

**Optimização do processo de fabrico de impulsores para
compressores usando fundição de ligas de alumínio de alta
resistência em contragravidade e sob vácuo,
em moldações de gesso**

Zollern & Comandita / INEGI

Pedro Miguel da Fonseca Ala

Relatório de Projecto Final

Orientador na Zollern & Comandita e no INEGI: Engenheiro Rui Jorge Lemos Neto

Orientadora na FEUP: Prof. Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

SETEMBRO 2008

RESUMO

Numa altura em que o Mundo se começa a consciencializar da gravidade do problema ambiental, nunca como agora se assistiu à adoção de tantas medidas tomadas no sentido de diminuir as emissões poluentes para a atmosfera. Perante esta realidade, e face à grande competitividade existente na indústria automóvel, têm-se desenvolvido motores apoiados cada vez mais em soluções tecnológicas de vanguarda, que lhes permitem não só ser mais performantes, como também mais eficientes do ponto de vista energético e das emissões poluentes. Entre estas soluções surgem os turbocompressores, ao permitirem não só um aumento da potência específica dos motores onde são montados, como um enriquecimento da combustão com ar, e assim uma diminuição das emissões resultantes dessa combustão.

Neste contexto, a *Zollern & Comandita* está actualmente a iniciar um novo negócio na área da produção de impulsores para turbocompressores por vazamento de ligas de alumínio em moldações de gesso, através de um processo de contragravidade assistido por vácuo.

Tendo sido inteiramente desenvolvido de raiz desde 2004 por intermédio de uma parceria celebrada com o Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), este processo de produção entrou em fase de industrialização em finais de 2006, estando actualmente em fase de qualificação por parte dos clientes, com vista a início de produção.

Durante a sua implementação industrial, e já em condições próximas das definitivas, a robustez deste processo foi testada, tendo revelado alguns pontos a melhorar, principalmente relacionados com a fragilidade das moldações de gesso quando secas, com a formação de bolhas de ar na superfície dessas moldações, com a necessidade de optimização da duração dos seus ciclos de secagem, e com a presença de filmes de óxidos nos impulsores fundidos.

Neste trabalho procura-se mostrar de que forma estes problemas se manifestaram na qualidade final das peças fundidas, e quais os métodos de abordagem entretanto desenvolvidos no sentido da sua resolução.

De modo a contextualizar todo este trabalho, faz-se também uma descrição do processo de produção e respectivo equipamento, bem como uma abordagem teórica aos processos de vazamento em moldações de gesso, e à metalurgia e fundição de ligas de alumínio.

SUMMARY

In a time where the World starts to think about the importance of the environment problem, never as now have there been so many measures taken in order to reduce the pollutant emissions to the atmosphere. Facing this reality and the great competitiveness in the automotive industry, new engines are being developed under vanguard technological solutions that not only allow them to be more performant, but also more efficient from the energy and pollutant emissions points of view. One of these solutions is the turbocharger, that allows not only an increase on the specific power of the engines, but also an enrichment of the combustion, with air, thus reducing the resultant emissions.

In this context, *Zollern & Comandita* is currently initiating a new business of production of impellers for turbochargers by casting aluminium alloys in plaster mouldings, using a countergravity casting process assisted by vacuum.

Being entirely developed through a partnership celebrated with Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) since 2004, this process started by being industrialized in the end of 2006, being currently under qualification procedures from the customers in order to start the production.

During its industrial implementation, and already in very similar conditions to the final ones, the robustness of the process was tested, revealing some points that needed improvement, related mainly with the weakness of the dried plaster mouldings, the air bubbles formation in their surface, the need to optimize the duration of their drying cycles, and the presence of oxide films in the cast impellers.

This work tries to demonstrate the way these problems influence the final quality of the castings, and the methodology adopted to solve them.

In order to contextualize this work, it is made a description of the production process and respective equipment, as well as a theoretical approach to the plaster mould casting technology, and to the metallurgy and casting of aluminium alloys.

AGRADECIMENTOS

Ao Eng.º Rui Neto, orientador deste trabalho no INEGI e na ZCP, agradeço sinceramente por toda a sua ajuda na elaboração deste trabalho, pelo apoio durante o desenvolvimento e a tão difícil implementação industrial desta tecnologia, e acima de tudo por toda a sua amizade e confiança sempre depositadas na minha pessoa durante todo o nosso contacto pessoal e profissional.

À Professora Doutora Teresa Duarte, orientadora deste trabalho na FEUP, agradeço a sua disponibilidade e a sua ajuda na execução deste trabalho.

Ao Eng.º Virgílio Oliveira, director-geral da ZCP, agradeço toda a sua amizade, e o seu apoio, compreensão e confiança sempre depositada em mim durante todo o nosso contacto, e em especial durante o arranque da nova fábrica.

Aos meus colegas do INEGI-CETECOFF, Bártolo Paiva, Ricardo Paiva, Fernando Moreira, Sertório Lares, Nuno Azevedo, Armanda Marques e Maria do Carmo, que participaram no desenvolvimento desta tecnologia desde o início.

Aos meus colegas de trabalho da ZCP, Bruno Meireles, Conceição Cabral, Filipe Ferreira, Hugo Ribeiro, José Teixeira, Nuno Costa, Nuno Gonçalves, Sofia Moutinho e Susana Coutinho, que todos os dias têm dado o seu melhor contributo para a prosperidade desta nova fábrica.

Aos meus amigos Bruno Alves e Miguel Ribeiro, pela sua amizade e apoio sempre disponíveis, pelo companheirismo, e pela sempre pronta ajuda.

Um agradecimento muito especial ao Rui Félix e à Patrícia Gonçalves, pela sua amizade bem demonstrada na valiosa ajuda na formatação do texto deste projecto.

Por fim, não posso deixar de agradecer profundamente aos meus pais e ao meu irmão, por todo o afecto e apoio demonstrados, e pela paciência, compreensão e disponibilidade nunca negados quando mais precisei ao longo de todo o meu percurso.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	<i>Aluminium Association</i>
Adi	Agência de Inovação
AFS	<i>American Foundry Society</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Al-Cu	Alumínio-cobre
Al-Si	Alumínio-silício
Al-Zn	Alumínio-zinco
Ar	Árgon
As	Arsénio
B	Boro
Ca	Cálcio
CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>)
CAM	Fabrico Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>)
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
CETECOFF	INEGI - Unidade de Fundição e Novas Tecnologias
Cl ₂	Cloro
DOE	Desenho de Experiências (<i>Design of Experiments</i>)
H	Hidrogénio atómico
H ₂	Hidrogénio molecular
H ₂ O	Água
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Li	Lítio
Mg	Magnésio
N ₂	Azoto
Na	Sódio
P	Fósforo
PLC	Controlador Lógico Programável (<i>Programmable Logic Controller</i>)
ppm	Partes por milhão
S	Enxofre
Sb	Antimónio

Sr	Estrôncio
TB	Tabuleiro
Te	Temperatura eutética
Ti	Titânio
TiAl ₃	Alumineto de titânio
TiB	Titânio-boro
TiB ₂	Diborato de titânio
Tl	Temperatura de <i>liquidus</i>
TP	Termopar
ZCP	<i>Zollern & Comandita</i>
ZGT	<i>Zollern GmbH & Co. KG</i>
α-Al	Alumínio primário
β-CaSO ₄	Anidrite solúvel
γ-CaSO ₄	Anidrite insolúvel

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação da empresa <i>Zollern & Comandita</i>	1
1.1.1. Apresentação da empresa	1
1.1.2. O Grupo <i>Zollern</i>	2
1.1.2.1. História e Situação Actual.....	2
1.1.2.2. Os Sócios.....	2
1.1.2.3. Organização do Grupo <i>Zollern</i>	2
1.1.2.4. A Relação com a <i>Zollern</i>	2
1.1.3. O património ZCP	3
1.2. Enquadramento do projecto na empresa <i>Zollern & Comandita</i>	4
1.3. Objectivos do projecto	10
1.4. Abordagem do problema proposto	10
CAPÍTULO 2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. Vazamento em moldações de gesso	11
2.1.1. Introdução	11
2.1.2. Descrição	13
2.1.2.1. Sumário	13
2.1.2.2. Gessos para vazamento de metal	14
2.1.2.3. Materiais das placas-molde	17
2.1.2.4. Desmoldante	18
2.1.2.5. Mistura e vazamento da barbotina.....	18
2.1.2.6. Presa do gesso e desmoldação	20
2.1.2.7. Secagem das moldações de gesso.....	20
2.1.2.8. Sistema de gitagem e de alimentação	22
2.1.2.9. Acabamento.....	23
2.1.3. Características das moldações	23
2.1.3.1. Permeabilidade	23
2.1.3.2. Resistência mecânica	24
2.1.4. Vantagens da utilização de moldações em gesso.....	25
2.1.4.1. Controlo de qualidade excepcional.....	25
2.1.4.2. Qualidade dimensional competitiva.....	26
2.1.4.3. Custo efectivo de produção	27
2.2. Metalurgia e fundição de ligas de alumínio	27
2.2.1. Introdução	27
2.2.2. Processos de vazamento	28
2.2.2.1. Vazamento em areia.....	29
2.2.2.2. Vazamento em coquilha por gravidade.....	30
2.2.2.3. Vazamento em coquilha por baixa-pressão.....	31
2.2.2.4. Fundição injectada	33
2.2.2.5. Fundição por cera perdida em carapaça (<i>Investment Casting</i>).....	34
2.2.2.6. Fundição por espuma perdida (<i>Lost Foam Casting</i>).....	35

2.2.3. Tratamento do banho e qualidade do metal	35
2.2.3.1. Qualidade da matéria-prima	35
2.2.3.2. Fusão e manuseamento do metal	37
2.2.3.3. Limpeza do forno e do cadinho	38
2.2.3.4. Fluxagem	38
2.2.3.5. Desgasificação	41
2.2.3.6. Filtragem	44
2.2.4. Ligas de alumínio em fundição	45
2.2.5. Solidificação das ligas de alumínio-silício	45
2.2.6. Afinação de grão	50
2.2.6.1. Afinadores de grão	51
2.2.6.2. Efeitos dos afinadores de grão	51
2.2.6.3. Mecanismos de afinação de grão	53
2.2.6.4. Adições de afinadores de grão na fundição	55
2.2.7. Modificação do eutético	56
2.2.7.1. Benefícios dos modificadores	56
2.2.7.2. Funcionamento dos modificadores	56
2.2.7.3. Elementos modificadores	58
2.2.7.4. Escolha do modificador	59
2.2.7.5. Influência dos modificadores na alimentação	60
2.2.7.6. Influência dos modificadores na porosidade	60
2.2.7.7. Melhoria de processos de fundição usando a modificação com estrôncio ...	61
2.2.7.8. Níveis de adição de estrôncio	61
2.2.7.9. Medição do nível de modificação	63
2.2.7.10. Activação, desvanecimento e reactividade	63
2.2.7.11. Local e método de adição de modificadores	64
2.2.8. Ligas eutéticas e hipereutéticas	64
2.2.9. Sequências de tratamento do banho na fundição	64
CAPÍTULO 3 TRABALHO EXPERIMENTAL	67
3.1. Descrição do processo	67
3.1.1. Moldações	67
3.1.1.1. Equipamento	67
3.1.1.2. Processo	70
3.1.2. Secagem de moldações	73
3.1.3. Fusão	74
3.1.3.1. Equipamento	75
3.1.3.2. Processo	78
3.1.4. Acabamentos	81
3.1.5. Tratamentos térmicos	86
3.1.5.1. Equipamento	87
3.1.5.2. Processo	90
3.1.6. Controlo de qualidade	91
3.2. Melhorias introduzidas durante a implementação industrial	95
3.2.1. Linhas de fractura superficiais	99

3.2.1.1. Resistência mecânica do gesso insuficiente	99
3.2.1.2. Temperatura e/ou tempo de secagem excessivos	103
3.2.1.2.1. Evolução da temperatura no interior de uma moldação perante um determinado ciclo térmico imposto	105
3.2.1.2.2. Determinação da última região das moldações a secar	108
3.2.1.2.3. Determinação do tempo de secagem das 24 moldações de uma mufla	110
3.2.1.2.4. Determinação da ordem de secagem das 24 moldações de uma mufla	113
3.2.2. Bolhas superficiais	115
3.2.2.1. Bolhas de ar na superfície das moldações.....	115
3.2.2.1.1. Optimização da vibração durante o vazamento das moldações.....	115
3.2.3. Reacções superficiais metal-gesso	119
3.2.4. Filmes de óxidos na microestrutura	120
3.2.4.1. Turbulência durante o enchimento das cavidades	120
3.2.4.1.1. Uniformização das condições de aplicação de vácuo sobre todas as cavidades de uma moldação durante o vazamento de metal.....	120
3.2.4.1.2. Controlo sobre o regime de escoamento do metal ao longo do seu trajecto ascendente desde o banho até ao completo preenchimento da cavidade ..	124
CAPÍTULO 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	131
4.1. Conclusões finais.....	131
4.2. Propostas de trabalhos futuros.....	134
BIBLIOGRAFIA.....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – <i>Zollern & Comandita</i>	1
Figura 1.2 – Turbocompressor em corte [Mayer, 1996].	4
Figura 1.3 – Impulsor de um turbocompressor.	5
Figura 1.4 – Rotor de um turbocompressor, constituído por uma turbina e por um impulsor ligados entre si por um único veio [Mayer, 1996].	5
Figura 1.5 – Posicionamento das pás em relação à turbina, num turbocompressor de geometria variável [i1].	5
Figura 1.6 – Fluxo dos gases de escape provenientes do motor sobre a turbina, previamente orientados pelas pás de turbina [i1].	6
Figura 1.7 – Actuais instalações da ZCP.	7
Figura 1.8 – Aspecto exterior do pavilhão fabril da ZCP–Alumínio.	7
Figura 1.9 – Aspecto interior do pavilhão fabril da ZCP–Alumínio.	7
Figura 1.10 – Secção de Moldações.	8
Figura 1.11 – Secção de Secagem de Moldações.	8
Figura 1.12 – Secção de Fusão.	8
Figura 1.13 – Secção de Acabamentos.	9
Figura 1.14 – Secção de Tratamentos Térmicos.	9
Figura 1.15 – Secção de Controlo da Qualidade.	9
Figura 1.16 – Secção de Expedição.	10
Figura 2.1 – Etapas do processo de vazamento de ligas metálicas em moldações de gesso.	15
Figura 2.2 – Forma recomendada para uma cuba e respectiva posição da hélice, usada na mistura de barbotinas para obtenção de moldações de gesso [Nunes, 1999].	19
Figura 2.3 – Esquema de execução de um ensaio de flexão em 3 pontos [Nunes, 1999].	25
Figura 2.4 – Diagrama esquemático do vazamento em areia [Metallurg Aluminium].	29
Figura 2.5 – Diagrama esquemático do vazamento em coquilha por gravidade [Metallurg Aluminium].	30
Figura 2.6 – Diagrama esquemático do vazamento em coquilha por baixa-pressão [Metallurg Aluminium].	31
Figura 2.7 – Diagrama esquemático do processo de fundição injectada [Metallurg Aluminium].	33
Figura 2.8 – Filmes de óxidos numa peça fundida em alumínio.	37
Figura 2.9 – Microestrutura com evidências de porosidade de origem gasosa típica (forma circular à esquerda) [Metallurg Aluminium].	41
Figura 2.10 – Efeito da temperatura na solubilidade do hidrogénio no banho de alumínio (a maior alteração em termos de solubilidade ocorre a cerca de 660°C) [Metallurg Aluminium].	42
Figura 2.11 – Diagrama de fases e microestruturas das ligas Al-Si [Metallurg Aluminium].	47
Figura 2.12 – Representação esquemática do eutético lamelar [Metallurg Aluminium].	48
Figura 2.13 – Representação esquemática de uma dendrite [Metallurg Aluminium].	48

Figura 2.14 – Microestrutura mostrando as dendrites de alumínio (zona mais clara) e o eutético nas regiões interdendríticas [Metallurg Aluminium].....	49
Figura 2.15 – Gráfico de análise térmica da solidificação de uma liga de alumínio-silício [Metallurg Aluminium].	49
Figura 2.16 – Rechupe num fundido em liga de alumínio [Metallurg Aluminium].....	50
Figura 2.17 – Alimentação num fundido em liga de alumínio [Metallurg Aluminium].	52
Figura 2.18 – Microestrutura de um afinador de grão [Metallurg Aluminium].....	53
Figura 2.19 – Processo de afinação de grão num banho de alumínio [Metallurg Aluminium].....	54
Figura 2.20 – Fotografia TEM de uma partícula de diborato de titânio (TiB ₂) [Metallurg Aluminium].....	55
Figura 2.21 – Crescimento e formação do silício acicular [Metallurg Aluminium].....	57
Figura 2.22 – Formação de maclagem no cristal de silício [Metallurg Aluminium].....	57
Figura 2.23 – Estrutura fibrosa do silício modificado na liga A413 (AlSi12) [Metallurg Aluminium].....	58
Figura 2.24 – Microestrutura de uma peça obtida por fundição injectada na liga A380 (AlSi8Cu3), mostrando silício não-modificado e parcialmente modificado (500×) [Metallurg Aluminium].	61
Figura 2.25 – Efeito da modificação com estrôncio na resistência à tracção de um fundido obtido por fundição injectada na liga A380 (AlSi8Cu3) [Metallurg Aluminium].....	62
Figura 2.26 – Sequência típica de tratamento do banho [Metallurg Aluminium].	65
Figura 3.1 – Etapas do processo de produção de impulsores para turbocompressores por vazamento em contragravidade de ligas de alumínio em moldações em gesso.....	68
Figura 3.2 – Placa-molde com impulsores em silicone e respectiva caixa de moldação.....	68
Figura 3.3 – Máquina de mistura automática de gesso com água em vácuo.	69
Figura 3.4 – Linha de produção de moldações (A → Máquina de mistura; B → Posto de vazamento; C → Posto de nivelamento; D → Posto de desmoldação; E → Posto de lavagem de placas-molde).....	69
Figura 3.5 – Postos de trabalho na linha de produção de moldações em gesso (A → Posto de vazamento; B → Posto de nivelamento; C → Posto de desmoldação; D → Posto de lavagem de placas-molde).....	70
Figura 3.6 – Vazamento da barbotina da calha de vazamento para as 3 placas-molde.	71
Figura 3.7 – Nivelamento da face superior da moldação com uma régua de cabelo.....	71
Figura 3.8 – Extração da moldação de gesso da placa-molde (desmoldação).....	72
Figura 3.9 – Moldação de gesso após desmoldação.	72
Figura 3.10 – Eliminação de rebarbas e de arestas vivas, e limpeza da moldação com ar comprimido.	72
Figura 3.11 – Colocação da moldação no interior da mufla de secagem de moldações.....	73
Figura 3.12 – Lavagem de uma placa-molde.	73
Figura 3.13 – Mufla eléctrica de secagem de moldações de gesso.....	74
Figura 3.14 – Ciclo térmico G200 imposto na secagem de moldações de gesso (temperatura de pré-aquecimento de 200°C).	74

Figura 3.15 – Aspecto geral da secção de Fusão.....	75
Figura 3.16 – Forno duplo de fusão/manutenção de alumínio e respectivo pórtico com duplo posto de vazamento.....	75
Figura 3.17 – Posto de vazamento.....	76
Figura 3.18 – Placa porta-tubos de aspiração de metal.....	76
Figura 3.19 – Anel de compressão radial da moldação sobre a placa porta-tubos.....	76
Figura 3.20 – Anel da câmara de vazamento e placa de arrefecimento.....	77
Figura 3.21 – Placa de arrefecimento refrigerada.....	77
Figura 3.22 – PLC de controlo e de aquisição de dados do vazamento.....	77
Figura 3.23 – Tubo de aspiração de metal.....	78
Figura 3.24 – Colocação dos tubos de aspiração na placa porta-tubos.....	78
Figura 3.25 – Moldação posicionada para o início da operação de vazamento.....	79
Figura 3.26 – Fecho da câmara de vazamento.....	79
Figura 3.27 – Câmara de vazamento no “Posto de Purga”, pronta para efectuar a purga e a injeção de árgon.....	80
Figura 3.28 – Câmara de vazamento no “Posto de Vazamento”, durante o vazamento de alumínio na moldação.....	80
Figura 3.29 – Abertura da câmara de vazamento,após o vazamento da moldação.....	81
Figura 3.30 – Moldação vazada colocada num <i>trolley</i> de transporte para arrefecimento.....	81
Figura 3.31 – Aspecto geral da secção de Acabamentos.....	82
Figura 3.32 – Corte do sistema de gitagem/alimentação de uma moldação vazada.....	82
Figura 3.33 – Abate de uma moldação vazada.....	82
Figura 3.34 – Impulsores fundidos após a operação de abate de uma moldação.....	83
Figura 3.35 – Remoção do gesso existente entre as alhetas de um impulsor no martelo de vibração pneumática.....	83
Figura 3.36 – Colocação de impulsores num dos tabuleiros de transporte, e impulsor após a operação de vibração pneumática.....	84
Figura 3.37 – Aspecto do topo do tarugo de uma peça antes e depois da rebarbagem.....	84
Figura 3.38 – Aspecto da base de uma peça antes e depois da rebarbagem.....	84
Figura 3.39 – Máquina de rebarbagem do topo do tarugo de peças fundidas.....	85
Figura 3.40 – Máquina de rebarbagem da base de peças fundidas.....	85
Figura 3.41 – Polimento da superfície de um impulsor com recurso a uma máquina de polimento.....	85
Figura 3.42 – Granalhadora automática de peças fundidas.....	86
Figura 3.43 – Cesto de tratamentos térmicos carregado com impulsores prontos a tratar termicamente.....	86
Figura 3.44 – Aspecto geral da secção de Tratamentos Térmicos.....	87
Figura 3.45 – Fornos de homogenização e de envelhecimento, respectivamente.....	87
Figura 3.46 – Controlador de temperatura do forno de homogenização.....	88
Figura 3.47 – “Aranha” para fixação e elevação do cesto com a carga a tratar.....	88
Figura 3.48 – Tanque de água do forno de homogenização.....	89

