temperatura de vazamento estimada para determinada peça. Na impossibilidade de garantir este controlo, o ciclo de arrefecimento deverá ser ajustado para a temperatura máxima [2].

2.1.4 Intervalo de solidificação

O intervalo de solidificação deve ser curto e o coeficiente de contração baixo para ser possível extrair rapidamente a peça do molde sem que esta fique sujeita a tensões internas provocadas pelo fenómeno da contração contrariada do molde

(possibilidade da peça partir). Por outro lado, a liga em que a peça é vazada não deve ser frágil a quente para que a peça possa ser retirada rapidamente.

2.1.5 Extração de ar da moldação

O facto das moldações metálicas não terem permeabilidade para libertar o ar e os gases contidos na cavidade, leva à necessidade de se projetarem sistemas de evacuação que promovam a expulsão espontânea do ar durante o enchimento. O sistema de extração de ar deve ser premeditado para libertar a totalidade de ar o mais rapidamente possível, impedindo a saída de metal pelo mesmo canal. Por isso, este deve ser alhetado de modo a aumentar a área da superfície de contacto, e ter espessuras na ordem das décimas de milímetro de modo a promover o efeito de capilaridade, o que obriga o metal a solidificar instantaneamente nas paredes destes canais, vulgarmente designados de “Chillvents”.

2.1.6 Pinos Extratores

Quando a geometria da peça é dotada de um grau de complexidade que não permite a sua extração direta da cavidade moldante, é possível promover a sua remoção através dos pinos extratores distribuídos criteriosamente na placa extratora do molde móvel. Estes pinos são atuados mecanicamente após o recuo dos pinos moldantes, que neste caso funcionam como machos. Os extratores devem estar localizados nas zonas de reentrância da peça mais ocultas ou que possam ser posteriormente maquinadas de modo a minimizar o efeito da deformação plástica no contacto.

2.1.7 Pinos Moldantes

Os pinos moldantes servem para executar furos ou reentrâncias na peça vazada. Em fundição injetada, no caso da Tesco, os pinos moldantes têm a função de machos móveis, uma vez que são atuados transversalmente ao plano de apartação por cilindros hidráulicos. O dispositivo que os contém é amovível do próprio molde e designa-se de “gaveta” devido ao movimento de encaixe no molde por corrediças.

Eles são atuados/avançados na cavidade do molde antes do vazamento do metal onde ficam sujeitos ao jato do spray desmoldante com o objetivo de evitar que o alumínio “agarre” na sua superfície e promover a sua lubrificação, e recuam à posição inicial após terminada a solidificação.

Os furos produzidos por estes pinos em moldação permanente podem admitir tolerâncias dimensionais e ajustamentos mais exatos que nos outros tipos de moldações. Por forma a facilitar a extração dos mesmos da peça devem ser atribuídos ângulos de saída ou inclinação consoante a profundidade e o diâmetro do furo.

2.1.8 Pino squeeze

O pino squeeze é um pino moldante móvel que funciona da mesma forma, porém é atuado na direção de encosto ou fecho das moldações. É atuado por um cilindro hidráulico e pode ser removido do molde.

2.1.9 Força de fecho das moldações

A força de fecho corresponde à força que o mecanismo da máquina de injeção deve suportar durante a fase de injeção sob pressão máxima (modo intensificador). O seu valor é obtido pelo produto da pressão máxima de injeção (bar) pela área da superfície projetada das cavidades do molde no plano da junta de fecho da moldação (cm²), cuja expressão analítica é a que se segue:

$$F (KN) = P(bar) \cdot A (cm^2) \quad (1)$$

Note-se que a seleção da máquina é feita com base na força de fecho, sendo que a capacidade de fecho da máquina nunca pode ser inferior à força de fecho calcula pela expressão anterior.

2.1.10 Pressão de injeção

A pressão de injeção depende do tipo de liga metálica que se pretende vazar por injeção, a tabela seguinte distingue a pressão de injeção de quatro ligas:

Tabela 2.1 - Ligas metálicas vs Pressão de injeção [2].

Liga Metálica	Pressão de Injeção
Ligas de Zinco	100 a 300 bar
Ligas de Alumínio	800 a 1200 bar
Ligas de Magnésio	700 a 1000 bar
Ligas de Cobre	800 a 1200 bar

2.1.11 Velocidade de injeção

A velocidade de entrada do metal na cavidade moldante depende da velocidade do pistão de injeção e das dimensões dos canais de ataque à peça.

Peças de maior dimensão, maior complexidade geométrica e espessuras reduzidas dependem de uma elevada velocidade de injeção para garantir a sua sanidade. A velocidade de entrada do metal fundido nos ataques normalmente variam de 10 a 60 m/s, sendo que para se atingir estas velocidades, a velocidade de injeção da máquina deve ser na ordem dos 10 m/s. Neste intervalo de velocidades dos ataques, é boa prática estabelecer a velocidade acima de 40 m/s.

A velocidade nos ataques é determinada pela razão entre o volume da cavidade moldante e o produto da área de seção de entrada dos gitos pelo tempo máximo de enchimento, a expressão seguinte demonstra o cálculo que deve ser feito [2]:

$$V [m/s] = \frac{V [mm^3]}{1000 \cdot S [mm^2] \cdot t [s]} \quad (2)$$

2.1.12 Dimensionamento das secções do sistema de enchimento

O sistema de enchimento deve ser projetado de modo a respeitar os propósitos para os quais é concebido, ou seja, conduzir o metal fundido para a cavidade moldante, facilitar o escoamento de gases e ar do interior da moldação a fim de assegurar o enchimento completo da peça e assegurar a transmissão da pressão ideal de compactação.

No caso da fundição injetada, a alimentação da peça não é feita com alimentadores devido à elevada velocidade de arrefecimento. Deste modo, a alimentação ou compensação da contração volumétrica é efetuada pelo canal de enchimento ou copo, graças ao efeito de compacidade provocado pela pressão de injeção sobre o metal vazado após o completo enchimento das cavidades da moldação.

O projeto do sistema de enchimento deve respeitar os princípios da mecânica dos fluidos, considerando o metal fundido como sendo um fluido no estado líquido a alta pressão regido pelos fundamentos hidrodinâmicos, no sentido de promover um escoamento não turbulento.

Para geometrias mais simples este estudo permite facilmente prever o modo como o escoamento do metal se desenvolve na cavidade moldante. Contudo, quando se tratam de formas mais complexas, que requerem a presença de pinos moldantes e envolvem variações de espessura e mudanças de direção, torna-se imprescindível a implementação de determinadas regras de traçado com objetivo de minimizar ângulos vivos, por exemplo, que fomentam a descolagem do fluxo de enchimento com turbulências associadas e consequentes cavitações na moldação.

A forma geométrica da secção dos canais de enchimento deve ser circular de modo a garantir o mínimo de perdas de pressão e a menor taxa de transferência de calor.

Outro parâmetro que tem obrigatoriamente de ser determinado no caso das máquinas para fundição injetada, está relacionado com a sua capacidade para fornecer determinado caudal volúmico de metal fundido à cavidade da moldação. Neste sentido, foram desenvolvidos os diagramas “P-Q²”, em que a pressão do metal e sistema hidráulico (P), é proporcional ao quadrado da velocidade de injeção, logo também proporcional ao quadrado de caudal volúmico (Q). No diagrama “P-Q²” está representada no eixo das ordenadas a pressão de bombagem (P) em Mpa de uma máquina hidráulica e no eixo das abcissas o caudal (Q²) em l/s.

Fazendo corresponder a cada pressão o valor do respetivo caudal ao quadrado é possível traçar a linha característica do funcionamento da máquina para determinada peça, sendo que a inclinação da reta pode variar de acordo com a pressão hidráulica, o diâmetro do êmbolo e a posição da válvula reguladora da injeção. A partir deste diagrama é possível associar a cada ponto de interseção a velocidade de enchimento (m/s), relativa à máquina de injeção, com que se pretende operar, e encontrar a área de secção mínima dos gitos de vazamento (mm²).

Outra forma de determinar a velocidade de enchimento seria a partir da seguinte expressão:

$$V [m/s] = 100 \cdot \frac{Q[l/s]}{S[mm^2]} \quad (3)$$

E o tempo de enchimento da cavidade (t) pode ser determinado pela razão entre o volume da peça incluindo o sistema de enchimento e o caudal pretendido:

$$t [mseg] = \frac{V[mm^3]}{Q[l/s]} \quad (4)$$

Sendo que o volume de cada peça é obtido da relação entre o seu peso e a densidade da liga metálica.

Na figura que se segue é possível visualizar um diagrama P-Q² para determinada máquina de injeção, note-se que quanto maior for o diâmetro do pistão de injeção, menor será a pressão que é necessário exercer para injetar determinado caudal de metal, e menor será o declive da reta característica da máquina [12] (ver figura 2.1).

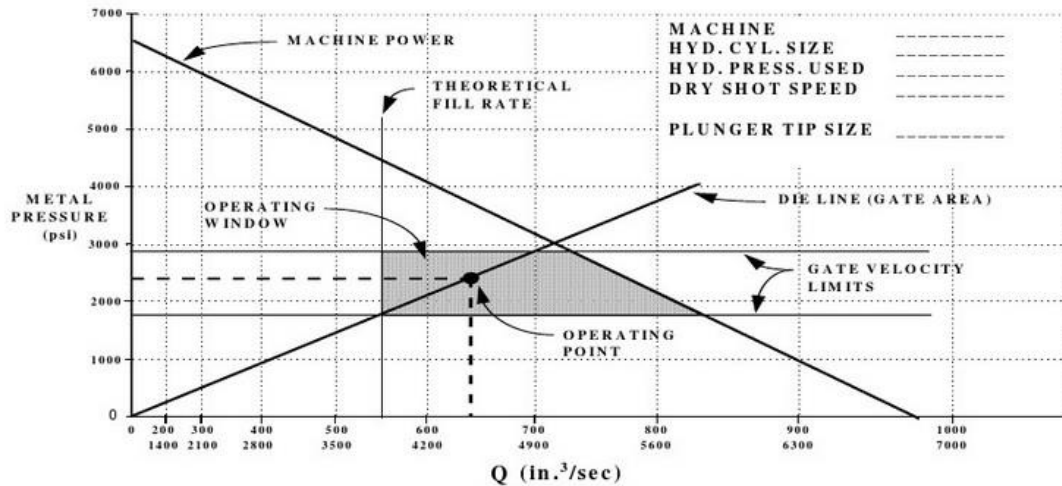


Figura 2.1 – Diagrama P-Q²

Relativamente ao sistema de enchimento, pode referir-se que quanto maior for a área de secção dos canais, maiores serão os caudais de enchimento necessários, o que implica menores velocidades e tempos de enchimento. Relativamente a estes parâmetros, podem tecer-se algumas considerações:

- A área de secção dos ataques deve ser o mais pequena possível de modo a facilitar o corte da peça, tendo em conta as dimensões internas da moldação;

- A boa sanidade dos fundidos é alcançada quando se utilizam velocidades de injeção elevadas. Para este tipo de máquinas e de moldações deve utilizar-se uma velocidade na ordem dos 40 m/s, considerando como limite máximo e mínimo, velocidades de 60 e 30 m/s respetivamente;

- Um tempo de enchimento inferior é propício a um bom acabamento superficial, devido às elevadas velocidades de injeção praticadas e aos reduzidos tempos de solidificação. Neste caso é aconselhável admitir valores de enchimento na ordem dos 0.040 segundos.

Como regra de traçado devem ser projetadas pequenas reduções progressivas das secções desde o canal de injeção até aos ataques à peça, à medida que o perfil se altera ou se muda de direção. Relativamente à espessura dos ataques, é praticamente correto admitirem-se valores entre 0,2 e 0,8 mm.

Pode concluir-se que uma maior área de secção no canal de injeção proporciona uma velocidade de enchimento mais baixa, de acordo com a máquina de injeção utilizada. E que as reduções sucessivas de área de secção garantem um enchimento pressurizado, evitando assim a retenção de ar ao longo dos canais do sistema de enchimento.

2.1.13 Masselotes

As *masselotes* são pequenos reservatórios de metal no sistema de enchimento situados acima da cavidade da peça e antes das alhetas arrefecedoras (*chillvents*).

São projetados com a finalidade de promover a redução da velocidade de escoamento do metal, acelerando o processo de solidificação até ao *chillvent* de modo a impedir a solidificação de metal no canal do sistema de vácuo e conseqüentemente o seu entupimento. Também funcionam como bolsas para retenção de metal à entrada das saídas de ar no sentido de promover a limpeza das impurezas causadas pela lubrificação e para facilitar o escoamento de ar do interior da cavidade da peça.

2.1.14 Temperatura do molde

A temperatura do molde é um parâmetro que deve ser controlado de modo a manter a temperatura mais ou menos constante ao longo dos ciclos de funcionamento da máquina.

Quando a temperatura do molde é muito elevada, o processo de arrefecimento e solidificação será mais demorado, aumentando a probabilidade de se obterem fundidos com más propriedades mecânicas e pior acabamento superficial. No caso da temperatura do molde ser muito baixa, a velocidade de arrefecimento será maior, com possibilidade de formação de gotas frias e defeitos de enchimento.

Existem vários fatores que provocam o aumento da temperatura do molde, estando normalmente relacionados com o aumento da temperatura de vazamento, maior frequência de ciclos, maior peso do fundido, paredes da peça mais espessas, quantidade insuficiente do químico anti-aderente, sendo que a própria geometria da cavidade moldante pode conduzir a gradientes térmicos indesejáveis e ao aumento da temperatura do molde.

O controlo rigoroso da temperatura do molde é uma operação praticamente impossível em ambiente industrial. No caso da Tesco são tomadas algumas medidas práticas nesse sentido, efetuando-se um pré aquecimento por chama direta do molde até uma temperatura próxima da de funcionamento em todas as trocas de molde, antes de dar início à produção, o que permite reduzir o número de peças inaceitáveis durante o aquecimento da máquina. Durante o funcionamento, quando a máquina atinge o ritmo de produção normal, com o sistema de refrigeração e spray, a temperatura do molde mantém-se mais ou menos constante ao longo do tempo.

2.1.15 Sistemas de arrefecimento

No caso dos moldes metálicos o seu arrefecimento é feito por linhas de água, ou seja, nas secções da moldação adjacentes às secções espessas da peça existem canais pelos quais se dá a circulação forçada de água. Estes canais devem ser inspecionados e limpos pela manutenção sempre que haja uma troca de molde, a fim de se evitar possíveis entupimentos.

Como medida preventiva, o operador e ou o responsável pelo setor da fundição deve regular/verificar manualmente o caudal de água que passa nas diversas secções do molde, através de um medidor de caudal durante um ciclo completo da máquina. Deve também verificar-se se existem fugas de água no circuito e na superfície de fecho do molde, sendo que nunca deve haver contacto da água com o metal vazado, caso contrario haverá forte possibilidade de ocorrer uma explosão de vapor. A temperatura da água também deve ser controlada à entrada, permitindo de certa forma avaliar o desempenho do sistema de refrigeração instalado. Este sistema funciona em circuito fechado, e é constituído por dois tanques, um para a água fria e outro destinado à água quente, e por uma torre de refrigeração. Deste modo, a água fria que entra e arrefece o molde, sai quente e é conduzida ao reservatório de água quente, posto isto, é feita passar pela torre de refrigeração onde é arrefecida e posteriormente armazenada no reservatório de água fria.

Na cavidade moldante, mais propriamente na zona superior do fundido, também é necessário um sistema de arrefecimento, que promova a rápida solidificação do metal, evitando o risco de entupimento do canal do sistema de vácuo do molde. Este arrefecimento é feito por alhetas arrefecedoras ou *chillvents*, de menor espessura de metal e maior área de contacto, aumentando assim a condutibilidade térmica nesta zona.

Um outro sistema que também funciona como meio de arrefecimento é o spray da cassete de desmoldante, que é constituído por vários bicos ejetores direccionados para as zonas da cavidade moldante sujeitas a temperaturas mais elevadas. Determinados bicos apenas ejetam a mistura do desmoldante, enquanto outros só pulverizam ar.

2.1.16 Vida do molde

O tempo de vida útil de uma moldação permanente está diretamente relacionado com o número de injeções que esta permite, satisfazendo os requisitos necessários para a boa formação do fundido.

Existem vários fatores/condições que influenciam a vida do molde, eles são:

- A temperatura de vazamento, que quanto mais alta for mais elevada será a temperatura do molde, conduzindo a um rápido enfraquecimento do aço de que é feito;

- A geometria da peça, ou seja, zonas da peça de maior espessura requerem maior capacidade de dissipação de calor por parte do molde, sendo que quanto maior for o gradiente de temperaturas, menor será o tempo de duração do molde;

- Os modos de arrefecimento, no caso do molde arrefecido a água, o processo será mais eficiente embora a vida do molde seja mais afetada do que no caso do arrefecimento a ar (susceptibilidade de empenos);

- Os ciclos de aquecimento, ou seja, a temperatura do molde deve ser mantida mais ou menos constante em funcionamento contínuo;

- O tempo de ciclo, que quanto menor, maior será a temperatura do molde;

- A pressão e velocidade de injeção;

- O pré-aquecimento do molde de modo a evitar choques térmicos, promove o regime de equilíbrio, reduzindo o número de rejeitos nas primeiras peças;

- O revestimento das paredes da cavidade com substância química anti aderente, sendo que esta tem obrigatoriamente que ser inerte relativamente ao metal fundido e não reagir nem libertar gases. O seu propósito é evitar a erosão e soldadura do metal fundido na cavidade moldante. No Tesco é utilizado o “Metalstar ASW-102” Antilotfett/Anti-solder-wax;

- O material do molde;

- A manutenção do molde e o modo de limpeza;

- O seu acondicionamento;

- O sistema de enchimento, que não deve ser propício a turbulências durante o vazamento;

- O modo de operação, quanto maior for o grau de automatização do sistema, mais facilmente se garante a uniformidade do processo;

- O projeto do molde, nomeadamente, regras de traçado que permitam uma menor variação das espessuras das paredes minimizam o efeito da fadiga térmica resultante dos fenómenos de aquecimento e arrefecimento sucessivos, que é propenso ao aparecimento de fendas. O projeto dos raios de saída ou concordância também interferem no número de peças boas que o molde permite obter. Normalmente devem projetar-se inclinações menores para a superfície externa do molde do que para a superfície interna, devido à contração volumétrica da peça. É prática comum usar uma inclinação de 5°, deixando 2° para a superfície externa do molde e 3° para a interna, sendo que raios de saída menores reduzem o número de peças boas que o molde permite obter entre duas manutenções consecutivas;

- A função destinada para a peça também poderá influenciar a duração de um molde. Se a sua função for essencialmente estrutural não atribuindo grande relevância ao acabamento superficial, o molde poderá continuar a ser utilizado depois de ser atingido o número de vazamentos correspondente ao seu fim de vida.

2.1.17 Material do molde

Em fundição injetada de Alumínio, especialmente para grandes cadências de produção, são normalmente utilizados moldes de aço devido à elevada resistência que transmite, à sua soldabilidade e facilidade de reparação relativamente a moldes feitos de outros materiais.

Os moldes existentes na Tesco são feitos em dois tipos de aço, um designa-se de “Dievar red 160” e outro de “1.2367.supra”.

Segundo a fonte citada, a ordem de grandeza da vida das moldações metálicas sem reparação na fundição injetada de ligas de Alumínio pode variar de 100.000 a 250.000 injeções [1]. Contudo, verifica-se que na prática quando são realizadas as devidas manutenções, facilmente se conseguem fundir 600.000 peças com o mesmo molde.

2.1.18 Troca de molde

Sempre que se conclui a produção de uma série de peças é necessário trocar o molde da máquina. Isso obedece a um procedimento próprio que se apresenta no anexo IV.

2.1.19 Tratamento do banho de alumínio

Esta prática é realizada com o objetivo de minimizar o teor de hidrogénio e impurezas não metálicas presentes no banho. Com este tratamento é possível minimizar a quantidade de escória dissolvida no metal fundido, e a quantidade de gases libertados pelo metal no interior da cavidade moldante.

Nesse sentido, são utilizados filtros nas entradas dos fornos, que devem ser substituídos regularmente, são realizadas operações de limpeza dos fornos com recurso a um tratamento específico do banho, com pastilhas e pó de azoto, que permitem a

desgaseificação do metal e fazem com que as impurezas da liga metálica subam à superfície do banho e possam ser removidas.

2.2 Fundição Injetada

O processo de fundição injetada tem sido alvo de constante desenvolvimento quer a nível de equipamentos, materiais, procedimentos de fabrico e tecnologia implementada. Posto isto, pode ser considerado dos processos de fundição, aquele que consente maior nível de automatização. Paralelamente permite obter fundidos com o maior grau de precisão a um ritmo de produção elevado.

Neste processo, o metal fundido é introduzido sob pressão no interior da cavidade moldante. Quando a cavidade fica preenchida de metal, existe uma fase de compactação por ação dessa mesma pressão que compensa a contração volumétrica e promove o enchimento completo.

As meias moldações estão acopladas aos pratos de uma prensa de fecho/abertura, que por sua vez é atuada por um mecanismo de “tesoura”. O prato fixo suporta a parte do molde que está fixa na máquina, e encontra-se do lado do pistão de injeção. O prato móvel sustenta a parte do molde que se move relativamente à parte fixa por ação do mecanismo de fecho da máquina, sendo a meia moldação fixada ao prato por pinos de tração. A parte móvel do molde possui ainda um conjunto de pinos extratores cuja função é extrair/desmoldar a peça fundida da cavidade moldante após a abertura da máquina.

Também existem moldes cuja parte móvel é equipada com dispositivos hidráulicos de acionamento de “gavetas”, tecnicamente designadas de “core”, segundo os 3 eixos principais, que fazem avançar/recuar os pinos moldantes.

A máquina de injeção poderá conter os seguintes equipamentos consoante o grau de automatização [1]:

- Molde metálico;
- Forno de manutenção para manter a liga metálica em fusão;
- Prensa de moldação por injeção;
- Prensa de corte dos gitos e rebarbas;
- Robot com dispositivo de ejeção de spray desmoldante;
- Robot extrator da peça que a transporte até ao posto de corte dos gitos e rebarbas, com a possibilidade de realizar esta ultima tarefa autonomamente.

2.2.1 Requisitos e características das máquinas de injeção

Existem determinadas condições que este tipo de máquinas deve respeitar, sendo que as mais importantes são:

- Possibilitar e garantir os respetivos movimentos de fecho e abertura da parte móvel do molde;
- Permitir a correta montagem das moldações, garantir a estabilidade necessária e a segurança do processo;
- Conter os dispositivos de injeção e de regulação da quantidade de metal a vaziar;
- Não deve ser atacada pela liga para não se danificar nem contaminar a própria liga metálica com elementos indesejáveis.

Os parâmetros que caracterizam as máquinas de injeção e por isso devem ser tidos em conta na seleção da máquina para operar com determinado molde, sendo estes os seguintes:

- força de fecho das moldações;
- capacidade máxima e mínima de injeção correspondente ao volume de metal injetado;
- curso de abertura e fecho, que determina as dimensões máximas e mínimas do molde que pode ser montado na máquina;
- dimensões do prato de fixação da meia moldação;
- existência ou não de dispositivos de acionamento de pinos moldantes;
- número de ciclo por hora;
- pressão de injeção;
- velocidade de injeção;
- tipo de vazamento (por coquilha ou caleira);
- capacidade da coquilha e material de que é feita;
- tipo de construção da máquina.

2.2.2 Tipos de máquinas

Relativamente aos tipos de máquinas mais utilizados no processo de fundição injetada, podem-se distinguir as máquinas de câmara quente e de câmara fria.

Nas máquinas de câmara fria o forno de manutenção é independente da própria máquina, ou seja, existe uma colher (a coquilha) que transfere o metal mecanicamente para o orifício de vazamento da camisa da máquina onde circula o pistão. O pistão avança e injeta o metal na cavidade moldante através da camisa da parte fixa do molde. O metal é injetado sob uma pressão bastante elevada contra a zona de impacto na cavidade da parte fixa do molde, cuja geometria permite que o metal ascenda pelos ataques à peça. Após a solidificação da peça, o pistão recua, o molde abre, os pinos extratores desmoldam a peça, a pinça do robô extrator pega na peça pelo copo de enchimento, o spray desmoldante atua na cavidade, o molde fecha e o ciclo repete-se. De seguida apresenta-se uma imagem ilustrativa do modo de injeção que caracteriza uma máquina deste tipo.

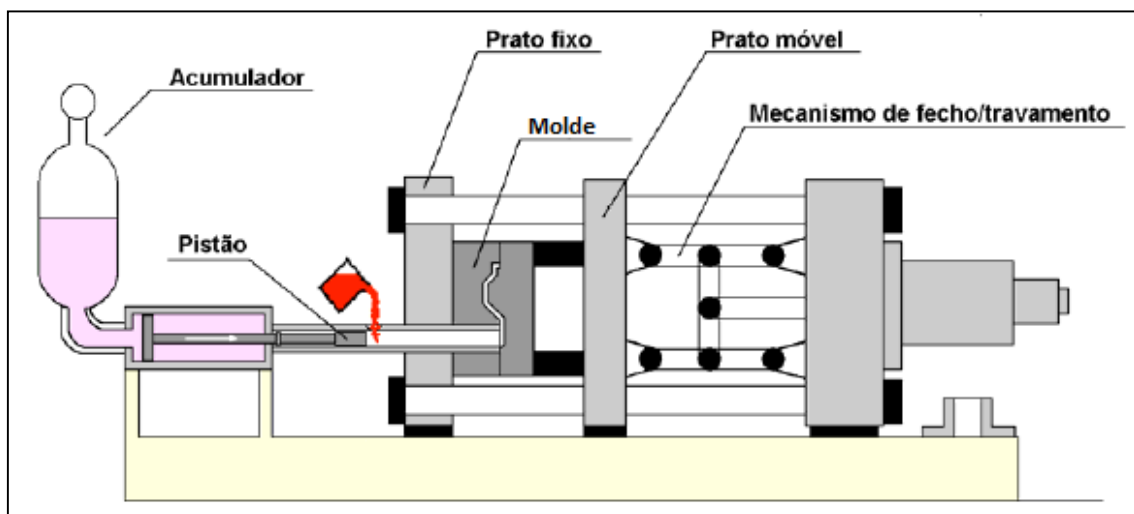


Figura 2.2 – Máquina de injeção de câmara fria [2].

Na Tesco apenas existem máquinas de câmara fria uma vez que a fundição apenas está destinada a ligas de Alumínio cujas temperaturas de fusão são relativamente elevadas quando comparadas com as ligas utilizadas nas máquinas de câmara quente. Contudo, a exposição à atmosfera do metal injetado conduz ao aprisionamento de ar e conseqüente turbulência durante o vazamento, pelo que a probabilidade de formação de porosidades internas nos fundidos durante o enchimento e solidificação é elevada.

As máquinas de câmara quente distinguem-se das de câmara fria pelo facto de integrarem na própria estrutura o forno de manutenção, o que possibilita que o pistão se encontre parcialmente imerso no metal fundido, existindo uma ligação física entre o forno e a parte fixa do molde através do prolongamento da própria camisa. O pistão atua na direção vertical relativamente à máquina, sendo que a camisa tem sempre metal no seu interior.