Figura 3.49 – Deslocação do tanque de água em relação ao forno de homogenização.	89
Figura 3.50 – Controlador de temperatura do forno de envelhecimento.	89
Figura 3.51 – Sequência de subida do cesto para o interior da câmara do forno de homogenização.	90
Figura 3.52 – Cesto com a carga imerso na água do tanque do forno de homogenização.	90
Figura 3.53 – Movimentação do cesto para o interior da câmara do forno de envelhecimento.	91
Figura 3.54 – Aspecto geral da secção de Controlo de Qualidade.	91
Figura 3.55 – Equipamento de inspecção de peças por ultra-sons.	92
Figura 3.56 – Peça imersa em água e devidamente alinhada com as sondas de inspecção, durante a inspecção por ultra-sons.	92
Figura 3.57 – Sinal recebido durante a inspecção de uma peça por ultra-sons.	92
Figura 3.58 – Imersão das peças no líquido penetrante.	93
Figura 3.59 – Lavagem das peças com um chuveiro, após imersão no líquido penetrante.	93
Figura 3.60 – Secagem das peças numa mufla termo-ventilada.	94
Figura 3.61 – Aplicação de pó revelador sobre as peças.	94
Figura 3.62 – Impulsor durante a inspecção com iluminação ultravioleta.	94
Figura 3.63 – Impulsores com fissuração superficial.	95
Figura 3.64 – Impulsores com bolhas superficiais.	96
Figura 3.65 – Impulsor com vestígios de reacção metal-gesso.	96
Figura 3.66 – Filme de óxido num impulsor.	97
Figura 3.67 – Distribuição de esforços num impulsor em funcionamento [Mayer, 1996].	97
Figura 3.68 – Bolhas de ar na superfície de uma moldação.	98
Figura 3.69 – Provete de gesso para ensaio de flexão em 3 pontos.	100
Figura 3.70 – Máquina de ensaio de flexão em 3 pontos.	100
Figura 3.71 – Ensaio de flexão em 3 pontos sobre um provete de gesso.	101
Figura 3.72 – Provete de gesso para ensaio de permeabilidade.	101
Figura 3.73 – Dispositivo de ensaio de permeabilidade, e colocação do provete no mesmo.	101
Figura 3.74 – Ensaio de fluidez de gesso.	102
Figura 3.75 – Máquina de ensaio de viscosidade <i>Sheen Digital Rotothinner 455N/15</i> , e respectivo disco perfurado.	102
Figura 3.76 – Ensaio de viscosidade de gesso.	103
Figura 3.77 – Sistema informático de aquisição de dados, respectiva placa de aquisição analógica-digital <i>National Instruments TBX-68T</i> , e interface de comunicação com o operador.	104
Figura 3.78 – Identificação de todos os tabuleiros de secagem de moldações presentes no interior de uma mufla.	105
Figura 3.79 – Posicionamento do termopar de monitorização no ponto central da moldação.	106
Figura 3.80 – Monitorização da evolução da temperatura no ponto central de 6 moldações, durante um ciclo de secagem de 24 moldações efectuado a 200°C (temperatura fixa) na mufla 2.	107

Figura 3.81 – Posicionamento dos termopares de monitorização na moldação.....	108
Figura 3.82 – Monitorização da evolução da temperatura em 11 diferentes pontos de uma moldação seca no tabuleiro TB5, durante um ciclo de secagem de 24 moldações efectuado a 200°C (temperatura fixa) na mufla 2.	109
Figura 3.83 – Monitorização da evolução da temperatura em 11 diferentes pontos de uma moldação seca no tabuleiro TB24, durante um ciclo de secagem de 24 moldações efectuado a 200°C (temperatura fixa) na mufla 2.	109
Figura 3.84 – Última região das moldações a secar.....	110
Figura 3.85 – Ciclo térmico inicialmente imposto para determinação do tempo de secagem das 24 moldações de uma mufla.	111
Figura 3.86 – Ciclo térmico P160 imposto na secagem de moldações de gesso (temperatura de pré-aquecimento de 160°C).	112
Figura 3.87 – Ciclo térmico a desenvolver para implementação em substituição do actual P160 na secagem de moldações de gesso.	113
Figura 3.88 – Número médio de bolhas de cada impulsor numa moldação vazada na posição 1 (posição da direita) da mesa vibratória de vazamento, para cada uma das vibrações testadas.	117
Figura 3.89 – Número médio de bolhas de cada impulsor numa moldação vazada na posição 2 (posição do meio) da mesa vibratória de vazamento, para cada uma das vibrações testadas.	117
Figura 3.90 – Número médio de bolhas de cada impulsor numa moldação vazada na posição 3 (posição da esquerda) da mesa vibratória de vazamento, para cada uma das vibrações testadas.	118
Figura 3.91 – Sistema de vibração do posto de vazamento de moldações com um excêntrico.	119
Figura 3.92 – Moldação com geometria 1.....	121
Figura 3.93 – Moldação com geometria 2.....	121
Figura 3.94 – Moldação com geometria 3.....	121
Figura 3.95 – Impulsor com alhetas mal-cheias.	123
Figura 3.96 – Chapa de inspecção de um impulsor com um poro interno em Raio X.	126
Figura 3.97 – Impulsor com óxidos superficiais, detectados por líquidos penetrantes.	126
Figura 3.98 – Método de detecção de óxidos alojados na base de um impulsor, por maquinagem.	126
Figura 3.99 – Sistema informático de aquisição de dados, respectiva placa de aquisição analógica-digital <i>National Instruments Ni cDAQ-9172</i> , e interface de comunicação com o operador.	128
Figura 3.100 – Sensores de vácuo analógicos <i>WIKA Transmitter S-10</i> fixos às tubagens de “Vácuo Total” e “VácuoParcial”.....	128
Figura 3.101 – Monitorização da evolução do nível de vácuo (nas tubagens de “Vácuo Total” e de “Vácuo Parcial”, e na periferia e no centro da moldação) e da temperatura (de uma das peças da moldação vazada, e da água de arrefecimento da placa), durante um vazamento com uma moldação com geometria 2.	129
Figura 3.102 – Ampliação do gráfico da Figura 3.101 no instante do enchimento das cavidades da moldação.	130

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Aplicações de produtos fundidos em alumínio (% aproximada) [Metallurg Aluminium].	28
Tabela 2.2 – Aplicações típicas das ligas Al-Si [Metallurg Aluminium].	46
Tabela 2.3 – Composição química de algumas das ligas Al-Si mais comuns [Metallurg Aluminium].	47
Tabela 2.4 – Comparação entre o sódio e do estrôncio como modificadores do eutético [Metallurg Aluminium].	59
Tabela 2.5 – Níveis de adição sugeridos para modificadores de estrôncio [Metallurg Aluminium].	62
Tabela 2.6 – Sistema de classificação da modificação da AFS [Metallurg Aluminium].	63
Tabela 3.1 – Possíveis causas dos problemas existentes aquando da implementação industrial do processo.	99
Tabela 3.2 – Comportamento das formulações de gesso antiga e nova.	103
Tabela 3.3 – Tempos de secagem e temperaturas média, máxima e mínima de todas as moldações, nas 10 muflas de secagem actualmente existentes na ZCP.	111
Tabela 3.4 – Ordem de secagem das 24 moldações presentes em cada uma das 10 muflas de secagem actualmente existentes na ZCP.	114
Tabela 3.5 – Número médio de bolhas nas moldações vazadas nas 3 posições da mesa de vazamento, com várias frequências de vibração.	116
Tabela 3.6 – Percentagem de alhetas mal-cheias no vazamento de moldações das 3 geometrias em teste, sob 3 níveis de vácuo distintos.	122
Tabela 3.7 – Ensaio da homogeneidade na distribuição do vácuo nas cavidades de uma moldação.	125
Tabela 3.8 – Percentagem de alhetas mal-cheias (MC) (regime laminar), e de poros internos (PI) e filmes de óxido (OX) (regime turbulento) no vazamento de moldações da geometria 2, sob 6 níveis de vácuo distintos.	127

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Apresentação da empresa *Zollern & Comandita*

1.1.1. Apresentação da empresa

A *Zollern & Comandita* (ZCP) (www.zollern.de) (Figura 1.1) é uma Fundação de Precisão (Microfusão) situada na Maia, na Área do Grande Porto, desde 1991.



Figura 1.1 – *Zollern & Comandita*.

Esta empresa pertence ao grupo alemão *Zollern GmbH & Co. KG* (ZGT) de Sigmaringen, situado no Sul da Alemanha, junto ao Rio Danúbio, entre Estugarda e o Lago de Constança.

Desde a sua fundação que a ZCP é especializada no processo de fundição de precisão de peças em aço por cera perdida, particularmente de aços especiais inoxidáveis e refractários, sendo que cerca de metade da sua produção é direccionada para a indústria automóvel (pás de

turbina para turbocompressores de geometria variável, válvulas de escape para turbocompressores, entre outros).

1.1.2. O Grupo Zollern

1.1.2.1. História e Situação Actual

Na Alemanha, a fundação da empresa remonta ao ano 1708, quando o príncipe *Meinrad II de Hohenzollern* iniciou umas das primeiras siderurgias no sul do país. Ao longo dos anos, a *Zollern* foi-se desenvolvendo e diversificando, ao ponto de no fim do século passado se dedicar à fundição, produção de chumaceiras e estiramento de perfis de aço.

Com a ambição de crescimento e diversificação, a *Zollern* introduziu em meados dos anos 50 o processo de microfusão, ou fundição de precisão pelo processo de cera perdida (*Investment Casting*). Nos anos 70 e 80 construiu mais duas fábricas para produção de transmissões e produtos para a engenharia mecânica em geral, e criou a marca *ZOLLERN*.

Em 1991 surgiu a primeira unidade fora da Alemanha, a Fundação de Precisão em Portugal. Ao longo destes anos a *Zollern* foi crescendo, graças a várias aquisições (*Isoprofil*, *BHW*, entre outras) e a uma nova unidade na China, e emprega hoje perto de 2.950 pessoas em 17 unidades fabris.

A designação social do grupo aquando da sua origem *Fürstlich Hohenzollernsche Werke Laucherthal GmbH & Co* foi alterada em 2004 para *Zollern GmbH & Co. KG*.

1.1.2.2. Os Sócios

A empresa continua a estar nas mãos da família dos príncipes de *Hohenzollern – Sigmaringen*, embora estes tenham cedido parte do capital em 1990 ao industrial alemão *Dr. Adolf Merckle*, ao qual também pertence a *Ratiopharm* (produtos farmacêuticos). Os sócios reúnem-se semestralmente, acompanhados pelos respectivos conselheiros, constituindo desta forma o conselho de administração, presidido por sua Alteza *Karl Príncipe Herdeiro de Hohenzollern-Sigmaringen*. A administração do grupo está delegada no gerente, *Dr. Horst Michael Holzbaur*.

1.1.2.3. Organização do Grupo Zollern

Existem 5 áreas de negócio. Cada área de negócio tem 1 ou 2 directores gerais, que respondem ao gerente do grupo. Os serviços centrais (Recursos Humanos, Logística, Finanças, Controlling e Informática) têm procuradores e as subsidiárias têm gerentes ou procuradores, que respondem da mesma forma directamente ao gerente.

1.1.2.4. A Relação com a Zollern

Tirando proveito da integração no grupo, a ZCP recorre aos serviços centrais de logística que cuidam de toda a aquisição de matérias-primas e subsidiárias de produção.

Sempre que entende ser necessário, recorre igualmente aos serviços centrais de Qualidade, Laboratório e Engenharia.

A ZGT abastece a ZCP com encomendas que se podem agrupar em:

- Grandes séries para a indústria automóvel;
- Pequenas e médias séries para as restantes indústrias (Diversos).

Neste âmbito, todo o desenvolvimento do produto é feito na Alemanha, partindo da consulta, oferta, análise de contrato, execução de moldes, definição dos parâmetros de trabalho, amostragem e aprovação do cliente. A transferência para Portugal é feita com base nos critérios do departamento técnico, que dá todo o apoio técnico e desloca pessoal para formação, caso necessário.

No mercado Ibérico, tendo em conta a ausência da ZGT, a ZCP actua comercialmente com autonomia para realizar negócios.

1.1.3. O património ZCP

Em Portugal, a ZCP dispõe de duas linhas de produção de carapaças cerâmicas, uma destinada exclusivamente às pás dos turbocompressores e outra destinada a produção de produtos diversos. Possui ainda um sector de injeção de ceras, um sector de fusão com 3 fornos de indução de 300 kW, linhas de acabamentos, e um grande sector de tratamentos térmicos com um forno de vácuo e vários fornos de atmosfera controlada.

No controlo da qualidade, salienta-se o controlo dimensional 3D, o controlo radiográfico por chapas e por radioscopia, o controlo por líquidos penetrantes e partículas magnéticas, e um laboratório de metalografia.

Na cera perdida, a ZCP desenvolve apenas uma parte muito pequena das suas ferramentas, tendo no entanto capacidade para fabricar alguns moldes de injeção de cera por CAD/CAM e por uma tecnologia de vazamento de ligas de baixo ponto de fusão oriunda da casa mãe alemã. Isto significa que uma boa parte da produção é assegurada com moldes oriundos da casa mãe, que só depois da fase inicial de desenvolvimento de produto os transfere para a ZCP, para utilização em produção.

No sentido de aumentar o leque de oferta para os actuais clientes da ZCP e do grupo *Zollern* na generalidade, em 2007 foi introduzida uma nova tecnologia para produção de impulsores para turbocompressores em ligas de alumínio. Estes componentes são produzidos por vazamento em contragravidade assistido por vácuo em moldações bloco de gesso, obtidas a partir de placas-molde revestidas a silicone.

Para assegurar a qualidade nesta nova tecnologia, a ZCP reforçou-se com um excelente laboratório metalográfico, espectrómetro para análise espectrométrica de ligas de Al, Cu, Fe e Ti, e também com novos processos de controlo de qualidade não destrutivo, nomeadamente metrologia 3D sem contacto com análise de imagem, ultra-sons e radioscopia. Paralelamente, adquiriu também alguns equipamentos adicionais no sentido de poder entrar no negócio da fusão de ligas de alumínio por cera perdida, aproveitando o conhecimento que vai sendo gerado nesta nova área tecnológica envolvendo este tipo de ligas.

Como este processo tecnológico foi desenvolvido de raiz em colaboração com o

Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), todas as técnicas de fabrico de moldes e de placas-molde para os complexos impulsores em silicone, representam um dos importantes patrimónios tecnológicos da empresa. Saliente-se que foi o domínio desta complexa tecnologia de moldes flexíveis que despertou o interesse por parte da *BorgWarner*, principal cliente dos impulsores em alumínio, para que a ZCP se envolvesse no desenvolvimento de um processo de fabrico de impulsores em ligas de titânio fundidas e em aço vazado.

1.2. Enquadramento do projecto na empresa *Zollern & Comandita*

Face à grande competitividade existente no seio da indústria automóvel, as crescentes restrições ambientais impostas à mesma têm levado ao desenvolvimento de motores cada vez mais apoiados em soluções tecnológicas de vanguarda, que lhes permitem não só apresentarem uma maior performance mas também menores consumos de combustível e emissões poluentes. Uma destas soluções passa pelo recurso a turbocompressores, que apesar de já serem usados há 30 anos, nunca como agora foram tão populares.

O funcionamento de um turbocompressor (Figura 1.2), é fundamentalmente assegurado por um impulsor (secção fria) (Figura 1.3) accionada por uma turbina (secção quente) que é colocada em rotação por efeito da expansão dos gases de escape, através de um veio que une estes dois componentes (Figura 1.4).

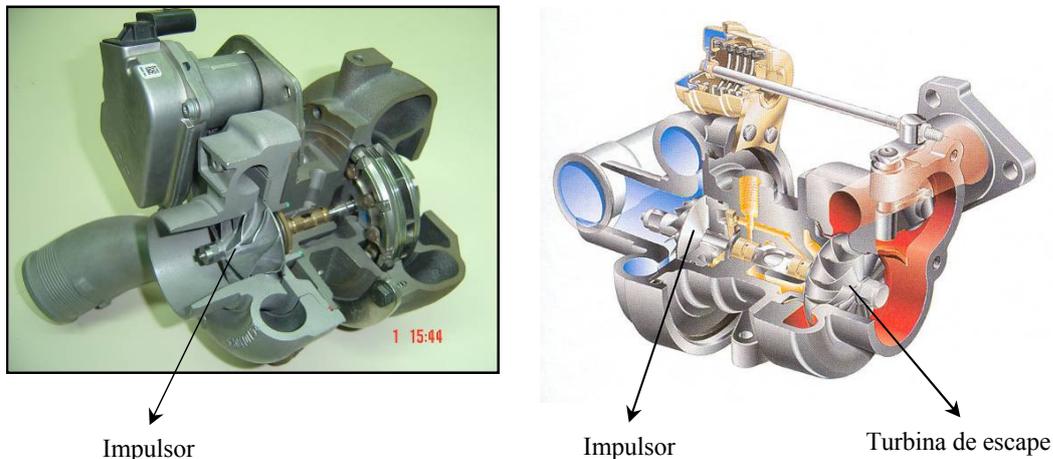


Figura 1.2 – Turbocompressor em corte [Mayer, 1996].

Rodando a velocidades que podem chegar às 300.000 rpm, o impulsor comprime, por sua vez, o ar atmosférico para o interior do motor, ar esse que posteriormente vai intervir no processo de combustão, enriquecendo-o em oxigénio, aumentando assim a sua eficiência.

Já produzida há alguns anos na ZGT e na ZCP, a pá de turbina é outro componente dos turbocompressores de última geração, com sistema de geometria variável. Não sendo mais do que um simples deflector, ela permite orientar os gases de escape provenientes do motor em diferentes ângulos de incidência, consoante a carga imposta ao mesmo (Figuras 1.5 e 1.6).

Desta maneira, consegue-se um aumento de rendimento face aos turbocompressores de geometria fixa, nos quais os gases de combustão são projectados sobre a turbina numa direcção fixa.

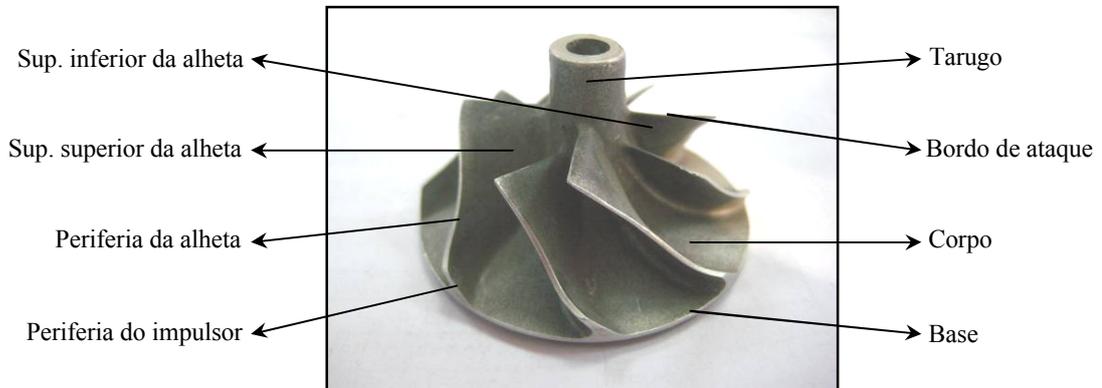


Figura 1.3 – Impulsor de um turbocompressor.

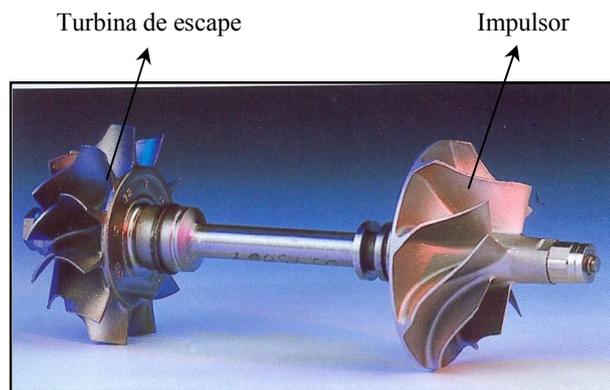


Figura 1.4 – Rotor de um turbocompressor, constituído por uma turbina e por um impulsor ligados entre si por um único veio [Mayer, 1996].

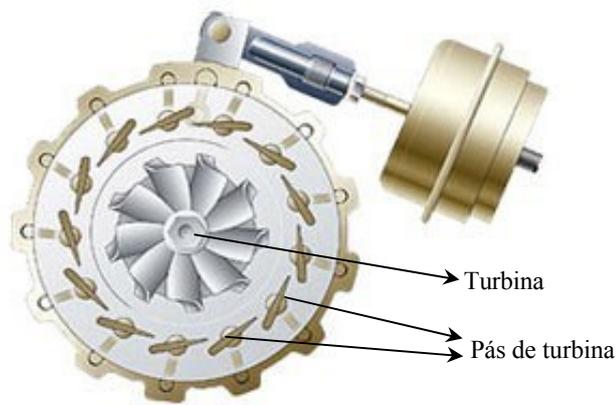


Figura 1.5 – Posicionamento das pás em relação à turbina, num turbocompressor de geometria variável [i1].

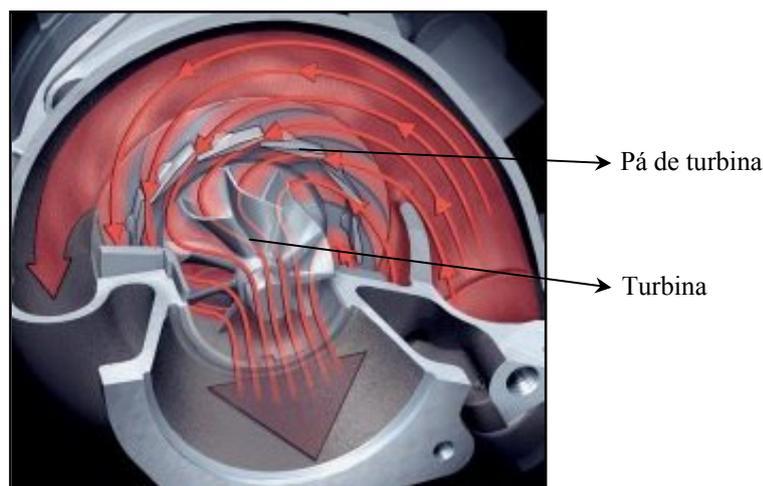


Figura 1.6 – Fluxo dos gases de escape provenientes do motor sobre a turbina, previamente orientados pelas pás de turbina [i1].

Num mercado tão restrito, sendo a ZCP já produtora e fornecedora da turbina (produzida na ZGT) e da pá de turbina (produzida na ZGT e na ZCP), foi de uma forma natural e num contexto comercial por assim dizer favorável, que em 2003 a ZCP decidiu também apostar na produção do impulsor, um produto fornecido por apenas 5 produtores a nível mundial e apoiado num processo produtivo bastante restrito e pouco conhecido.

Decidida a avançar para o desenvolvimento deste processo, estabeleceu uma parceria com o INEGI, com vista a que a sua Unidade de Fundição e Novas Tecnologias (CETECOFF) começasse a desenvolver investigação nesse sentido. O objectivo final passava por desenvolver totalmente o processo, e projectar, construir e testar os equipamentos específicos necessários ao mesmo, de maneira a montar uma nova unidade industrial destinada à produção de impulsores em ligas de alumínio. O desafio foi lançado.

Abril de 2004 marcou assim o início formal do projecto, com a submissão do mesmo à aprovação por parte da Agência de Inovação (Adi), ao abrigo do programa de financiamento IDEIA (Apoio à Investigação e Desenvolvimento Empresarial Aplicado).

Com uma equipa inicial constituída apenas por elementos do INEGI, no arranque procurou-se definir a estrutura básica do processo e explorar as principais fases de produção em que ele iria assentar. Foi também nesta altura que se iniciou um contacto regular com a *BorgWarner* (já cliente da *Zollern* na turbina e na pá de turbina), de maneira a melhor orientar o desenvolvimento do processo no sentido de eles se tornarem também clientes da ZCP no impulsor de alumínio.

Uma vez o processo mais ou menos delineado, era agora altura de o tornar robusto com vista à industrialização. Surgiu assim a necessidade de afinação dos pequenos pormenores e de concepção e construção de ferramentas e equipamentos específicos. Foi também necessário começar a criar uma pequena equipa *Zollern* especializada nas várias fases do processo, de maneira a poder desenvolver todo o trabalho sistemático a fazer. Foi uma fase de investigação intensa, com uma vasta quantidade de ensaios realizados e resultados para analisar e relacionar entre si, mas ao mesmo tempo estimulante, já que em simultâneo se

começaram a produzir impulsos para montagem em motores da marca *Rotax*, para uso em *jet-skis* de competição.

O final do ano 2006 marcou a transição do processo do ambiente laboratorial do INEGI para as novas instalações na ZCP (Figuras 1.7 a 1.16). Com uma equipa inicial de 12 colaboradores, as preocupações passaram a centrar-se então na organização do *layout* industrial, na recepção, montagem e teste dos novos equipamentos, e na estabilização e implementação industrial da tecnologia desenvolvida.



Figura 1.7 – Actuais instalações da ZCP.



Figura 1.8 – Aspecto exterior do pavilhão fabril da ZCP–Alumínio.



Figura 1.9 – Aspecto interior do pavilhão fabril da ZCP–Alumínio.



Figura 1.10 – Secção de Moldações.



Figura 1.11 – Secção de Secagem de Moldações.



Figura 1.12 – Secção de Fusão.



Figura 1.13 – Secção de Acabamentos.



Figura 1.14 – Secção de Tratamentos Térmicos.



Figura 1.15 – Secção de Controlo da Qualidade.



Figura 1.16 – Secção de Expedição.

1.3. Objectivos do projecto

No enquadramento referido, os objectivos definidos para este projecto foram:

- Optimização do processo de vazamento de gesso em placas-molde elastoméricas com recurso a vibração mecânica para isenção de bolhas;
- Optimização da composição do gesso e do processo de secagem de moldações para garantir resistência mecânica e permeabilidade às mesmas, e tempos de secagem suficientemente curtos, de modo a tornar o processo industrialmente viável;
- Optimização das condições de vazamento das ligas de alumínio em termos de:
 - Limpeza das moldações secas e pré-aquecidas;
 - Vácuo e impregnação das moldações com argon para diminuição da oxidação durante o vazamento;
 - Temperaturas de pré-aquecimento das moldações;
 - Temperatura e teor de hidrogénio das ligas a vazar;
 - Sistema de filtragem de filmes de óxidos.

1.4. Abordagem do problema proposto

Para atingir os objectivos propostos, a estratégia definida para este trabalho consistiu em efectuar uma pesquisa bibliográfica sobre as tecnologias envolvidas no processo de produção de impulsores para turbocompressores, isto é, o vazamento de ligas metálicas em moldações de gesso e a fundição de ligas de alumínio. Posteriormente procede-se a uma descrição do processo actualmente existente e do trabalho de optimização realizado.

CAPÍTULO 2

Pesquisa bibliográfica

2.1. Vazamento em moldações de gesso

2.1.1. Introdução

Originalmente desenvolvido pelos fundidores de estátuas em bronze dos tempos medievais, o processo de vazamento em moldações de gesso constitui hoje uma das mais importantes técnicas de fundição nos Estados Unidos [P.M.C.A., 1983].

A seguir ao vazamento em coquilha, à fundição injectada e ao vazamento em moldação de areia, o vazamento em moldação de gesso é provavelmente a técnica mais amplamente usada neste país na produção de peças em ligas de alumínio e de cobre. Para isto muito contribuiu o desenvolvimento dos gessos permeáveis usados com moldes de borracha, e o refinamento dos gessos maciços usados com moldes rígidos [P.M.C.A., 1983].

Apesar de não ser economicamente tão competitivo como os processos apresentados acima, o vazamento de ligas metálicas em moldações de gesso é visto como uma técnica de fundição de precisão, permitindo assim produzir fundidos que não podem ser obtidos por outros processos. Por sua vez, quando comparado com outros processos de fundição de precisão tais como o *Investment Casting*, revela-se extremamente competitivo, especialmente na produção de fundidos de grandes dimensões em ligas de alumínio ou de cobre, ou de protótipos de fundição injectada, sem ter que recorrer a elevados investimentos em ferramentas, nem perder muito tempo [P.M.C.A., 1983].

Virtualmente, não há quaisquer restrições em termos de geometrias passíveis de serem produzidas por este tipo de vazamento. Além disso, o processo não está limitado a peças leves ou de baixa produção [P.M.C.A., 1983].

Como principais vantagens deste processo, salientam-se:

- Excelente acabamento superficial dos fundidos, não necessitando muitas vezes de operações posteriores de maquinagem ou acabamento [Nunes, 1999 / P.M.C.A., 1983 / Clegg, 1991];

- Elevada capacidade de reprodução de detalhes dos modelos nos fundidos finais [Nunes, 1999 / P.M.C.A., 1983 / Clegg, 1991];
- Possibilidade de produção de peças em ligas de alumínio e de cobre de grandes dimensões, com paredes de espessura fina, e de geometria complexa, devido à natureza isolante dos materiais presentes nos gessos usados para a produção de moldações (a condutividade térmica do gesso é de 0,20 a 0,45cal/m.s °C) [Nunes, 1999 / P.M.C.A., 1983 / Clegg, 1991];
- Cumprimento consistente de tolerâncias dimensionais apertadas, típicas do processo de *Investment Casting* [Nunes, 1999 / P.M.C.A., 1983 / Clegg, 1991];
- Obtenção de fundidos com dureza uniforme e estabilidade dimensional [P.M.C.A., 1983];
- Obtenção de fundidos sem distorções e com tensões residuais muito baixas, devido à velocidade de solidificação reduzida imposta aos mesmos. Tal acontece como resultado da natureza isolante do gesso no estado em que é usado após secagem (estado hemihidratado) e permite dispensar posteriores operações de endireitamento e de maquinagem, com a inerente poupança de tempo e redução de custos que tal acarreta [P.M.C.A., 1983 / Clegg, 1991];
- Especialmente adaptável à utilização de arrefecedores (normalmente metálicos, os quais são colocados à volta do modelo antes do vazamento da barbotina), permitindo um controlo apertado dos gradientes térmicos nas moldações, e assim uma optimização das propriedades mecânicas em áreas isoladas de peças complexas, reduzindo tensões residuais e distorções. [Nunes, 1999].

Apesar das suas vantagens, o vazamento em moldações de gesso também apresenta algumas limitações:

- Processo limitado ao vazamento de ligas de alumínio, de zinco e de cobre, como resultado das limitações impostas pela temperatura de fusão do gesso [P.M.C.A., 1983];
- A impossibilidade de vazamento de metais ferrosos prende-se com o facto de as elevadas temperaturas das ligas provocarem uma reacção das mesmas com o enxofre (S) presente no gesso, originando peças com má qualidade superficial [Nunes, 1999];
- Baixa produtividade e custos elevados para produção de grandes séries, devido ao longo tempo de processamento das moldações e à impossibilidade de as reutilizar [Nunes, 1999 / Clegg, 1991];
- Necessidade de mais equipamento do que para a maior parte dos restantes processos [Nunes, 1999];
- Necessidade de um controlo rigoroso de todos os parâmetros do processo produtivo [Nunes, 1999 / Clegg, 1991];
- Necessidade de procedimentos especiais ou de vazamento sob pressão ou assistido por vácuo, porque é necessário ultrapassar os problemas inerentes a uma baixa permeabilidade da moldação [Nunes, 1999 / Clegg, 1991];
- Possibilidade de ocorrência de um crescimento exagerado do grão nos fundidos,

como consequência do arrefecimento lento a que estes estão sujeitos, o que prejudica as suas propriedades mecânicas finais (nomeadamente a tenacidade), [Nunes, 1999 / Clegg, 1991];

- Inviabilidade de reciclagem dos materiais usados na produção da moldação [Clegg, 1991].

2.1.2. Descrição

2.1.2.1. Sumário

O processo de vazamento em moldações de gesso é uma técnica semelhante ao vazamento em moldações de areia no sentido em que passa pela obtenção de uma moldação por vazamento de uma cerâmica sobre uma placa-molde. Enquanto que neste último processo essa placa-molde é geralmente fabricada em madeira, e sobre ela é vazada areia, no processo de moldações de gesso a placa é normalmente maquinada com precisão num material rígido (metálico ou polimérico), ou revestida com um material elastomérico (silicone, por exemplo), sendo sobre ela vazado gesso no estado líquido. Como resultado, a precisão dimensional, a capacidade de reprodução e o acabamento superficial tipicamente obtidos são significativamente superiores aos atingidos com o processo de vazamento em moldações de areia [Nunes, 1999 / P.M.C.A., 1983].

Normalmente, as ferramentas não são mais do que 2 placas-molde permanentes maquinadas, a partir das quais se vão obter 2 moldações com forma negativa daquelas. A forma do fundido a obter está assim dividida ao longo de uma linha de apartação que é definida dentro de certas tolerâncias e apenas do lado exterior do mesmo. No caso de a peça apresentar cavidades, estas serão obtidas pelo uso de machos (produzidos nas respectivas caixas de machos) devidamente posicionados em ambas as metades da moldação [P.M.C.A., 1983].

Após aplicação de um agente desmoldante sobre as placas-molde, é então vazada uma barbotina cerâmica sobre as mesmas, a qual resulta de uma mistura de gesso e de outros materiais refractários com água. Esta barbotina fica entretanto em repouso durante o tempo de presa, no final do qual, já na forma de 2 moldações sólidas e consistentes, são desmoldadas das placas-molde [P.M.C.A., 1983].

A etapa seguinte é uma das fases mais críticas de todo o processo de vazamento de moldações em gesso, e consiste na secagem das moldações “verdes”. Nesta fase, usando fornos de secagem próprios, tanto a água livre como a água combinada presente nas moldações são removidas [P.M.C.A., 1983], de modo a que o vazamento do metal no seu interior possa ocorrer sem se comprometer a integridade das peças finais.

Decorrida a secagem das moldações, estas são então montadas num dispositivo próprio para efectuar o vazamento. Este pode ser efectuado de várias formas, nomeadamente [P.M.C.A., 1983]:

- Vazamento em contragravidade totalmente em vácuo;
- Vazamento em baixa-pressão assistido por vácuo;

- Vazamento em gravidade assistido por vácuo.

A selecção do tipo de vazamento a adoptar depende da capacidade da fundição em termos de equipamento e/ou dos requisitos metalúrgicos exigidos ao produto final [P.M.C.A., 1983].

Durante o vazamento, as propriedades isolantes do gesso seco constituinte da moldação asseguram que o metal se mantém líquido o suficiente para encher as secções mais finas do fundido. Em simultâneo, a permeabilidade do gesso permite não só a saída dos gases da moldação [P.M.C.A., 1983], como um meio privilegiado para a acção do vácuo sobre o enchimento das cavidades da mesma.

Após o arrefecimento, as moldações são cuidadosamente partidas e separadas dos fundidos, e os sistemas de gitagem e de alimentação removidos [P.M.C.A., 1983]. As operações seguintes de acabamento dos fundidos podem passar pela rebarbagem, polimento e granalhagem dos mesmos.

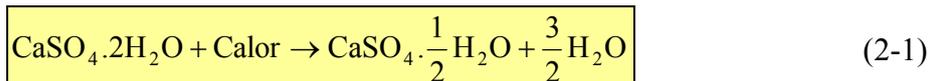
O organigrama da Figura 2.1 resume as etapas do processo de vazamento de ligas metálicas em moldações de gesso.

2.1.2.2. Gessos para vazamento de metal

Podendo ser encontrado em formações rochosas em várias partes do Mundo (especialmente no Canadá, Estados Unidos, França, Inglaterra, Itália, China, Rússia, e alguns países da América do Sul), o gesso é um mineral que cristaliza no sistema monoclinico, apresenta uma morfologia prismática, geralmente é maciço e granular, e tem brilho vítreo. Na maior parte dos casos é também incolor, apesar de poder apresentar-se branco, cinzento, amarelo, castanho ou azulado, consoante as suas inclusões. Além disso, tem dureza 2 (escala de Mohs) e densidade 2,3 [Nunes, 1999]. Quando cristalino, o gesso é vulgarmente conhecido como alabastro.

A fórmula química do gesso é $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de cálcio bihidratado), sendo constituído por 79,1% de CaSO_4 e por 20,9% de H_2O , e apresenta a seguinte composição estequiométrica: 32,5% de CaO , 29,9% de H_2O e 46,6% de SO_4 . É por isso um composto de cálcio (Ca), enxofre e água [Nunes, 1999].

O gesso cerâmico, muitas vezes designado por *Plaster of Paris*, é constituído fundamentalmente por sulfato de cálcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), o qual é obtido através da desidratação controlada do sulfato de cálcio bihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) por remoção de 75% da água de recristalização [Lucas, 1987]. Esta reacção pode ser traduzida pela seguinte equação [Nunes, 1999]:



O gesso usado em fundição divide-se em dois tipos [Nunes, 1999]:

- Gesso cinzento, normalmente conhecido por *metal casting base*;
- Gesso branco, normalmente conhecido por *white moulding plaster*, que é mais puro e mais caro que o gesso cinzento.

A calcinação do gesso branco pode-se fazer por dois processos diferentes, dos quais resultam produtos também diferentes [Lucas, 1987 / Nunes, 1999]:

- O **gesso α** hemihidratado (α -HH), obtido em autoclave sob pressão (aproximadamente 8bar) e a temperaturas da ordem dos 170°C;
- O **gesso β** hemihidratado (β -HH), obtido à pressão atmosférica e a temperaturas da ordem dos 120°C.

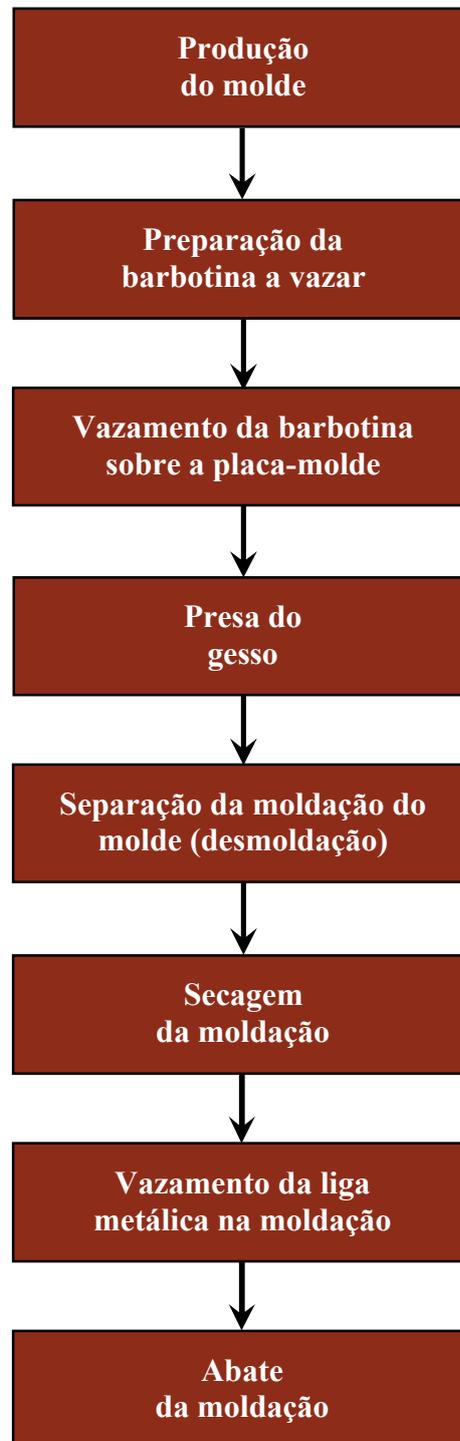


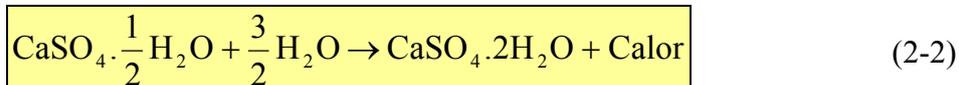
Figura 2.1 – Etapas do processo de vazamento de ligas metálicas em moldações de gesso.

A completa desidratação dos hemihidratados, a temperaturas entre os 120 e os 150°C, dá origem à anidrite solúvel (γ -CaSO₄), facilmente reversível na presença de humidade. A temperaturas superiores a 320°C forma-se a anidrite insolúvel ou β -CaSO₄ [Nunes, 1999].

Apesar de provirem do mesmo tipo de gesso, e de não apresentarem diferenças ao nível da composição química e mineralógica, os gessos α e β apresentam propriedades físicas e mecânicas diferentes, as quais se reflectem sobretudo ao nível de [Nunes, 1999]:

- Densidade ($d_{\text{gesso } \alpha} = 2,76$; $d_{\text{gesso } \beta} = 2,63$);
- Resistência mecânica (gesso α mais resistente que o β);
- Resistência ao desgaste (gesso α mais resistente que o β);
- Capacidade de absorção de água (gesso β absorve mais água que o α).

Quando é adicionada água ao gesso hemihidratado, este volta ao estado bihidratado (Equação 2-2), obtendo-se uma barbotina líquida que rapidamente ganha presa e solidifica em poucos minutos [Nunes, 1999].