A utilização deste tipo de máquinas é vantajosa na medida em que permite um menor contacto com a atmosfera, minimizando a quantidade de ar que normalmente é injetado juntamente com o metal, e os problemas associados à turbulência. Contudo, o facto do dispositivo de injeção estar permanentemente em contacto com o metal líquido faz com que este se degrade mais rapidamente, e apenas seja possível trabalhar com ligas de baixo ponto de fusão (ligas de magnésio e de alumínio). A figura que se segue ilustra o modo de injeção neste tipo de máquinas:

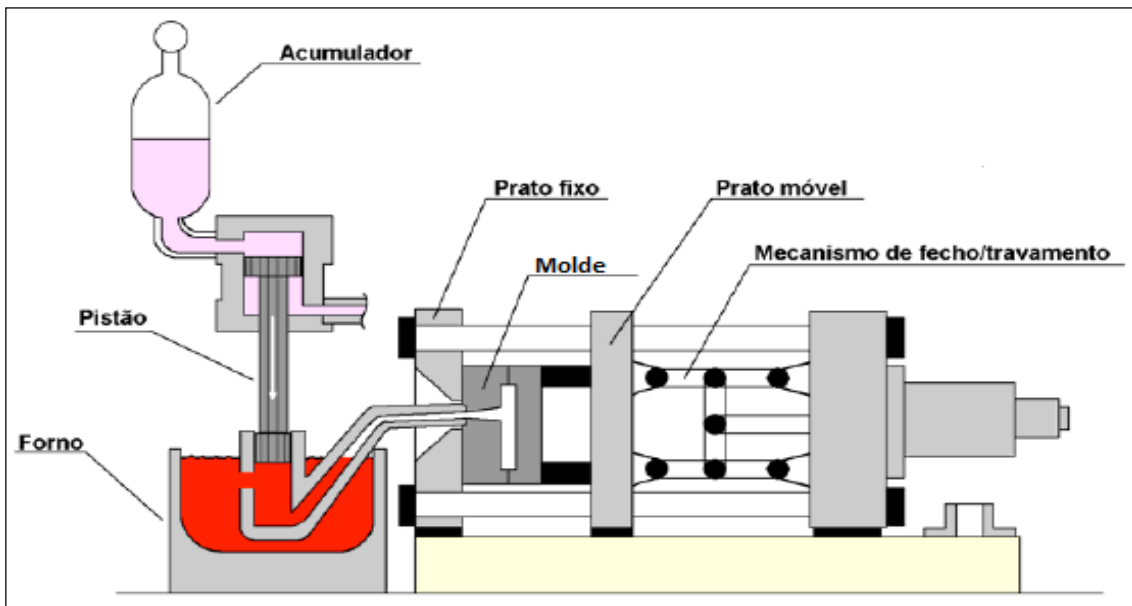


Figura 2.3 – Máquina de injeção de câmara quente [2].

A máquina de fundição injetada utilizada para fundir as peças analisadas neste trabalho é uma Buhler 660 EVOLUTION, que se encontra representada na figura seguinte:



Figura 2.4 – Buhler 660 EVOLUTION 66 Compact.

Na tabela 2.2 encontram-se discriminadas as características deste modelo.

Tabela 2.2 – Características da máquina de injeção. [3]

Caraterística	Gama de valores admissível
Força de injeção (modo dinâmico)	288KN
Força de injeção (modo intensificador)	760KN
Ø Pistão	70 – 120 mm
Curso de injeção	0 – 300 mm
Comprimento do pistão	700mm
Massa Al vazada (Taxa de enchimento 60%)	Min: 3.6Kg Máx: 10.7Kg
Área projetada do pistão	ØMin:334cm ² ØMáx:982cm ²
Área máxima projetada para Pressão de injeção de 400Bar	1650cm ²
Pressão mínima de injeção especificada	672Bar
Pressão máxima de injeção especificada	1975Bar
Força de fecho	6600KN
Dimensões do prato	1220 x 1220mm
Distância entre as guias (Tie bars)	780 x 780mm
Comprimento do molde	360 x 900mm
Curso de abertura do molde	800mm
Força de injeção	225, 350KN
Curso de injeção	175, 165mm
Peso da máquina	26500Kg
Dimensões da máquina	8.1 x 3.1 x 3.5m

2.2.3 Variáveis do processo

O processo de fundição injetada está dependente de diversos parâmetros que se explicam de seguida:

- Pressão de injeção – Durante o enchimento da cavidade moldante é possível definir 3 etapas em que o pistão se desloca a diferentes velocidades. Na primeira etapa o pistão empurra lentamente o metal fundido no interior da camisa, de modo a facilitar a expulsão do ar contido e evitar o seu envolvimento no metal. Posto isto, processa-se a segunda fase, em que o metal é injetado muito rapidamente no interior da cavidade moldante, preenchendo-a totalmente. E por último atua a fase da compactação em que a pressão aumenta com o objetivo de compensar a contração de solidificação do metal, evitando o aparecimento de possíveis rechupes ou porosidades devido à retenção de ar no seio do fundido. Normalmente neste tipo de máquinas de camara fria a pressão máxima de compactação pode chegar aos 865 Bar. Na figura 2.5 pode visualizar-se um gráfico que representa a variação da pressão ao longo das 3 fases de injeção de um programa na máquina Buhler 660.

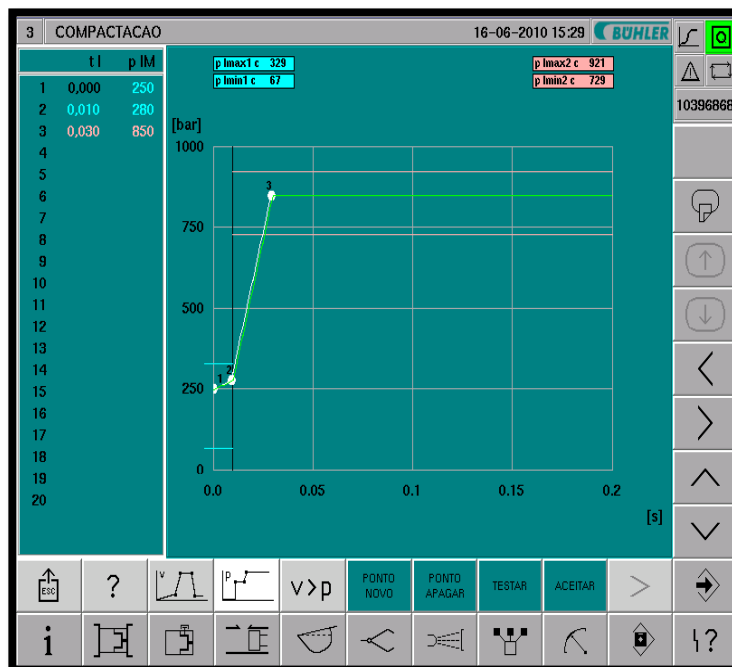


Figura 2.5 – Gráfico de pressões de um programa de fundição

- Velocidade de injeção – Relativamente à velocidade de injeção da primeira fase, sabe-se que esta deve ser a velocidade necessária para que o metal fundido chegue a meio da secção dos ataques à peça sem que tenha ar retido. Normalmente a velocidade nesta primeira fase deve ser de cerca de 0.12 m/s, e o tempo de enchimento correspondente de cerca de 1.8416 segundos, dependendo da máquina e do programa do molde instalado.
- A velocidade do metal na segunda fase corresponde ao enchimento da moldação e é de aproximadamente 2 m/s, dependendo da máquina e da espessura da peça a vazar. Sabe-se que quanto mais elevada for a velocidade da segunda fase, melhor qualidade terá a peça fundida. Porém, caso esta velocidade seja muito elevada, aumenta o grau de turbulência, e consequentemente de erosão/cavitação nos canais de enchimento degradando a cavidade moldante. Na figura 2.6 encontra-se representado um gráfico de velocidades de um programa de injeção para um dos modelos fundidos na Buhler 660, neste gráfico é possível relacionar a velocidade do pistão com o respetivo curso na câmara de injeção da máquina.

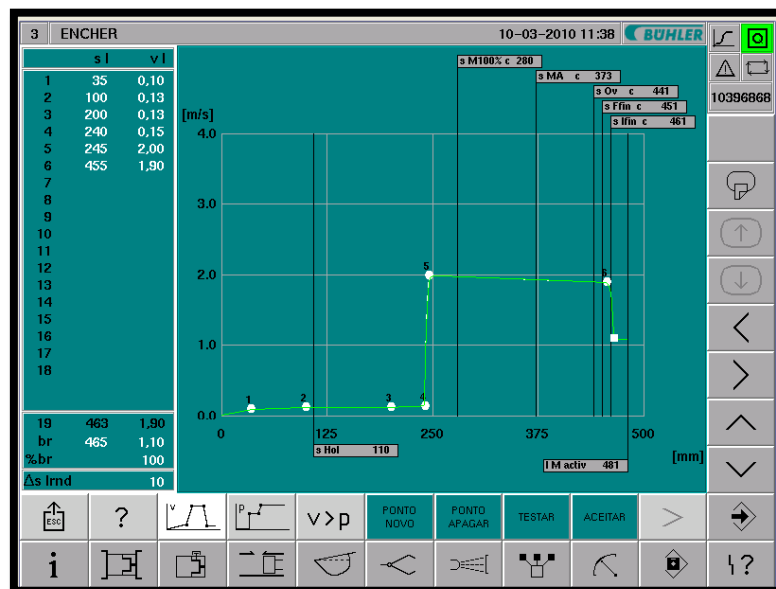


Figura 2.6 – Gráfico de velocidades de um programa de fundição.

- Força de fecho – A força de fecho é um parâmetro decisivo na seleção da máquina de injeção, pois esta deve assegurar a estanquicidade do molde, principalmente quando o modelo a fundir requiere elevadas pressões de

injeção. Deste modo, consegue-se evitar correr o risco do molde não permanecer corretamente fechado aquando da injeção, reduzindo a possibilidade de surgir *flash* nas zonas da linha de junta, e que não seja projetado alumínio para o exterior. A força de fecho deve ser proporcional ao produto da pressão máxima de injeção pela área projetada da peça e sistema de enchimento.

2.2.4 Defeitos de fundição

No processo de fundição injetada os defeitos mais comuns podem surgir sob a forma de:

- Porosidades – As porosidades representam espaços vazios no seio ou à superfície do fundido que surgem devido ao aprisionamento de ar na câmara de injeção durante o vazamento, ao aprisionamento de ar durante o enchimento da cavidade, devido à ação do spray desmoldante, à dificuldade em libertar os gases que se formam devido à presença de hidrogénio no próprio metal fundido, precipitando sob a forma de bolhas gasosas durante o arrefecimento e solidificação;
- Rechupes – Facilmente se confundem com porosidades, embora sejam normalmente de maiores dimensões. A sua presença deve-se à contração do volume de metal durante o processo de solidificação, quando a fase de compactação não se processa devidamente, ou quando o metal solidifica mais cedo que o normal;
- Fraturas/fissuras – Ocorrem quando o metal fundido contrai subitamente já no fim do processo de solidificação, existe maior probabilidade de ocorrência em zonas de pontos quentes sujeitas a tensões de contração volumétrica;
- Fraturas nas entradas – Quando estas fissuras ocorrem nas zonas dos ataques à peça ou entradas;
- Gotas frias – Representam pequenas porções de metal que são projetadas contra a cavidade moldante durante o enchimento, solidificando. Assim, surge como que uma inclusão metálica de forma aproximadamente

esférica à superfície do fundido, pois durante o enchimento da cavidade o metal líquido já não as consegue dissolver;

- Mau enchimento – Zonas das peças que não se formaram ou apresentam forma diferente da pretendida, por falta da presença de metal. A sua formação depende da temperatura de vazamento e do tempo de enchimento, refletindo-se no modo como o escoamento do metal é orientado no enchimento da cavidade e consecutivamente da direccionalidade de solidificação.

3 PROJETO PARA FUNDIÇÃO

3.1 Sistema de alimentação

O arrefecimento de um metal, desde a sua temperatura de fusão até à temperatura ambiente é normalmente acompanhado por uma redução de volume significativa, que em fundição se designa por contração. Esta contração ocorre em três estágios diferentes, e assume designações diferentes: contração no estado líquido, contração de solidificação, e contração no estado sólido [4].

Contração líquida – devida ao arrefecimento do metal no estado líquido até ao início da solidificação.

Contração de solidificação – corresponde à redução de volume que sucede aquando da transição do estado líquido para o estado sólido.

Contração sólida – variação de volume que ocorre durante o arrefecimento no estado sólido, desde a temperatura de solidificação até à temperatura ambiente.

A contração de solidificação caracteriza-se por ser a mais difícil de controlar, variando o valor de contração para os diversos metais ou ligas consoante a sua temperatura de solidificação. Esta é responsável por defeitos de solidificação, nomeadamente cavidades internas ou com ligação ao exterior, de dimensões consideráveis, que em fundição se denominam de rechupes. Paralelamente poderão surgir porosidades de reduzidas dimensões originadas por gases dissolvidos no metal fundido ou devidas a inclusões não metálicas, escórias ou partículas de material refratário, estes embora sejam defeitos idênticos aos anteriores não podem ser confundidos pois têm origens completamente diferentes.

Já a contração no estado sólido é responsável pelas dimensões finais da peça fundida, podendo o seu efeito estar na origem do aparecimento de fissuras na mesma.

3.2 Sistema de enchimento/injeção

O sistema de enchimento é constituído por um conjunto de canais presentes na moldação, por onde o metal fundido é vazado sob pressão e conduzido até à cavidade da moldação, onde o metal solidifica até tomar a forma da peça.

A sanidade da peça vazada no que respeita à compensação da contração volumétrica é conseguida através da fase de compactação, em que é exercida uma pressão elevada no pistão da máquina de injeção após a cavidade moldante estar completamente preenchida de metal.

Para isso o sistema de enchimento deve ser projetado de acordo com determinados requisitos:

- Deve promover-se uma solidificação dirigida, de modo a fazer com que determinadas zonas da peça arrefeçam mais rapidamente que o normal, conseguindo-se que a última zona a solidificar seja a dos ataques à peça. Isto é possível caso as linhas de água sejam corretamente projetadas no interior do molde, nomeadamente nas zonas mais espessas, sujeitas a temperaturas mais elevadas;
- Os ataques e o copo de enchimento devem solidificar depois da peça, ou parte da peça que está a alimentar e ser a última zona a solidificar (regra dos módulos de arrefecimento);
- Os canais de enchimento devem ser corretamente dimensionados de modo a otimizar o fluxo de metal na cavidade da peça e promover a direccionalidade do processo de solidificação;
- A massa de metal vazada na câmara de injeção deve ser suficiente para compensar a contração volumétrica (regra do volume de solidificação);
- Contrariar o efeito de vácuo que se opõe à compactação do metal fundido no interior da cavidade.

O dimensionamento do sistema de enchimento deve satisfazer a seguinte regra da contração volumétrica [4].

Deve verificar se na terceira fase do enchimento, a compactação, a ação da pressão compensa as faltas de material devido à contração do metal durante o processo de solidificação. Nesta fase, é aplicada uma subpressão ao pistão de injeção, por efeito do intensificador, que consiste num acumulador de azoto. Esta fase caracteriza-se pela

elevada pressão de compactação (aproximadamente 860 bar), em que a cavidade do molde está preenchida de metal, e o pistão exerce maior força no sentido de compactar melhor o metal durante um intervalo de tempo de cerca de 5 segundos a uma velocidade desprezável. O efeito da compactação reflete-se na variação da espessura da bolacha do sistema de enchimento. Existe uma relação que permite determinar o volume de metal necessário para compensar a contração da liga durante a solidificação [6]:

$$V_a \geq K \times C \times V_p \quad (5)$$

Em que:

V_a é o volume necessário (variação da bolacha);

K é um coeficiente de segurança;

C é a contração volumétrica de solidificação da liga (%);

V_p é o volume do cacho.

Na tabela 3.1 apresenta-se o valor da contração volumétrica ou de solidificação para os principais metais ou ligas metálicas processados por fundição.

Tabela 3.1 - Valores da contração de solidificação para vários metais e ligas metálicas [4].

Ligas metálicas/Metais	Contração de solidificação C (%)
Ligas de alumínio	7 – 8
Ligas de magnésio	4 – 5
Zinco	4,7

3.2.1 Sistema de injeção

- Primeira fase do enchimento

A velocidade da primeira fase é a velocidade com que o pistão percorre o espaço disponível na camisa de injeção até atingir o ponto em que esta se encontra completamente cheia. Nesta fase o metal é empurrado para a secção de ataque a velocidades muito baixas, sendo a qualidade do fundido fortemente influenciável por esta variável do processo.

A velocidade da primeira fase do enchimento pode ser determinada através da seguinte equação [5]:

$$Vl_{f_{1^{a}fase}} = 22.8x \left[\frac{100 - \%F}{100} \right] x \sqrt{dM} \quad (6)$$

(E. A. Herman)

Em que:

- K é uma constante de valor igual a 22.8;
- %F corresponde à taxa de enchimento;
- dM é o diâmetro do pistão da máquina de injeção.

Note-se que a velocidade depende do diâmetro do pistão e da taxa de enchimento, sendo que para taxas de enchimento inferiores a 50% este cálculo teórico da velocidade permite obter valores menos precisos, contudo é o que permite prever a velocidade correspondente ao escoamento de metal menos propício à retenção de ar. Isto porque à medida que o pistão avança no interior da camisa e empurra o metal, o escoamento tem tendência a desenvolver a forma de uma onda, que normalmente impede que o ar contido na camisa se escape, levando à formação de porosidades no fundido.

Assim, a velocidade ideal da primeira fase deve ser calculada tendo em conta que o metal deve alcançar a secção de ataque, correspondente ao fim da primeira fase, sem que exista ar retido no metal.

- Taxa de enchimento

É a relação entre o volume de metal vazado na camisa e o volume da própria camisa correspondente à posição em que o pistão está recuado. A taxa de enchimento pode ser calculada a partir da seguinte expressão [5]

$$\%F = \frac{1000 \times ml}{\rho Msol \times 0.95 \times Adm \times LMactiv} \quad (7)$$

Em que:

- m_l corresponde à massa de metal vazado;
- ρ_{Msol} é a densidade do metal;
- 0.95 representa um coeficiente de segurança;
- A_{dm} é a área do pistão;
- L_{Mactiv} corresponde ao comprimento ativo da camisa.

- Segunda fase do enchimento

Teoricamente, a segunda fase tem início quando o metal atinge a secção de alimentação, estando a camisa de injeção completamente cheia.

Desta forma, é então possível calcular este volume de metal, que corresponde ao volume das peças e das masselotes menos o volume da bolacha no impacto. E assim determinar o comprimento necessário para se processar a segunda fase do enchimento. O volume do cilindro é calculado através da seguinte expressão:

$$Volume\ cilindro = \acute{a}rea\ cilindro \times comprimento\ cilindro \quad (8)$$

Em que a área do cilindro é a seguinte:

$$\acute{A}rea\ cilindro = \frac{\pi \times \emptyset_{pist\tilde{a}o}^2}{4} \quad (9)$$

Desta relação pode determinar-se o comprimento do cilindro:

$$Comprimento\ cilindro = \frac{Volume\ cilindro}{\frac{\pi \times \emptyset_{pist\tilde{a}o}^2}{4}} \quad (10)$$

A partir da diferença entre o comprimento do cilindro e o comprimento ativo da camisa de injeção, ou comprimento útil, pode determinar-se o ponto de entrada da segunda fase. Na realidade a transição da primeira fase para a segunda não é instantânea, devendo por isso adicionar-se um curso de 25 a 50 mm. Note-se que o

curso de entrada da segunda fase não deve ser muito antes do ponto ideal, caso contrário proporcionará um volume extra de ar a extrair da cavidade. A equação que nos permite determinar o curso de entrada da segunda fase é a seguinte [5]:

$$\text{Entrada 2ª fase} = L_{\text{Mativ}} - (L_{\text{2ª fase}} + \text{transição}) \quad (11)$$

Atingido o ponto do início da segunda fase, a velocidade do pistão aumenta substancialmente de modo a proporcionar o enchimento completo da cavidade com metal num curto espaço de tempo, sendo esta a variável de maior influência no funcionamento da máquina de injeção. A relação que permite determinar a velocidade da segunda fase é a que se segue [5]:

$$V_{l_{2ª \text{ fase}}} = \frac{mA}{\rho_{\text{Msol}} \times tF \times dM \times 0.785} \quad (12)$$

Sendo que:

- “mA” representa a massa de metal injetada após a alimentação, correspondente ao conjunto peça com as masselotes;
- “ ρ_{Msol} ” é a densidade do metal;
- “tF” corresponde ao tempo de enchimento da cavidade;
- “dM” designa a área do pistão.

A velocidade teórica à qual o metal transpõe a secção de alimentação nos ataques, é dada pela expressão abaixo [5]:

$$V_{mA} = \frac{100 \times AdM \times vC}{SA} \quad (13)$$

Em que:

- “AdM” é a área do pistão;
- “vC” representa a velocidade do pistão;
- “SA” é a área de secção de alimentação (mm²).

Deve ter-se em consideração como regra geral para ligas de Alumínio em situações de funcionamento normais, valores de VmA de 20 a 60m/s, e de 15 a 30m/s quando o sistema de vácuo é ativado.

- Terceira fase de enchimento)

No momento em que a cavidade moldante se encontra totalmente cheia, dá-se o fim da segunda fase, a velocidade do pistão diminui drasticamente e a pressão aumenta. Ou seja, inicia-se a fase de compactação, em que o pistão pressiona o metal na cavidade à medida que se processa a solidificação do cacho.

Nesta fase a intensificação da pressão sobre o metal permite compensar a contração volumétrica que se ocorre durante a solidificação.

3.2.2 Tempo de enchimento

A temperatura do metal no forno de manutenção é uma variável dependente das características da peça que se pretende produzir.

Na prática o tempo de enchimento ideal permanece constante ao longo dos ciclos de produção, isto porque a máquina é ajustada de modo a manter este parâmetro o mais constante possível.

A expressão que permite determinar o tempo de enchimento é a seguinte [5]:

$$tF = A \times s^2 \times \left[\left(\frac{\Delta t}{2(tL - tF) + (\Delta t)} \right)^2 + \left(\frac{n \times (t0 + \Delta t_k)}{2(tL - tF) - n \times \Delta t_k} \right)^2 \right] \quad (14)$$

(B. Nogowizin)

Em que:

- “A” representa um coeficiente de segurança de 0.0433 (constante);
- “S” é a espessura média das paredes da peça (mm);
- “Δt” é a temperatura de sobreaquecimento do banho (°C);
- “tL” corresponde à temperatura de Líquidos (°C);
- “tS” é a temperatura de Sólidos (°C);
- “tF” designa a temperatura do molde (°C);

- “n” corresponde à fração de metal sólido admissível , sendo que para uma taxa de enchimento inferior a 50% se deve assumir uma fração de metal sólido de 0.7;

- “t0” representa um coeficiente de temperatura para o aquecimento do banho e capacidade calorífica de 352°C;

- “ Δt_k ” corresponde ao intervalo de solidificação (tL-tS) do metal ou liga.

Na tabela abaixo, encontra-se especificada a relação que existe entre a espessura mínima da peça e o respetivo tempo de enchimento:

Tabela 3.2 - Relação espessura da peça vs. Tempo de enchimento. [5]

Espessura da peça, S (mm)	Tempo de enchimento, tF (s)	
1.5	0.020	0.010-0.030
1.8	0.030	0.020-0.040
2.2	0.040	0.020-0.060
2.3	0.050	0.030-0.070
2.5	0.060	0.040-0.090
3.0	0.070	0.050-0.100
3.8	0.080	0.050-0.120
5.0	0.120	0.080-0.300

4 FERRAMENTAS INFORMÁTICAS DE SIMULAÇÃO

As ferramentas informáticas de simulação são atualmente imprescindíveis numa empresa de Fundição, nomeadamente no âmbito do projeto, na medida em que auxiliam o projetista no processo de conceção de novos moldes. Elas são caracterizadas pela sua versatilidade, facilidade de utilização e rapidez de cálculo. A vantagem da sua utilização reside no facto de permitirem simular todo o processo de vazamento e solidificação, ajudando o projetista a prever, identificar e quantificar potenciais defeitos de fundição, reduzir desperdícios de metal e otimizar o sistema de enchimento e alimentação, reduzindo o tempo envolvido em solucionar possíveis problemas, reduzindo a necessidade de retrabalho em ensaios práticos.

Estes instrumentos de simulação podem ser classificados como preventivos ou curativos. Dizem-se preventivos quando são utilizados na fase de projeto com o objetivo de prever potenciais defeitos que possam surgir, levando a uma redução do “time to market” do produto final, ou seja, do tempo que demora a um produto ser projetado até à sua produção em série. Quando os problemas ou defeitos persistem mesmo depois da fase de projeto, havendo a necessidade de alterar determinados parâmetros de processo, estas ferramentas também podem utilizadas com a finalidade de testar as alterações envolvidas por tentativa/erro, tratando-se então de instrumentos curativos porque são utilizados após falha.

O projeto do sistema de enchimento do fluxo de metal normalmente assenta nos fundamentos matemáticos de Navier-Stockes, sendo baseado no modelo de turbulência que mais se adequa ao processo em questão. Contudo, tem-se verificado que os softwares desenvolvidos mais recentemente se regem pela equação de Bernoulli da mecânica dos fluidos.

O que distingue e normalmente está na base da preferência de um destes softwares de simulação está relacionado com a base de dados dos materiais e suas propriedades e os coeficientes de transferência de calor que admitem.

Dependendo do conteúdo das diversas aplicações de cada software, ou das variáveis que são capazes de simular, existem duas metodologias de cálculo, o Método dos Elementos Finitos e o Método das Diferenças Finitas.

4.1 Princípios teóricos das aplicações informáticas de simulação do processo de fundição

- Formação de porosidades

O modelo de cálculo envolvido na análise à formação de porosidades no software assenta nos seguintes princípios:

- Um aumento da fração crítica da fase líquida (CLF) significa que a passagem de metal nas secções em a fase líquida é menor que o valor da fração líquida (CLF), vai ser dificultada. Como consequência disto, a probabilidade de surgirem porosidades será maior;
- Quanto maior a diferença de densidades entre a temperatura de vazamento e a temperatura de solidus, maior será o valor da contração volumétrica da peça, e por isso, a probabilidade de surgirem poros de maiores dimensões também irá aumentar.

- Calor envolvido

A energia envolvida sob a forma de calor depende da temperatura de vazamento, do calor específico e do calor latente da liga metálica. O seu valor absoluto pode ser determinado a partir da seguinte expressão [9]:

$$\begin{aligned}
 \text{Calor} = & [(T_{\text{vazamento}} - T_{\text{solidus}}) \times \text{calor específico} \times \text{peso}] \\
 & + [\text{Calor latente } (Q_{cr}) \\
 & \times \text{peso (entre líquido e solidus)}] \\
 & + [\text{Calor latente } (Q_{eutético}) \\
 & \times \text{peso (ponto eutético)}]
 \end{aligned} \tag{15}$$

- Transferência de calor

Durante o processo de solidificação, o calor pode ser dissipado pelo molde pelos três processos de transferência de calor (convecção, condução e radiação). A taxa de transferência de calor é calculada da seguinte forma [9]:

$$\begin{aligned}
 \text{Taxa de transferência de calor} \\
 = & [(T_{\text{molde}} - T_{\text{inicial do molde}}) \\
 & \times \text{calor específico absorvido pelo molde}] \\
 & + [\text{área troca de calor por condução} \\
 & \times (T_{\text{metal}} - T_{\text{molde}}) \times \text{calor transferido por condução}] \\
 & + [\text{área troca de calor por radiação} \\
 & \times (T_{\text{metal}} - T_{\text{exterior}}) \times \text{coeficiente de radiação}]
 \end{aligned} \tag{16}$$

4.2 Softwares fundamentados no método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos caracteriza-se pela aplicação das equações de conservação na forma integral a todos os volumes de controlo que compõem o domínio de estudo. Nesta metodologia a solução final garante que a conservação de propriedades relevantes em cada volume de controlo, como a massa, a quantidade de movimento e a energia, se verifica na íntegra, qualquer que seja o domínio de controlo. A conservação de uma variável no interior de um volume de controlo pode ser determinada a partir da relação entre os vários processos com influência sobre a mesma, esta variação pode representar-se da seguinte forma:

$$\begin{array}{l} \text{Taxa de} \\ \text{variação de } \phi \\ \text{no VC com o tempo} \end{array} = \begin{array}{l} \text{fluxo líquido de} \\ \phi \text{ por convecção} \\ \text{no VC} \end{array} + \begin{array}{l} \text{fluxo líquido de} \\ \phi \text{ por difusão no} \\ \text{VC} \end{array} + \begin{array}{l} \text{taxa de geração} \\ \text{de } \phi \\ \text{no VC} \end{array}$$

Deste modo, a discretização característica do método dos elementos finitos em regime estacionário será realizada em função do integral desta equação diferencial:

$$\int_A \rho \phi \vec{u} \cdot \vec{n} dA = \int_A T \text{grad} \phi \cdot \vec{n} dA + \int_V S_\phi dV \quad (17)$$

Assim, todo o domínio da solução que se pretende analisar, será subdividido num número finito de volumes de controlo, formando uma malha que define as suas fronteiras ou limites. Neste caso, os nós computacionais, localizados no interior destes volumes de controlo, deixam de ser a unidade de cálculo, sendo que os volumes de controlo se ajustam aos limites ou contornos da geometria da peça [11].

4.3 Softwares fundamentados no método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é uma técnica geral para obtenção de soluções aproximadas de problemas físicos, que consiste em discretizar o domínio contínuo da solução, ou seja, dividir o domínio da solução num número finito de sub-domínios simples (elementos finitos) e utilizar princípios variacionais para obter uma aproximação da solução [6]. Este método numérico trata como as suas incógnitas os valores da variável dependente num número finito de localizações, os nós ou pontos, do domínio de cálculo. A informação contínua da solução exata é substituída por valores discretos (os pontos ou nós de cálculo), cujos valores calculados dependem de uma equação diferencial direta [7]. A metodologia dos elementos finitos permite obter resultados mais credíveis que a das diferenças finitas quando se pretende realizar uma simulação numa peça de geometria complexa com zonas de concentração de tensões. A vantagem reside no facto de possibilitar um refinamento da malha nestas zonas críticas (malha flexível), no entanto implica um elevado número de operações numéricas.

Este método revela-se mais fiável que o das diferenças finitas quando se pretende realizar uma análise de tensões ou determinar os pontos quentes de um fundido, porém requer maior memória RAM e maior tempo de processamento que no caso das diferenças finitas.

4.4 Softwares fundamentados em diferenças finitas

No método das diferenças finitas este conceito de malha flexível não é aplicável, pois utiliza malhas regulares, o que condiciona a credibilidade dos resultados obtidos nos domínios de geometria complexa. Porém, envolve um número relativamente inferior de operações numéricas e de maior simplicidade quando comparado com o método anterior.

A sua grande desvantagem deve-se à imprecisão dos resultados obtidos da simulação em zonas de paredes finas (menor espessura), devido a uma fraca ligação da malha com a geometria da peça. Ou seja, o facto de a malha ser constante e ortogonal

faz com que seja impossível que os contornos da peça com a moldação não fiquem bem definidos.

4.5 Softwares de simulação numérica comercializáveis

Atualmente existem vários softwares de simulação numérica disponíveis no mercado. Porém, nem todos permitem simular todos os processos de fundição.

Seguidamente são enunciados os mais conhecidos e comercializados no mercado:

- NovaFlow&Solid (volumes finitos) – Fundição em areia, fundição injetada, fundição “shell”, fundição em cera perdida;

- Flow-3D (diferenças finitas) – fundição em areia, fundição injetada, fundição semi-sólida, fundição por centrifugação, fundição em cera perdida;

- SolidCast, FlowCast (diferenças finitas) – Fundição em areia, fundição injetada, fundição em cera perdida;

- Magmasoft (diferenças finitas) – Fundição em areia, fundição injetada, fundição “Shell”, fundição em cera perdida;

- Procast (elementos finitos) – Fundição em areia, fundição injetada, fundição de baixa pressão, fundição semi-sólida, fundição por centrifugação, fundição em cera perdida.

Neste projeto foi utilizado o software NovaFlow e Solid®, versão 4.3r6, produzido por NovaCast Foundry Solution AB, e disponibilizado pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho.

4.5.1 Nova Flow & Solid

Este software foi utilizado no âmbito do projeto, desenvolvimento e validação de sistemas de enchimento referentes a determinadas peças e respetivas cavidades moldantes produzidas na Tesco pelo processo de fundição sob pressão ou injetada. Ele permite simular a transferência de calor do fundido durante o processo de solidificação, e prever o fluxo de enchimento de metal na cavidade da moldação, auxiliando o

operador a antever qualquer tipo de movimentação ou turbulência excessiva aquando do vazamento e ainda identificar possíveis defeitos como porosidades e rechupes.

A sua utilização permite definir o tipo de liga metálica que se pretende vaziar, o material do molde, o modelo da máquina de fundição injetada e simular as condições em que esta opera. A metodologia de cálculo que nele está implícita é a dos volumes finitos, em que as células da malha gerada se adaptam aos limites ou contornos da peça. Existe a necessidade de se definir os parâmetros de rede e a dimensão das células unitárias, uma vez que todo o processamento e cálculo são feitos com base numa iteração sucessiva, ponto a ponto, de transferência de propriedades entre as unidades vizinhas da malha. Ou seja, o programa divide o domínio tridimensional do desenho em pequenos elementos de forma triangular, e todo o estudo é realizado com base nas diferenças de propriedades entre um elemento pontual e a sua vizinhança. Esta versão

Note-se que a estrutura da malha é constante em todo o domínio da peça, e quanto menor for a dimensão da sua unidade maior será a precisão dos resultados obtidos, contudo há uma limitação que está relacionada com a capacidade de processamento do computador, havendo uma necessidade de conjugar estas duas variáveis.

Relativamente ao fenómeno de transferência de calor, o software assume diferentes condições de arrefecimento para os diversos processos de fundição. No caso dos processos de fundição em que o material da moldação apresenta baixos valores de condutividade térmica, como é o caso da fundição em areia, os coeficientes de transferência de calor podem ser desprezados. Sendo apenas garantidos os valores de transferência de calor por convecção para a atmosfera [9].

Contudo, neste processo de fundição que utiliza moldações permanentes metálicas o mesmo não acontece, uma vez que os coeficientes internos de transferência de calor, do fundido para o material da moldação são relevantes e devem ser devidamente especificados na interface de simulação [9].

4.5.1.1 Funcionalidades

3 D Import

Neste primeiro módulo do programa é possível abrir o ficheiro CAD 3D convertido em formato STL, compatível com o simulador. Há também a possibilidade de selecionar as unidades métricas com que se pretende trabalhar, de manipular sólidos e posicionar o modelo no sistema de eixos X; Y e Z.

Porém, a principal função deste modulo é converter o ficheiro no formato .cvg para que posteriormente possa ser trabalhado no menu *Initial Settings*.

Initial Settings

Este menu permite abrir o desenho virtual 3D do fundido na extensão .cvg para que o utilizador possa definir todas as condições iniciais necessárias, desde parâmetros de rede ou malha, definir os materiais, parâmetros de simulação do processo de fundição e o plano de apartação. Existe ainda a possibilidade de definir os locais de enchimento e alimentação (masslots), introduzir sensores para obter a análise de temperaturas e caudalímetros, definir as zonas de evacuação de ar e gases da cavidade da moldação (chillvent), as condições de pré-aquecimento do molde e criar filtros de retenção de escórias.

Após ter terminado de estabelecer todas as condições necessárias, é ainda possível pré-definir as condições iniciais da distribuição de temperaturas e especificar o modelo de transferência de calor, selecionando no menu "*Technology*" a opção "*Heat transfer model*".

Posto isto basta guardar novamente, e automaticamente serão gerados dois ficheiros diferentes, um para executar a simulação, em formato .sim, e outro para visualizar os resultados no modulo Browser, em formato .psp.

Simulation

Neste módulo são processados todos os cálculos necessários para as simulações pretendidas. Dependendo do tipo de resultados que se pretendem obter, deve ser selecionado o respetivo modelo de simulação em que se deseja trabalhar e abrir o ficheiro .sim guardado no menu *Initial Settings*.

Antes de iniciar a simulação no módulo pretendido, devem ser carregados os parâmetros pré-definidos de simulação e de distribuição de temperaturas.

Para dar início à simulação basta selecionar a opção “Simulate” e “Start Simulation”.

Existe ainda a possibilidade de tirar partido de uma função que permite parar a simulação (“AutoStop”) de acordo com quatro critérios opcionais, que devem ser definidos antes de iniciar a simulação, o primeiro critério permite parar a simulação em intervalos de tempo definidos pelo utilizador, o segundo está relacionado com a percentagem do volume de enchimento do molde, o terceiro com a percentagem de metal na fase líquida, sendo que o software assume este critério por defeito até deixar de haver metal na fase líquida, e por fim, ainda admite o critério da temperatura máxima.

Caso se pretendam guardar os valores de determinadas variáveis de processo e dos resultados finais sempre que a simulação é interrompida, deve selecionar-se a opção “AutoSaving”. Estes dados ficarão disponíveis no “casting descriptor”.

NovaStress

Este módulo do simulador permite obter uma análise de tensões ou esforços característicos do fundido em estudo.

Browser

Todos os resultados obtidos das simulações podem ser visualizados neste módulo, inclusive os dados resultantes de cada paragem da simulação.

Inicialmente é necessário abrir o ficheiro .psp, que contém toda a informação da simulação que tivera sido feita à priori.

Posto isto, é possível obter os diversos tipos de análises do processo de fundição. Para tal, basta selecionar o tipo de gráfico cujas variáveis se pretendem visualizar e escolher qual o tipo de análise.

A partir da análise dos módulos de arrefecimento da peça (“Thermal modulus”), é possível definir a zona a alimentar e dimensionar o respetivo alimentador. Nesse sentido, deve selecionar-se a opção “Postprocess” e de seguida “Feeder size”. Para isso é necessário selecionar o plano ou secção desejado, posicionar o cursor do rato sobre a zona desejada e pressionar simultaneamente a tecla *shift* e o botão esquerdo do rato. Deste modo, o software indica o módulo da zona a alimentar, o volume, a massa de

metal necessária, o diâmetro e altura do alimentador dependendo do processo de fundição. Permite ainda gerar imagens ilustrativas da análise e criar vídeos.

4.5.1.2 Análises e critérios

As análises de resultados da simulação numérica que o NovaFlow&Solid permite executar são baseadas em determinados critérios, cuja descrição é feita de seguida.

- **Análise de Pontos Quentes**

Esta análise permite identificar os pontos quentes do fundido cujo tempo de arrefecimento é superior, ou seja, demoram mais tempo até solidificar. Este estudo é baseado nos tempos de solidificação ou de tempo crítico de fração sólida numa dada vizinhança.

- **Análise do Tempo de Solidificação (Solidification Time)**

Pretende-se com esta análise localizar zonas isoladas da peça que contêm metal líquido aprisionado (possibilidade de rechupes), permitindo de certa forma uma perceção acerca da evolução da solidificação.

- **Análise do Perfil de temperaturas**

Esta funcionalidade permite a colocação de sensores de modo a estimar com maior rigor a temperatura e correspondente solidificação em determinados pontos da peça.

A partir do gradiente de temperatura é também possível prognosticar acerca da direcionalidade da solidificação. Sabe-se que um gradiente elevado é um bom indicador de uma solidificação direcionada.

- **Critério da Taxa de Arrefecimento**

Determina a taxa de arrefecimento (Cooling Rate °C/s) do fundido em cada nó da malha até se atingir o ponto de Niyama na curva de arrefecimento. Permite concluir acerca das propriedades mecânicas do metal.

- **Critério de Niyama**

Este critério está relacionado com o Perfil de Temperaturas e com a Taxa de Arrefecimento, não contabiliza os efeitos da gravidade e é utilizado para identificar zonas propícias à formação de porosidades no fundido. Também permite concluir acerca da direcionalidade da solidificação. O seu valor varia inversamente com a probabilidade da presença de porosidades, sendo que um valor igual a zero indica uma solidificação mal dirigida.

Para as ligas de alumínio, normalmente, são considerados como valores limites ou críticos 0 a 0,30. Sendo que quando o valor excede o limite máximo de 0,30, é pouco provável que surjam porosidades [9].

- **Análise da Fase Líquida**

Este estudo permite avaliar o desempenho do sistema de enchimento e alimentação. Identificando-se facilmente zonas restritas à passagem de metal líquido durante o vazamento. E prevê a temperatura durante o enchimento.

- **Análise de rechupe (Shrinkage)**

Permite identificar potenciais zonas do fundido propícias ao aparecimento de rechupes e porosidades, e determinar as suas dimensões.

- **Análise dos módulos**

Permite calcular os módulos térmicos em qualquer ponto e com base nisto definir e dimensionar o alimentador necessário.

- **Análise do perfil de velocidades**

Através desta análise é possível concluir acerca do escoamento do metal e da turbulência associada.

5 TRABALHO EXPERIMENTAL

Numa fase inicial do projeto, o trabalho focou a calibração do próprio software de simulação numérica. Com este propósito, foram realizadas várias simulações de peças já fundidas para posteriormente serem analisados os resultados obtidos, por analogia aos parâmetros experimentais.

Neste sentido, foi realizado um estudo sobre a peça Cylinder Head 1720, que faz parte da linha de montagem dos compressores do ar condicionado. Esta peça é obtida por fundição injetada, podendo de ser feita da liga de alumínio HD2-BS1 ou ADC12, especificadas segundo a norma ASTM standard E 691-87 e JIS H 5302, respetivamente, e cujos principais elementos de liga são o Silício e o cobre (AlSi12Cu). Nesta empresa as propriedades da liga de Alumínio são garantidas, uma vez que são periodicamente recolhidas amostras, que posteriormente são polidas e analisadas num Espectrómetro pelo departamento de garantia da Qualidade (ver análises nos anexos). A liga metálica disponível na base de dados do NovaFlow&Solid que melhor se identifica corresponde à liga A413 (AlSi12Cu), com um teor de Silício entre 8 e 12%, que a caracteriza como sendo apropriada ao processo de fundição injetada, nomeadamente quando se pretende um curto intervalo de solidificação. Relativamente ao teor em cobre, que deve ser entre 1.5 e 4%, sabe-se que é o elemento que confere à liga melhores propriedades mecânicas, como a resistência mecânica e dureza do fundido. Também interfere na facilidade com que se realizam os tratamentos térmicos à peça, conferindo ao Alumínio uma melhor resistência à corrosão, porém também tem o inconveniente de reduzir substancialmente a fluidez do metal fundido na cavidade moldante.

Na tabela que se segue encontram-se discriminadas as propriedades mecânicas e térmicas desta liga.

Tabela 5.1 - Características Mecânicas e Térmicas da liga [8].

Propriedades Mecânicas	Liga A413
Resistência à tração (MPa)	290
Tensão de Cedência (MPa)	130
Densidade (g/cm ³)	2.657
Resistência à Fadiga (MPa, [5x10 ⁸]	130

ciclos])	
Tensão de corte (MPa)	170
Propriedades Térmicas	Liga A413
Calor Específico (j/Kg.K)	963
Calor Latente de Fusão (Kj/Kg)	389
Densidade (cal/cm.s.°C)	0.37
Intervalo de Solidificação (°C)	575-585
Coeficiente de Expansão Térmica entre 20 e 300°C (°C x 10 ⁻⁶] x 10 ⁻¹)	22.5

Inicialmente foram simuladas algumas situações com diferentes parâmetros de processo, e devido às variadas limitações da versão deste simulador, nomeadamente: diferentes pressões de injeção com o objetivo de conseguir o mesmo efeito de sucção provocado pelo sistema de vácuo, e diferentes condições de arrefecimento, como por exemplo a utilização de uma pintura refratária, na tentativa de reproduzir o mesmo efeito do spray desmoldante.

Posto isto, analisaram-se os resultados obtidos das diversas condições simuladas, que melhor se adequam aos parâmetros envolvidos no fabrico da peça.

5.1 Modelo “Cylinder Head 1720”

Inicialmente ponderou-se a viabilidade de utilizar o desenho cavidade do molde invés do sistema de enchimento. Então optou-se pelo desenho do sistema de enchimento por dois motivos, o cliente não facultava o desenho do molde por ser um projeto tão complexo e confidencial, salvaguardando os seus direitos de autor, e devido ao elevado grau de complexidade do desenho do molde, seria impossível levar a cabo este processo de simulação uma vez que exigiria um transcendente poder de processamento e de memória RAM.

O cliente forneceu então o desenho 3D do sistema de enchimento, no formato “IGS”, o qual foi convertido no “SolidWorks” em “STL”, compatível com o menu “3D Import” do Nova Flow&Solid.

5.1.1 Parâmetros de simulação

1º Ensaio

Após ter importado o ficheiro STL procedeu-se ao alinhamento da cavidade segundo os eixos X, Y e Z. Fixou-se a posição e efetuou-se o malhamento do modelo.

Antes de se ter efetuado o malhamento, reparou-se que seria impossível simular o fundido utilizando uma malha tão apertada para a espessura mínima real do molde, que era 245mm. Então, recorreu-se a um método que simplificou bastante este problema. Este trata-se de uma relação entre a espessura mínima de transferência de calor necessária para um determinado tempo de solidificação. Desta relação concluiu-se que para um molde permanente em aço, com um tempo de solidificação de aproximadamente 8 segundos, seria correto admitir uma espessura mínima de 25 mm [2] (ver figura 5.1).

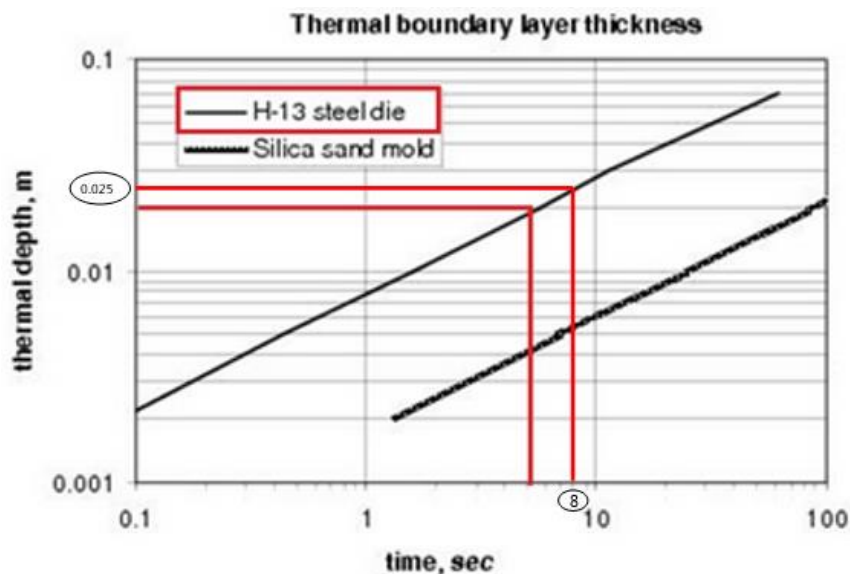


Figura 5.1 – Relação entre o tempo de solidificação e a espessura mínima do molde.

Posto isto, definiu-se uma malha com tamanho de célula unitária de 1.4 mm de modo a conseguir fazer com que coubessem pelo menos duas células de cálculo na parede de menor espessura da peça, que mede aproximadamente 3mm (ver figura 5.2). Por norma deveria utilizar-se células com tamanho três vezes inferior a 3mm, porém isto não foi possível, uma vez que teria que garantir também a menor distância da periferia da peça ao exterior do molde (Minimal mould thickness). Comprometendo

assim a aproximação dos resultados, a capacidade de processamento e memória RAM do hardware disponível (ver figura 5.3).

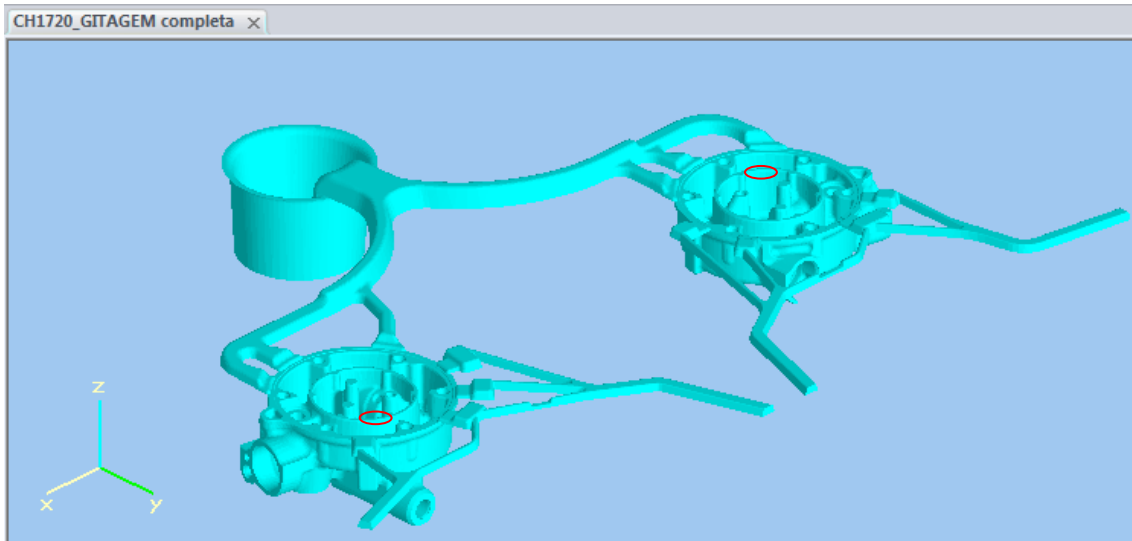


Figura 5.2 - Zonas de menor espessura da peça.

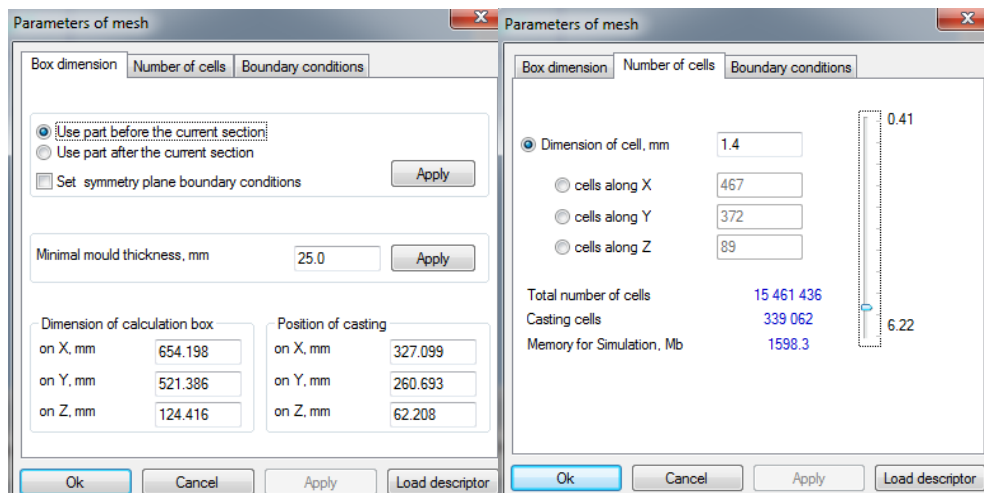


Figura 5.3 - Parâmetros de malha.

Relativamente ao processo de vazamento foi selecionado o modo “HPD with filling chamber”, ou seja, fundição injetada sob pressão com câmara. Neste é possível definir diversos parâmetros de entrada, sendo eles os seguintes: diâmetro da câmara onde circula o pistão, comprimento máximo da câmara, capacidade da mesma, a massa de metal vazado e a pressão de injeção. Posto isto, ainda permite definir as diferentes

fazes de injeção do metal na cavidade do molde. Para isso, o utilizador deve introduzir o curso e a velocidade do pistão, sendo que em função destes dois parâmetros, o software realiza uma estimativa do tempo de duração de cada fase e o respetivo fluxo ou caudal de metal necessário.