A formação do gesso bihidratado a partir do hemihidratado misturado com água ocorre por destruição da estrutura do hemihidratado, com crescimento simultâneo de cristais de bihidratado de hábito acicular e tamanho bem maior que o dos de hemihidratado. Durante o crescimento desses cristais, a barbotina vai-se sucessivamente tornando mais viscosa até ficar dura, e eles vão ficando rodeados por um excesso de água, que ao evaporar-se origina a precipitação de ainda mais cristais nos pontos de contacto entre os já previamente formados. Tal vai promovendo uma crescente rigidez da rede de cristais tridimensional [Lucas, 1987 / Nunes, 1999].

Existem actualmente duas teorias que explicam a reacção de presa do gesso [Lucas, 1987 / Nunes, 1999]:

- Teoria de *Le Chatelier*, que em 1887 admitiu que a presa se produz devido à diferença de solubilidade entre o hemihidratado (6 a 10g/l) e o bihidratado (2g/l). Em contacto com a água, o hemihidratado dissolve-se até à saturação, dando origem a uma solução sobressaturada, e proporcionando assim condições para a precipitação do bihidratado. O processo envolve assim a dissolução do hemihidratado, dando-se subseqüentemente a reacção de hidratação (transformação da solução hemihidratada em solução bihidratada sobressaturada) espontaneamente a partir de germens de bihidratado existentes na barbotina. Os cristais em forma de agulha cruzam-se em todas as direcções produzindo uma rede tridimensional que confere resistência mecânica às moldações;
- Teoria mais recente, que explica a presa por um processo coloidal. Quando se misturam o gesso e a água forma-se um gel intermediário, a partir do qual se desenvolvem os cristais de bihidratado. A presa corresponderá assim a uma coagulação desse gel.

Dum ponto de vista mais prático, na fundição os gessos usados para vazamento de ligas metálicas podem agrupar-se em 2 categorias consoante o modo como são usados:

- Gessos convencionais não-porosos, normalmente vazados sobre modelos rígidos;
- Gessos porosos, normalmente vazados sobre modelos elastoméricos.

Apesar de em ambos os casos o ingrediente fundamental ser gesso hemihidratado, este é misturado com outros aditivos de modo a controlar a fluidez e a viscosidade após mistura, o tempo de *gloss-off* (tempo de trabalho, em que a viscosidade da barbotina se mantém inalterada, permitindo o vazamento), o tempo de presa, as resistências mecânicas nos estados verde e seco e a contração da moldação [Nunes, 1999 / P.M.C.A., 1983]. Entre estes aditivos encontram-se [Nunes, 1999]:

- A sílica e a farinha de sílica, que conferem resistência e refratariedade às moldações, e melhoram a condutividade térmica das mesmas;
- O cimento *Portland*, fibra de vidro e terra alba, que são por vezes adicionados para aumentar a resistência da moldação e melhorar as características de presa das misturas;
- A diatomite, utilizada para conferir porosidade e diminuir o tempo de presa das moldações;
- O hidróxido de cálcio, que ajuda a prevenir a contração e a aumentar o tempo de presa da moldação;
- O talco, que ajuda a evitar o aparecimento de fissuras nas moldações.

As misturas de gesso convencionais são normalmente usadas no vazamento sobre modelos rígidos. Estas misturas são excelentes em termos de precisão dimensional, acabamento superficial, e capacidade de reprodução de detalhes, apesar de apresentarem uma permeabilidade relativamente baixa. É por isso muito vulgar que moldações deste tipo sejam vazadas com auxílio total ou parcial de vácuo, de modo a facilitar não só o enchimento como a remoção de gases da moldação [P.M.C.A., 1983].

Já as moldações de gesso poroso são normalmente usadas no vazamento sobre modelos elastoméricos. Estes gessos permeáveis são normalmente constituídos por gesso e por outros ingredientes principais, embora em alguns casos possam também possuir agentes espumantes (gessos do tipo “espuma”). Durante a mistura, estes são responsáveis pela formação de uma estrutura porosa de células pequenas, uniformes e interligadas entre si, revestidas pela superfície lisa da moldação. Quando a moldação é seca, esta rede de células interligadas surge como o caminho natural para saída dos gases da moldação que se formam durante o vazamento [P.M.C.A., 1983].

2.1.2.3. Materiais das placas-molde

O equipamento e materiais usados no vazamento sobre modelos rígidos e sobre modelos elastoméricos são totalmente diferentes [P.M.C.A., 1983].

Devido à estrutura celular presente nos gessos permeáveis, a extração de moldações das placas-molde com modelos rígidos é difícil. A superfície suave que cobre esta estrutura é muito fina e tem uma resistência mecânica muito reduzida, não suportando as forças normais geradas na desmoldação deste tipo de modelos. Por este motivo são usados modelos flexíveis em borracha, facilmente deformáveis de modo a permitir uma fácil retirada dos modelos

[P.M.C.A., 1983]. Um dos materiais mais usados nas fundições para execução dos modelos das peças a reproduzir é o silicone, o qual, para além de ser fácil de manipular, apresenta também uma boa durabilidade em serviço.

Já os modelos usados no vazamento sobre modelos rígidos são maquinados directamente em materiais metálicos ou poliméricos, sendo usados como modelos permanentes. Estes modelos devem apresentar “saídas” (mesmo que apenas 0,25°), de modo a facilitar a extracção de moldações das placas-molde [P.M.C.A., 1983].

2.1.2.4. Desmoldante

Independentemente do tipo de modelo ou gesso usado, é normalmente necessário aplicar um agente desmoldante sobre os modelos antes de vazarem a barbotina, de modo a facilitar a extracção da moldação da placa-molde [P.M.C.A., 1983].

Apesar de cada fundição poder ter o seu desmoldante particular, normalmente este não é mais do que uma cera ou óleo que permita a aplicação de uma fina camada sobre os modelos [P.M.C.A., 1983]. De referir que no caso de os modelos serem em silicone, deve-se evitar o uso de desmoldantes à base deste material, uma vez que tal conduz à deformação e conseqüente degradação daqueles.

2.1.2.5. Mistura e vazamento da barbotina

Na preparação de uma mistura de água com gesso, a proporção destes 2 elementos é de uma importância extrema. Por isso a pesagem de ambos deve ser feita de forma rigorosa, de modo a se obter uma consistência cremosa após a mistura [P.M.C.A., 1983].

A consistência é definida como a relação entre a massa de água e a massa de pó (gesso ou mistura de gesso com outros elementos). Assim, uma mistura que contenha 1.400g de água e 1.000g de gesso apresenta uma consistência de 1,4. O aumento da consistência de uma mistura produz um efeito significativo nas propriedades da moldação final, tais como:

- Diminuição da resistência mecânica no estado verde e após secagem [P.M.C.A., 1983];
- Diminuição da densidade [Nunes, 1999];
- Aumento da permeabilidade da moldação seca [P.M.C.A., 1983];
- Aumento da contracção [P.M.C.A., 1983].

Neste contexto é vantajoso o uso da maior consistência possível, sem contudo pôr em causa a resistência mínima necessária em cada situação [Nunes, 1999].

Uma vez encontrada a composição e a consistência adequadas, para um correcto processamento da barbotina deve-se ter em conta os seguintes aspectos:

- A fim de evitar a presença de partículas de sulfato de cálcio bihidratado que possam actuar como agentes nucleantes e aumentar a velocidade de presa, o material e equipamento utilizados na mistura devem estar o mais limpos possível [Lucas, 1987];
- A água utilizada na mistura deve ser desionizada, encontrar-se isenta de

impurezas e a uma temperatura de cerca de 20°C;

- Deve haver uma pesagem rigorosa da água e do gesso intervenientes na mistura, tal como já foi referido [Nunes, 1999];
- A adição do gesso à água deve ter uma duração (duração de incorporação) constante no processo, e deve ser feita com o auxílio de um peneiro. Após a adição completa do gesso a utilizar na mistura, é conveniente que se espere algum tempo (30 segundos, tipicamente) de modo a que ocorra a molhagem de todas as partículas [Lucas, 1987];
- Deve-se fixar o tempo de mistura [Lucas, 1987], e evitar que ele exceda o necessário para uma adequada homogenização, já que tempos longos tendem a provocar um aumento da expansão da moldação durante a presa, e um aumento da incorporação de ar no interior da barbotina [Nunes, 1999];
- A velocidade de presa do gesso também é influenciada pela velocidade e pelo tempo de mistura: velocidades elevadas combinadas com tempos de mistura reduzidos tendem a provocar uma redução do tempo de presa [Nunes, 1999].

Um exemplo de uma cuba típica para obtenção da barbotina encontra-se esquematizado na Figura 2.2.

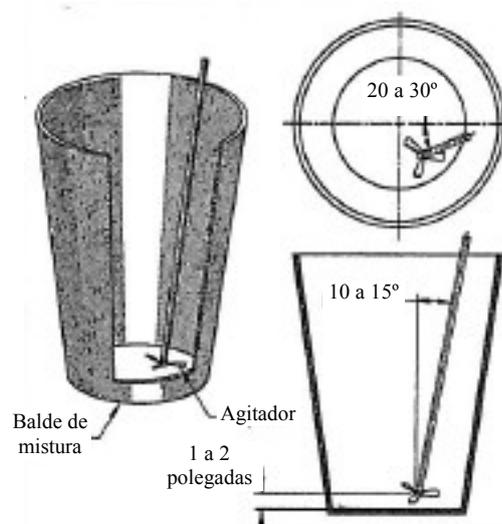


Figura 2.2 – Forma recomendada para uma cuba e respectiva posição da hélice, usada na mistura de barbotinas para obtenção de moldações de gesso [Nunes, 1999].

Após a mistura das quantidades adequadas de água e de gesso, a barbotina obtida é então cuidadosamente vazada sobre os modelos da placa-molde, já devidamente revestidos com desmoldante [P.M.C.A., 1983]. É importante que esta barbotina seja vazada tão cedo quanto possível após a mistura de modo a não perder a fluidez necessária para que flua facilmente sobre as placas, permitindo a libertação das bolhas aprisionadas no seu seio, e de modo a assegurar uma boa reprodutibilidade de detalhes dos modelos [Nunes, 1999].

Logo a seguir, e antes da presa do gesso se começar a manifestar, é frequente o uso de vibração e/ou de vácuo de modo a evitar a formação de bolhas na superfície das cavidades [Nunes, 1999 / P.M.C.A., 1983].

É de referir que no caso de gessos do tipo “espuma”, apesar de tal como nos gessos convencionais, a proporção água/gesso também ser um factor a ter em atenção (consistências de 1 são vulgares e normalmente suficientes), a operação particularmente vital acaba por ser a mistura. Tal deve-se ao facto de durante a mesma ser incorporado ar para produzir uma variação do volume de 70 a 100% face ao original [P.M.C.A., 1983], a qual vai influenciar directamente a permeabilidade final das moldações produzidas [Nunes, 1999].

Aquando do uso destes gessos, de modo a obter-se um núcleo celular revestido por uma superfície suave, (estrutura ideal em gessos porosos), o processo de mistura deve garantir uma densidade e uma permeabilidade uniformes, em simultâneo com uma superfície resistente. Assim, nestas situações uma correcta mistura da água com o gesso passa por garantir um bom controlo da temperatura de ambos, bem como um controlo eficaz do tempo e da velocidade de mistura [P.M.C.A., 1983].

2.1.2.6. Presa do gesso e desmoldação

A presa do gesso é a reacção operada no mesmo quando adicionado à água, de que resulta o endurecimento da barbotina formada com elevação de temperatura [Lucas, 1987].

O tempo de presa corresponde ao tempo que se deve aguardar entre o vazamento da barbotina e o momento em que o endurecimento desta, e logo a sua resistência, torna possível efectuar a desmoldação. Este tempo pode ser detectado por medição da evolução da temperatura da moldação ao longo da presa, uma vez que esta vai aumentando como resultado da libertação de calor à medida que o gesso hemihidratado se combina com a água [Nunes, 1999]. Assim, considera-se que o tempo de presa corresponde geralmente ao instante em que essa temperatura atinge o seu valor máximo.

Este tempo pode ser reduzido [P.M.C.A., 1983]:

- Aumentando a temperatura da água usada na mistura;
- Modificando a velocidade e a forma do misturador, de modo a aumentar a energia da mistura;
- Usando aditivos químicos.

Decorrida a presa do gesso, procede-se então à extracção da moldação da placa-molde. Apesar de o método mais frequente passar pelo recurso à desmoldação mecânica (separação por elevação da moldação em relação à placa-molde), também se recorre muitas vezes ao uso de ar comprimido com meio auxiliar para facilitar a operação [P.M.C.A., 1983].

2.1.2.7. Secagem das moldações de gesso

Após a desmoldação, a secagem das moldações de gesso deve iniciar-se tão cedo quanto possível, a fim de evitar a ocorrência de secagem parcial e conseqüente fissuração. Se tal não for eventualmente possível, as moldações devem ser armazenadas em condições húmidas [Nunes, 1999], podendo ser envolvidas com sacos de plástico devidamente fechados,

por exemplo, de modo a evitar o seu contacto com a atmosfera ambiente.

Antes de poderem ser vazadas, as moldações de gesso têm de ser convenientemente secas em fornos próprios para o efeito. Como já foi referido, durante esta fase, quer a água livre (corresponde ao excesso de água que não se combina quimicamente com nenhum dos componentes da mistura, não actuando por isso no processo de ligação dos componentes da mesma [Nunes, 1999]), quer a água combinada (água necessária para o processo de hidratação do gesso [Nunes, 1999]) são removidas da moldação de modo a assegurar uma completa secagem, e assim evitar a geração de vapor de água aquando do contacto com o metal no vazamento, comprometendo a integridade dos fundidos. Tal deve ser feito evitando a ocorrência de choque térmico que possa levar à geração de fissuras na moldação [P.M.C.A., 1983].

Para que uma moldação esteja completamente seca, isto é para que haja uma completa remoção da água da mesma, é necessário que o seu interior atinja uma temperatura no mínimo de 105°C. Esta temperatura pode ser medida com recurso a um termopar colocado no interior da moldação [Nunes, 1999], e inclusive monitorizada ao longo do ciclo de secagem, de modo a conhecer-se a evolução da temperatura da moldação ao longo da secagem.

Outro processo de averiguar a evolução da secagem de uma moldação consiste na técnica de peso perdido de água. Esta técnica consiste na medição periódica da perda de massa da moldação durante o seu ciclo de secagem. Desta forma, considera-se que uma moldação está seca quando perdeu uma massa equivalente à massa de água inicial que continha [Nunes, 1999]. É de salientar que para efectuar estas pesagens se deve utilizar uma balança com precisão de 1g.

Contudo, na prática, para que uma moldação possa ser vazada, ela apenas tem que perder água combinada a uma profundidade abaixo da sua superfície de pelo menos 13mm [Nunes, 1999].

Uma vez que a secagem das moldações envolve simultaneamente os factores temperatura e tempo, a sua duração pode variar de moldação para moldação. Alguns dos factores que influenciam o tempo de secagem são [P.M.C.A., 1983]:

- Área superficial da moldação;
- Espessura da moldação;
- Permeabilidade da moldação;
- Potência calorífica do forno de secagem;
- Eficiência da convecção forçada no forno de secagem.

Desta forma, o ciclo térmico de secagem para uma moldação com determinadas características tem de ser, de uma forma geral, determinado experimentalmente. Uma vez determinado este ciclo, ambos os parâmetros tempo e temperatura devem ser rigorosamente controlados tendo em vista a estabilidade e reprodutibilidade do processo [Nunes, 1999].

Devendo ser preferencialmente eléctricos, e com circulação de ar no seu interior [Nunes, 1999], os fornos usados na secagem podem ser do tipo “batch” ou do tipo “túnel” [P.M.C.A., 1983]. Nos primeiros, a secagem tem início apenas quando a última moldação é colocada dentro do forno, estando, após secagem, todas as moldações disponíveis para vazamento imediato. As moldações são assim agrupadas para serem convenientemente secas.

Já nos fornos do tipo “túnel”, as moldações iniciam a sua secagem individualmente à medida que vão entrando e circulando num tapete rolante no interior do forno.

Pelo facto de terem uma temperatura de vazamento cerca de 1,5 vezes superior às das ligas de alumínio e de zinco, no vazamento de ligas de cobre a possibilidade de geração de vapor, e logo de problemas nos fundidos, cresce significativamente face aos vazamentos nos outros 2 tipos de ligas. Por este motivo, a temperatura de secagem das moldações deve ser cerca de 400 a 500°C superior à das destinadas ao vazamento das ligas de alumínio e de zinco (tipicamente 200 a 250°C). Tal tem como objectivo apenas assegurar a eliminação de toda a humidade das moldações antes do vazamento, mas implica que haja um grande controlo sob o ciclo térmico imposto de modo a evitar a ocorrência de decomposição química e de fissuração da moldação. De facto, se as moldações forem sobreaquecidas as camadas superficiais decompõem-se, e elas irão contrair excessivamente [P.M.C.A., 1983].

No vazamento de ligas de alumínio e de zinco o sobreaquecimento das moldações não é tão crítico como no caso das ligas de cobre, uma vez que as temperaturas de secagem também não são tão elevadas. Contudo, em ambas as situações deve-se evitar expor a moldação calcinada a um choque térmico demasiado elevado durante o arrefecimento, que poderá levar à sua fractura. Além disso, também se deve garantir que as moldações estão convenientemente apoiadas de modo a evitar qualquer possibilidade de fissuração ou empeno [P.M.C.A., 1983].

No caso de se usarem machos para reprodução de cavidades internas nos fundidos, eles são normalmente secos separadamente das moldações correspondentes. Devido à sua natureza delicada, é também usual que alguns machos sejam secos em formas que lhes garantam algum suporte, para que não sejam danificados durante a secagem [P.M.C.A., 1983].

Devido à sua natureza higroscópica, após a secagem e uma vez exposto à atmosfera circundante, o gesso calcinado tem a tendência a reabsorver humidade. Por isso, devem ser tidos alguns cuidados de armazenagem se as moldações secas não puderem ser vazadas imediatamente após a sua saída do forno, de forma a evitar ao máximo a sua re-hidratação [P.M.C.A., 1983].

Apesar de se esperar que a reciclagem do gesso calcinado venha um dia a ser rentável, hoje em dia ainda não existem meios que o permitam, pelo que as moldações só podem ser usadas uma única vez [P.M.C.A., 1983]. Porém, em vez de serem depositados em aterros, os resíduos de gesso podem sempre ser incorporados numa determinada proporção na produção de cimento, por exemplo.

2.1.2.8. Sistema de gitagem e de alimentação

Ao projectar a geometria da placa-molde e respectivos sistemas de gitagem e de alimentação, o projectista depara-se com várias vantagens, mas também algumas dificuldades decorrentes da natureza isolante das moldações de gesso calcinado [P.M.C.A., 1983].

No vazamento de ligas de cobre, a baixa velocidade de solidificação permite o uso de gitos e alimentadores mais pequenos do que no vazamento em areia. Tal reflecte-se na obtenção de fundidos de qualidade a mais baixo custo, devido a uma maior optimização do espaço utilizado na moldação, e a uma melhor relação massa dos fundidos / massa total de

metal vazado [P.M.C.A., 1983].

No caso das ligas de alumínio, a moldação de gesso facilita o vazamento de secções finas, mas a velocidade de solidificação relativamente baixa conduz à incorporação de gás no fundido. De maneira a ultrapassar este problema, é geralmente necessário impor uma solidificação fortemente direccionada, com recurso a arrefecedores, e recorrer ao uso de vácuo para que os gases gerados na moldação se escoem para o exterior e não para o fundido [P.M.C.A., 1983].

2.1.2.9. Acabamento

O abate de moldações de gesso é muito mais simples e fácil do que o de moldações em areia ou em carapaça cerâmica. Tal deve-se à inferior resistência do gesso calcinado face a qualquer tipo de areia ou cerâmica usada na fundição [P.M.C.A., 1983].

Durante esta fase, as ligações aos gitos e alimentadores, bem como as linhas de apartação são facilmente eliminadas por rebarbagem, sendo os fundidos frequentemente usados sem ou com operações de acabamento e maquinagem mínimas [P.M.C.A., 1983].

2.1.3. Características das moldações

De todas as propriedades típicas das moldações de gesso, a permeabilidade e a resistência mecânica são das mais importantes, e as que assumem mais relevância no processo tratado neste estudo.

2.1.3.1. Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade de um material poroso que quantifica a maior ou menor facilidade com que um fluído o pode atravessar [Nunes, 1999].

O conhecimento da permeabilidade de um determinado material tem interesse por dois motivos em particular. O primeiro diz respeito ao conhecimento da quantidade de fluído que se espera que o possa atravessar (ou dele sair). O segundo prende-se com o conhecimento mais preciso do material pela quantificação da sua permeabilidade (deriva directamente da sua porosidade) [Nunes, 1999].

A permeabilidade é definida pela lei de *Darcy* (Equação 2-3), que diz que o caudal de fluído que atravessa um corpo por unidade de área, é directamente proporcional ao gradiente de pressão ao longo desse corpo, e inversamente proporcional à viscosidade do fluído. A constante que transforma esta proporcionalidade numa igualdade é a permeabilidade [Nunes, 1999].

$$\frac{Q}{A} = k \times \frac{\Delta P}{\nu \times L} \quad (2-3)$$

em que:

- $Q \rightarrow$ Caudal do fluído;

- $A \rightarrow$ Área do material poroso;
- $\Delta P \rightarrow$ Variação da pressão ao longo do corpo;
- $L \rightarrow$ Comprimento do material na direcção do caudal;
- $\nu \rightarrow$ Viscosidade do fluído;
- $k \rightarrow$ Permeabilidade.

Em fundição, a permeabilidade é a propriedade física do material de uma moldação que determina a facilidade com que os gases que se encontram no seu interior passam da cavidade moldante para o exterior [Nunes, 1999].

Esta propriedade é muito importante, na medida em que dela depende a maior ou menor facilidade com que os gases provenientes do metal fundido e existentes dentro da moldação se libertam para o exterior da mesma, evitando-se assim o aparecimento de defeitos tais como inclusões gasosas [Nunes, 1999].

Uma vez que a permeabilidade de uma moldação é uma medida indirecta da sua porosidade, uma permeabilidade demasiado elevada pode significar falta de resistência mecânica da mesma (por diminuição da secção resistente da moldação). Por outro lado, se a porosidade da moldação for muito elevada pode existir o risco de haver penetração de metal no interior da mesma, podendo provocar o seu colapso [Nunes, 1999].

Um aumento da porosidade significa a existência de um maior espaçamento entre os constituintes granulares que compõem a moldação. Isto implica que a granulometria dos constituintes da moldação seja fundamental para a sua permeabilidade final, e que seja a porosidade a controlar a sua permeabilidade [Nunes, 1999].

Por outro lado, a porosidade mais elevada ocorre na presença de materiais granulares do mesmo tamanho, pelo que na presença de uma distribuição granulométrica mais variada, os espaços entre os grãos maiores podem ser preenchidos por outros de menor dimensão, diminuindo assim a porosidade e com isso a permeabilidade [Nunes, 1999].

2.1.3.2. Resistência mecânica

A resistência mecânica de uma moldação é outra propriedade que importa controlar de forma rigorosa, uma vez que dela depende não só o seu comportamento quando manuseada ou sujeita ao efeito erosivo do metal líquido durante o vazamento, como a facilidade com que o gesso é removido na operação de abate [Nunes, 1999].

No momento do vazamento, a cavidade moldante é sujeita a solicitações mecânicas, cuja principal possível consequência é a sua deformação. Estas solicitações são consequência de diversos factores, tais como [Nunes, 1999]:

- Impacto do metal na parede da cavidade durante o vazamento;
- Solicitações provocadas pelo peso do próprio metal;
- Pressão metalostática do metal;
- Pressão devida a fenómenos de expansão volumétrica verificados em algumas ligas metálicas durante a solidificação;
- Choque térmico e solicitação térmica devido à existência de gradientes de

temperatura.

O grau de deformação e distorção que se verificará numa moldação sujeita a estas solicitações depende sobretudo da sua rigidez e resistência [Nunes, 1999].

A resistência mecânica dos materiais cerâmicos é, de uma forma geral, caracterizada pela resistência à flexão, a qual pode ser determinada mediante realização de um ensaio de flexão em 3 pontos (Figura 2.3).

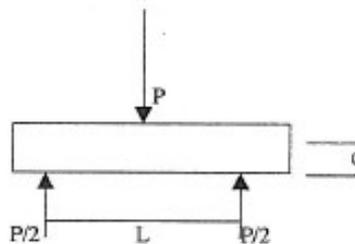


Figura 2.3 – Esquema de execução de um ensaio de flexão em 3 pontos [Nunes, 1999].

Neste ensaio, a resistência à flexão pode ser calculada através da fórmula [Lucas, 1987]:

$$\text{M.R.} = \frac{3 \times P \times L}{2 \times B \times H^2} \quad (2-4)$$

em que:

- M.R. → Módulo de rotura (N/mm^2);
- P → Carga de rotura (N);
- L → Distância entre apoios (mm);
- B → Largura do provete (mm);
- H → Espessura do provete (mm).

2.1.4. Vantagens da utilização de moldações em gesso

2.1.4.1. Controlo de qualidade excepcional

Como grandes vantagens qualitativas decorrentes do vazamento de ligas metálicas em moldações de gesso temos [P.M.C.A., 1983]:

- Excelente capacidade de enchimento de secções finas e intrincadas, devido à natureza isolante dos materiais presentes nos gessos usados para a produção de moldações;
- Fundidos finais com tensões internas muito reduzidas, devido à velocidade de

solidificação muito reduzida;

- Fundidos finais com um acabamento superficial excelente, não necessitando muitas vezes de operações posteriores de maquinagem ou acabamento;
- Elevada capacidade de reprodução de detalhes dos modelos nos fundidos finais;
- Cavidades internas e entalhes de todas as formas podem ser reproduzidos com restrições mínimas, bem como arestas vivas ou raios de curvatura de maior dimensão.

2.1.4.2. Qualidade dimensional competitiva

A precisão superficial e várias tolerâncias dimensionais atingíveis pelos fundidos vazados em moldações de gesso aproximam-se bastante das exibidas pelos obtidos por *Investment Casting* ou por fundição injectada [P.M.C.A., 1983].

Seguidamente apresentam-se alguns valores de referência de âmbito dimensional típicos deste processo [P.M.C.A., 1983]:

- **Tolerâncias lineares:**
 - $\pm 0,005\text{mm/mm}$ ($0 \leq L \leq 150\text{mm}$)
 - $\pm 0,003\text{mm/mm}$ ($L \geq 150\text{mm}$)
 - Tolerância máxima: $\pm 0,040\text{mm/mm}$
- **Ângulos de saída requeridos:**
 - Situação normal: $0,020^\circ/\text{mm} \leq \alpha \leq 0,079^\circ/\text{mm}$
 - Situação especial: $0^\circ/\text{mm} \leq \alpha \leq 0,010^\circ/\text{mm}$
 - Ângulos de saída nulos são possíveis usando modelos em silicone.
- **Cavidades e entalhes:**
 - Diâmetro mínimo: 6mm
- **Ângulos:**
 - Tolerância máxima: $0^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$
- **Perpendicularidade:**
 - Situação normal: 0,008mm/mm
 - Situação especial: 0,005mm/mm
- **Espessura de parede:**
 - Situação normal: $\pm 0,38\text{mm}$
 - Situação especial: $\pm 0,25\text{mm}$
 - *Espessuras de parede típicas:*
 - *Ligas de alumínio:*
 - Situação normal: 1,8mm

- Situação especial: 1,0mm
- *Ligas de cobre:*
 - Situação normal: 2,3mm
 - Situação especial: 1,0mm
- *Ligas de zinco:*
 - Situação normal: 1,5mm
 - Situação especial: 1,0mm

2.1.4.3. Custo efectivo de produção

O processo de vazamento em moldações de gesso é particularmente eficaz em termos de custos de produção de moldações. Tal deve-se fundamentalmente ao facto de [P.M.C.A., 1983]:

- As placas-molde referentes a peças diferentes poderem usar as mesmas caixas de moldação entre si, partilhando assim os custos de execução;
- Os modelos não apresentarem grande desgaste em serviço, permitindo a produção de grandes séries de peças;
- A solidificação lenta das peças reduzir a concentração de tensões, promovendo uma dureza uniforme e a ausência de empenos.

Neste processo, os custos de ferramentas são geralmente superiores aos do vazamento em areia, idênticos aos do *Investment Casting*, e inferiores aos da fundição injectada [P.M.C.A., 1983].

Em termos de rapidez de produção de amostras de pré-produção, o processo é também comparável ao vazamento em areia, sendo normais tempos de execução de 2 a 6 semanas, bastante inferiores aos típicos da fundição injectada [P.M.C.A., 1983].

2.2. Metalurgia e fundição de ligas de alumínio

2.2.1. Introdução

Hoje em dia, o alumínio e as suas ligas são dos materiais mais versáteis, económicos e atractivos para utilização numa vasta gama de aplicações, graças à combinação única de propriedades que apresentam, entre as quais [Metallurg Aluminium]:

- Baixa densidade (2,7, aproximadamente um terço das do aço, cobre ou bronze);
- Elevada resistência específica;
- Elevada resistência à corrosão;
- Elevadas condutividades térmica e eléctrica;

- Elevado calor específico mássico (C_p);
- Ausência de magnetismo;
- Ausência de toxicidade.

Podendo ser processadas por forjamento ou fundição, e apesar de actualmente as ligas forjadas trabalhadas (forjadas e extrudidas) representarem cerca de 75% da produção mundial, a fundição de alumínio tem vindo a conhecer um importante crescimento nos últimos anos, devido essencialmente aos seguintes factos [Metallurg Aluminium]:

- Facilidade de obtenção de geometrias complexas muitas vezes muito dispendiosas ou mesmo impossíveis de obter por outro processo;
- Evolução verificada no tratamento e preparação dos banhos, e nas técnicas de vazamento, que teve como consequência o aumento da resistência, ductilidade e tenacidade dos fundidos.

Muito desse crescimento tem ocorrido na indústria dos transportes, particularmente na indústria automóvel, que absorve cerca de 80% da produção mundial nesta área. Muitos outros produtos fundidos em alumínio são também empregues na área da engenharia em geral, da engenharia eléctrica, da construção e de equipamentos domésticos e de escritório, tal como evidencia a Tabela 2.1 [Metallurg Aluminium].

Tabela 2.1 – Aplicações de produtos fundidos em alumínio (% aproximada) [Metallurg Aluminium].

Indústria	Japão	EUA	Alemanha	Itália	França	Reino Unido
Transportes	83	60	74	65	83	62
Engenharia em geral	8	14	13	7	5	5
Engenharia eléctrica	5	9	5	8	6	15
Construção	3	4	4	12	1	5
Equip. domésticos e de escritório	1	13	4	8	5	13

2.2.2. Processos de vazamento

A maior parte das peças fundidas em ligas de alumínio são geralmente obtidas por um dos seguintes processos [Metallurg Aluminium]:

- Vazamento em areia;
- Vazamento em coquilha por gravidade;

- Vazamento em coquilha por baixa-pressão;
- Fundição injectada;
- Fundição por cera perdida em carapaça (*Investment casting*);
- Fundição por espuma perdida (*Lost foam casting*).

2.2.2.1. Vazamento em areia

O vazamento em moldações de areia (Figura 2.4) é o mais simples e comum processo de vazamento de ligas de alumínio, e consiste no vazamento destas ligas numa moldação previamente obtida por calcamento de areia sobre um modelo do fundido final fabricado num material próprio (madeira ou metal, por exemplo). Uma vez solidificado o metal, a moldação é então abatida para que se possa remover o fundido do seu interior, facto que possibilita a produção de peças com geometria complexa [Metallurg Aluminium].

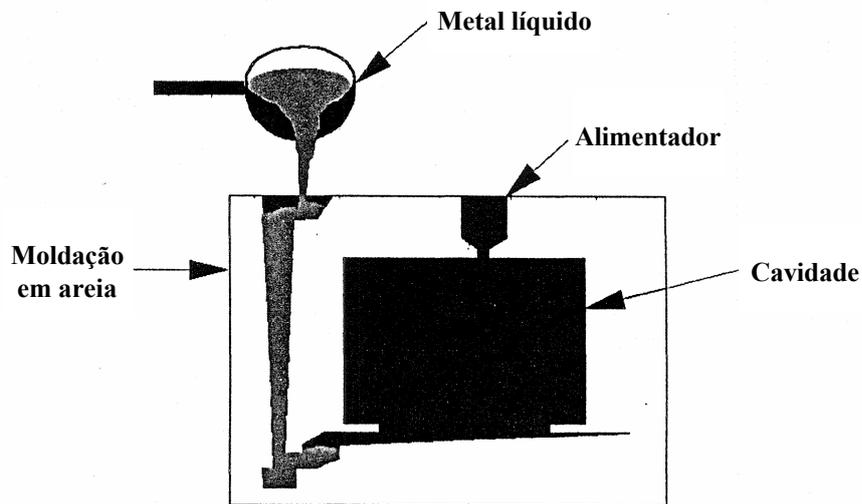


Figura 2.4 – Diagrama esquemático do vazamento em areia [Metallurg Aluminium].

Principais vantagens [Metallurg Aluminium]:

- Processo de vazamento muito versátil;
- Possibilidade de vazamento de peças de grandes dimensões;
- Possibilidade de vazamento de peças com formas complexas e com cavidades;
- Possibilidade de vazamento de peças com baixo nível de porosidade;
- Baixo custo dos equipamentos (para pequenas produções);
- Rentabilidade elevada quando comparado com outros processos, mesmo para pequenas quantidades.

Principais desvantagens [Metallurg Aluminium]:

- Espessura mínima das paredes dos fundidos de 3 a 5mm;
- Fundidos com tolerâncias dimensionais lineares sofríveis (cerca de 4mm/m);
- Rugosidade superficial das peças;
- Fundidos com grão grosseiro quando comparado com os de outros processos de vazamento, devido à velocidade de solidificação reduzida;
- Cadências de vazamento reduzidas (podem ser aumentadas mediante automação, até cerca de 600 moldações/hora).

2.2.2.2. Vazamento em coquilha por gravidade

Este processo passa pelo vazamento repetitivo em gravidade da liga fundida numa moldação metálica (vulgo molde) permanente com dois ou mais componentes (Figura 2.5), e encontra-se especialmente vocacionado para a produção em grande cadência de pequenas peças com geometria simples [Metallurg Aluminium].

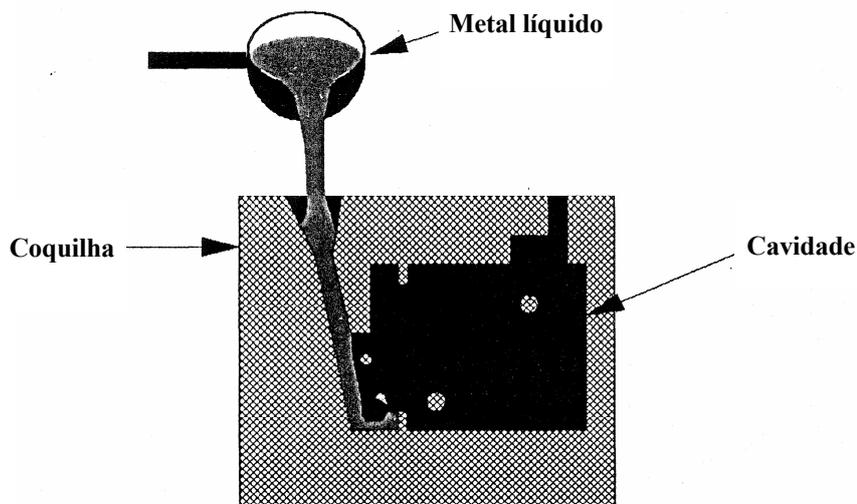


Figura 2.5 – Diagrama esquemático do vazamento em coquilha por gravidade [Metallurg Aluminium].

Apesar disso, o facto de o processo permitir o uso de machos (metálicos, em areia ou em gesso, dependendo da complexidade das geometrias) possibilita também a obtenção de geometrias mais complexas [Metallurg Aluminium].

Factores como a melhor qualidade superficial, melhores propriedades mecânicas (como resultado da superior velocidade de solidificação), e custos de produção de grandes séries mais baixos levaram a que, nos últimos anos, muitas peças deixassem de ser vazadas em areia para passarem a ser vazadas em coquilha [Metallurg Aluminium].

Principais vantagens [Metallurg Aluminium]:

- Fundidos com elevados níveis de integridade mecânica;
- Possibilidade de vazamento de peças com baixo nível de porosidade;
- Possibilidade de obtenção de fundidos com grão fino;
- Cadências de vazamento genericamente mais elevadas do que no vazamento em areia;
- Peças com menor necessidade de acabamento do que as obtidas por vazamento em areia;
- Custos fixos inferiores aos do processo de fundição injectada.

Principais desvantagens [Metallurg Aluminium]:

- Espessura mínima das paredes dos fundidos de 3 a 5mm;
- Fundidos com tolerâncias dimensionais lineares na casa dos 3mm/m;
- Complexidade de geometrias de fundidos limitada;
- Gama de peso dos fundidos de 0,1 a 70kg;
- Rentabilidade atingida para quantidades entre 500 e 2500 unidades.

2.2.2.3. Vazamento em coquilha por baixa-pressão

Neste processo, o vazamento da liga ocorre por aplicação de um gás pressurizado (pressões geralmente compreendidas entre 0,2 e 0,6bar) sobre a superfície do banho, o qual força o metal a subir por um tubo e assim a entrar dentro da moldação (coquilha ou molde) (Figura 2.6) [Metallurg Aluminium].

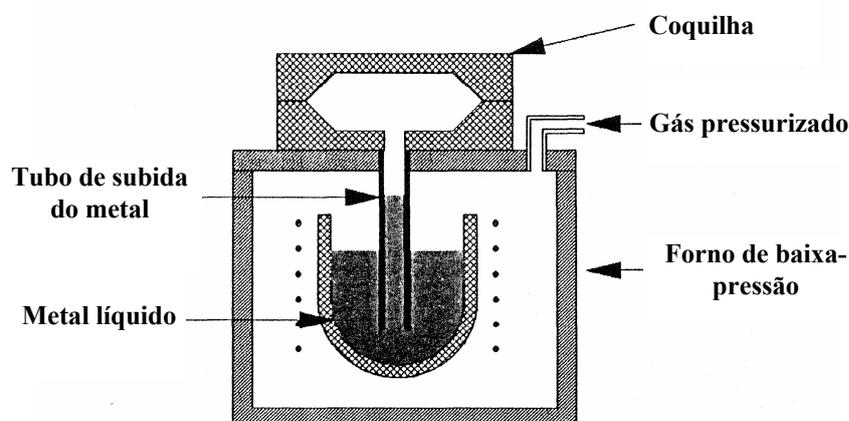


Figura 2.6 – Diagrama esquemático do vazamento em coquilha por baixa-pressão [Metallurg Aluminium].

Uma das grandes vantagens deste processo face aos vazamentos em gravidade passa pelo controlo sobre a velocidade de enchimento, limitando assim a ocorrência de turbulência, o que se revela decisivo na obtenção consistente de fundidos de elevada qualidade [Metallurg Aluminium].

Uma das variantes do vazamento em baixa-pressão que surge no sentido de ainda reduzir mais a turbulência de enchimento (ao ponto de quase a eliminar) é o vazamento por pressões diferenciais, e passa pela aplicação de uma contra-pressão no interior da zona do molde ainda por encher. O facto de permitir a produção de peças com excelente integridade estrutural justifica que este processo seja usado na produção de jantes e de componentes estruturais para automóveis [Metallurg Aluminium].

É também de referir que, à semelhança do que acontece no vazamento em coquilha por gravidade, também por baixa-pressão é possível o uso de machos no interior da coquilha de maneira a possibilitar o vazamento de peças de maior complexidade geométrica [Metallurg Aluminium].

Principais vantagens [Metallurg Aluminium]:

- Fundidos com excelente integridade estrutural;
- Possibilidade de vazamento de peças com paredes finas (2 a 3mm de espessura);
- Fundidos com melhores tolerâncias lineares do que os vazados por gravidade;
- Peças com melhor qualidade superficial do que as vazadas por gravidade;
- Possibilidade de uso de machos em areia para obtenção de geometrias mais complexas;
- Fundidos sem grande necessidade de acabamento final;
- Fundidos são tratáveis termicamente;
- Cadências de vazamento até 30 peças/hora;
- Custo da coquilha inferior ao custo de um molde de fundição injectada;
- Processo reprodutível e de fácil automatização;
- Processo penoso para os operadores.

Principais desvantagens [Metallurg Aluminium]:

- Dimensão dos fundidos limitada pela dimensão da máquina;
- Complexidade geométrica limitada;
- Cadências de vazamento inferiores às da fundição injectada;
- Investimento elevado nas coquilhas;
- Rentabilidade atingida para quantidades superiores a 1.000 unidades.

2.2.2.4. Fundição injectada

O processo de fundição injectada passa por vaziar a liga de alumínio sob pressão (pressões de injeção até 2.000bar) numa moldação permanente em aço (Figura 2.7) [Metallurg Aluminium].

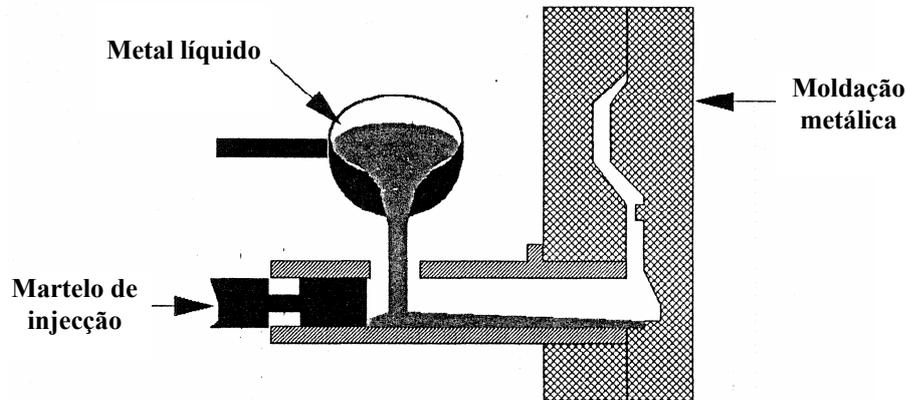


Figura 2.7 – Diagrama esquemático do processo de fundição injectada [Metallurg Aluminium].