Para comprovar a veracidade dos elementos de cálculo do software procedeu-se ao cálculo teórico do volume e da capacidade da câmara de injeção, em unidade de massa de Alumínio. Sabendo que o curso útil da câmara de injeção corresponde à diferença entre o seu comprimento total e o curso/posição inicial do pistão calculada pelo software, tem-se que:

$$L_{\text{útil}} = L_{\text{total}} - L_{\text{inicial}} \Leftrightarrow L_{\text{útil}} = 480 - 259.587 = 220,413\text{mm};$$

$$V_{\text{câmara}} = \pi \cdot r^2 \cdot L_{\text{total}} \Leftrightarrow V_{\text{câmara}} = \pi \times 40^2 \times 480 \Leftrightarrow V_{\text{câmara}} = 2411520\text{mm}^3 \Leftrightarrow V_{\text{câmara}} = 2411.52\text{cm}^3;$$

$$\rho_{\text{Al}} = 2,657\text{g/cm}^3 \Leftrightarrow \rho_{\text{Al}} = \frac{\text{massa}_{\text{Al}}}{V_{\text{câmara}}} \Leftrightarrow \text{massa}_{\text{Al}} = 2,657 \times 2411.52 \Leftrightarrow \text{massa}_{\text{Al}} = 6407.40864\text{g} \Leftrightarrow \text{massa}_{\text{Al}} = 6.407\text{Kg};$$

$$\text{Área do pistão} = \frac{\pi \times D^2}{4} \Leftrightarrow \text{Área pistão} = \frac{\pi \times 8^2}{4} \Leftrightarrow \text{Área do pistão} = 50.26\text{cm}^2;$$

$$\text{Volume da camisa} = \text{área do pistão} \times \text{comprimento ativo da camisa} \Leftrightarrow \text{Volume da camisa} = 50.26 \times 48 = 2412.74\text{cm}^3;$$

$$\text{Taxa de enchimento} = \frac{\text{massa injetada}}{\rho_{\text{alumínio}} \times 0.95 \times \text{Volume da camisa}} \times 100 \Leftrightarrow \text{Taxa de enchimento} = \frac{2588}{2.657 \times 0.95 \times 2412.74} \times 100 \Leftrightarrow \text{Taxa de enchimento} = 42.49\%;$$

$$\text{Área da secção de alimentação} = 2.60\text{cm}^2;$$

$$\text{Velocidade rápida do pistão} = 2.0\text{m/s};$$

$$\text{Velocidade na secção de alimentação} = \frac{\text{área do pistão}}{\text{área secção de alimentação}} \times \text{Velocidade do pistão} \Leftrightarrow \text{Velocidade na secção de alimentação} = \frac{50.26}{2.60} \times 2 \Leftrightarrow \text{Velocidade na secção de alimentação} = 38.7\text{m/s};$$

Equação da continuidade (confirmação da velocidade rápida do pistão):

$$\text{Área pistão} \times V_{\text{pistão}} = \text{Área secção alimentação} \times V_{\text{secção alimentação}} \Leftrightarrow 50.26 \times V_{\text{pistão}} = 2.60 \times 38.7 \Leftrightarrow V_{\text{pistão}} = 2.00\text{m/s} \text{ (“confirma!”)};$$

$$\text{Massa após alimentação} = 764.4\text{g};$$

$$\text{Tempo de enchimento da cavidade} = \frac{\text{massa após alimentação}}{V_{\text{alimentação}} \times \rho_{\text{alumínio}} \times \text{área}_{\text{alimentação}} \times 0.785} \Leftrightarrow$$

$$\text{Tempo de enchimento da cavidade} = \frac{1051}{(100 \times 38.7) \times 2.657 \times 2.60 \times 0.785} \Leftrightarrow \text{Tempo de}$$

enchimento da cavidade = 0.050s;

Tempo fim enchimento = 2.567s;

Curso de entrada da velocidade rápida = 45cm;

Curso ativo da velocidade rápida = comprimento ativo da camisa – (curso entrada velocidade rápida + espessura da bolacha) \Leftrightarrow Curso ativo velocidade rápida = 48 – (30.8+2) \Leftrightarrow Curso ativo velocidade rápida = 15.2cm;

$$\text{Volume útil da camisa (velocidade rápida)} = \frac{\pi \times 8^2}{4} \times (48 - 30.8) = 864.47\text{cm}^3;$$

$$2.657\text{g} \quad 1\text{cm}^3 \Leftrightarrow \text{Volume cacho} = 974.03\text{cm}^3;$$

$$2588\text{g} \quad \text{Volume cacho}$$

Taxa de enchimento teórica durante a velocidade rápida =

$$\frac{\text{volume cacho}}{\text{Volume util da camisa}} \times 100 \Leftrightarrow \text{Taxa de enchimento teórica da velocidade rápida} =$$

$$\frac{974.03}{864.47} \times 100 = 112.67\%$$

Deste último cálculo pode concluir-se que como a taxa de enchimento teórica no curso em que entra a velocidade rápida é de cerca de 100%, praticamente já não existe ar aprisionado na camisa de injeção, ou seja, é seguro passar-se para a velocidade rápida sem comprometer a sanidade do fundido com possíveis porosidades.

Com base nestes cálculos e nos parâmetros do programa-peça da respetiva máquina de fundição (Buhler 660T), estimaram-se os valores tabelados de seguida para as três fases do processo de fundição:

Tabela 5.2 - CH1720_Parâmetros de funcionamento teóricos

Fase	Tempo de duração (s)	Curso do pistão, ΔL (mm)	V _{Máx} do pistão (m/s)
1ª Fase (alimentação)	0,048	308 – 259,587 = 48,413	1.0
2ª Fase (enchimento)	0,073	454,997 – 308 = 146,997	2.0
3ª Fase (compactação)	5,0	20 + 5 = 25	0.005

Estes valores foram introduzidos no menu “Filling parameters”, sendo alguns ajustados automaticamente pelo software, como se mostra na figura que se segue.

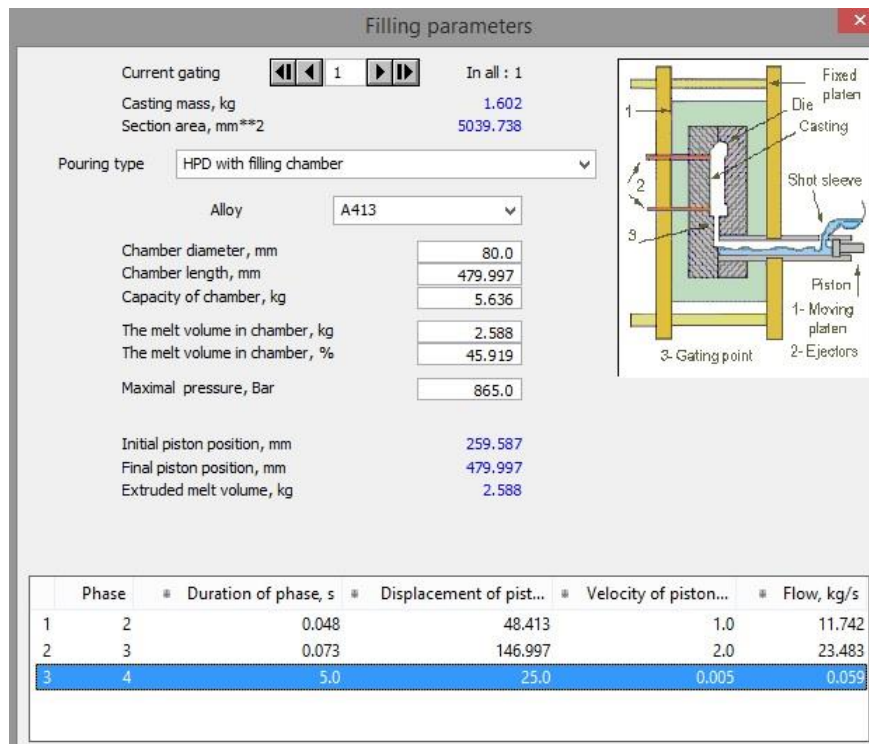


Figura 5.4 - Parâmetros de enchimento da cavidade CH1720.

Nomeadamente o comprimento da câmara, que passou de 480mm para 479.997mm, a capacidade da câmara de injeção calculada anteriormente (6.407Kg) não pôde ser assumida uma vez que está dependente do comprimento da câmara que o programa assume. Deste modo, apenas permite uma capacidade de 5.636Kg da liga de Alumínio A413, resultando em 45.919% do volume da câmara cheio para o peso de metal injetado de 2.588Kg.

Paralelamente, e uma vez que o software ajusta o comprimento total da câmara de injeção, também o curso (“Displacement”) de cada uma das três fases foi alvo de uma aproximação.

Sistema de vácuo

Na prática, este molde é dotado de sistemas de vácuo que facilitam a extração de gases do seu interior após o vazamento do metal.

Deste modo, existe o sistema de vácuo de injeção, cuja função é sugar o ar que fica retido na câmara de injeção quando esta se enche de Alumínio, minimizando assim a quantidade de ar injetada juntamente com o metal fundido.

Após o enchimento da cavidade moldante, atua ainda o sistema de vácuo central ou do molde, que auxilia a expulsão dos gases na cavidade, nomeadamente na última zona do fundido a solidificar, após os “chillvents”.

Porém, uma das principais limitações deste simulador está relacionada com a impossibilidade de especificar a pressão de funcionamento de que cada um destes sistemas de vácuo. De seguida serão identificados estes parâmetros.

Tabela 5.3 Condições de funcionamento do sistema de vácuo.

	Vácuo do molde	Vácuo de injeção
Valor real (KPa)	2.6	6.9
Limite controlo superior (KPa)	6.0	15.0
Limite controlo inferior (KPa)	0.0	5.0

Sabe-se que: $1 \text{ Bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \times 10^2 \text{ KPa}$

O que significa que o valor da pressão do sistema de vácuo do molde é de 0.026Bar e o do vácuo de injeção é de 0.069Bar.

O valor absoluto destes parâmetros é irrelevante quando comparado com a pressão de compactação de 865Bar, porém o seu efeito na extração de gases é notório, reduzindo em larga escala o número de peças defeituosas, rejeitadas pela presença de porosidades.

Para compensar o efeito do sistema de vácuo na simulação, a alternativa passa por aumentar o valor da pressão de injeção.

No entanto, como o enchimento se processou na totalidade do volume da cavidade, esta medida tornou-se desnecessária. De seguida mostram-se duas imagens, do módulo *Browser* e do vídeo final, que ilustram isto mesmo (“Filled volume = 100%”):

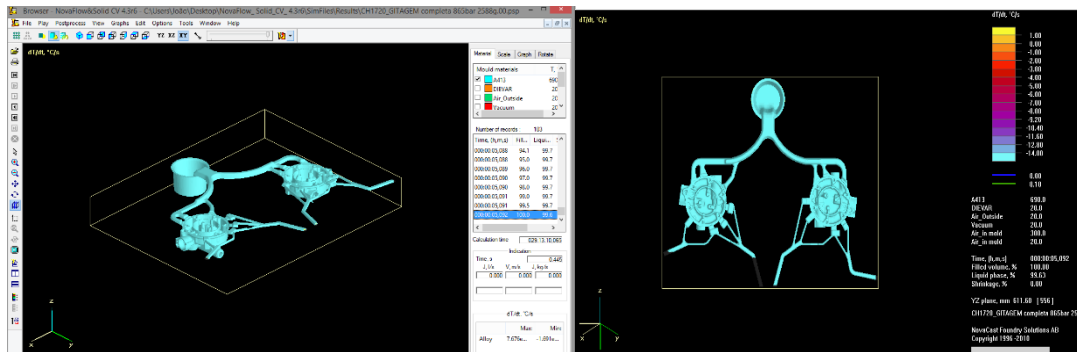


Figura 5.5 – CH1720_Enchimento completo.

Note-se que caso o software permitisse simular a formação da onda de metal interior da camisa de injeção e visualizar o arrastamento de ar envolvido no metal, o efeito do sistema de vácuo na injeção e do molde seria fundamental para tornar a simulação o mais realista possível.

2º Ensaio

Após a realização do primeiro ensaio, chegou-se à conclusão de que o software não é capaz de simular a primeira fase do enchimento, assim testou-se realizar uma nova simulação com apenas duas fases, admitindo apenas uma fase para o enchimento e outra para a compactação. Neste ensaio a malha foi gerada com um plano de simetria, com o objetivo de facilitar posteriormente a simulação do arrefecimento. Deste modo, reduziu-se o diâmetro do pistão (área de secção de alimentação) e a massa de metal injetado para metade ($2.588/2=1.294\text{Kg}$), mantendo o comprimento da câmara de injeção (480mm). Como é óbvio a taxa de enchimento aumentou.

Outro erro cometido no primeiro ensaio foi assumir a pressão de compactação de 865bar como sendo a pressão de injeção durante todo o curso do pistão, o que não é verdade. Então testou-se o enchimento a uma pressão de injeção de 600Bar (ver figura 5.6).

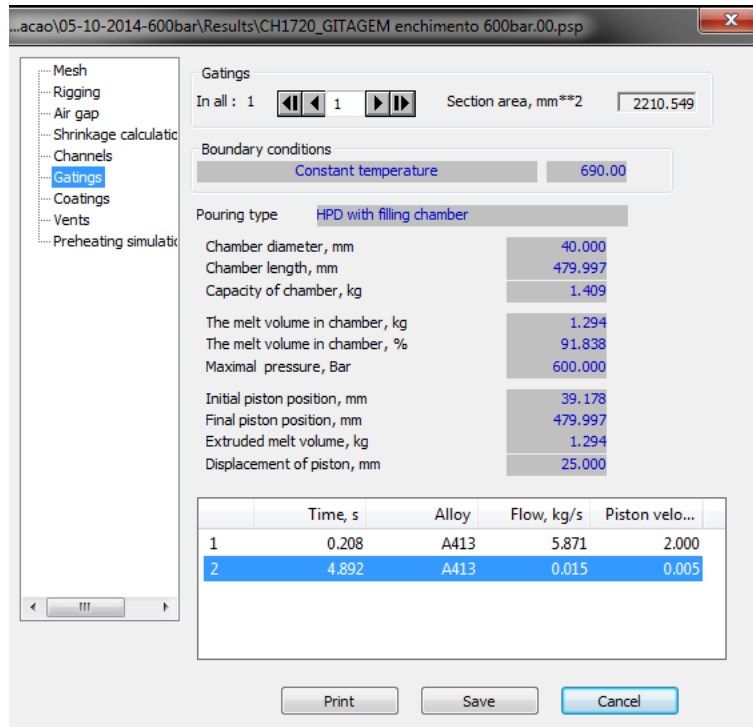


Figura 5.6 – CH1720_Parâmetros de enchimento-2ºensaio.

No que respeita à análise do perfil de velocidades, pode referir-se que nas secções dos ataques à peça, facilmente se atingem velocidades na ordem dos 17m/s, já nos canais de menor área de secção junto às saídas de gases, o escoamento do metal chega a alcançar velocidades superiores a 60m/s nos canais direcionados à esquerda e 11m/s nos canais localizados na zona superior direita representada na figura 5.7.

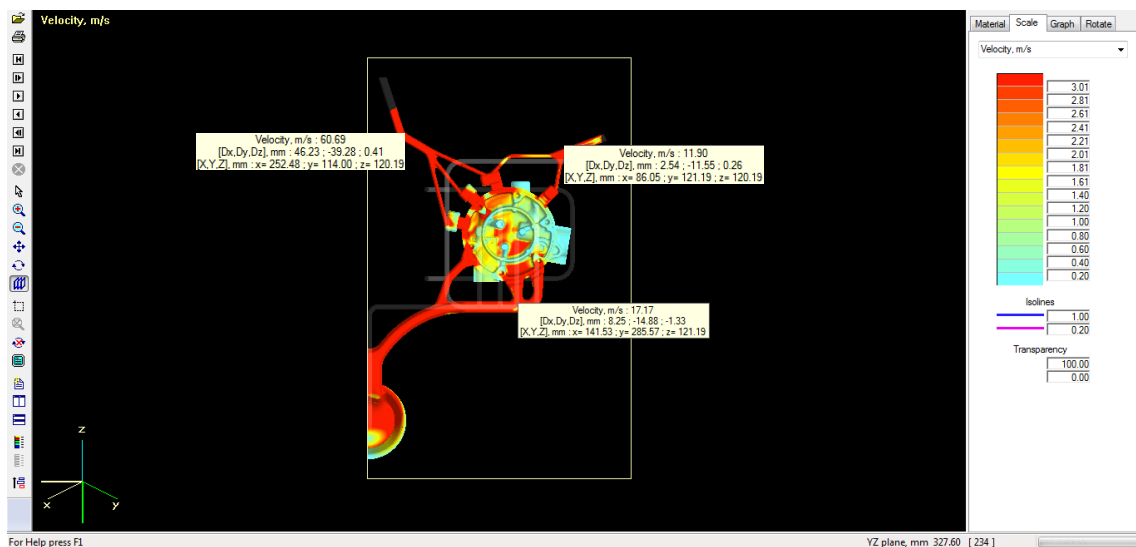


Figura 5.7 – CH1720_Perfil de velocidades.

Deste segundo ensaio pode estimar-se o tempo de enchimento como sendo o tempo que demora a encher a cavidade a partir do momento em que o metal chega até

ao meio da secção dos ataques, como se pode constatar na imagem seguinte, este processo demora cerca de 5.028 segundos:

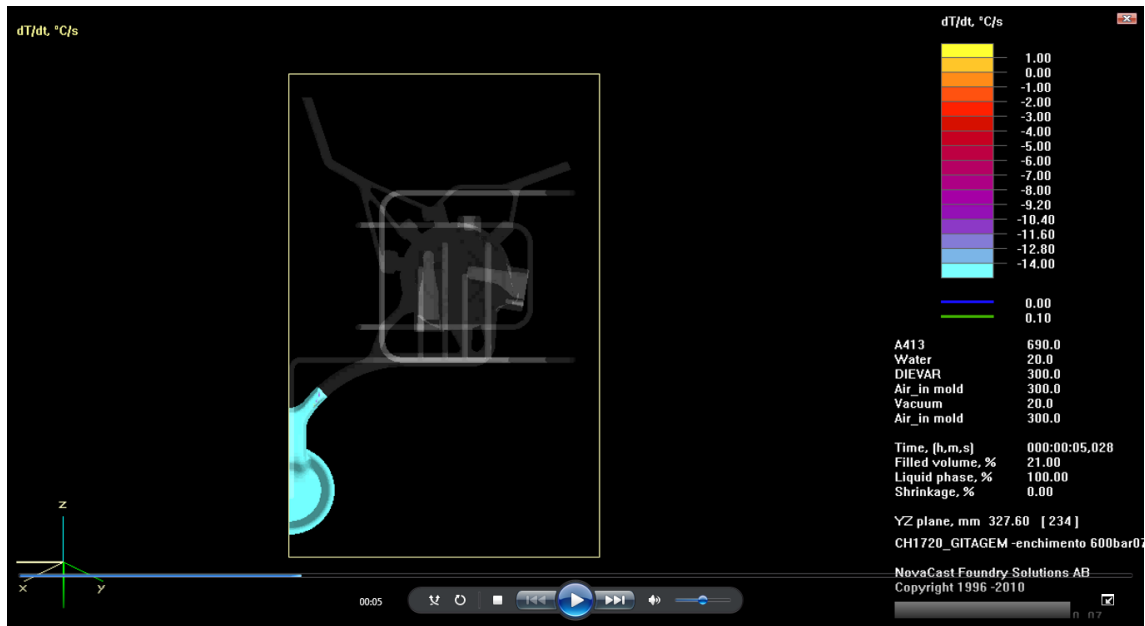


Figura 5.8 – CH1720_Duração da primeira fase do enchimento.

No final do enchimento, quando a taxa de enchimento “Filled volume” é igual a 100%, o tempo de enchimento absoluto é 5.134 segundos (ver figura 5.9).

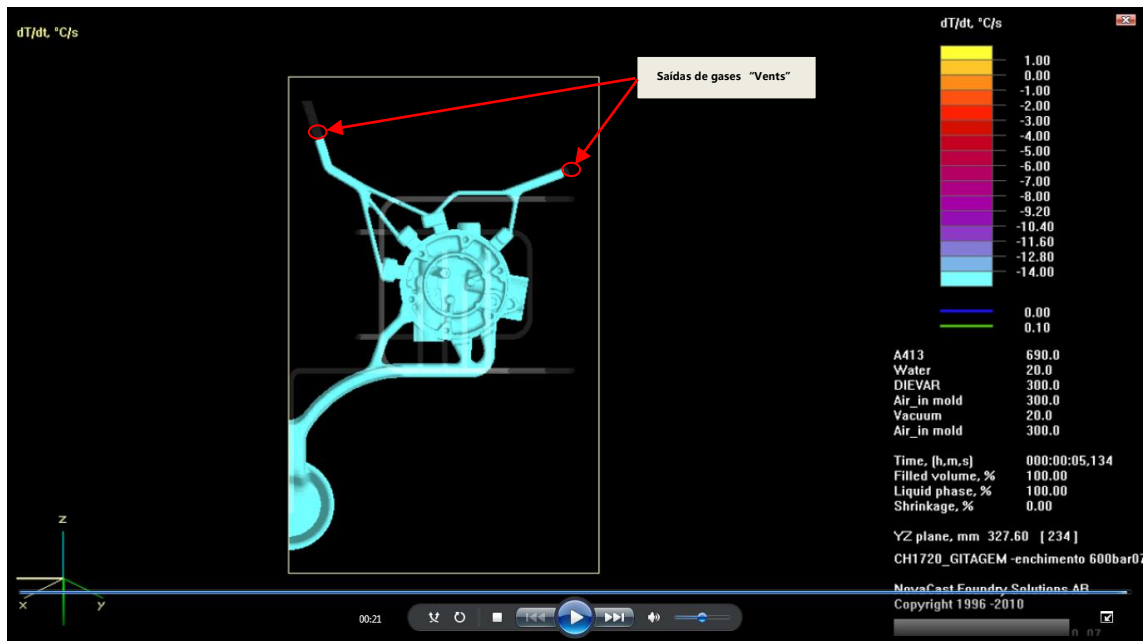


Figura 5.9 – CH1720-Tempo de enchimento total.

Então, conclui-se que da diferença do intervalo de tempo analisado (5.134 - 5.028), resulta um tempo de enchimento teórico da cavidade de 0.106 segundos.

Outro aspeto importante está relacionado com as últimas zonas a serem preenchidas com metal, na figura seguinte é possível identificá-las facilmente.

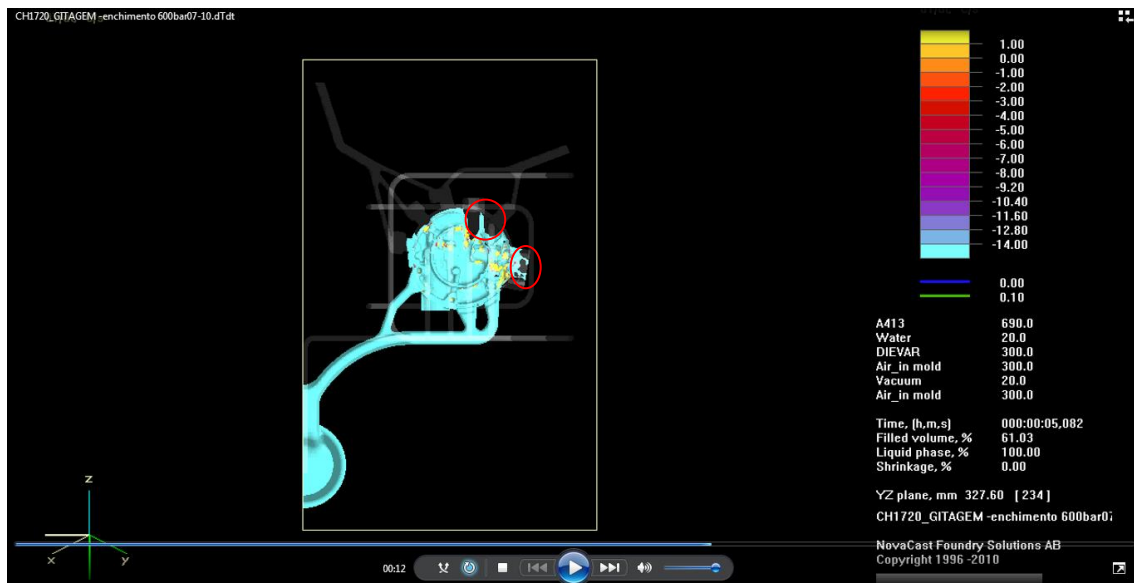


Figura 5.10 – CH1720-Ultimas zonas da peça a serem preenchidas.

5.1.2 CH 1720 - Arrefecimento e solidificação

Antes de iniciar a simulação do processo de arrefecimento e solidificação desta cavidade moldante, foi necessário modelar as linhas de água que proporcionam a refrigeração do molde nas zonas mais espessas, e que portanto demoram mais tempo a solidificar. Estes canais destinados à circulação forçada de água são de dois tipos, as chamadas linhas diretas que consistem num perfil tubular em cobre com uma entrada e uma saída, e as chamadas cascatas em que existe um canal dentro de outro, que permitem que a água fria entre pela secção exterior, e saia a maior temperatura pelo orifício interior. Estas últimas proporcionam o arrefecimento das zonas mais críticas, de maior espessura, da cavidade moldante.

Inicialmente, estes canais foram modelados separadamente, porém quando foram individualmente posicionados no modelo 3D no *3D Import*, reparou-se que não era possível definir as entradas e saídas individualmente. Posto isto chegou-se à conclusão de que seria necessário modelar um perfil único, com 6mm de diâmetro, em que a entrada e a saída da água se situassem no mesmo plano fronteira do molde. O perfil criado no *SolidWorks* encontra-se representado na figura 5.11.

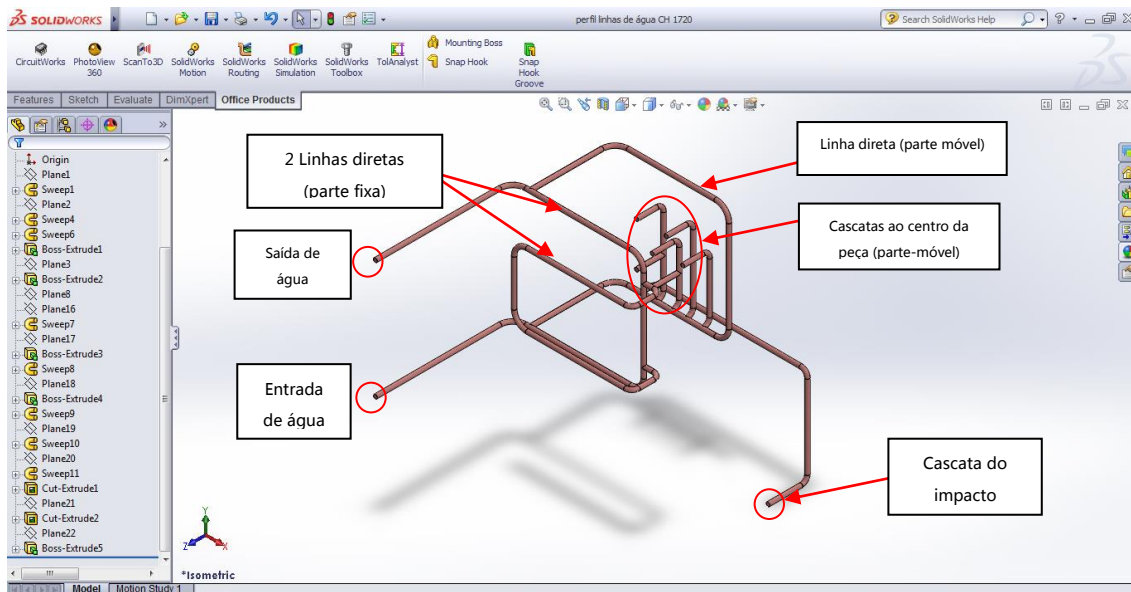


Figura 5.11 - CH1720_Modelação 3D do perfil das linhas de água.

Posto isto, foi necessário exportar o ficheiro em formato STL para ser aberto no “3D Import” através da opção “Add channel”, e posicionado na cavidade utilizando o comando “Rotate&Move”, disponível no ícone representado a vermelho na lista de sólidos 3D (ver figura 5.12).