Devido à elevada velocidade de enchimento imposta ao metal (cerca de 60m/s), torna-se assim possível a produção de geometrias muito complexas, apesar de tal também provocar uma elevada turbulência de enchimento e uma elevada porosidade interna. Tal limita grandemente a utilização de fundidos produzidos por este método quando se impõe alguma ductilidade e necessidade de tratamento térmico [Metallurg Aluminium].

O ciclo operativo de uma máquina de fundição injectada tem início após o fecho do molde, com o vazamento de metal à frente do pistão de injeção. De seguida o pistão inicia o seu movimento de forma lenta até encerrar o orifício de vazamento da liga, altura em que ele acelera então o seu movimento e injecta o metal no interior do molde. Uma vez este cheio, ocorre então um aumento da pressão imposta à liga pelo pistão, de maneira a diminuir alguma porosidade que possa existir no seio do metal injectado. Após a solidificação do metal, o molde é então aberto e o pistão recolhido para se poder extrair o fundido. Finalmente, o molde volta a ser fechado e o pistão colocado na posição inicial, para o início de mais um vazamento [Metallurg Aluminium].

Principais vantagens [Metallurg Aluminium]:

- Possibilidade de vazamento de peças com paredes muito finas (1 a 2,5mm de espessura);
- Boas tolerâncias lineares;
- O melhor acabamento superficial é obtido por este processo;
- Fundidos com grão muito fino devido à elevada velocidade de arrefecimento;
- Propriedades repetitivas;

- Cadências de vazamento até cerca de 200 peças/hora.

Principais desvantagens [Metallurg Aluminium]:

- Ausência de ductilidade e de tenacidade nos fundidos;
- Dimensão dos fundidos limitada pela dimensão da máquina;
- Secções espessas difíceis de obter com boa sanidade;
- Porosidade presente nos fundidos;
- Os fundidos não podem ser tratados termicamente;
- Gama de pesos dos fundidos de 0,01 a 25kg;
- Elevado investimento inicial;
- Rentabilidade atingida para quantidades superiores a 10.000 unidades / ano.

2.2.2.5. Fundição por cera perdida em carapaça (*Investment Casting*)

Devido ao facto de permitir produzir peças em bruto com uma geometria muito próxima da final pretendida (tal como a fundição injectada), o processo de *Investment Casting* ganhou popularidade nos últimos anos. Além disso é também um processo que permite a produção de geometrias bastante complexas, apesar de necessitar de um elevado investimento inicial em equipamento e de os custos com o pessoal serem geralmente mais elevados devido ao elevado número de etapas constituintes do processo [Metallurg Aluminium].

Tais limitações levaram a que o mercado de fundidos obtidos por cera perdida em carapaça esteja mais concentrado nas indústrias aeroespacial e de alta tecnologia, isto apesar de factores como a necessidade de maior qualidade superficial e de maior rigor dimensional contribuírem para uma crescente abertura a novos mercados [Metallurg Aluminium].

Este processo tem início com a injeção de um modelo em cera da peça a fundir, normalmente num molde metálico. De seguida, este modelo é mergulhado sucessivamente em vários banhos cerâmicos até se obter uma carapaça cerâmica. A cera existente no interior da carapaça obtida é então fundida e a cerâmica é sinterizada, podendo-se então vaziar o metal no espaço anteriormente ocupado pela cera e assim obter a peça metálica pretendida [Metallurg Aluminium]. Segue-se um complexo e moroso processo de abate da carapaça cerâmica, corte de gitos e rebarbagem, responsável por mais de 30% do custo final das peças produzidas.

Principais vantagens [Metallurg Aluminium]:

- Boa precisão dimensional;
- Fundidos com elevada integridade;
- Bom acabamento superficial;
- Possibilidade de vazamento de geometrias complexas;
- Necessidade de operações de acabamento mínimas nas peças produzidas;
- Elevadas cadências de produção.

Principais desvantagens [Metallurg Aluminium]:

- Processo complexo;
- Necessidade de conhecimento especializado;
- Processo mais vocacionado para a produção de peças de pequena dimensão;
- Custos fixos elevados.

2.2.2.6. Fundição por espuma perdida (*Lost Foam Casting*)

Dos processos de fundição abordados, este é provavelmente aquele que se encontra em maior expansão actualmente [Metallurg Aluminium].

Sendo muito semelhante ao vazamento em areia, este processo também tem características comuns com a fundição por cera perdida. Neste processo o metal é vazado numa cavidade em areia, tendo início com a produção de um modelo da peça a fundir em espuma de poliestireno. De seguida, este modelo é mergulhado numa barbotina cerâmica, colocado no interior de um tambor e é calcada areia à sua volta. Quando o metal é vazado, a espuma vaporiza e ele passa assim a ocupar o seu lugar [Metallurg Aluminium].

Recentemente, algumas fundições têm conjugado este processo com a aplicação de pressão, de maneira a produzir peças com porosidade muito reduzida [Metallurg Aluminium].

2.2.3. Tratamento do banho e qualidade do metal

A par das condições em que se processa a solidificação da peça após vazamento, também o tratamento a que o banho de metal fundido é sujeito é uma das etapas mais importantes a considerar em qualquer processo de fundição de alumínio. Inclusões, filmes de óxido ou hidrogénio presentes no banho podem levar à rejeição de fundidos, ao promoverem a ocorrência de porosidade, problemas de maquinagem, redução da fluidez da liga ou diminuição das propriedades mecânicas [Metallurg Aluminium].

São 6 os pontos a ter em atenção no que respeita aos cuidados a ter em termos de tratamento do metal a vazar [Metallurg Aluminium]:

- Qualidade da matéria-prima;
- Fusão e manuseamento do metal;
- Limpeza do forno e do cadinho;
- Fluxagem;
- Desgasificação do banho;
- Filtragem.

2.2.3.1. Qualidade da matéria-prima

O alumínio usado nas fundições apresenta-se geralmente na forma de lingotes, e pode ser fornecido em duas qualidades distintas, dependendo da forma como é obtido [Metallurg

Aluminium]:

- **Alumínio primário**, que corresponde a liga produzida a partir de alumínio obtido por redução electrolítica directamente do minério;
- **Alumínio secundário**, que corresponde a liga que já foi previamente usada na fundição, e re-fundida em lingotes uma ou várias vezes. É mais económico que o alumínio primário.

A opção pelo uso de uma ou da combinação destas 2 qualidades está obviamente dependente da exigência do cliente. Contudo, numa situação ou noutra deve-se ter sempre em conta os seguintes cuidados na compra de lingote:

- **Aspecto visual** [Metallurg Aluminium]:
 - Os lingotes devem ter uma boa aparência, não devendo apresentar rechupes nem vestígios de escória superficial, sob pena de tal vir a promover inclusões nos fundidos.
- **Composição química:**
 - Deve-se ter em consideração os limites de composição química impostos pela *Aluminium Association* (AA) [Metallurg Aluminium];
 - Uma vez que o titânio (Ti) actua como afinador do tamanho de grão dos fundidos, deve ser dada atenção à sua quantidade no lingote. Este pode já trazer de origem o teor de titânio necessário pra se obter a afinação de grão necessária nos fundidos, eliminando assim a necessidade de ter que o adicionar posteriormente na preparação do banho;
 - Apesar de haver essa possibilidade, a liga não deve vir pré-modificada, isto é, não deve ser fornecida com o teor de estrôncio (Sr ; elemento mais vulgarmente usado como modificador do eutético) necessário para se obter a modificação do eutético necessária nos fundidos. Ao contrário do titânio, este elemento deve ser adicionado ao banho perto da altura do vazamento, uma vez que tem tendência a oxidar muito facilmente e a perder-se para a atmosfera [Metallurg Aluminium].
- **Metais básicos** [Metallurg Aluminium]:
 - Deve-se garantir que a presença de metais alcalinos (sódio (Na), lítio (Li) e cálcio) nos lingotes não ultrapassa 2 ppm, uma vez que estes metais aumentam significativamente a geração de escória ao tornarem o filme de óxido mais poroso, podendo conduzir assim ao aumento de inclusões nos fundidos.
- **Fósforo (P) e antimónio (Sb)** [Metallurg Aluminium]:
 - Estes elementos influenciam negativamente a performance da modificação da liga;
 - O teor de fósforo deve ser o mais baixo possível, apesar de quantidades até 10 ppm não constituírem problema;
 - Por não ser tão prejudicial à modificação da liga como o fósforo, o antimónio pode estar presente até teores de 100 ppm.

2.2.3.2. Fusão e manuseamento do metal

Uma fusão e um manuseamento menos próprios de uma liga de alumínio podem levar à formação de filmes de óxido (Figura 2.8) ou de outras inclusões [Metallurg Aluminium].

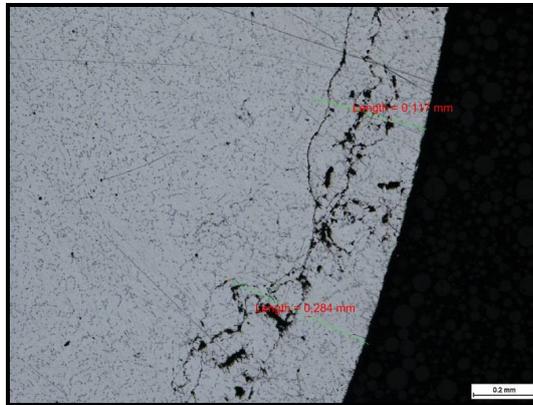


Figura 2.8 – Filmes de óxidos numa peça fundida em alumínio.

O alumínio no estado fundido reage imediatamente com o oxigénio, formando um filme de óxido que cobre a superfície do metal. Este filme protege o material de uma oxidação posterior, pelo que não deve ser eliminado até ao momento do vazamento [Valente et al., 1993].

Apesar de poderem ter origem durante a fusão e as operações de manuseamento do metal, os filmes de óxido podem também já residir na matéria-prima de base [Metallurg Aluminium].

Como efeitos extremamente nefastos da oxidação do metal temos [Metallurg Aluminium / Neto, 1985]:

- Redução das propriedades mecânicas, devido à presença de óxidos sob a forma de inclusões e ao aumento do teor de gás devido à hidratação desses óxidos;
- Ocorrência de porosidade;
- Diminuição da colabilidade, provocada pela presença de óxidos em suspensão e/ou superficiais;
- Redução da maquinabilidade, provocada pela presença de pontos duros originados pela presença de alumina (coríndon) ou óxidos de outros elementos.

Os filmes de óxido são por isso extremamente prejudiciais, podendo ser eliminados se se tiverem em atenção algumas medidas:

- No caso de se usarem fornos a gás para fundir o metal, deve ser evitado o contacto directo deste com a chama como acontece em muitos fornos de concepção mais antiga, uma vez que tal leva a uma oxidação extremamente severa da superfície [Metallurg Aluminium];
- Caso o metal tenha que ser transferido para um forno de manutenção para ser vazado, na operação de transfega, deve-se fazer tudo para minimizar a altura de

queda do metal no cadinho de destino, bem como para isolá-lo do contacto com o ar durante esse trajecto. Uma boa maneira de o garantir passa por usar fornos com vazamento inferior (*bottom-pour tundish*) [Metallurg Aluminium];

- Utilização de equipamentos de fusão com pequena superfície de exposição não-protegida [Neto, 1985];
- Utilização de baixas temperaturas de manutenção e técnicas de fusão rápidas [Neto, 1985];
- Utilização de cadinhos, ferramentas, cargas, e fluxos devidamente limpos e secos, uma vez que os fenómenos de oxidação são normalmente catalizados pela humidade [Neto, 1985].

Embora menos frequentes que os filmes de óxido, mas nem por isso menos problemáticos visto serem higroscópicos, os carbonetos são outro tipo de inclusões, que podem provir por exemplo dos tubos de alimentação em ferro fundido nos processos de vazamento por baixa-pressão, ou de resíduos de óleo dos retornos. Daí o cuidado a ter na correcta limpeza e secagem destes, bem como dos restantes materiais a adicionar ao banho [Metallurg Aluminium].

2.2.3.3. Limpeza do forno e do cadinho

Uma das medidas usadas para reduzir o número de inclusões e de óxidos em suspensão no banho após o seu tratamento, passa por esperar o tempo suficiente para que ocorra sedimentação das inclusões e óxidos pesados, e flutuação dos seus congéneres mais leves. Por isso mesmo os cadinhos em serviço devem ser limpos frequentemente, de modo a remover todas as inclusões que se vão depositando no seu fundo [Metallurg Aluminium].

2.2.3.4. Fluxagem

Quando fundidas, as ligas de alumínio apresentam uma grande tendência para oxidarem superficialmente, criando uma película superficial que isola o metal não-oxidado (e por isso melhor para uso no vazamento) da atmosfera, e acumulando-se nas paredes do cadinho. Desta forma, as partículas de óxido permanecem no banho na forma de inclusões prejudiciais à qualidade geral das peças a vazar [Metallurg Aluminium].

A utilização de fluxos surge assim da necessidade em ultrapassar os problemas provocados pela oxidação da superfície do banho, visto [Metallurg Aluminium]:

- Retardarem a oxidação;
- Acelerarem a remoção das inclusões;
- Separarem o alumínio da escória;
- Limparem os óxidos das paredes do cadinho.

Visto serem higroscópicos, os fluxos devem ser armazenados num local seco. Caso contenham humidade, devem ser devidamente secos e nunca adicionados ao banho, uma vez que tal pode levar a incorporação de hidrogénio, com conseqüente aparecimento de porosidade e de uma diminuição das propriedades mecânicas nos fundidos [Valente et al.,

1993].

Sendo na sua maioria compostos à base de sais halogenados de metais alcalinos e alcalino-terrosos [Neto, 1985] (sais de cloretos e fluoretos com outros aditivos), os fluxos são materiais cujo uso irá cada vez mais impor não só um controlo efectivo dos fumos emitidos bem como eficientes equipamentos de exaustão [Metallurg Aluminium].

Devendo ser utilizada uma quantidade de fluxo de 0,3 a 1% da quantidade de metal sobre a qual vai actuar, a sua acção também é mais eficaz se ele for introduzido no banho de forma faseada e não todo de uma vez, de modo a evitar que ele se aglomere e perca a sua reactividade [Valente et al., 1993].

Após actuação, os fluxos devem ser separados do metal líquido antes do vazamento, para impedir que inclusões dos mesmos fiquem retidas no interior dos fundidos. Após isto, deve-se também esperar o tempo suficiente (tipicamente 30 minutos, para um cadinho de 200/300kg) para que ocorra decantação das inclusões pesadas e flutuação dos sais constituintes dos fluxos e das inclusões de baixa densidade [Valente et al., 1993].

Tendo em conta as suas aplicações, os fluxos utilizados nas fundições de alumínio podem ser de vários tipos:

• **Fluxos de cobertura ou de fusão:**

- São utilizados principalmente em pequenos fornos de cadinho [Valente et al., 1993];
- São normalmente usados durante a fusão do material [Metallurg Aluminium];
- São normalmente espalhados sobre a superfície do banho de forma manual [Metallurg Aluminium / Valente et al., 1993];
- Fornecem uma barreira física à oxidação do banho, uma vez que fundem à superfície dos mesmos, molhando os materiais que são carregados [Valente et al., 1993];
- Exercem uma acção química ao dissolverem o óxido de alumínio, ou uma acção mecânica ao produzirem uma agitação do banho (devido à decomposição pelo calor) [Valente et al., 1993];
- O seu uso permite melhorar a colabilidade das ligas, melhorar as propriedades mecânicas dos fundidos, e diminuir as perdas de magnésio nas refusões sucessivas [Valente et al., 1993];
- O seu uso é particularmente importante a temperaturas acima dos 775°C [Metallurg Aluminium].

• **Fluxos escorificantes:**

- Promovem a separação da película superficial de óxido de alumínio (Al_2O_3) do banho metálico, sem o reduzir [Valente et al., 1993];
- Contêm compostos que reagem exotermicamente fazendo aumentar a temperatura e a fluidez [Valente et al., 1993];
- São benéficamente usados na indústria do alumínio para reduzir as escórias ricas em metal, que podem conter entre 60 a 85% de metal livre, que se

pode transformar em óxido de alumínio irrecuperável [Valente et al., 1993];

- A quantidade a usar pode ser calculada pela massa (0,2 a 1,0% da massa total do banho), ou pela área superficial do banho ($2,5\text{kg/m}^2$) [Metallurg Aluminium];
- Este tipo de fluxo é normalmente espalhado sobre a superfície do banho de forma manual, e depois conduzido ao seu interior por agitação, assegurando assim o contacto daquele com toda a camada de óxidos superficiais e em suspensão. O banho deve ser então mantido em repouso durante cerca de 5 a 10 minutos para permitir não só a ascensão de todo o fluxo, como também o reaproveitamento do alumínio libertado da escória. Finalmente, o fluxo deve ser cuidadosamente removido da superfície do banho [Metallurg Aluminium / Valente et al., 1993].

- **Fluxos de limpeza:**

- São usados para remover a camada de óxidos que geralmente se acumula nas paredes dos cadinhos, e que limita assim a capacidade dos mesmos [Metallurg Aluminium / Valente et al., 1993];
- Actuam suavizando essa camada, de maneira a ser possível raspá-la e removê-la da superfície do banho [Metallurg Aluminium];

- **Fluxos de desgasificação** [Metallurg Aluminium]:

- São usados para remover hidrogénio e inclusões do banho;
- Este tipo de fluxo é mais eficiente quando injectado directamente no seio do banho, na forma de pó. À medida que é injectado, ele funde e forma pequenas gotas que flutuam até à superfície do banho, arrastando consigo os átomos de hidrogénio (H) existentes no banho e inclusões não-metálicas em suspensão;
- Este tratamento não é tão eficiente nem tão limpo como a desgasificação com argón (Ar) ou azoto (N_2), não sendo por isso recomendado.

- **Fluxos de tratamento** [Metallurg Aluminium]:

- Esta família de fluxos contempla materiais capazes de adicionar e de remover certos elementos químicos do banho;
- Alguns destes fluxos são usados para modificar e refinar o tamanho de grão das ligas, por adição de sódio, titânio e boro (B), podendo ser normalmente adicionados em pó ou na forma de tabletes. Contudo o seu uso não é normalmente recomendado, pois podem conduzir a alguma inconsistência no refinamento e na modificação da liga, tornando difícil um correcto doseamento de sódio, titânio e boro. Além disso, libertam também fumos que têm de ser controlados;
- Já os fluxos usados na remoção de elementos químicos do banho são particularmente úteis se não se conseguir obter um banho isento desses elementos. Dentro desta família tem-se por exemplo os fluxos à base de AlF_3 , destinados a remover cálcio, estrôncio e magnésio, ou os fluxos que

actúan com libertação de cloro, destinados a remover cálcio, lítio, magnésio, sódio e estrôncio. É de referir que estes fluxos exigem a extracção e neutralização dos fumos libertados, uma vez que estes são portadores de ácidos clorídrico e fluorídrico.

2.2.3.5. Desgasificação

Um dos defeitos mais frequentes nas peças fundidas em alumínio é a porosidade de origem gasosa, que tem essencialmente origem no hidrogénio atómico (H) dissolvido no banho e que se manifesta sob a forma de poros de forma arredondada não superficiais, resultantes da sintetização atómica em moléculas de hidrogénio (H₂) (Figura 2.9) [Metallurg Aluminium].



Figura 2.9 – Microestrutura com evidências de porosidade de origem gasosa típica (forma circular à esquerda) [Metallurg Aluminium].

É desta forma compreensível a elevada preocupação existente nas fundições de alumínio em controlar os níveis de hidrogénio dissolvido no banho, devido ao contacto deste com a atmosfera circundante, com materiais adicionados ao banho, ou com utensílios de fundição húmidos ou sujos [Metallurg Aluminium].

A temperatura da liga também tem uma grande influência no teor de hidrogénio nela existente, uma vez que o seu aumento leva também a um aumento da solubilidade daquele gás no seio do banho (Figura 2.10) [Metallurg Aluminium].

A quantidade de hidrogénio dissolvido no banho será assim tanto maior quanto mais elevada for a temperatura do mesmo, e quanto mais tempo ele for mantido a essa temperatura, pois a incorporação de gás a partir do ambiente circundante efectua-se por adsorção superficial seguida de difusão [Valente et al., 1993].

Por sua vez, na solidificação do metal esta solubilidade diminui drasticamente, levando à sintetização de hidrogénio e à formação de bolhas gasosas de H₂ (porosidade gasosa) [Metallurg Aluminium], pelo que em termos práticos uma liga solidificada às

velocidades normais terá tendência a apresentar poros gasosos. Caso a solidificação seja extremamente lenta, todo o hidrogénio entretanto sintetizado abandonará o alumínio durante o processo [Valente et al., 1993], não ocorrendo por isso porosidade nos fundidos.

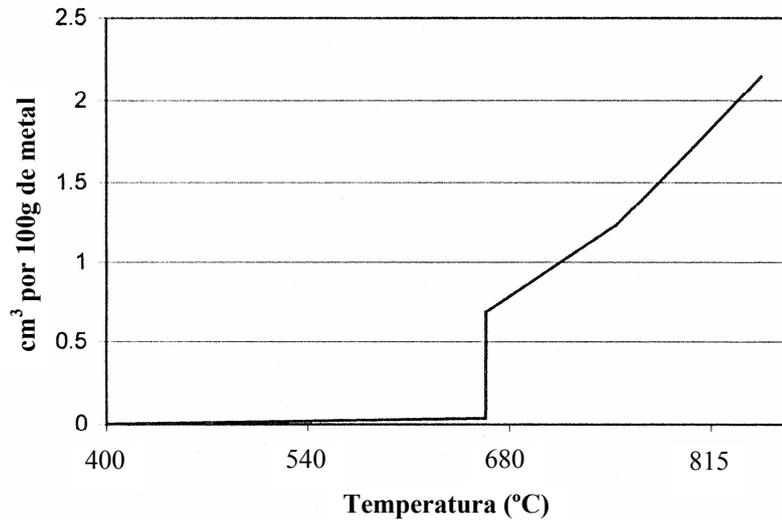


Figura 2.10 – Efeito da temperatura na solubilidade do hidrogénio no banho de alumínio (a maior alteração em termos de solubilidade ocorre a cerca de 660°C) [Metallurg Aluminium].

Para um dado teor de hidrogénio, os poros serão mais abundantes e de maiores dimensões quanto mais grosseira for a estrutura de solidificação, o que significa que para elevadas taxas de arrefecimento as porosidades gasosas serão mais dispersas e menos significativas, havendo a possibilidade de nem todo o hidrogénio dissolvido se sintetizar para dar origem a gás [Valente et al., 1993], e mesmo de não existirem porosidades.

Meios de evitar a contaminação com hidrogénio [Metallurg Aluminium]:

- Todos os banhos de alumínio apresentam um filme de óxido superficial que ajuda a proteger o metal da atmosfera, reduzindo assim a sua contaminação por hidrogénio. Para evitar a ruptura desse filme, a agitação do banho deve ser reduzida ao mínimo;
- Uma vez que as impurezas presentes no banho tendem a nuclear o hidrogénio nele existente, mantendo-o no seu seio, torna-se também muito importante a limpeza do banho de inclusões e filmes de óxido. Sem inclusões, o hidrogénio migra para a atmosfera durante a solidificação da liga, não originando poros nos fundidos.
- Reduzir ou eliminar fontes tais como os hidrocarbonetos e a humidade, tomando os seguintes cuidados:
 - Limpeza e desengorduramento dos lingotes, dos retornos, e dos restantes metais de adição;
 - Secagem das ferramentas, dos refractários, dos lingotes, dos retornos, e dos

restantes metais de adição;

- Armazenagem dos fluxos higroscópicos em recipientes herméticos, de modo a evitar a sua contaminação com humidade;
- Manter a temperatura do banho tão baixa quanto possível, dentro dos limites razoáveis de processamento;
- Evitar a turbulência na queda do metal em altura, durante as operações de transfega e de vazamento.

Tratamentos de desgasificação [Metallurg Aluminium]:

- Mesmo tendo todos os cuidados anteriormente referidos para evitar a contaminação do banho por hidrogénio, a sua desgasificação é um imperativo sempre que se queiram obter peças fundidas com qualidade;
- Existem vários processos de desgasificação, desde a desgasificação em vácuo à desgasificação com fluxos. Contudo, os métodos mais comuns baseiam-se na injeção de bolhas gasosas através do banho, as quais se encarregam de arrastar o hidrogénio até à superfície. A eficiência destes métodos acaba por depender principalmente do tamanho das bolhas produzidas, com as bolhas mais pequenas e uniformemente distribuídas a serem sinónimo de uma maior eficácia;
- Dentro dos métodos de desgasificação apoiados na injeção de um gás no seio do banho, a desgasificação giratória é o método mais eficaz, ao produzir bolhas bem dispersas, com diâmetros de poucos milímetros. Neste processo, a eficiência melhora com o aumento da velocidade do rotor, pois as bolhas injectadas tendem a ser mais finas, e o tempo de contacto a ser maior. Deve-se contudo evitar o uso de velocidades tão elevadas que levem à formação de um vórtice que arraste a escória formada para o interior do banho;
- A desgasificação com lança produz bolhas de grande dimensão (diâmetro de 2 a 3cm) que tendem a subir à volta da mesma, tornando assim este método ineficiente;
- Também a desgasificação com pastilhas acaba por se revelar ineficiente ao produzir bolhas de vários tamanhos de uma forma descontrolada;
- Os tipos de gases usados na desgasificação podem ser de dois tipos:
 - **Gases reactivos:**
 - Contém geralmente cloro (Cl_2), ou compostos ou misturas à base de cloro;
 - Apesar de poderem aumentar a eficiência da desgasificação quando se injectam bolhas de média ou grande dimensão, apresentam um efeito muito ténue na desgasificação giratória;
 - O seu uso leva à limpeza adicional do banho por flutuação de partículas sólidas tais como filmes de óxido e à separação do metal da escória;
 - Por removerem elementos como o magnésio (Mg), estrôncio e sódio

do banho, a desgasificação reactiva deve ser efectuada sempre antes de qualquer tratamento de modificação da liga;

- A desgasificação reactiva é um processo inimigo do ambiente, uma vez que o cloro é altamente corrosivo e irritante.

- **Gases inertes:**

- O azoto e o árgon são os gases inertes usados para remover o hidrogénio do banho;
- Apesar destes gases serem menos eficientes que os gases reactivos na limpeza do banho por flutuação de partículas sólidas, o árgon é mais eficiente que o azoto neste aspecto. Tal deve-se ao facto de as bolhas geradas com este gás tenderem a ser mais pequenas, e assim a melhorar a eficiência do processo;
- Apesar de poder ocorrer alguma remoção de sódio e de magnésio do banho durante a desgasificação, esta pode ser efectuada depois da modificação da liga com estrôncio;
- Contrariamente à desgasificação reactiva, a desgasificação com estes gases não apresenta qualquer problema ambiental, apresentando uma performance similar, especialmente com recurso a uma máquina de desgasificação giratória.

2.2.3.6. Filtragem

A filtragem é usada em muitas fundições para ajudar a reduzir a quantidade de inclusões no banho, e passa pela obstrução ao escoamento da liga de modo a reter estas inclusões [Metallurg Aluminium].

Tipos de filtro [Metallurg Aluminium]:

- Filtros simples → Filtros de fibra de vidro ou de malha de aço, que apesar de serem bastante eficazes na remoção de partículas de grande dimensão ou de filmes de óxido, não o são em relação a partículas mais pequenas;
- Filtros de espuma cerâmica (*CFFs – ceramic foam filters*) → Usados para uma filtragem mais eficaz, estes filtros são constituídos por uma estrutura cerâmica semelhante a uma esponja, que assegura um trajecto suficientemente complexo ao fluxo de metal para dele remover partículas mais finas que ficam presas às suas paredes;
- Como alternativas aos filtros de espuma cerâmica existem os filtros cerâmicos extrudidos e os filtros de partículas ligadas.

Os filtros usados nas fundições de alumínio podem estar localizados tanto na moldação como fora dela [Metallurg Aluminium].

- **Filtragem na moldação** [Metallurg Aluminium]:

- Neste caso, o filtro é colocado no sistema de gitegem do fundido;

- Filtrar o metal imediatamente antes de ele entrar na cavidade da moldação deveria ser a maneira mais eficaz de efectuar a filtragem. Contudo, o facto de o filtro reduzir a velocidade de deslocação do metal, se por um lado é bom por permitir também reduzir a turbulência do escoamento do mesmo, por outro pode levar à necessidade de o sistema de gitagem ter que ser redesenhado.
- **Filtragem fora da moldação** [Metallurg Aluminium]:
 - O metal é filtrado entre o forno de fusão/manutenção e a moldação;
 - Apesar de a filtragem não se fazer junto à cavidade da moldação, podem ser usados filtros mais finos e o sistema de gitagem não precisa de ser alterado de modo a incluir filtros. Este sistema deve mesmo assim ser bem projectado, de modo a não prejudicar o metal previamente filtrado, e por isso limpo.

2.2.4. Ligas de alumínio em fundição

As ligas de alumínio-silício (Al-Si) são usadas em aproximadamente 90% dos produtos de fundição de alumínio [Metallurg Aluminium].

Por apresentarem uma elevada colabilidade quando comparadas com outros tipos de ligas de alumínio, as ligas de alumínio-silício facilitam a obtenção de fundidos de qualidade. Além disso, apresentam boa resistência à corrosão e podem ser maquinadas e soldadas. Algumas aplicações vulgares destas ligas são apresentadas na Tabela 2.2 [Metallurg Aluminium].

Tal como a Tabela 2.2 evidencia, existem muitas ligas de alumínio-silício. A composição química de algumas das mais comuns é mostrada na Tabela 2.3 [Metallurg Aluminium].

Apesar de muitos dos códigos usados para especificar as composições das ligas de fundição já se encontrarem standardizados internacionalmente, cada país ainda tem o seu pacote de especificações próprio [Metallurg Aluminium].

De todas as ligas do sistema Al-Si, as ligas A355 (AlSi5Cu1Mg), A356 (AlSi7Mg0,4), A357 (AlSiMg0,6), e A319 (AlSi5Cu3) são as mais usadas em fundição, possuindo silício para garantir a colabilidade, e magnésio para a obtenção de propriedades mecânicas por tratamento térmico [Metallurg Aluminium].

2.2.5. Solidificação das ligas de alumínio-silício

De modo a compreender a afinação de grão, o processo de modificação, e o refinamento do silício, é necessário perceber de que maneira se processa a solidificação das ligas de alumínio-silício [Metallurg Aluminium].

O diagrama de fases de uma liga Al-Si (Figura 2.11) mostra a evolução das fases em função da temperatura e da quantidade de silício daquela [Metallurg Aluminium].

Ligas que contenham aproximadamente 12% de silício são designadas por ligas eutéticas, e solidificam a uma temperatura constante sob a forma de células eutéticas lamelares de silício e alumínio (Figura 2.12) [Metallurg Aluminium].

Ligas com uma percentagem de silício abaixo da da composição eutética são designadas por ligas hipoeutéticas, enquanto que acima dessa composição passam a chamar-se hipereutéticas [Metallurg Aluminium].

Tabela 2.2 – Aplicações típicas das ligas Al-Si [Metallurg Aluminium].

Especificação		Aplicação típica
Aluminium Association	ISO	
A319	AlSi5Cu3	Engenharia em geral, cabeças de cilindros, caixas de velocidades, ferramentas eléctricas, equipamento de escritório.
A355	AlSi5Cu1Mg	Pistões de ar comprimido, corpos de bombas de combustível, cabeças de cilindros refrigeradas por água, corpos de válvulas.
A308	AlSi6Cu4	Engenharia em geral, caixas de velocidades, ferramentas eléctricas, equipamento de escritório.
A356	AlSi7Mg	Componentes de bombas para aviões, instalações de energia nuclear, transportes marítimos, transportes rodoviários, jantes.
A380	AlSi8Cu3	Fundição injectada, blocos de motores, portas, aspiradores.
A332	AlSi9Cu4Mg	Pistões para motores a gasolina e a diesel.
A360	AlSi10Mg	Blocos de motores, portas, equipamento químico.
A384	AlSi10Cu2Fe	Vários componentes em fundição injectada.
A336	AlSi12Cu	Pistões para motores a gasolina e a diesel, polias.
413	AlSi12	Blocos de motor, equipamento químico, carcaças de instrumentos.
A390	AlSi17Cu4Mg	Blocos de motor de automóveis em fundição injectada, compressores de ar, polias de bombas.

Dependendo do teor de silício na liga e das condições de arrefecimento, a estrutura do fundido pode essencialmente compreender misturas de cristais de alumínio, cristais de silício e células eutéticas de alumínio-silício. A presença de outros elementos nas ligas reais são responsáveis pelo aparecimento de várias fases intermetálicas (Mg_2Si , $CuAl_2$) [Metallurg Aluminium].

Tabela 2.3 – Composição química de algumas das ligas Al-Si mais comuns [Metallurg Aluminium].

Designação da liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Outros	Fornecedor
Ligas Al-Cu									
201.2	0.02	0.01	4.1	0.31	0.28	-	0.19	Ag 0.51	AFS
204.2	0.08	0.15	4.4	0.02	0.22	-	0.22		SKANAL
206.2	0.05	0.03	4.4	0.26	0.30	0.02	0.40		AFS
Ligas Al-Si									
319.1	5.7	0.62	3.4	0.36	0.10	0.92	0.14		AFS
B 319.1	5.9	0.75	3.3	0.36	0.42	0.98	0.11		AFS
332.1	9.9	0.67	2.8	0.25	0.91	0.97	0.7		AFS
339.1	11.9	0.75	0.95	0.20	1.16	0.33	0.02	Ni 0.99	AFS
C 355.2	5.1	0.10	1.0	0.01	0.53	-	0.09		AFS
356.1	6.7	0.44	0.01	0.30	0.35	0.01	0.01		SKANAL
A 356.2	6.8	0.08	0.04	0.00	0.35	0.01	0.15		AFS
A 357.2	6.9	0.14	0.03	0.00	0.56	0.02	0.08	Be 0.06	AFS
A 380.1	9.1	1.0	3.2	0.38	0.34	1.1	-		SKANAL
A 380.1	8.9	0.88	3.3	0.24	0.06	2.05	0.03		AFS
B 380.1	9.3	0.89	3.4	0.28	0.02	0.76	0.04		AFS
A 390.1	15.0	0.3	5.5	<0.01	0.65	0.07	0.01		SKANAL
B 390.1	17.4	0.74	4.8	0.27	0.56	-	0.06		AFS
AA4004	9.2	0.26	<0.01	0.05	1.28	0.06	0.01		SKANAL
A 413.1	11.4	0.46	0.09	0.18	0.03	1.1	-		SKANAL
Ligas Al-Mg									
512.0	1.8	0.55	0.12	0.35	4.0	0.01	0.02		SKANAL
518.2	0.10	0.16	0.01	0.01	7.6	0.02	-		SKANAL
Ligas Al-Zn									
713.1	0.12	0.55	0.74	0.10	0.44	7.5	0.15		AFS

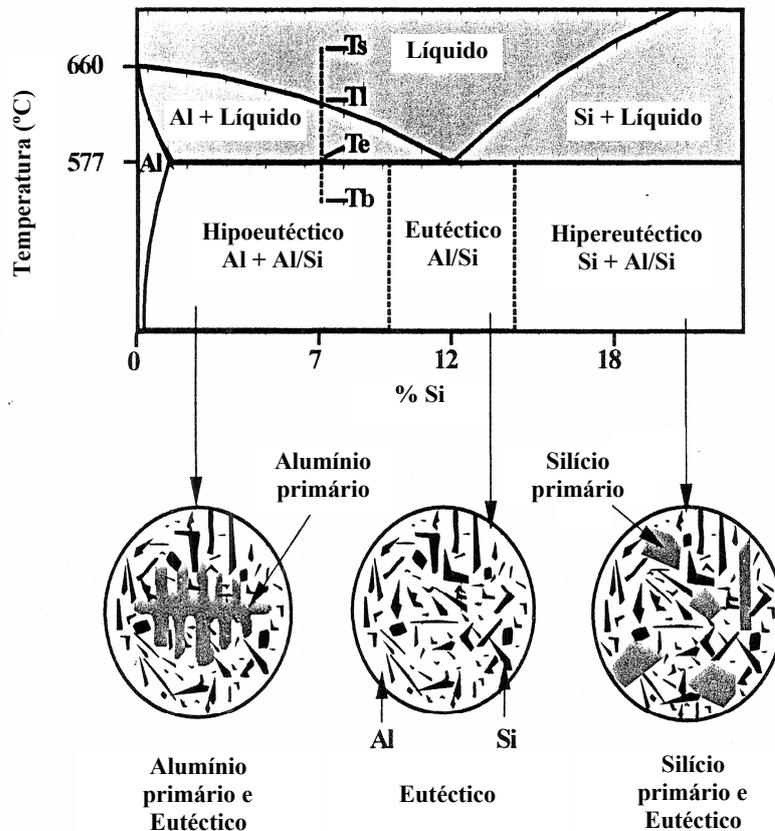


Figura 2.11 – Diagrama de fases e microestruturas das ligas Al-Si [Metallurg Aluminium].

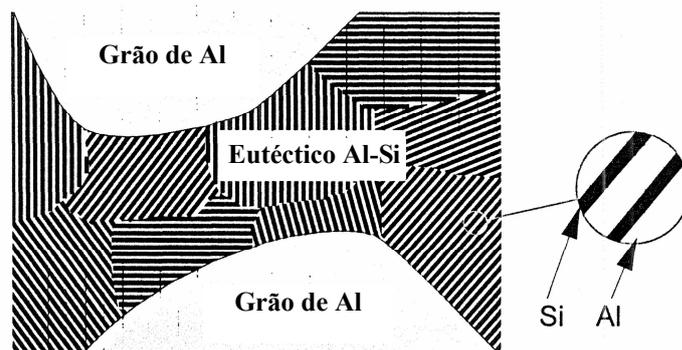


Figura 2.12 – Representação esquemática do eutético lamelar [Metallurg Aluminium].

Tal como evidencia a Figura 2.11, durante a solidificação de uma liga hipoeutética a primeira fase sólida a formar-se é alumínio primário (α -Al). Considerando por exemplo uma liga com 7% Si, arrefecida desde o estado líquido (T_s), abaixo da temperatura de *liquidus* (T_l) começa-se a formar alumínio na forma de pequenas dendrites (Figura 2.13) [Metallurg Aluminium].

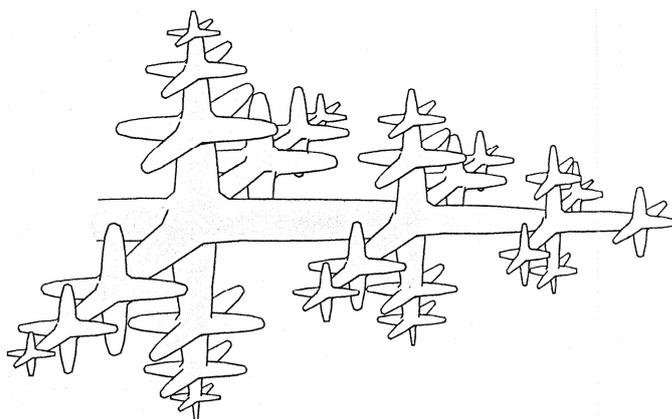


Figura 2.13 – Representação esquemática de uma dendrite [Metallurg Aluminium].

À medida que a temperatura vai descendo, vão-se nucleando novas dendrites de alumínio e as que existem vão crescendo cada vez mais até se atingirem a temperatura eutética (T_e) [Metallurg Aluminium].

Quando é atingida a temperatura eutética, todo o líquido restante solidifica na forma de um eutético de alumínio-silício (no caso de ligas binárias simples) (Figura 2.14). Já a formação das restantes fases intermetálicas, tais como CuAl_2 e Mg_2Si , fica reservada para temperaturas mais baixas, dependendo da composição real da liga [Metallurg Aluminium].

É assim visível que numa liga não-eutética o processo de solidificação se desenrola num intervalo de temperaturas (e não a uma única temperatura, como no caso de uma liga eutética), encontrando-se finalizado assim que se atinge a temperatura eutética [Metallurg Aluminium].

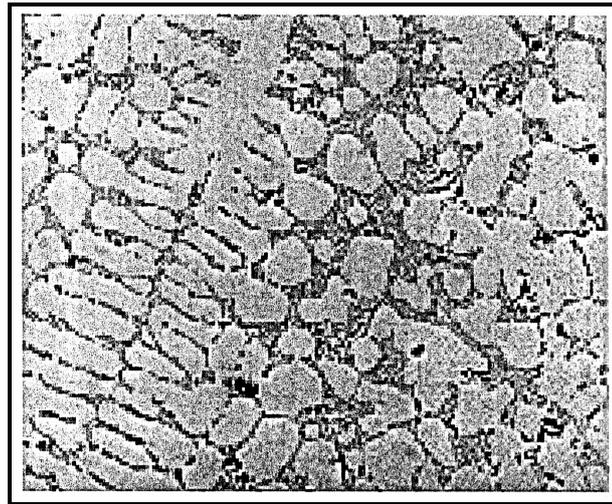


Figura 2.14 – Microestrutura mostrando as dendrites de alumínio (zona mais clara) e o eutético nas regiões interdendríticas [Metallurg Aluminium].

Analisando a solidificação em termos energéticos com recurso a um gráfico de análise térmica (Figura 2.15), visto neste processo haver libertação de calor, seria de esperar o aparecimento de um planalto de estabilização da temperatura do banho durante a sua ocorrência [Metallurg Aluminium].