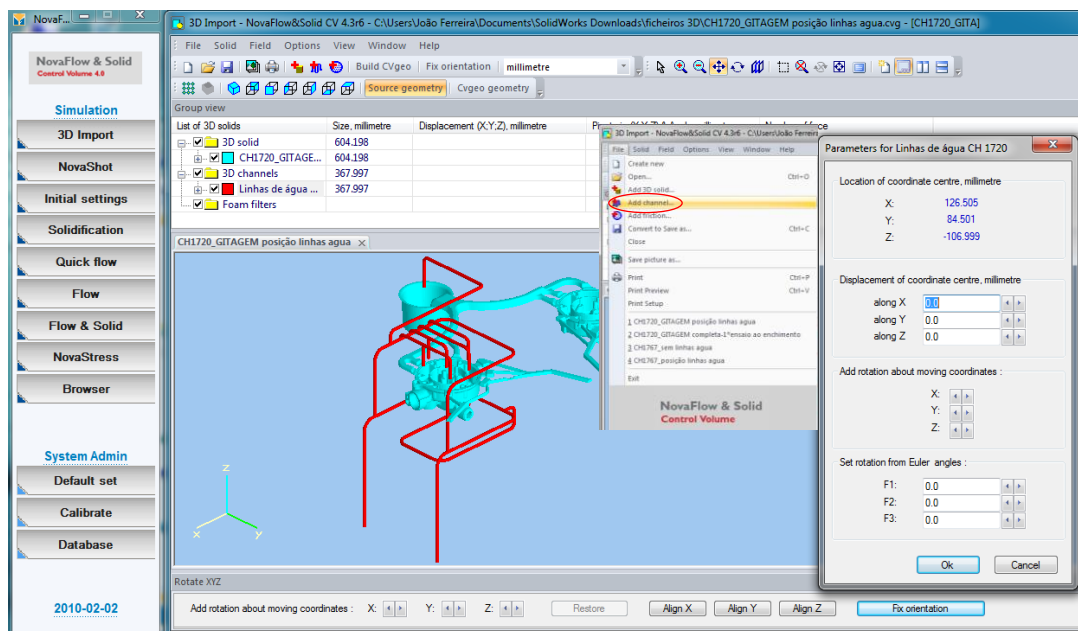


Figura 5.12 – CH1720_3D Import Posicionamento do perfil das linhas de água.

Após ter o conjunto 3D corretamente posicionado nos 3 eixos, guardou-se o ficheiro, que é automaticamente convertido no formato “CVgeo CAD files”, para posteriormente ser aberto no menu “Initial Settings”. Neste menu procedeu-se à geração

da malha utilizando um plano de simetria YZ, isto porque se tratam de duas cavidades simétricas. De seguida mostra-se o plano definido:

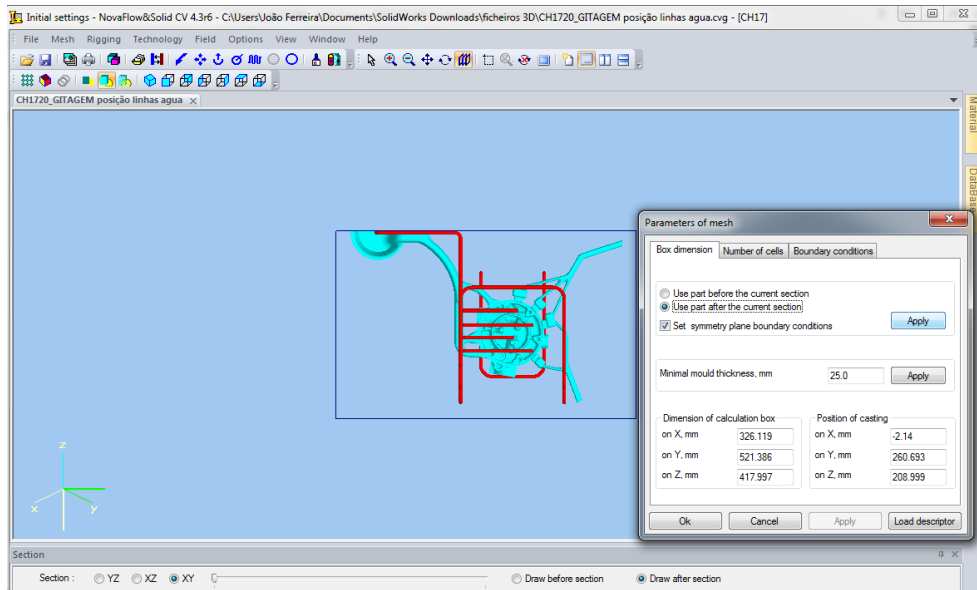


Figura 5.13 – CH1720_Geração do plano de simetria.

Para finalizar o malhamento correto de modo a que fosse possível definir a entrada e saída dos canais de circulação da água numa das faces que delimitam o molde, teve que se definir um novo plano XY com o objetivo de cortar a caixa virtual do molde (ver figura 5.14).

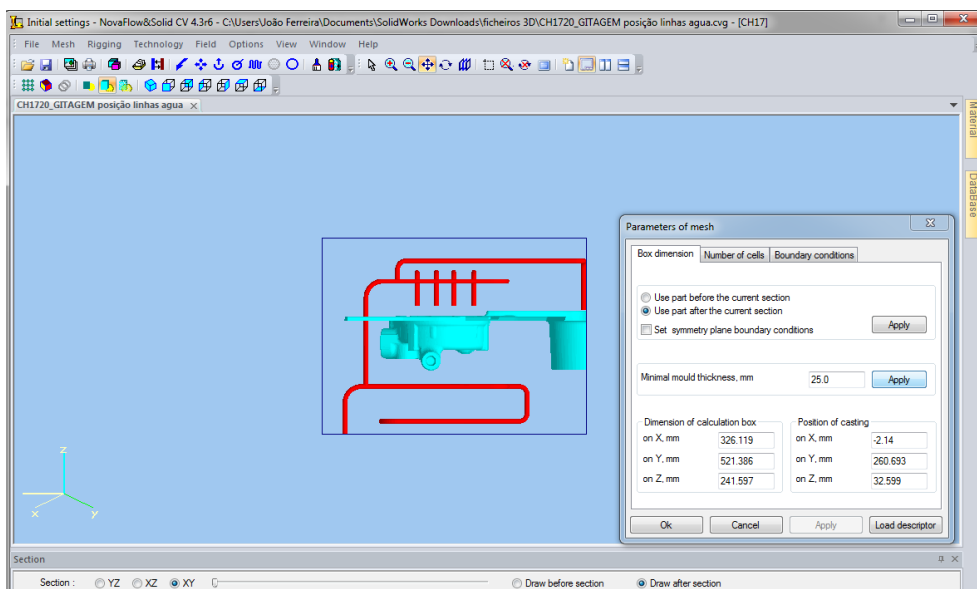


Figura 5.14 – CH1720_Plano para definir a entrada e saída da água nos canais.

Nesta fase já foi possível definir todos os parâmetros necessários para simular o efeito do arrefecimento dos canais de água, estabeleceu-se uma pressão de 1.5Bar, um caudal de água de 0.4l/s e a temperatura de entrada da água a 20°C. Posto isto, bastou indicar a secção de entrada e de saída da água na opção “Parameters” (ver figura 5.15).

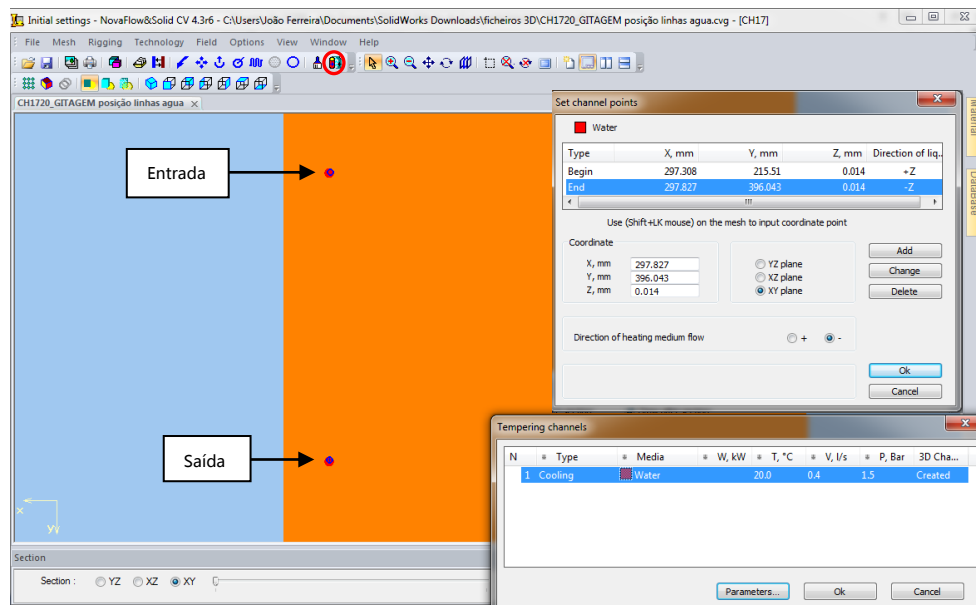


Figura 5.15 – CH1720_Criação das linhas de água.

O próximo passo foi definir a secção de alimentação (“Gating Point”), as saídas de gases (“Vents”), os sensores de temperatura (“Sensor element”) nas zonas onde se pretende estudar a variação da temperatura ao longo do processo de solidificação, e o medidor de caudal (“Flowmeter”) que faz mais sentido no processo de enchimento para ter a noção acerca da massa de metal que passa em determinada secção dos canais ao longo do tempo.

De seguida, deve criar-se a lista de materiais, neste caso a liga de Alumínio A413 a 690°C (temperatura à qual o metal é vazado), o material do molde, o “Dievar”, a 300°C (temperatura estipulada para o pré-aquecimento do molde), o ar dentro do molde a 300°C, o ar do exterior a 20°C, a água de refrigeração do molde que entra a 20°C e o vácuo (ver figura 5.16).

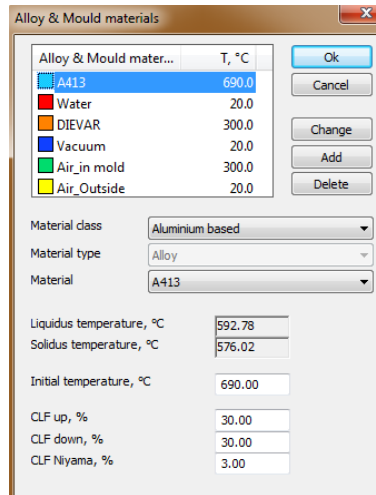


Figura 5.16 – CH1720_Lista de materiais.

Seguem-se os parâmetros de enchimento, que são iguais aos especificados na simulação do enchimento. Na seguinte imagem pode visualizar-se a localização do Gating point, assim como os “Filling Parameters” na opção HPD-Filling Chamber:

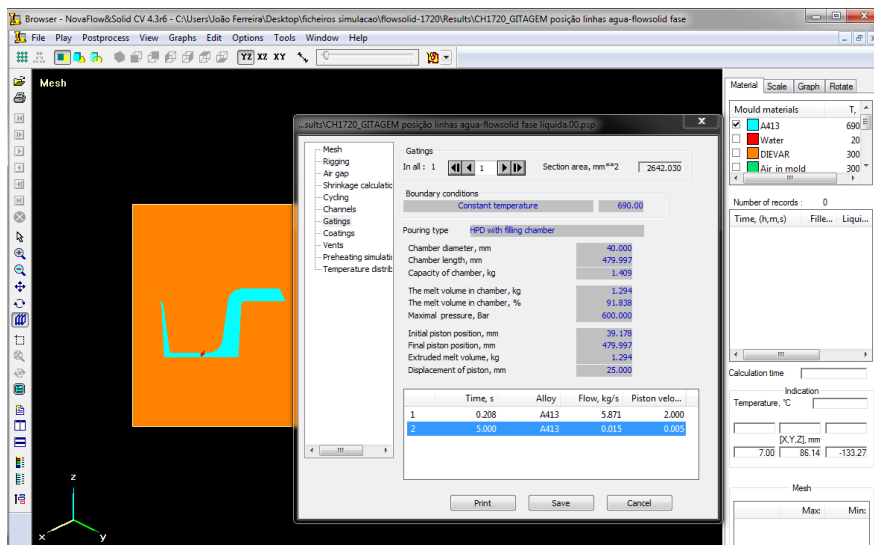


Figura 5.17 – CH1720_Localização do “Gating point” e parâmetros de enchimento.

Estipulou-se um pré-aquecimento do molde a 300°C durante 10 segundos, assumindo o ar dentro do molde como meio.

Relativamente à distribuição de temperaturas, convencionou-se para a liga de Alumínio do fundido, uma variação linear ao longo do eixo Y, definindo a temperatura na origem e na extremidade de 690°C. De igual modo para o aço do molde, mas com temperatura na origem e na extremidade de 300°C.

No que concerne aos parâmetros que estão na base do cálculo da taxa de porosidades, assumiu-se uma pressão de injeção de 600Bar, e um coeficiente da

influência da gravidade o mais baixo possível, por se tratar de fundição injetada, em que o metal é injetado sob elevada pressão, o que leva a desprezar o efeito do peso do metal.

Definiu-se o modelo de transferência de calor “Surface heat transfer” assumindo que as trocas de calor se processam principalmente por condução, sendo que as superfícies laterais, superior e inferior dissipam 20, 50 e 60% respectivamente, do calor do molde para o ar exterior (ver figura 5.18).

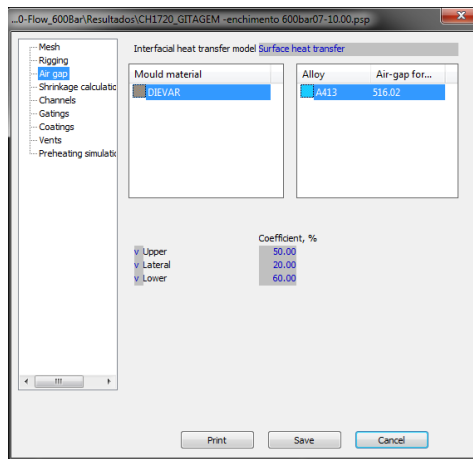


Figura 5.18 – CH1720_Interface de transferência de calor.

Na tentativa de aproximar o efeito provocado pelo spray desmoldante, assumiu-se que a cavidade do molde seria revestida de uma pintura refratária (“Coating”), com uma espessura de 0.1mm, proporcionando um coeficiente de transferência de calor de 0.3 W/m²/°C, sendo este último atribuído por defeito pelo software.

Estabeleceu-se também uma sequência lógica de ciclos de arrefecimento do molde, do tipo “First is FlowSolid, following Solid”, que permite simular o arrefecimento em dois estágios distintos, considerando que inicialmente e à medida que a temperatura diminui existem duas fases em simultâneo, a fase líquida diminui à medida que a fase sólida aumenta, e num segundo estágio o processamento do metal somente no estado sólido. Considerou-se ainda como critério de remoção do fundido, o de 0% da fase líquida. Definiram-se então três ciclos, o primeiro que admite o tempo de duração em que o molde está aberto, de 29 segundos, exposto ao ar do exterior a uma temperatura de 20°C, o segundo em que o molde é pintado com material refratário (spray desmoldante) durante 15 segundos, com o molde exposto ao ar do exterior à temperatura ambiente, e o terceiro que admite o molde fechado exposto ao ar do interior a uma temperatura de 300°C durante 20 segundos (ver figura 5.19).

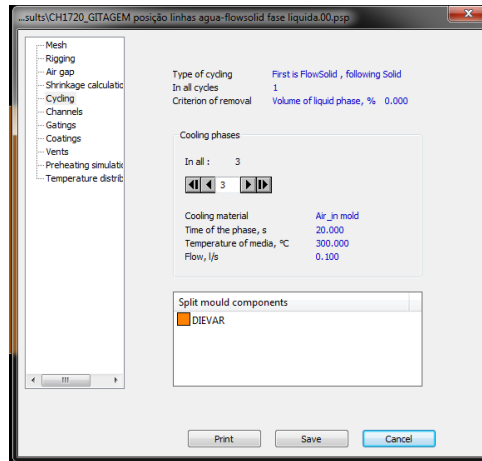


Figura 5.19 – CH1720_Ciclos de arrefecimento.

Neste caso, chegou-se à conclusão de que para simular a solidificação separadamente do enchimento, apenas faria sentido o tipo de arrefecimento “All cycles are solid”, definindo apenas o terceiro ciclo. Isto porque o menu “Solidification” parte do princípio que a cavidade está cheia de metal, e com base nisto apenas processa a sua solidificação.

Foi necessário também identificar as condições fronteira do ponto de enchimento e das saídas de gases. No primeiro admitiu-se que o metal é injetado a temperatura constante, de 690°C. Quanto às saídas de gases, o software subentende que os canais onde estas são definidas tem ligação com o exterior, e então pressupõe-se que estes canais na fronteira do molde dissipam calor por radiação para o meio ambiente a 20°C (ver figura 5.20).

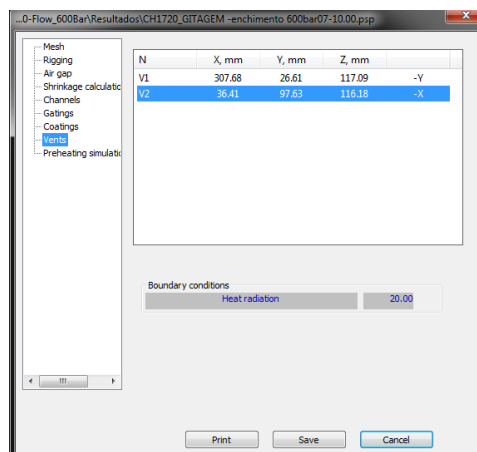


Figura 5.20 – CH1720_Condições fronteira nas saídas de gases.

Nesta fase, todos os parâmetros estavam definidos corretamente para dar início à simulação no menu “Flow&Solid”, que permite simular o processo contínuo desde o

enchimento até ao final da solidificação do fundido. Porém, após se ter iniciado a simulação, o software assumia automaticamente uma temperatura do Alumínio de 300°C, e como tal, estando a liga a uma temperatura inferior à temperatura de fusão, estaria então no estado sólido e o enchimento não se processava. Com isto, pensou-se então que o módulo “Flow&Solid” desta versão do *NovaFlow* contivesse algum tipo de erro associado que fizesse assumir uma temperatura de vazamento igual à do pré-aquecimento do molde, ou seja, a temperatura do metal inicialmente mantinha-se algum tempo a 690°C mas rapidamente passava para 300°C, temperatura à qual o metal se encontra no estado sólido não atravessando a secção de enchimento.

Posto isto, e após muitas tentativas falhadas, optou-se por simular a solidificação separadamente do enchimento. Os parâmetros utilizados foram os mesmos, à exceção dos ciclos de arrefecimento, que neste caso foram do tipo “All cycles are Solid”, e com apenas a terceira fase do ciclo que considera o molde fechado cheio de metal à temperatura de 300°C durante um período de tempo de aproximadamente 20 segundos.

5.1.3 CH 1720 – Análise de resultados

No menu “Browser” é necessário carregar o ficheiro em formato *.psp correspondente à simulação que se pretende. A partir daqui será possível obter as diversas análises resultantes da simulação realizada anteriormente. De seguida mostram-se os resultados do processo de solidificação deste modelo:

- **Análise dos pontos quentes (Thermal modulus)**

Inicialmente realizou-se o estudo dos pontos quentes, cuja determinação permite ter uma noção acerca da direccionalidade do processo de solidificação e das zonas mais críticas, com maior tendência para originar defeitos de fundição (ver figura 5.21).

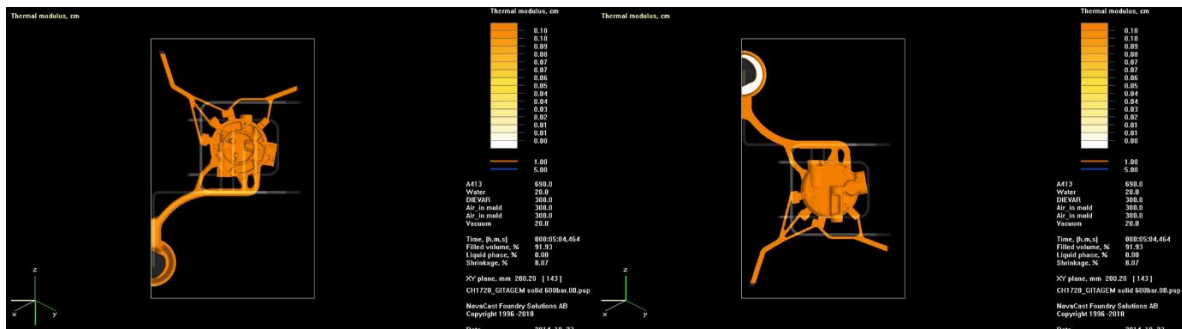


Figura 5.21 - CH 1720_Pontos quentes.

Na figura anterior pode constatar-se que as zonas de maior módulo, representadas com tonalidade mais escura, correspondem às zonas de secção mais espessa da cavidade moldante, logo com maior tempo de arrefecimento relativamente às zonas de módulo inferior.

- **Análise de Rechupe (Shrinkage)**

Este estudo permite concluir acerca da ocorrência de porosidades sob a forma de rechupes nas zonas com secção de maior espessura da cavidade. Este comportamento da liga em questão, A413, está diretamente relacionado com o seu curto intervalo de solidificação, ou seja, como o metal solidifica muito rapidamente, não há tempo suficiente para compensar a contração volumétrica associada. Mesmo sendo esta uma liga dotada de uma boa fluidez para ser usada em fundição injetada, este será um problema que persiste, podendo ser minimizado por otimização no projeto do sistema de enchimento.

De seguida mostra-se uma imagem com as zonas mais propensas à formação deste defeito (figura 5.22).

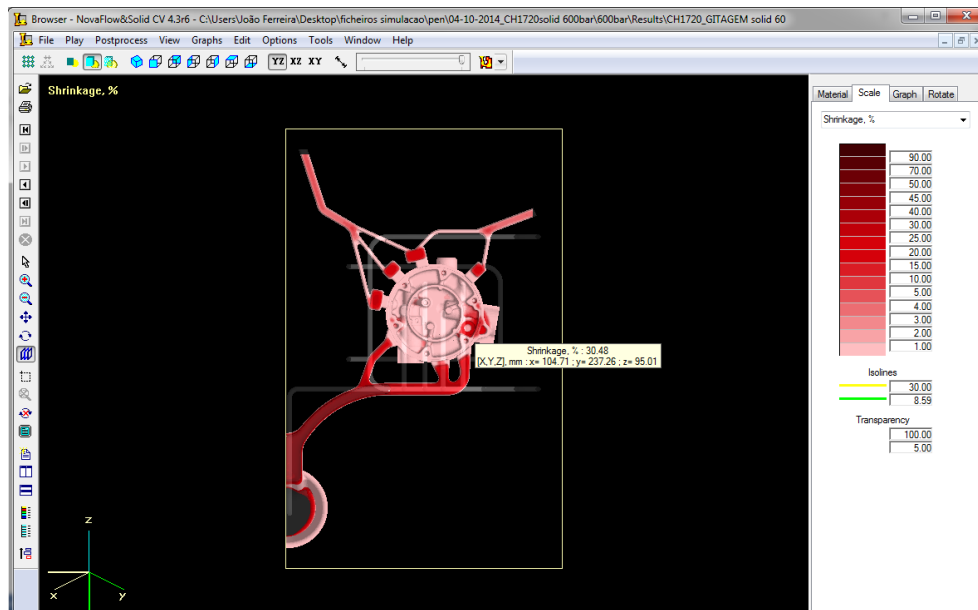


Figura 5.22 - CH 1720_taxa de rechupe.

Este módulo do NovaFlow permite determinar a taxa de rechupe em qualquer zona da peça, para isso basta posicionar o cursor sobre a zona pretendida, que ele mostra as coordenadas nos 3 eixos e a respetiva percentagem deste defeito. Do lado direito é possível também definir uma escala, em que as zonas mais claras correspondem às zonas de menor rechupe e as zonas a cor vermelha mais intensa, às de maior rechupe.

Desta análise é possível concluir que a zona da peça mais suscetível à formação de rechupe é a zona da caixa, com uma taxa de rechupe de 30.48%, o que valida os resultados práticos obtidos. A figura 5.43 confirma os resultados desta análise.

Em contrapartida, as zonas dos ataques à peça e das masslotes apresentam uma taxa muito elevada de rechupe, que facilmente se justifica por serem zonas muito espessas.

- **Análise pelo critério de Niyama**

Através deste critério é possível analisar a probabilidade de formação de porosidades associadas à retenção de gases no seio do fundido. Este problema deriva da dificuldade em extrair o ar misturado com os gases do interior da cavidade do molde durante o enchimento e solidificação do metal.

Este critério consiste na determinação do valor de Niyama, que é inversamente proporcional ao aparecimento de porosidades, ou seja, um valor elevado de Niyama significa que a probabilidade de existirem poros na peça é reduzida.

Desta análise conclui-se que zonas delimitadas pela cor branca, são zonas fortemente propensas ao aparecimento de poros (figura 5.23).

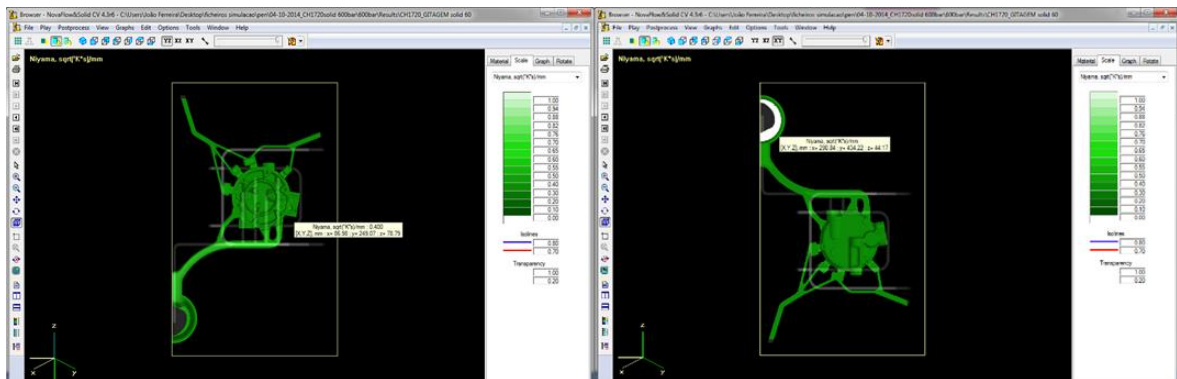


Figura 5.23 - CH 1720_Aparecimento de zonas com porosidades.

Nos resultados obtidos pelo critério de Niyama verifica-se que na imagem anterior na vista representada à direita, existe uma forte possibilidade de aparecerem porosidades apenas na zona da bolacha (zona de cor branca). Pode constatar-se ainda que em toda a geometria da peça a probabilidade de ocorrência de poros é substancialmente menor, correspondendo a um valor de Niyama igual a 0,4.

- **Análise do Tempo de Solidificação**

Através da análise do tempo de solidificação, foi possível identificar as zonas mais espessas que demoram mais tempo a solidificar e as que solidificam mais rapidamente. Foi possível quantificar o tempo de solidificação necessário em qualquer zona do fundido, prevendo-se um tempo total de aproximadamente 8 segundos (ver figura 5.24).

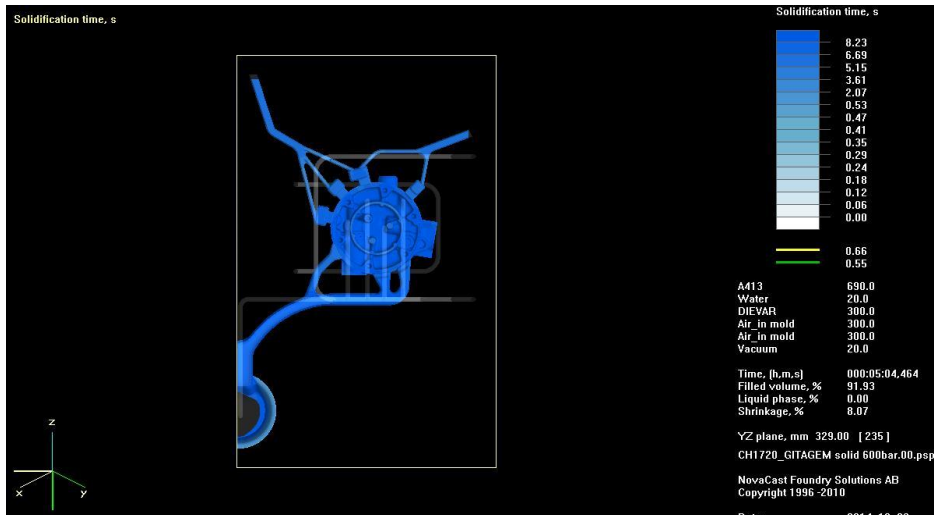


Figura 5.24 - CH 1720_Tempo de solidificação.

Note-se que nas zonas da cavidade mais próximas das linhas de água, o tempo de solidificação diminui bastante devido ao arrefecimento provocado pela circulação da água fria nestes canais.

- **Análise do Perfil de Temperaturas**

O perfil de temperaturas obtido é traçado em função das zonas onde são colocados os sensores. Por isso é importante que se faça coincidir a posição dos sensores nas zonas mais críticas da peça, permitindo uma melhor perceção do aparecimento de defeitos (ver figura 5.25).

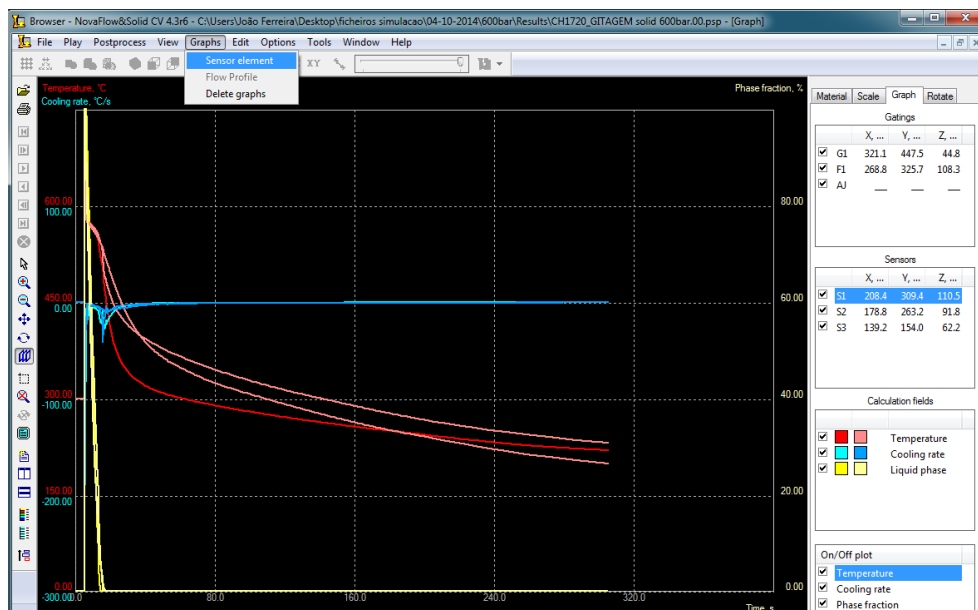


Figura 5.25 - CH 1720_Perfil de temperaturas.

Neste gráfico é possível visualizar a variação da temperatura ao longo do tempo de arrefecimento, em cada um dos três sensores, colocados em zonas distintas da cavidade (curvas de cor rosa e vermelha). Note-se ainda, que a fase líquida se mantém nos 100% até que o arrefecimento se processe até à temperatura de 592°C. Na altura em que se atinge o intervalo de solidificação da liga A413 (585°C-575°C), a fase líquida começa a decrescer exponencialmente até que toda a massa de metal solidifique.

5.2 Modelo “Cilinder Head 1767”

5.2.1 CH 1767 – Processo de enchimento

1º Ensaio

Neste caso, esta simulação não poderia ser tão “simples e expedita” como a que tivera sido anteriormente realizada para a cavidade “CH1720”. Uma vez que se trata de um projeto novo, houve a necessidade de se realizarem vários cálculos teóricos de modo a ajustar com algum rigor todos os parâmetros de enchimento necessários para prosseguir com a respetiva simulação.

Através do software CAD “Solidworks” foi possível determinar a massa de metal injetada correspondente ao volume do modelo 3D da cavidade ($V=408.36518 \text{ cm}^3$), tendo por isso que definir o tipo de material “Alumínio” e a respetiva densidade da liga em questão ($\rho = 2.657 \text{ g/cm}^3$), (ver figura 5.26).

$$\begin{array}{l} 2,657\text{g} \text{ — } 1\text{cm}^3 \quad \Leftrightarrow \text{Massa modelo 3D} = 1085\text{g} \\ \text{Massag} \text{ — } 408,36518 \text{ Volume modelo 3D (cm}^3\text{)} \end{array}$$

Através desta relação foi possível determinar a massa de Alumínio correspondente ao modelo 3D. Porém, na prática foi necessário injetar uma massa relativamente maior uma vez que no modelo 3D facultado pelo fornecedor do molde, os canais destinados às saídas de gases estavam cortados.

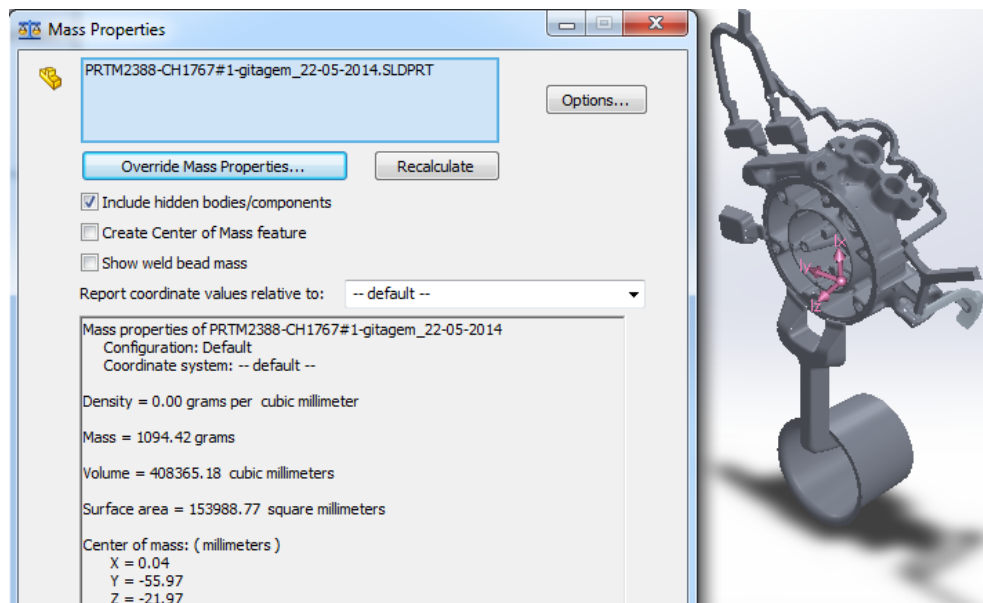


Figura 5.26 – CH1767_Solidworks-volume do modelo 3D da cavidade.

Na realidade, seria necessária uma massa de Alumínio de 1146,6g, cujo volume correspondente é calculado de seguida.

$$2.657g \text{ — } 1\text{cm}^3 \Leftrightarrow \text{Volume cacho (real)} = 431.54\text{cm}^3$$

$$1146.6g \text{ — } \text{Volume cacho (real) cm}^3$$

Assim, pode assumir-se um peso aproximado de metal injetado de 1147g.

Relativamente ao comprimento ativo da camisa, sabe-se que este corresponde ao comprimento do conjunto composto pela camisa da máquina mais a camisa do molde, menos o comprimento do impacto (copo de enchimento).

Assim, sabe-se que:

- $L \text{ ativo camisa} = 26 + 25 - 9 \Leftrightarrow L \text{ ativo camisa} = 42\text{cm}$, comprimento este, que teve que ser ajustado para 41.7cm, por questões de compatibilidade da máquina de fundição injetada.
- A partir daqui foi possível efetuar o dimensionamento completo dos parâmetros de fundição necessários para avançar com a simulação.
- Área do pistão = $\frac{\pi \times D^2}{4} \Leftrightarrow \text{Área pistão} = \frac{\pi \times 7^2}{4} \Leftrightarrow \text{Área do pistão} = 38.465\text{cm}^2$;
- Volume da camisa = área do pistão x comprimento ativo da camisa \Leftrightarrow
Volume da camisa = $38.465 \times 41.7 = 1603.6152\text{cm}^3$;

- Taxa de enchimento (3D) = $\frac{\text{massa injetada}}{\rho_{\text{alumínio}} \times 0.95 \times \text{Volume da camisa}} \times 100 \Leftrightarrow$ Taxa de enchimento = $\frac{1085}{2.657 \times 0.95 \times 1603.6152} \times 100 \Leftrightarrow$ Taxa de enchimento = 26.8%;
- Taxa de enchimento real = $\frac{\text{massa injetada}}{\rho_{\text{alumínio}} \times 0.95 \times \text{Volume da camisa}} \times 100 \Leftrightarrow$ Taxa de enchimento = $\frac{1146.6}{2.657 \times 0.95 \times 1603.6152} \times 100 \Leftrightarrow$ Taxa de enchimento = 28.3%;
- Área da secção de alimentação = 0.88cm²;
- Velocidade rápida do pistão = 1m/s;
- Velocidade na secção de alimentação = $\frac{\text{área do pistão}}{\text{área secção de alimentação}} \times \text{Velocidade do pistão} \Leftrightarrow$ Velocidade na secção de alimentação = $\frac{38.465}{0.88} \times 1 \Leftrightarrow$ Velocidade na secção de alimentação = 43.71m/s;
- Equação da continuidade (confirmação da velocidade rápida do pistão):
Área pistão x V pistão = Área secção alimentação x Vsecção alimentação
 $\Leftrightarrow 38.465 \times V \text{ pistão} = 0.88 \times 43.71 \Leftrightarrow V \text{ pistão} = 0.99\text{m/s}$ (“confirma”);
- Massa após alimentação = 764.4g;
- Tempo de enchimento da cavidade = $\frac{\text{massa após alimentação}}{V_{\text{alimentação}} \times \rho_{\text{alumínio}} \times \text{área}_{\text{alimentação}} \times 0.785} \Leftrightarrow$ Tempo de enchimento da cavidade = $\frac{764.4}{(100 \times 43.71) \times 2.657 \times 0.88 \times 0.785} \Leftrightarrow$ Tempo de enchimento da cavidade = 0.0953s;
- Tempo fim enchimento = 0.0970s;
- Curso de entrada da velocidade rápida = 30cm;
- Curso ativo da velocidade rápida = comprimento ativo da camisa – (curso entrada velocidade rápida + espessura da bolacha) \Leftrightarrow Curso ativo velocidade rápida = 41.7 – (30+2) \Leftrightarrow Curso ativo velocidade rápida = 9.7cm;
- Volume útil da camisa (velocidade rápida) = $\frac{\pi \times r^2}{4} \times (41.7 - 30) = 450.27\text{cm}^3$;

- Taxa de enchimento teórica da velocidade rápida = $\frac{\text{volume desenho (3D)}}{\text{Volume util da camisa}} \times 100 \Leftrightarrow$ Taxa de enchimento teórica da velocidade rápida = $\frac{408.36}{450.27} \times 100 = 90.69\%$
- Taxa de enchimento teórica da velocidade rápida = $\frac{\text{volume cacho}}{\text{Volume util da camisa}} \times 100 \Leftrightarrow$ Taxa de enchimento teórica da velocidade rápida = $\frac{431.54}{450.27} \times 100 = 95.84\%$

Deste último cálculo pode concluir-se que como a taxa de enchimento teórica no curso em que entra a velocidade rápida é de cerca de 100%, praticamente já não existe ar aprisionado na camisa de injeção, ou seja, é seguro passar-se para a velocidade rápida sem comprometer a sanidade do fundido com possíveis porosidades.

Relativamente ao processo de enchimento definido na simulação, sabe-se que com um pistão de 70mm de diâmetro, uma câmara/camisa de injeção com um comprimento ativo de 417mm, cuja aproximação do software é de 417.030mm e uma massa injetada de 1,147Kg, a posição inicial prevista do pistão é de 289.439mm e a final de 417.029mm.

O curso do pistão no início da terceira fase corresponde à diferença entre o curso final e o deslocamento durante a compactação, sendo que este último corresponde à espessura da bolacha mais o curso de compactação, ou seja:

$$417.029 - (20 + 5.029) = 392\text{mm}$$

O deslocamento do pistão na segunda fase corresponde à diferença entre o curso no início da terceira fase e o curso em que entra a velocidade rápida (início da segunda fase), cujo valor é:

$$392 - 300 = 92\text{mm}$$

E por fim, o deslocamento do pistão na primeira fase, que será este valor subtraído do curso inicial estimado pelo simulador:

$$300 - 289.439 = 10.561\text{mm}$$

Deste modo, foi possível estimar-se os valores tabelados de seguida para as três fases de fundição:

Tabela 5.4 – CH1767_Parâmetros de funcionamento teóricos.

Fase	Tempo de duração (s)	Curso do pistão, ΔL (mm)	V _{Máx} do pistão (m/s)
1ª Fase (alimentação)	0,062	10.561	0.170
2ª Fase (enchimento)	0,092	92	1.000
3ª Fase (compactação)	4,172	25.029	0.006

A partir destes cálculos teóricos, definiram-se os parâmetros de enchimento para as 3 fases na interface do menu do simulador que simula o enchimento (ver figura 5.27).

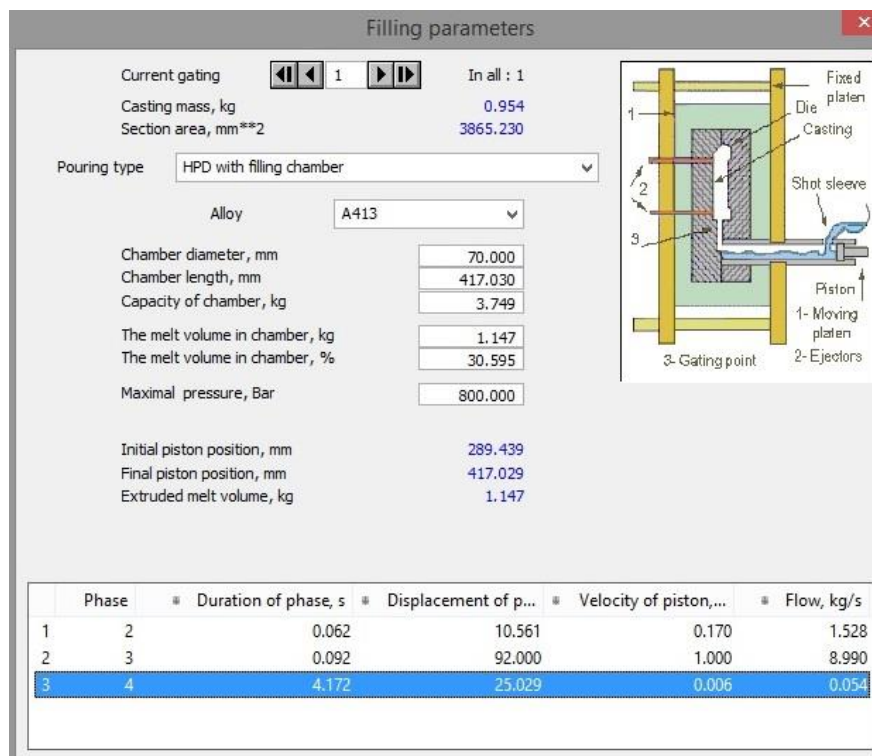


Figura 5.27 - CH 1767_Parâmetros de enchimento (3 fases).

Da primeira simulação do fluxo de enchimento deste modelo, pode concluir-se que a massa prevista de metal injetada se revelou insuficiente, uma vez que apenas 97.2% do volume da cavidade ficou preenchido. A razão que levou a apontar para esta causa deve-se ao facto da simulação de fluxo do modelo “Cylinder Head 1720” se ter

processado até ao enchimento completo, desprezando o efeito do sistema de vácuo, não sendo portanto necessário aumentar o valor nominal da pressão de injeção.

A imagem que se segue demonstra o fim do enchimento desta cavidade em que foram definidas as 3 fases:

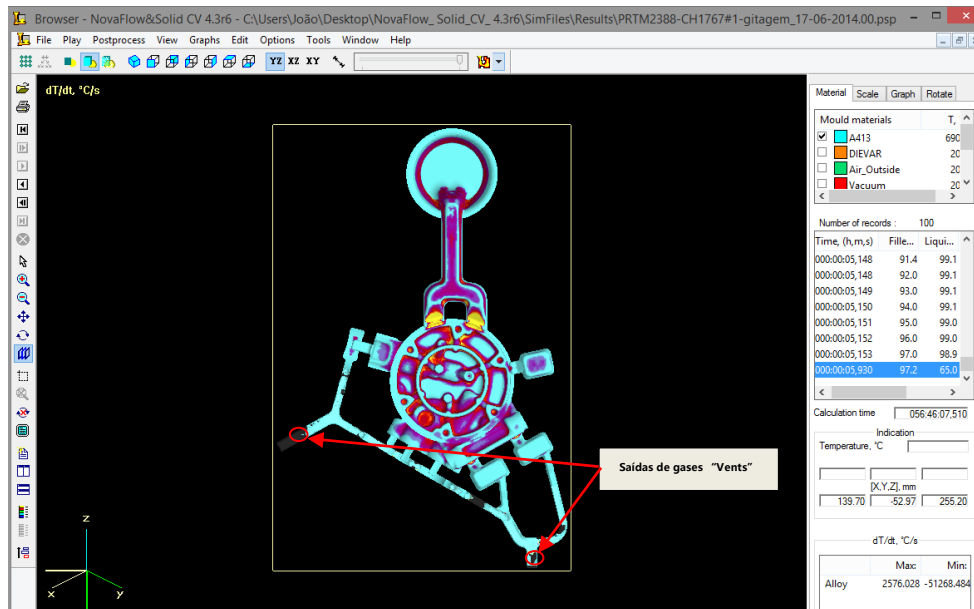


Figura 5.28 - Browser CH 1767_enchimento (3 fases).

2º Ensaio

Paralelamente ao sucedido anteriormente na simulação da cavidade CH 1720, procedeu-se de igual modo, simulando o processo de enchimento em apenas duas fases. Todos os parâmetros utilizados foram idênticos, excetuando-se as variáveis do processo de enchimento, devido a este modelo pressupor um pistão de injeção de menor diâmetro, para além disto, trata-se de um sistema de enchimento de cavidade única, com diferentes canais de ataque, diferentes posicionamentos de *masselotes* e saídas de gases.

O sistema de enchimento foi projetado para um pistão de diâmetro inferior (70mm), logo a câmara de injeção terá menor volume, assumindo-se diferentes cursos e velocidades do pistão em ambas as fases (ver figura 5.29).

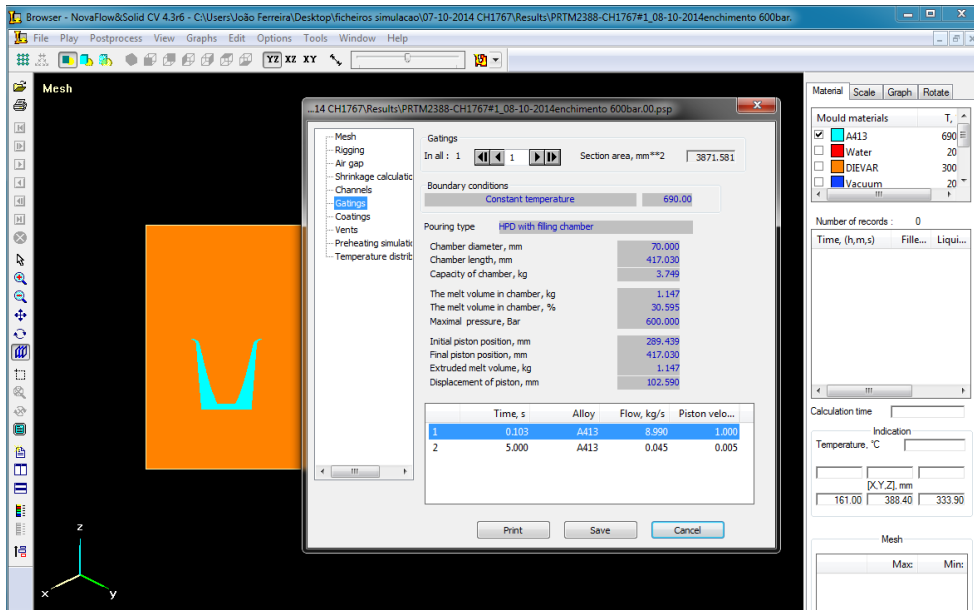


Figura 5.29 - CH 1767_Parâmetros de enchimento (2 fases).

De seguida mostra-se como se processou o enchimento desta cavidade com apenas as duas fases especificadas anteriormente (figura 5.30).

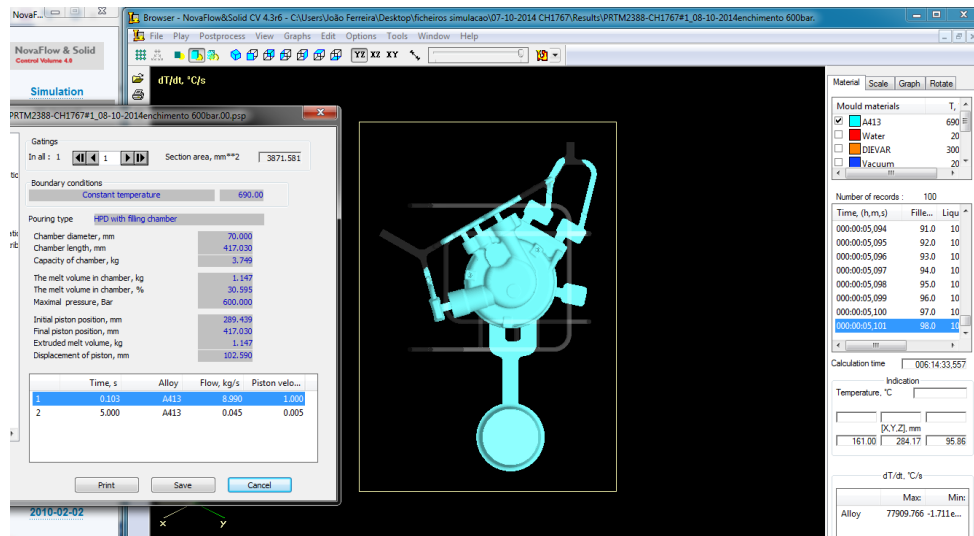


Figura 5.30 - CH1767_Enchimento (2 fases).

Analisando agora o perfil de velocidades com que o metal entra na cavidade do molde nas diferentes zonas da peça, pode constatar-se que numa das secções do ataque à peça a velocidade do metal é de 18,03m/s (ver figura 5.31).

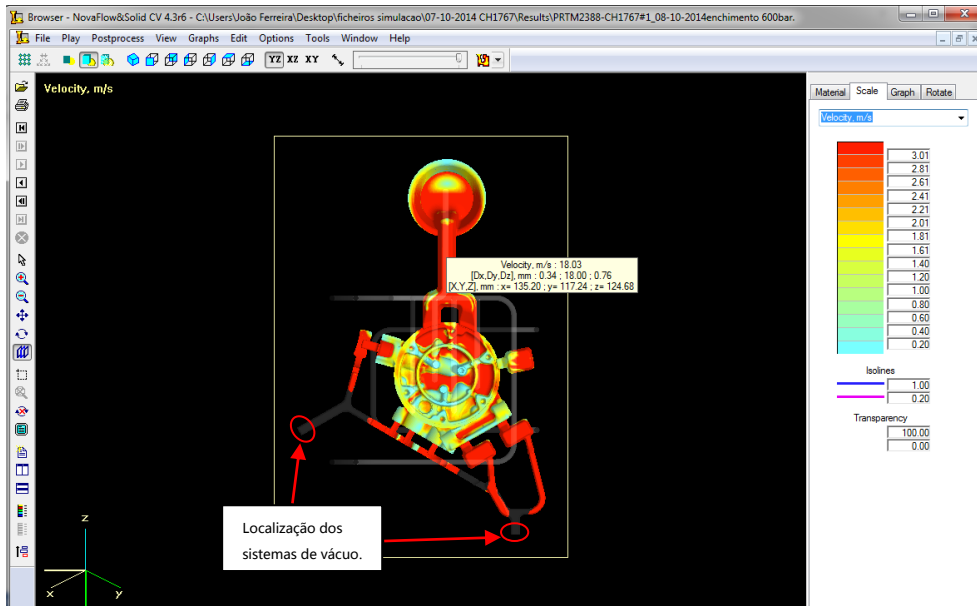


Figura 5.31 - CH 1767_Perfil de velocidades.

Esta análise tem especial importância quando se pretende fazer com que o metal não chegue próximo dos canais do sistema de vácuo, evitando-se correr o risco de os entupir. Pode verificar-se ainda que as *masselotes* cumprem as suas funções, reduzindo a velocidade do metal nestas zonas, isto porque o metal nas saídas de gases facilmente atinge velocidades na ordem dos 45m/s, por terem uma área de secção tão reduzida de modo a facilitar o arrefecimento e solidificação do metal.

Relativamente ao tempo de enchimento desta cavidade, sabe-se que o metal demora sensivelmente cerca de 5.023 segundos até alcançar a secção média dos ataques à peça (ver figura 5.32).

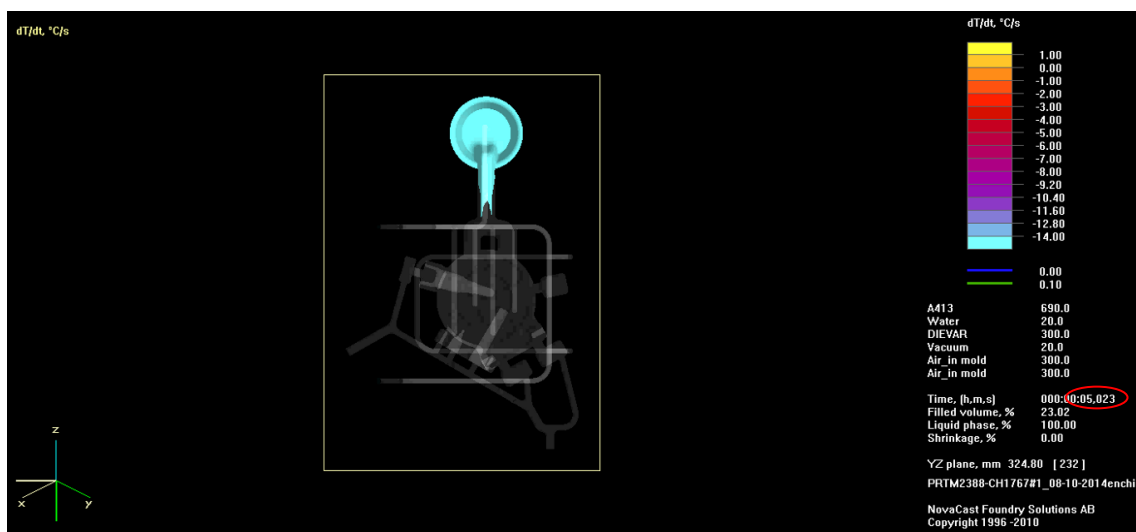


Figura 5.32 - CH 1767_Duração da primeira fase do enchimento.

No final do enchimento a estimativa para o tempo de enchimento é de 5.101 segundos (ver figura 5.33).

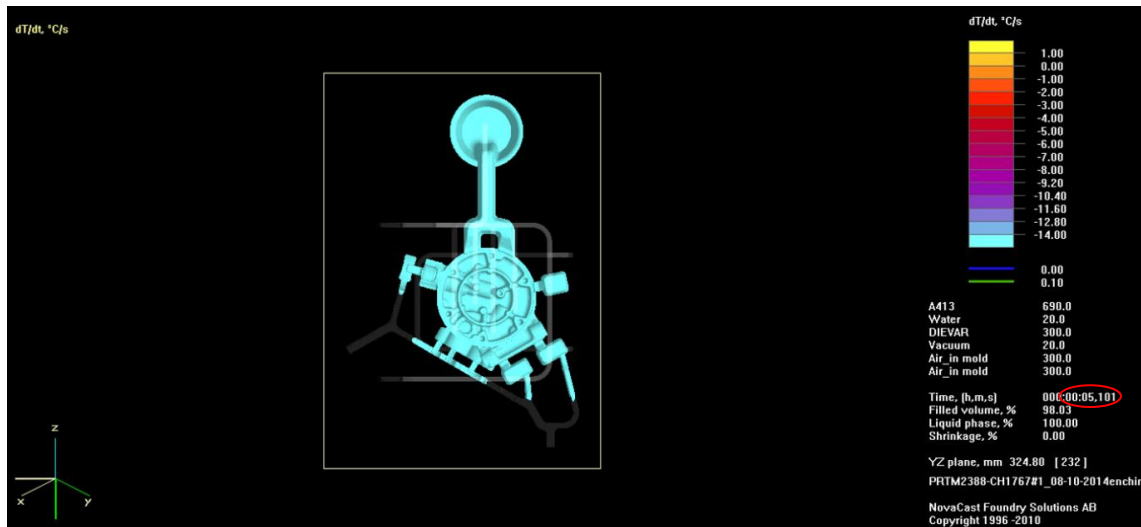


Figura 5.33 - CH 1767_Tempo de enchimento total.

Assim, da diferença entre estes dois valores (5.101-5.023), resulta um tempo de enchimento teórico de 0.078 segundos.

Posto isto, resta identificar quais as últimas zonas a serem preenchidas com metal, na figura seguinte é possível visualizá-las facilmente.

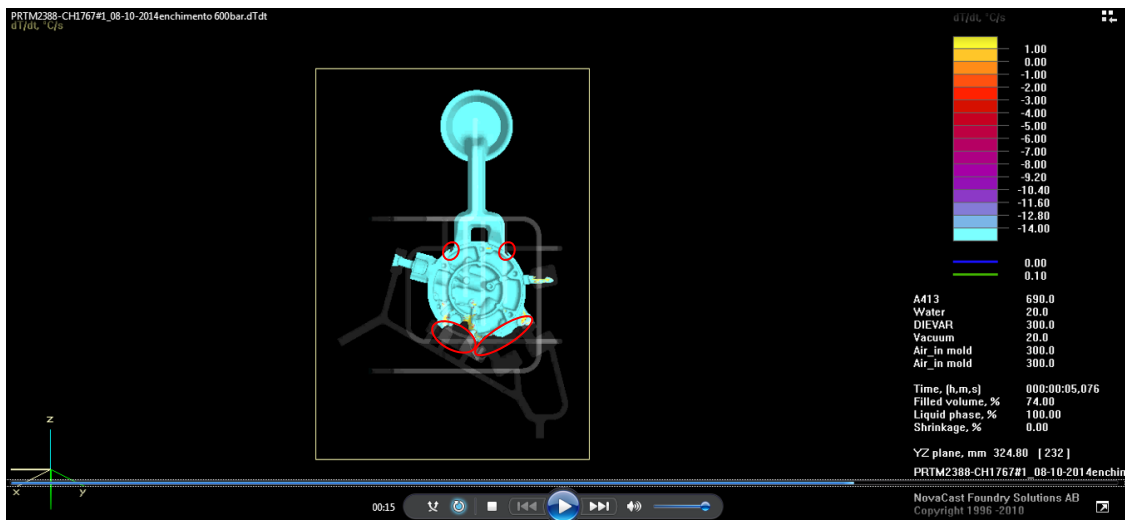


Figura 5.34 – CH1767-Ultimas zonas da peça a serem preenchidas.

5.2.2 CH 1767 – Arrefecimento e solidificação

O próximo passo passou por modelar o circuito ou perfil das linhas de água para o modelo em análise. Então, recorreu-se uma vez mais ao *Solidworks* e o resultado final foi o seguinte:

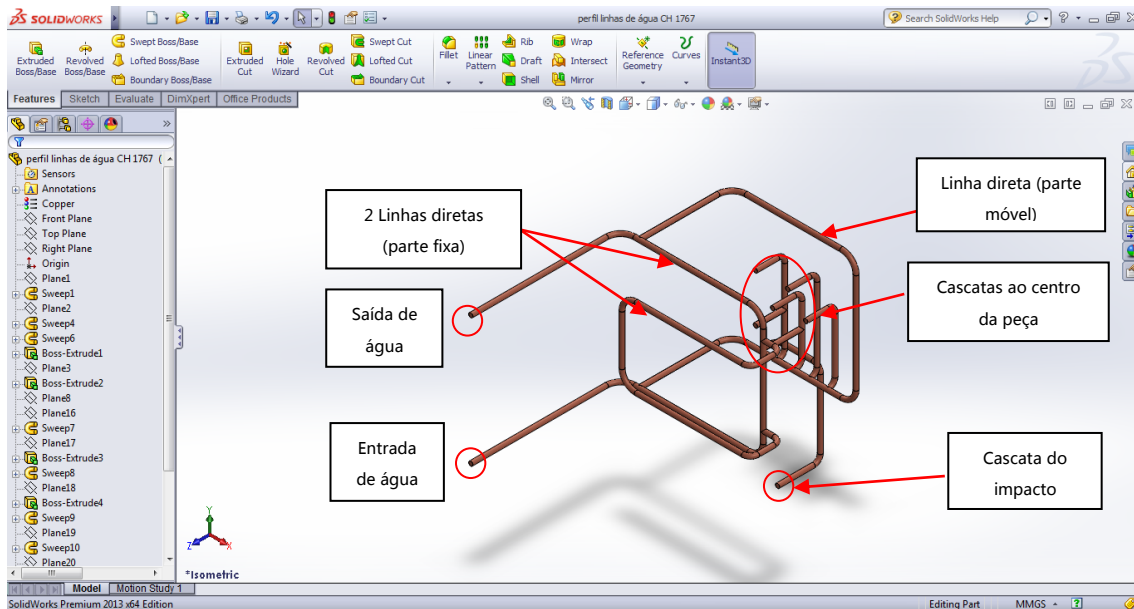


Figura 5.35 - CH 1767 – Modelo 3D do perfil das linhas de água.

De seguida, importou-se o ficheiro convertido em formato stl para o *3D Import* do simulador e posicionou-se o perfil na cavidade.

Já no menu *Initial Settings*, procedeu-se à geração da malha utilizando os valores parametrizados na simulação do modelo anterior, uma espessura mínima do molde de 25mm, e células com 1.4mm de tamanho. O segundo passo foi “cortar” o modelo 3D do molde por uma secção inferior que intersesta-se o perfil das linhas de água nos canais destinados à entrada e saída (ver figura 5.36).

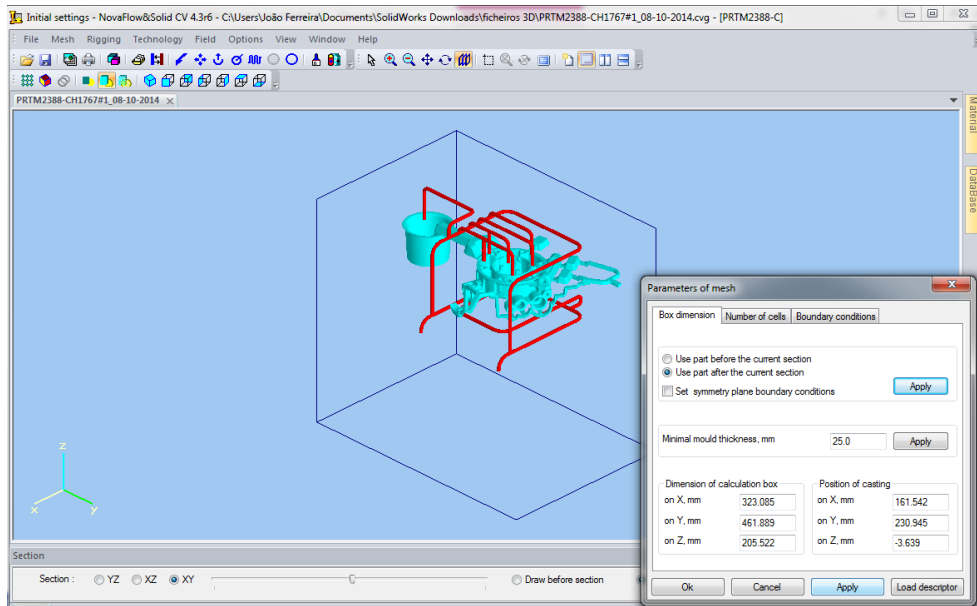


Figura 5.36 - CH 1767_geração da malha.

5.2.3 CH 1767 – Análise de resultados

- Análise dos pontos quentes (Thermal Modulus)

Na figura que se segue, facilmente se conseguem distinguir diferentes valores de módulos térmicos em diferentes zonas do fundido. Verifica-se também que zonas de maior módulo térmico correspondem às últimas a solidificar (figura 5.37). Este modelo apresenta um módulo térmico médio de aproximadamente 0.64cm.

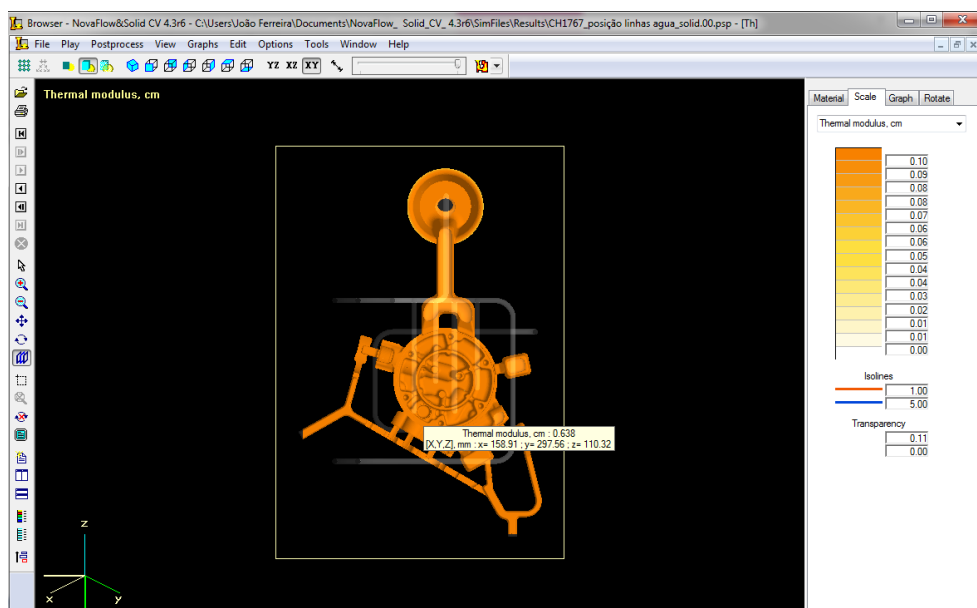


Figura 5.37 - CH1767_Pontos Quentes.

- **Análise de Rechupe (Shrinkage)**

Da análise à formação de rechupe sob a forma de porosidades, conclui-se que tal como o sucedido no modelo CH 1720, surge uma taxa de rechupe mais elevada na zona da caixa (8.6%), e na zona do DPS, que consiste num furo lateral destinado à montagem de uma válvula que regula o fluxo de ar na peça, com uma taxa de rechupe relativamente inferior (4.3%) (ver figura 5.38 e 5.46).

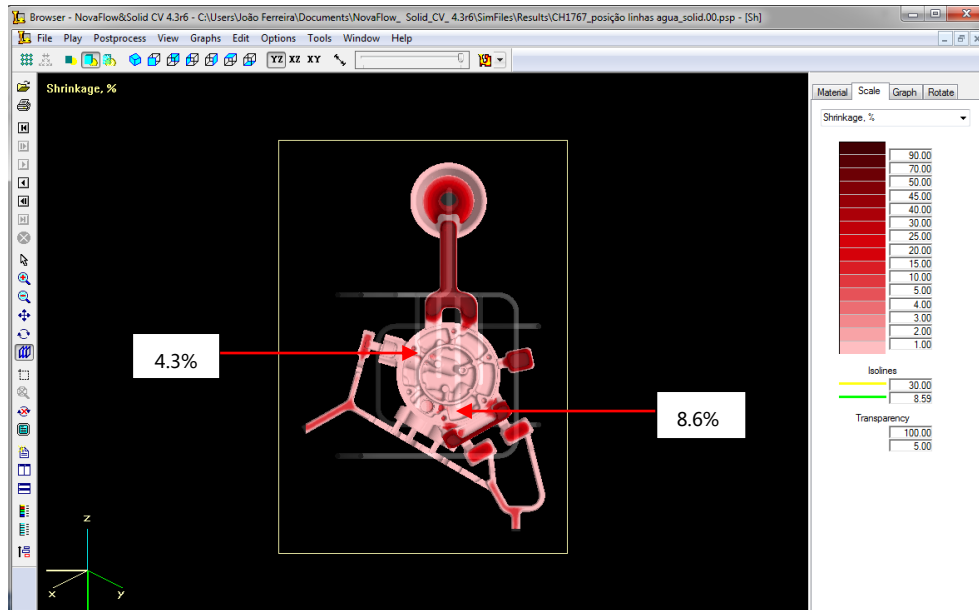


Figura 5.38 - CH1767_Formação de Rechupe.

- **Análise ao critério de “Niyama”**

Pelo critério de “Niyama” pode-se verificar que o índice de porosidades é idêntico ao obtido na simulação do modelo anterior (0.4), resultando numa distribuição de porosidades mais ou menos idêntica em todo o domínio da peça (figura 5.39).

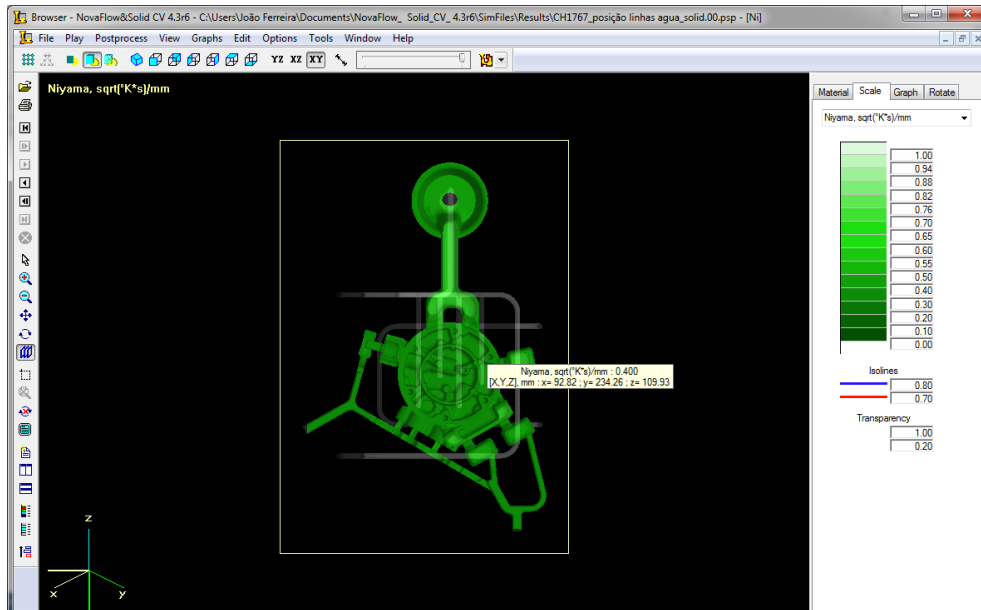


Figura 5.39 - CH1767 – Critério de Nyama.

- **Tempo de solidificação**

Relativamente ao tempo de solidificação, estima-se que as zonas de maior espessura da peça demorem cerca de 12.6 segundos, enquanto outras menos espessas demoram aproximadamente 4.6 segundos (ver figura 5.40).

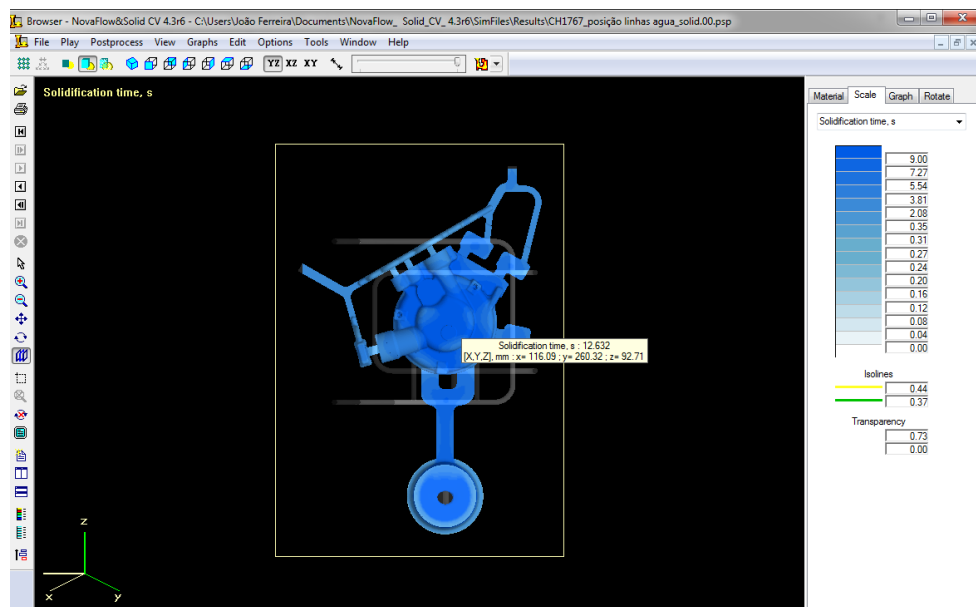


Figura 5.40 - CH 1767 – Tempo de solidificação.

- **Análise do perfil de Temperaturas**

Confrontando os resultados obtidos do registo de temperaturas nos sensores, com o perfil de temperaturas traçado para o modelo CH 1720, verifica-se que neste caso o metal se mantém a temperaturas relativamente superiores durante um intervalo de tempo maior. Por outras palavras, conclui-se que o processo de arrefecimento da liga de Alumínio neste modelo se processa de forma mais lenta e gradual, favorecendo uma solidificação dirigida do fundido. O mesmo se passa com a fase líquida, que não diminui de forma tão repentina, o que se revela proveitoso no que respeita à fase de compactação, ou seja, permite uma melhor compensação do fenómeno de contração do metal, minimizando possíveis problemas de rechupes e porosidades (ver imagem 5.41).

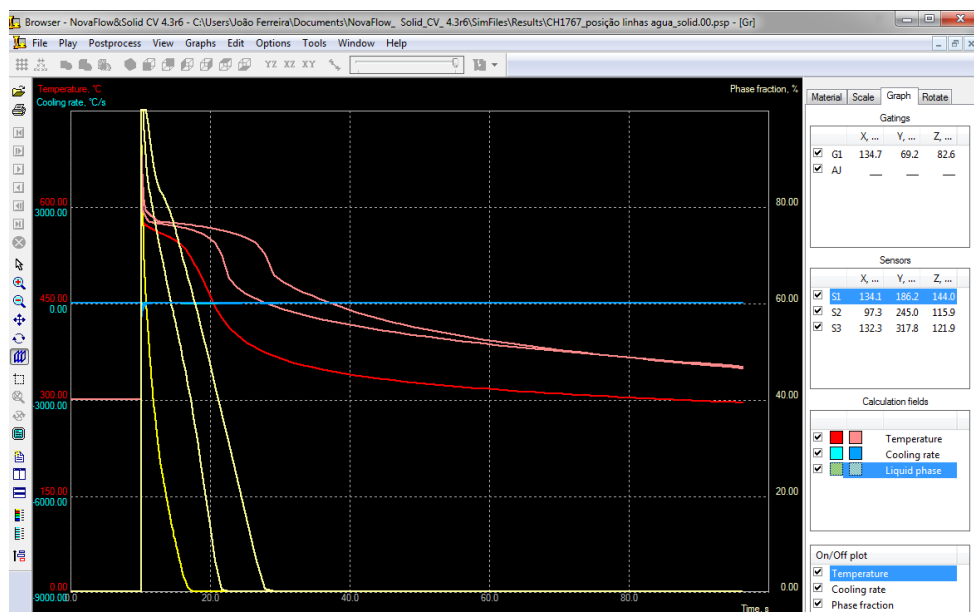


Figura 5.41 - CH1767 – Perfil de temperaturas.

5.3 Validação Experimental

O objetivo da validação experimental consiste na calibração do método e parâmetros envolvidos no processamento dos resultados teóricos obtidos pelo simulador. Nesse sentido, apresentam-se de seguida algumas fotos de peças de ambos os modelos, rejeitadas após o processo de maquinagem pela presença de porosidades nas zonas mais comuns e evidenciadas nas diversas análises realizadas anteriormente.

Os defeitos de fundição sobre os quais incidem estes rejeitos derivam essencialmente da presença de micro e macroporosidades.

Estes defeitos de fundição apenas podem ser descobertos visualmente nas superfícies maquinadas da peça.

Dependendo da zona, do tamanho e quantidade de porosidades, o seu efeito poderá ou não prejudicar o bom funcionamento das peças após montagem nos compressores do ar-condicionado dos automóveis. Porém, quando surgem em zonas maquinadas para efeitos de vedação, devem ser rejeitadas, verificando-se o alarme no *Poka-Yoke* de teste ao vazamento.

5.3.1 Porosidades no modelo CH 1720

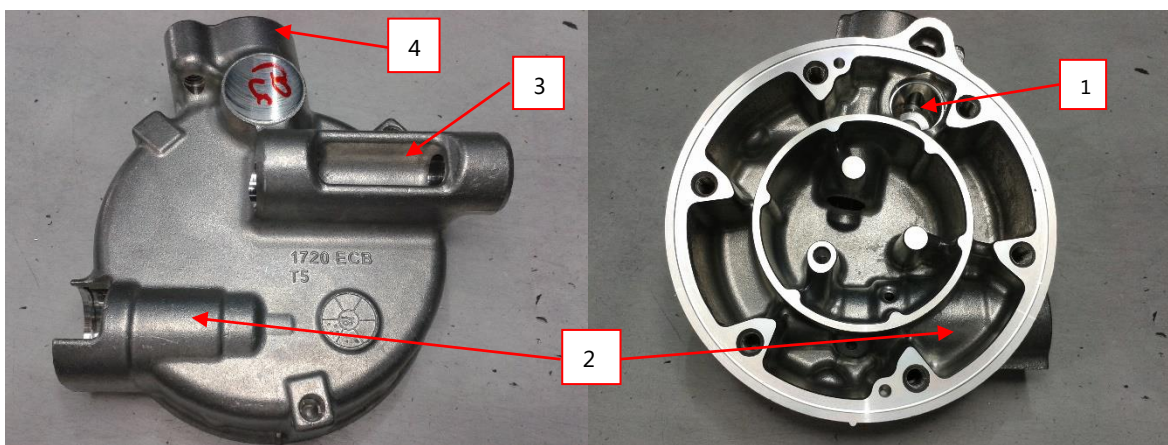


Figura 5.42 - CH1720 – zonas críticas.

- 1) Caixa – esta zona assinalada com o número 1 na figura anterior, é onde surgiu a maior taxa de porosidades (30.48%) (ver figura 5.22). A imagem seguinte comprova:



Figura 5.43 - CH1720-Visualização de porosidades na caixa.

- 2) DPS – zona identificada com o número 2 na figura 5.42, na simulação resultou numa taxa de poros relativamente inferior, aproximadamente 5% (ver figura 5.22).

- 3) Tubo – Encontra-se evidenciado com o número 3 na figura 5.42. Neste caso, este tipo de defeito poderá estar relacionado com uma macroporosidade possivelmente originada pela contração do metal, ou então uma bolha superficial, derivada de uma insuficiente libertação de hidrogénio por parte do metal fundido, ou ar retido no fluxo de metal (ver figura 5.22).

De seguida mostra-se uma peça com uma macroporosidade nesta zona (ver figura 5.44).



Figura 5.44 - CH1720-Macroporosidade no tubo.

- 4) Sucção – Encontra-se representada com o número 4 na figura 5.35, na análise de rechupe resultou com cerca de 15% de poros (figura 5.45).



Figura 5.45 - CH1720-Porosidade na Sucção.

5.3.2 Porosidades no modelo CH 1767

Deste modelo não existiam resultados reais de peças com rejeitos, pois ainda não se tinha iniciado a produção em massa. Contudo, na figura 5.38 e 5.39, é possível fazer uma estimativa acerca da taxa de porosidades nas zonas da caixa (1), DPS (2), tubo (3) e na sucção/descarga (4), (ver figura 5.46).

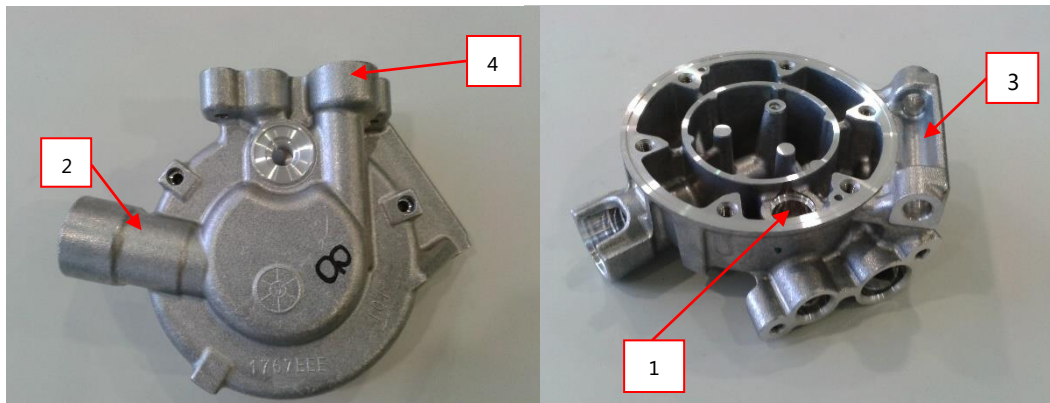


Figura 5.46 - CH1676 – Zonas propícias ao aparecimento de poros.

6 CONCLUSÕES

A componente prática deste trabalho revelou a eficiência e necessidade que estas ferramentas informáticas de simulação numérica têm no projeto ao desenvolvimento do produto, nomeadamente no ramo da fundição associado à indústria automóvel.

Na indústria automóvel os componentes são produzidos com tolerâncias dimensionais muito apertadas. Daí que as peças obtidas pelo processo de fundição sejam vulgarmente designadas de fundidos de precisão. Este rigor dimensional requer meios cada vez mais sofisticados com vista a melhorar a viabilidade associada ao projeto de fabrico. Assim, torna-se imprescindível recorrer a este tipo de softwares informáticos

Estas aplicações de simulação são ferramentas muito caras, daí que muitas empresas excluam a possibilidade de investimento num software deste género devido ao elevado investimento inicial de aquisição. Contudo, fica comprovado neste trabalho os benefícios inerentes à fase de projeto de novos fundidos, bem como na otimização de processos já postos em prática

Existem inúmeras aplicações deste género disponíveis no mercado, todavia, nem todas são específicas para a fundição injetada.

Este trabalho surgiu da necessidade específica da Tesco em prever com algum rigor o modo como se processa o enchimento nas respetivas cavidades moldantes, determinando quais as últimas zonas a serem preenchidas com metal. Paralelamente, também o efeito dos canais de refrigeração do molde foi analisado, concluindo acerca da sua influência no fenómeno de arrefecimento do fundido até solidificar completamente.

O recurso a este software de simulação serviu de certa forma para avaliar as suas potencialidades no domínio da fundição injetada. Apesar das várias limitações inerentes à sua aplicabilidade neste processo de fundição, a sua utilização serviu para sensibilizar a empresa quanto à necessidade de integração de uma ferramenta de simulação numérica no departamento da engenharia de fundição

O Nova Flow&Solid foi um software especialmente concebido para simular modelos obtidos por fundição em areia, no que respeita à fundição injetada, representa uma aplicação válida para analisar o processo de enchimento e solidificação, embora os resultados não sejam suficientemente precisos.

A precisão ou rigor das análises obtidas é uma questão um pouco subjetiva, pois está dependente de diversos fatores, desde os parâmetros de injeção, ciclos de arrefecimento do molde, coeficientes de transferência de calor envolvidos, entre outros. Para além disto, o modo como o utilizador interpreta os resultados também é um fator preponderante. Paralelamente, existe ainda um outro relacionado com o senso comum, ou dito de outra forma, a experiência adquirida da prática, normal numa indústria de fundição, as condições industriais envolvidas, e a carência de recursos de monitorização do processo.

O software revelou-se fiável em termos de resultados práticos, embora os valores absolutos do módulo de solidificação sejam irreais. Para além disto, demonstrou diversas limitações relacionadas com a sua aplicabilidade no processo de fundição injetada, nomeadamente a incapacidade de simular o efeito do arrastamento do ar juntamente aos gases no interior da camisa de injeção durante a primeira fase do processo de enchimento, não permitir definir corretamente os parâmetros de funcionamento dos sistemas de vácuo da injeção e do molde, não ser capaz de simular o efeito dos elementos móveis no interior da cavidade do molde, os pinos moldantes. Esta versão também não permite simular o efeito do spray desmoldante.

Na tentativa de contornar esta última limitação, definiu-se uma pintura do molde (Coating), porém também não foi possível determinar o coeficiente de transferência de calor associado ao efeito do arrefecimento do spray, uma vez que a concentração da mistura do desmoldante variava constantemente, sempre que se efetuavam as leituras

Para além disto, surgiram várias complicações ao longo da realização deste projeto, estando elas relacionadas com falta de poder computacional dos meios informáticos disponíveis, e diversas incompatibilidades desta versão já antiga do software com os sistemas operativos da atualidade.

O problema mais grave foi não ser possível realizar a simulação do processo de enchimento e de solidificação em simultâneo no menu “Flow&Solid”. Este foi um fator bastante desmotivante, uma vez que tudo indicava que todos os parâmetros introduzidos estariam bem definidos. Posto isto, apenas foi possível processar a informação separadamente, o que não é correto uma vez que este se trata de um processo cíclico em que o modo como se processa o enchimento da cavidade é decisivo para que a direccionalidade do processo de solidificação ocorra devidamente. Só assim se poderiam obter resultados mais realistas

Em suma, saliente-se que todo este processo de validação de um sistema de enchimento através de um software de simulação numérica, deverá contemplar todas as condições experimentais associadas à atividade industrial de uma fundição, de modo a incrementar a credibilidade dos resultados obtidos

6.1 Sugestões para trabalho futuro

De modo a dar continuidade à componente prática deste trabalho, seria interessante explorar melhor o processo de simulação utilizando um software dedicado à fundição injetada, como por exemplo o Flow 3D.

Assim, sugere-se então um estudo mais aprofundado, que envolva desta vez o desenho do molde, tentando simular o efeito do arrastamento de ar no interior da camisa de injeção após o vazamento do metal durante a primeira fase do enchimento. Paralelamente, seria relevante simular o efeito do sistema de vácuo, e fazer a simulação conjunta do enchimento e solidificação, seria conveniente testar diferentes pressões de injeção até estabelecer um valor padrão com base nos resultados das diversas análises e respetivas analogias à experimentação

Devido à escassez dos recursos disponíveis, envolvidos na monitorização do processo de fundição, propõe-se um estudo mais pormenorizado do processo de transferência de calor, recorrendo à colocação de termopares ou outro tipo de sensores no molde para quantificar a temperatura e o modo como evolui durante o tempo em que o molde se encontra fechado.

Duas contra medidas pensadas com o objetivo de contornar as limitações do NovaFlow e solid, que não chegaram a ser postas em prática por falta de tempo, estão relacionadas com a possibilidade de revestir o modelo 3D da cavidade moldante com outro material e prolongar a secção circular da bolacha até ao plano fronteira do molde, no sentido de avaliar se o facto da secção em que é definido o ponto de enchimento estar situado no interior da caixa correspondente ao molde em aço, seria diferente caso o “gating point” estivesse em contacto com o meio ambiente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ferreira, José Carvalho, "Tecnologia da Fundição", Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [2] Barbosa, Joaquim, "*PROCESSOS DE FUNDIÇÃO*", Publicação interna da Universidade do Minho, 2002.
- [3] <http://www.buhlergroup.com/global/en/products/die-casting-machine-evolution.htm#.VIRhKDGsWAU>.
- [4] Barbosa, Joaquim, "FUNDAMENTOS DE ENCHIMENTO E ALIMENTAÇÃO", Publicação interna da Universidade do Minho, 2003.
- [5] Tesco-Componentes para automóveis Lda, *Publicação interna*, Ribeirão, Vila Nova de Famalicão.
- [6] Peixinho, Nuno, *Mecânica Computacional - "Método dos Elementos Finitos"*, Publicação interna da Universidade do Minho.
- [7] Lobarinhas, Pedro, "*Métodos Numéricos na Transferência de Calor*", Publicação interna da Universidade do Minho, 2009/10.
- [8] *ASM Speciality HandBook - Aluminium and Aluminium Alloys - ASM International*, 1993.
- [9] Novacast "NOVA FLOW&Solid®", Guide to NOVA Flow&Solid®, Version 4.3r6.
- [10] G. Seliger, Sustainable Manufacturing: Shaping Global Value Creation, Springer, 2012.

[11] Lobarinhas, Pedro, "*Estudo e Modelação do Arrefecimento de Extrudidos em Calibradores*", Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, 2003.

[12] <http://wenku.baidu.com/view/ea9c63f69e314332396893e8.html>.
Basic Die Casting, October 23, 2006

8 ANEXOS

Anexo I – Calibração do software

Uma das funcionalidades do simulador NovaFlow&Solid consiste na possibilidade de calibrar o próprio software. A realização desta calibração seria importante caso o processamento das simulações do enchimento e solidificação fossem realizadas consecutivamente, e o fator tempo não interferisse negativamente. Só assim se conseguiriam resultados mais realistas.

Nesse sentido, seria de extrema importância proceder-se à calibração térmica do software no módulo “Thermal Calibration”, que permite obter a curva de arrefecimento que melhor se adequa aos meios utilizados na prática.

De seguida apresenta-se o procedimento que seria necessário seguir para levar a cabo a calibração do software:

1. No início deve definir-se a forma geométrica que mais se assemelha à peça que se pretende simular, neste caso é cilíndrica.
2. De seguida deve-se seleccionar o material do molde metálico (Dievar), a respetiva temperatura de pré-aquecimento ($T=300^{\circ}\text{C}$), a liga metálica (A413) e a temperatura de vazamento ($T=690^{\circ}\text{C}$);
3. No próximo passo define-se o modelo de cálculo que se pretende, neste caso o “Quasi-equilibrium”, que considera o processo de solidificação como sendo praticamente homogéneo em todo o domínio da peça. Isto deve-se ao facto da fundição injetada pressupor tempos de enchimento e solidificação muito curtos, não permitindo que o fenómeno de precipitação ocorra devidamente nas diferentes fases do processo de solidificação;
4. Deve dimensionar-se a geometria cilíndrica pré-definida, introduzindo o valor do módulo da peça expresso em cm e o raio, que corresponde a 20mm;
5. Posto isto deve verificar-se se os parâmetros que envolvem a taxa de transferência de calor dissipado pela liga metálica e a capacidade de

absorção do mesmo pelo material metálico do molde. O software assume os valores relativos aos materiais existentes na sua base de dados, caso estes valores necessitem de ser alterados para tornar a curva de arrefecimento mais realista, basta desativar a opção “use coefficients from Database” e introduzir manualmente valores correspondentes ao coeficiente de transferência de calor por condução, calor específico e densidades;

6. Na opção “Parameters of diagram” podem ser editados os valores da taxa de nucleação na primeira e segunda fase do processo de solidificação;
7. De seguida deverá ser seleccionada a interface de transferência de calor, neste caso, a opção “Surface heat transfer”, que admite que a maior parte das trocas de calor são realizadas por condução entre o metal em contacto com a superfície da cavidade moldante. Desta forma, e de acordo com a análise termográfica, estima-se que cerca de 20% do calor seja dissipado pelas paredes laterais do molde mais próximas das duas cavidades da peça (maior massa de Alumínio), 50% seja dissipado pela parte superior do molde onde se situam os canais de extração de gases (chillvents e canais de vácuo) e os restantes 60% correspondam à parte inferior, a zona do impacto em que é realizado o enchimento, daí que a temperatura permaneça alta;
8. Na impossibilidade de definir diretamente o efeito do arrefecimento provocado pelo spray desmoldante no software, optou-se por definir a opção pintura da cavidade moldante como material refratário “Coating”, definindo-se uma espessura de 0.1mm e um coeficiente de transferência de calor de 0.3 W/m²/°C, sendo este um valor assumido por defeito;
9. Posto isto, basta iniciar a simulação. Existe a possibilidade de carregar a curva teórica de arrefecimento (de cor branca) “Load ATAS curve”, para se poder comparar com a curva de arrefecimento resultante da calibração térmica (de cor vermelha), obtida no fim da simulação.

Anexo II – Controlo termográfico do processo de Fundição Injetada

Para monitorizar a temperatura do molde, utilizou-se um instrumento designado de termo-câmara, disponível no setor da Fundição. Embora a sua utilização seja muito limitada, pois apenas permite obter uma distribuição de temperaturas no molde, após a remoção do fundido, ou seja, quando o molde abre. Esta análise é importante para verificar o efeito do arrefecimento do spray desmoldante após a abertura do molde., permitindo detetar problemas relacionados com a refrigeração das linhas de água.

A confiabilidade deste estudo depende principalmente da perícia do utilizador da termo-câmara, nomeadamente no ajuste do gradiente de temperaturas, e em conseguir fotografar na posição e altura corretas.

Assim, analisou-se a parte móvel do molde, esperando que o molde abrisse e o robô extrator retirasse o fundido do seu interior, e então fotografou-se a respetiva cavidade moldante antes do spray (figura II.1).

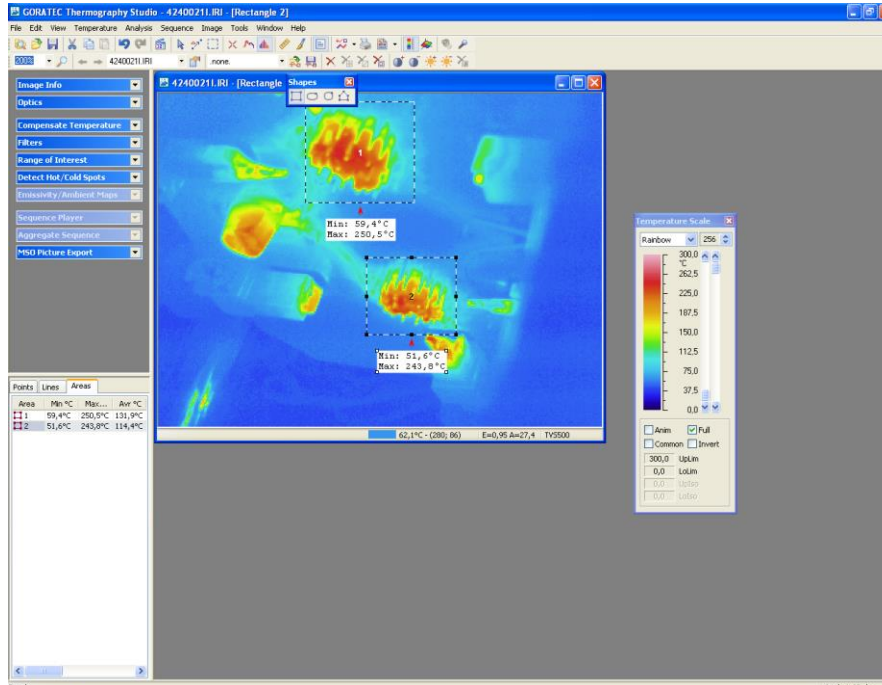


Figura II.1 - CH1720 – análise termográfica da parte móvel antes do spray.

Após o spray desmoldante voltou a fotografar-se a cavidade do lado móvel do molde (figura II.2). Note-se que até aqui apenas se ajustou o gradiente de temperaturas da termo-câmara uma vez.

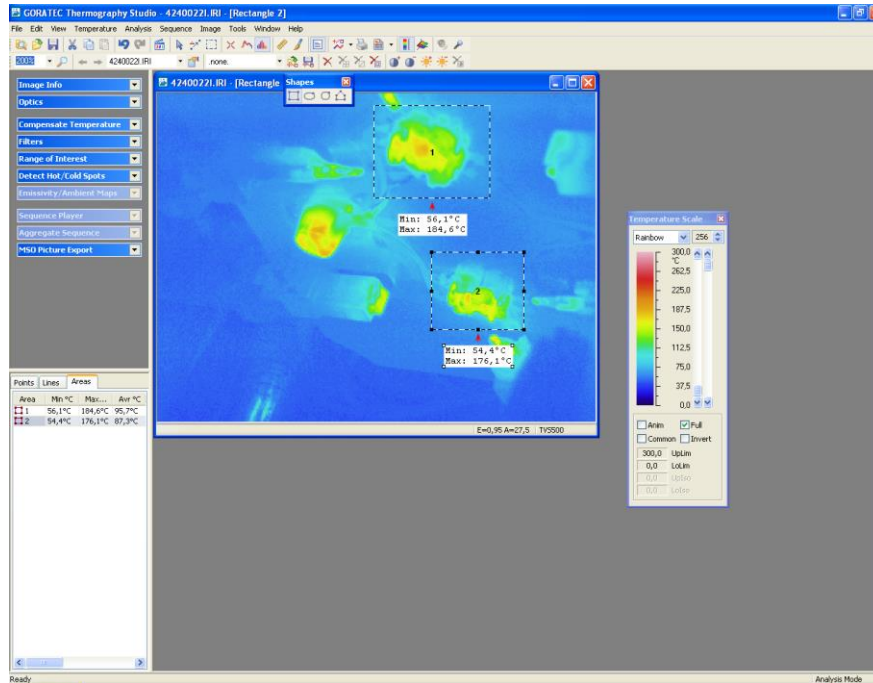


Figura II.2 - CH1720 – análise termográfica da parte móvel após o spray.

Seguidamente, repetiu-se o mesmo procedimento para a parte fixa do molde, ajustando-se novamente o gradiente de temperaturas da termo-câmara. A análise da distribuição de temperaturas nesta cavidade moldante obtida antes do spray desmoldante encontra-se representada na figura II.3.

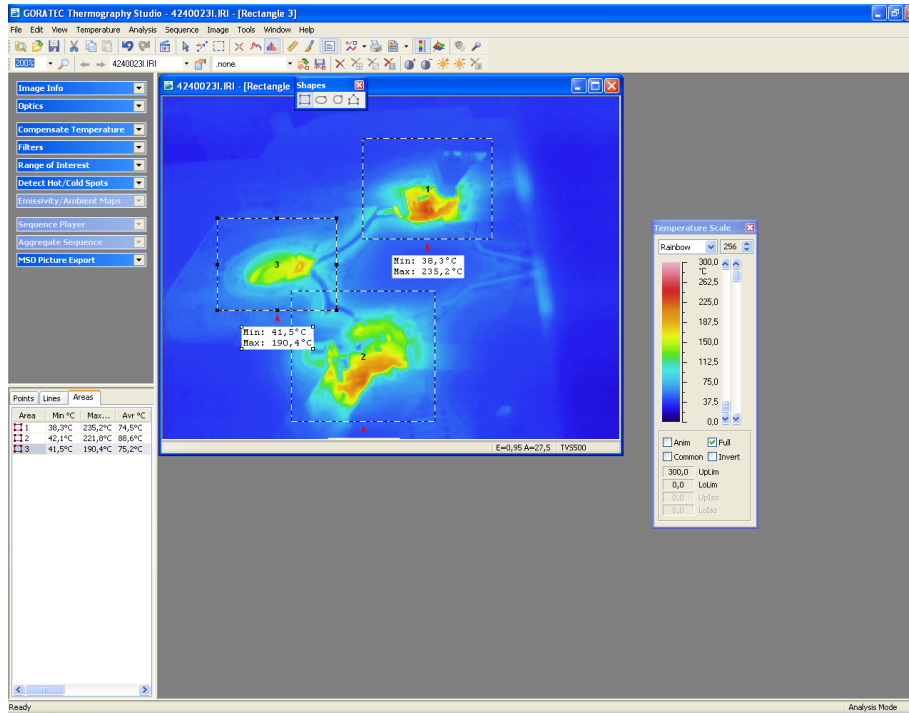


Figura II.3 - CH1720 – análise termográfica da parte fixa antes do spray.

Com o mesmo gradiente memorizado, voltou a fotografar-se a mesma cavidade após a ação do spray desmoldante (ver figura II.4).

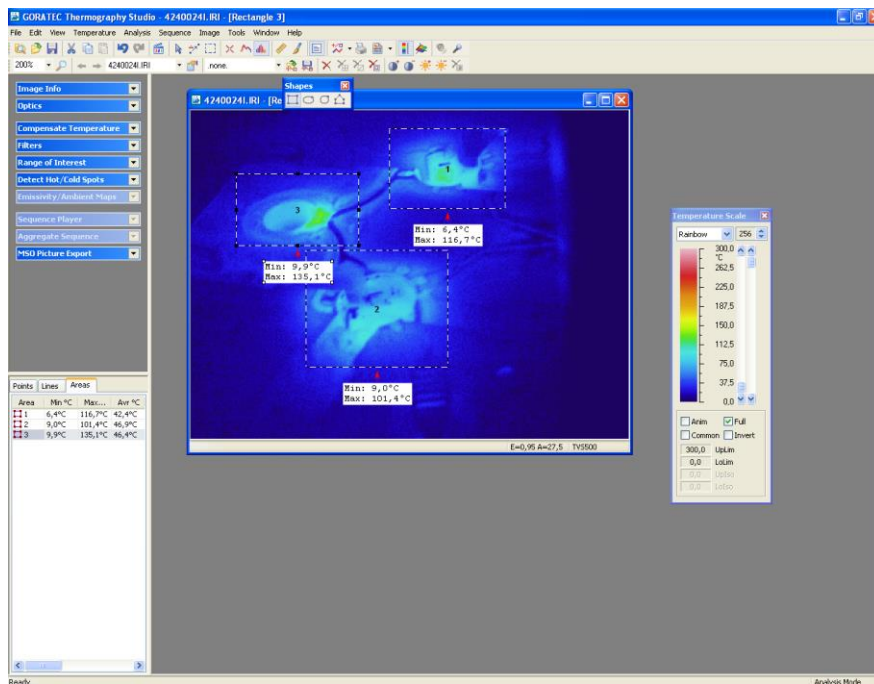


Figura II.4 - CH1720 - análise termográfica da parte fixa após o spray.

Através deste estudo foi possível comprovar que a cavidade do molde sujeita a temperaturas mais elevadas é a que corresponde à parte móvel. Nesta cavidade, o efeito do arrefecimento provocado pelo spray desmoldante faz com que a temperatura máxima diminua cerca de 65,9°C.

Relativamente à cavidade fixa pode concluir-se que esta apresenta uma distribuição de temperaturas mais baixa relativamente à cavidade do lado móvel, e que após a ação do spray desmoldante a temperatura máxima decresce cerca de 118.5°C.

No que concerne ao efeito dos canais de refrigeração por circulação forçada de água, pode referir-se que estão a funcionar devidamente uma vez que a distribuição de temperaturas é homogénea nas duas cavidades da parte fixa e da parte móvel

Anexo III – Análises no Espectrómetro

Tal como foi referido anteriormente, o controlo da qualidade da liga de Alumínio é garantido através da análise no Espectrómetro dos elementos de liga presentes numa amostra recolhida diretamente do forno da máquina de fundição.

A liga de Alumínio utilizada para fundir os dois modelos em estudo é a HD2-BS1, as percentagens dos elementos de liga admissíveis encontram-se especificadas na tabela seguinte:

Tabela III.1 - Composição da Liga de Alumínio HD2-BS1.

Liga	Componente									Outros		
HD2-BS1	Si	Cu	Zn	Mg	Fe	Mn	Ni	Pb	Sn	Cada	Total	Al
<u>Specif.</u>	10,5 ~ 12,0	1,5 ~ 4,0	<2,5	0.05 ~ 0.35	<1,1	<0,5	<0,5	<0,20	<0,20	-	<0,5	Resto

Durante a produção em massa do modelo Cilinder Head 1720 realizou-se uma análise no espectrometro à liga de Alumínio HD2 BS1, cujo resultado se apresenta de seguida:

Tabela III.2 Qualidade da liga de Fundição-CH1720.

Run	Si	Cu	Zn	Mg	Fe	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Cr	Ca	P	Na	Al
Avg (%)	10.86	1.97	2.166	0.14	0.95	0.18	0.08	0.0722	0.0219	0.06	0.076	0.003	0.0009	0.0001	83.42

Desta análise é possível concluir que a liga se encontra dentro de especificação, pois todos os elementos químicos estão dentro da gama de valores discriminados na tabela 6.

Esta análise também foi realizada durante a produção das amostras iniciais do projeto para o novo modelo Cilinder Head 1767, cujo resultado também foi positivo (ver tabela III.3).

Tabela III.3 Qualidade da liga de Fundição-CH1767.

Run	Si	Cu	Zn	Mg	Fe	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Cr	Ca	P	Na	Al
Avg (%)	11.36	1.93	2.151	0.1	0.82	0.24	0.06	0.0489	0.011	0.049	0.086	0.001	0.0007	0.0002	83.141

Anexo IV – Procedimento para troca de molde

- 1º Prender o molde instalado na máquina com os guinchos da ponte rolante;
- 2º Ativar a função “Mold Change” com o molde na posição inicial (molde e gavetas (core) fechadas) montar o travador;
- 3º Desconectar linhas de água e mangueiras do sistema hidráulico;
- 4º Desapertar grampos de fixação;
- 5º Recuar o prato de fixação do molde móvel;
- 6º Desapertar as fêmeas dos pinos de tração e retirar os pinos de tração da parte móvel;
- 7º Recuar as guias (tiebars) da máquina;
- 8º Retirar o molde da máquina e levá-lo através da ponte rolante para a manutenção;
- 9º Fechar/avançar as duas guias inferiores da máquina;
- 10º Vedar o anel da camisa do molde com o-ring;
- 11º Posicionar o novo molde na máquina;
- 12º Fechar/avançar as duas guias superiores da máquina;
- 13º Encaixar o molde no prato da parte fixa, ajustado à camisa da máquina;
- 14º Medir a distância desde o molde até à periferia do prato da máquina nas duas zonas de fixação para verificar se está corretamente alinhado;
- 15º Montar os grampos de fixação da parte fixa do molde;
- 16º Montar os tirantes/pinos de tração da parte móvel com uma chave de canos;
- 17º Fechar o prato da parte móvel até ao molde;
- 18º Apertar os grampos de fixação da parte móvel;
- 19º Retirar o travão do molde e apertar as fêmeas dos tirantes de tração;
- 20º Conectar a ficha do jet cool à máquina e ligar à energia;
- 21º Ligar as entradas e saídas de água e de ar no jet cool (entrada de água e de ar no molde);
- 22º Ligar (power on), pressionar botão *start* e seleccionar a posição auto;
- 23º Mudar a cassete ou ajustar apenas a direção dos bicos ejetores de spray desmoldante para os pontos da cavidade do molde a serem arrefecidos;
- 24º Desengatar os guinchos da ponte após o molde estar devidamente instalado;
- 25º Recuar o prato da parte móvel (posição retract);

- 26° Conectar entradas e saídas dos tubos hidráulicos e das linhas de água;
- 27° Ligar os canais de água das gavetas que atuam os pinos moldantes, segundo determinada ordem e regular os caudais através do caudalímetro;
- 28° Montar o datador na cavidade do molde;
- 29° Selecionar o programa-peça na unidade de controlo da máquina (PLC);
- 30° Descer a cassete de spray e verificar se todos os pontos críticos estão a ser arrefecidos pelos respetivos bicos ejetores;
- 31° Pintar a superfície de fecho do molde da parte móvel com uma pasta vermelha para verificar se fecha corretamente ou se existe algum empeno;
- 32° Regular a pressão da água que entra no molde e regular o caudal da parte fixa e móvel através dos passadores;
- 33° Verificar a temperatura do forno;
- 34° Verificar se o robot pega corretamente na peça pelo copo de enchimento;
- 35° Aplicar o revestimento anti aderente (“Metalstar ASW-102”) na cavidade moldante e efetuar o pré-aquecimento do molde com chama direta;
- 36° Aplicar pasta anti adesiva (“CrisolFlown – MetalFlow”) na colher/coquilha para evitar que o metal fundido agarre;
- 37° Verificar o ângulo que a coquilha faz para controlar a quantidade de metal vazado;
- 38° Respeitar as regras de aquecimento da máquina:
 - Efetuar 15 tiros de aquecimento no modo lento (slow shot);
 - 10 Tiros em modo rápido (fast shot);
 - Selecionar o modo intensificador (intensifier) e separar as peças dos 15 primeiros tiros para rejeição.