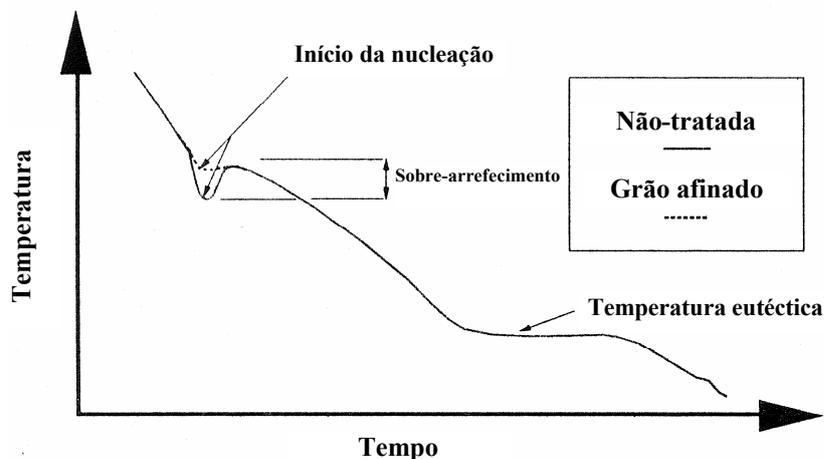


Figura 2.15 – Gráfico de análise térmica da solidificação de uma liga de alumínio-silício [Metallurg Aluminium].

Contudo, na prática, tal como evidencia a Figura 2.15, para que haja nucleação das primeiras dendrites é necessário o arrefecimento abaixo da temperatura de solidificação de equilíbrio. A este arrefecimento dá-se o nome de sobre-arrefecimento, o qual não é mais do que uma medida da dificuldade oferecida pelas primeiras dendrites à nucleação. Comparativamente às ligas de base, as ligas com afinadores de grão ou nucleantes apresentam sobre-arrefecimentos muito reduzidos, uma vez que o afinador actua no sentido de facilitar a

nucleação exógena [Metallurg Aluminium].

Entretanto, após nucleação das primeiras dendrites, estas iniciam o seu crescimento, originando libertação de calor latente de solidificação e um conseqüente aumento da temperatura [Metallurg Aluminium].

Devido à extracção de calor que entretanto se vai verificando durante a solidificação, ocorre novamente uma descida da temperatura até se atingir a temperatura eutética. Aí dá-se a sua estabilização, até que a solidificação do eutético esteja concluída [Metallurg Aluminium].

Um dos efeitos mais visíveis da solidificação da liga passa pela alteração da sua densidade de 2,3 no estado líquido, para 2,7 no estado sólido, facto que se reflecte na ocorrência de contracção e de rechupe (Figura 2.16), nas variantes de macro e micro-rechupe, consoante ele se manifeste sob a forma de vazios de grande ou de pequena dimensão [Metallurg Aluminium].

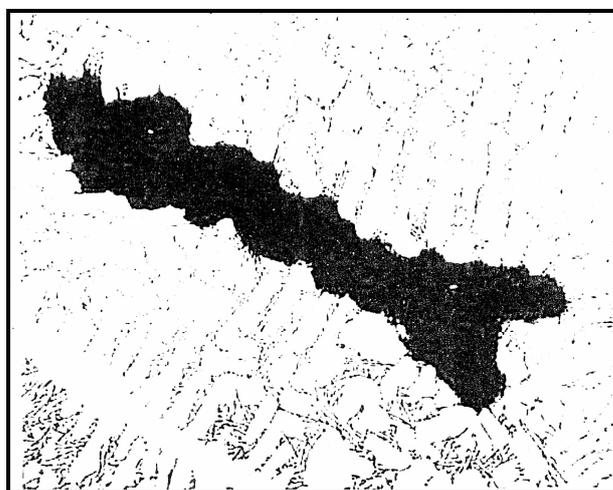


Figura 2.16 – Rechupe num fundido em liga de alumínio [Metallurg Aluminium].

Numa situação destas, a microestrutura apresenta uma mistura de grãos dendríticos rodeados pelo eutético de alumínio-silício, com agregados isolados de compostos intermetálicos e de rechupes [Metallurg Aluminium].

No caso de ligas hipereutéticas o processo de solidificação ocorre de uma forma ligeiramente diferente do das hipoeutéticas. Assim, começa por haver nucleação não de dendrites de alumínio primário, mas de fases primárias de silício, seguindo-se então a formação do eutético. É de referir que nestes casos a nucleação dessas fases de silício desempenha uma importância extrema no controlo da microestrutura e das propriedades do fundido [Metallurg Aluminium].

2.2.6. Afição de grão

A afinação de grão permite reduzir o tamanho das dendrites de alumínio primário nas

ligas hipoeutéticas, e assim aumentar a qualidade do fundido, contribuindo para [Metallurg Aluminium]:

- Melhorar a alimentação durante a solidificação;
- Diminuir e eventualmente promover uma melhor distribuição dos rechupes;
- Melhorar as propriedades mecânicas;
- Melhorar a dispersão de fases secundárias e de impurezas;
- Reduzir a duração da homogenização no caso de ligas tratáveis termicamente;
- Melhorar a qualidade superficial;
- Melhorar a maquinabilidade;
- Facilitar operações de acabamento no fundido;
- Diminuir a ocorrência de fissuração a quente (*hot tearing*).

2.2.6.1. Afinadores de grão

Os afinadores de grão são materiais adicionados às ligas com vista a facilitarem a nucleação das dendrites e assim a promoverem a geração de um tamanho de grão fino e uniforme [Metallurg Aluminium].

O afinador mais eficiente para as dendrites de alumínio é o titânio. Contudo, devido à sua temperatura de fusão de 1760°C, torna-se difícil a sua dissolução no banho, pelo que a forma mais vulgar de o fazer é através de ligas-mãe (*master alloys*).

Existem vários tipos de afinadores de grão para as ligas de alumínio-silício, baseados em ligas-mãe de alumínio-titânio ou alumínio-titânio-boro, e disponíveis geralmente sob várias formas, desde fluxo a varão metálico ou a pastilha. A forma adoptada depende sobretudo da relação custo/performance pretendida. Contudo, é de referir que os afinadores de grão disponíveis na forma de pastilha, apesar de serem os mais baratos, são também os que levam mais tempo a produzir efeito uma vez que actuam com base em reacções químicas com o banho. Além disso, não apresentam grande consistência em termos de eficiência e libertam fumos prejudiciais [Metallurg Aluminium].

2.2.6.2. Efeitos dos afinadores de grão

O efeito do tamanho de grão nos fundidos pode ser mais facilmente compreendido observando em detalhe uma dendrite de alumínio. Apesar de ser habitual vê-las em secções metalográficas, as dendrites são estruturas tridimensionais algo complexas (Figura 2.13), que conseguem interagir entre si e assim incrementar a resistência do banho, mesmo na presença de volumes de fracção sólida muito reduzidos [Metallurg Aluminium].

Assim, na presença de dendrites de maior dimensão, à medida que elas vão crescendo os seus “braços” começam a interagir entre si relativamente cedo, aumentando a dificuldade do metal líquido fluir através do emaranhado interdendrítico de forma precoce, mesmo ainda na presença de pequenos volumes de fracção sólida. Pelo contrário, se elas forem pequenas, o aumento dessa resistência é atrasado, ocorrendo apenas na presença de volumes de fracção sólida maiores. Este crescimento e interacção entre as dendrites é conhecido por coerência

[Metallurg Aluminium].

Para perceber a importância disto torna-se fundamental uma compreensão dos tipos de escoamento que ocorrem num fundido durante a sua solidificação (Figura 2.17) [Metallurg Aluminium].

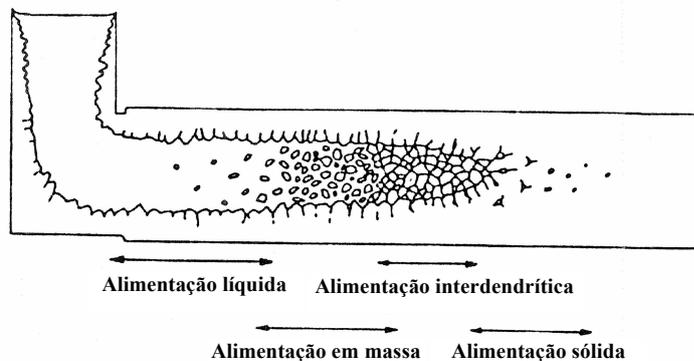


Figura 2.17 – Alimentação num fundido em liga de alumínio [Metallurg Aluminium].

O escoamento líquido é o mais fácil, e quanto mais tempo o metal permanecer líquido melhor é a alimentação das áreas rechupadas [Metallurg Aluminium].

A fase seguinte corresponde ao escoamento em massa, e é caracterizada por uma diminuição da alimentação, embora ainda haja um fluxo de metal suficiente para as áreas rechupadas do fundido [Metallurg Aluminium].

Após se atingir um estado de coerência, passa-se a estar na presença de um escoamento interdendrítico, em que as zonas rechupadas apenas são alimentadas através (ou por entre) os braços dendríticos, e de uma forma muito mais difícil do que anteriormente [Metallurg Aluminium].

A última fase é a de escoamento sólido. Aqui pouco há a fazer em termos de alimentação das zonas rechupadas, e o aparecimento de rechupes pode ser uma realidade [Metallurg Aluminium].

Compreendendo isto, torna-se assim fácil perceber porque um tamanho de grão pequeno favorece o enchimento e a solidificação de um fundido [Metallurg Aluminium].

Durante o enchimento de uma moldação pode ocorrer formação de dendrites em consequência do arrefecimento natural do metal, as quais vão migrando para o interior da cavidade e assim constituir o fundido final. Se elas forem grandes, podem conduzir a problemas de enchimento de secções mais finas do fundido, os quais podem ser ultrapassados aumentando a temperatura do banho de maneira a atrasar a solidificação do mesmo. Pelo contrário, se as dendrites tiverem uma dimensão mais reduzida oferecem uma menor resistência ao fluxo, tornando assim possível o enchimento de secções mais estreitas mesmo para temperaturas de banho mais baixas [Metallurg Aluminium].

Durante a solidificação, torna-se necessário contrariar a contracção volumétrica do

fundido promovendo o escoamento de metal líquido na direção do fundido. Na presença de dendrites maiores, a resistência ao escoamento de metal semi-sólido (alimentação em massa) ocorrerá mais cedo do que no caso de dendrites de tamanho mais reduzido, exigindo alimentação líquida através de canais interdendríticos longos mas abertos. Isto pode levar à ocorrência de dificuldades de alimentação de zonas mais afastadas dos alimentadores, e logo de macro-rechupes se os canais de alimentação ficarem bloqueados. Caso a rede dendrítica seja mais fina, a alimentação em massa poderá ocorrer durante mais tempo uma vez que o agrupamento de muitas dendrites pequenas se torna mais fácil do que o de poucas grandes. Desta forma, durante o processo de solidificação, a alimentação interdendrítica só se torna crítica muito mais tarde. A quantidade de rechupe a remover vem reduzida, e assim as áreas isoladas são mais pequenas e melhor dispersas pelo fundido, pelo que perante uma boa geometria de fundição, a porosidade é geralmente mais reduzida e finamente dispersa [Metallurg Aluminium].

2.2.6.3. Mecanismos de afinação de grão

Tipicamente, os afinadores de grão promovem dois efeitos nas dendrites de α -Al [Metallurg Aluminium]:

- São um ponto de nucleação para o crescimento do grão;
- Atrasam o crescimento desses grãos de modo a que haja mais tempo para a formação de novos grãos.

A Figura 2.18 mostra a microestrutura de um afinador de grão, na qual as partículas mais pequenas são de diborato de titânio (TiB_2) e as maiores de alumineto de titânio ($TiAl_3$) [Metallurg Aluminium].

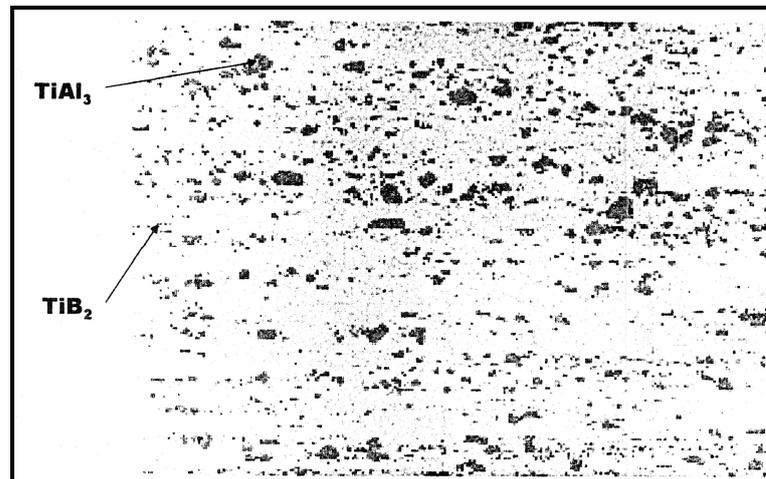


Figura 2.18 – Microestrutura de um afinador de grão [Metallurg Aluminium].

Quando o afinador de grão é adicionado ao banho o diborato de titânio actua como areia na água, não se dissolvendo mas constituindo uma partícula dura. Já o alumineto de titânio tem um comportamento semelhante ao açúcar na água, dissolvendo-se e libertando o titânio em solução [Metallurg Aluminium].

A Figura 2.19 mostra o que acontece num banho de alumínio durante o processo de afinação de grão [Metallurg Aluminium].

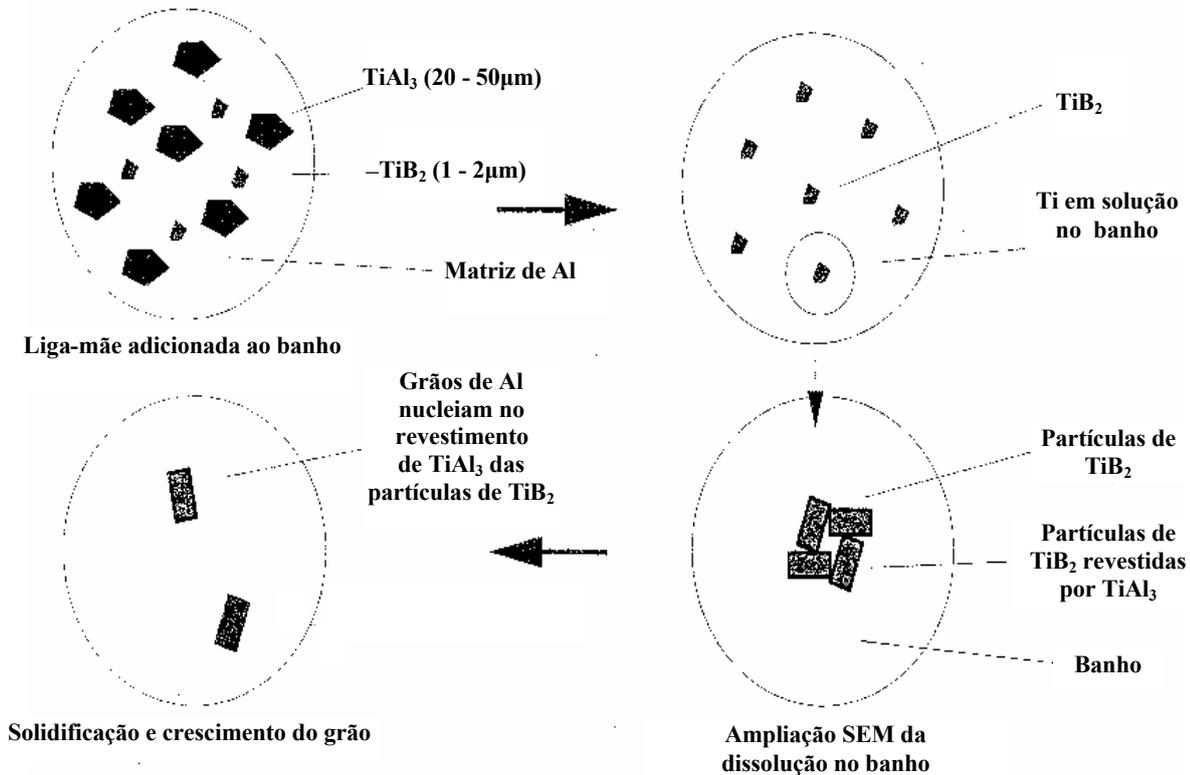


Figura 2.19 – Processo de afinação de grão num banho de alumínio [Metallurg Aluminium].

O esquema superior do lado esquerdo representa a liga de afinação de grão a adicionar ao banho, sendo possível de observar as partículas de TiB_2 bem como as de $TiAl_3$ embebidas numa matriz de alumínio [Metallurg Aluminium].

Do lado direito surge o aspecto do banho de alumínio após adição do afinador de grão. As partículas de TiB_2 continuam bem evidentes, apesar de as de $TiAl_3$ se terem dissolvido no banho [Metallurg Aluminium].

Já os esquemas inferiores procuram mostrar aquilo que estudos desenvolvidos na Universidade de Cambridge levam a crer que aconteça na realidade, isto é, que a superfície externa das partículas de TiB_2 se encontra revestida por uma fina camada de $TiAl_3$, a partir da qual se começam a nuclear as dendrites durante a solidificação da liga (Figura 2.20). Os afinadores de grão parecem assim não actuar na ausência de pelo menos uma pequena quantidade de titânio [Metallurg Aluminium].

Tal como evidencia a Figura 2.20, as partículas de TiB_2 têm forma plana e hexagonal, e podem apresentar uma espessura de apenas alguns átomos. A fina linha envolvente da partícula representada é a camada de $TiAl_3$, e a zona nebulosa emergente desta camada no lado esquerdo da partícula representa os primeiros estágios de nucleação de α -Al formando as dendrites [Metallurg Aluminium].

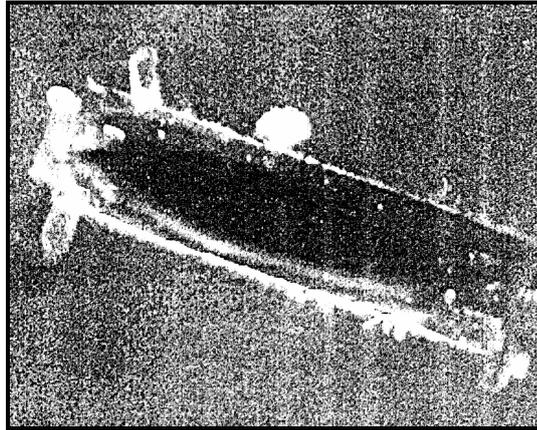


Figura 2.20 – Fotografia TEM de uma partícula de diborato de titânio (TiB₂) [Metallurg Aluminium].

2.2.6.4. Adições de afinadores de grão na fundição

Tal como referido anteriormente, tanto as partículas de nucleação (TiB₂) como o titânio livre são necessários para que ocorra afinação de grão. Esta é razão pela qual se deve usar um afinador de grão à base de titânio e boro e não unicamente à base de titânio. Não apresentando capacidade de nucleação de grãos, este último tipo de afinador apenas actua como limitador de tamanho de grão [Metallurg Aluminium].

Quando se usa um afinador de grão à base de titânio-boro (TiB), os aluminetos de titânio dissolvem-se em cerca de 1 minuto. Os restantes factores que impõem uma determinada antecedência de adição do afinador ao banho face ao instante de solidificação prendem-se com a fusão do afinador e com a distribuição das partículas de borato [Metallurg Aluminium].

Outro factor importante a ter em conta prende-se com o desvanecimento com o tempo. Por serem mais densas que o alumínio, as partículas de TiB₂ têm tendência a sedimentar para o fundo do cadinho com o tempo. Para além disso promover uma má afinação de grão, tem também como consequência a formação de uma lama no fundo daquele. Apesar de diferentes afinadores de grão à base de TiB apresentarem diferentes taxas de desvanecimento com o tempo, de uma maneira geral para maximizar a eficiência da afinação de grão, quanto menos tempo decorrer entre a adição do afinador e o vazamento melhor [Metallurg Aluminium].

Enquanto o titânio é um restrictor do crescimento de grão, está presente na partícula de TiB₂, e está em evidência como uma camada crítica para que ocorra nucleação nas partículas de TiB₂, o boro apenas entra na constituição da partícula de borato. Por este motivo e ao contrário do titânio, o boro deve ser usado como controlo na fundição. Um bom método de controlar a adição de boro ao banho passa pela análise química por espectrometria de emissão, com um canal específico com precisão adequada para este elemento [Metallurg Aluminium].

2.2.7. Modificação do eutético

Dependendo da aplicação em causa, na fundição de ligas de alumínio a modificação do eutético pode ser usada com diferentes objectivos, uma vez que [Metallurg Aluminium]:

- Diminui a temperatura de solidificação do eutético;
- Modifica a morfologia do silício constituinte do eutético;
- Redistribui a porosidade.

Enquanto que as fundições que produzem componentes estruturais usam estrôncio com o objectivo de alcançar a resistência e a ductilidade exigidas pelos clientes, outras fundições usam-no com o simples objectivo de redistribuir a porosidade [Metallurg Aluminium].

2.2.7.1. Benefícios dos modificadores

Os modificadores do eutético são adicionados às ligas de alumínio-silício com o principal objectivo de reduzir a taxa de sucata promovendo [Metallurg Aluminium]:

- Controlo da morfologia do silício;
- Melhoria nas propriedades mecânicas;
- Melhoria na maquinabilidade;
- Redução do fenómeno de fissuração a quente;
- Diminuição do tempo de tratamento térmico;
- Controlo da distribuição da porosidade;
- Melhoria da capacidade de enchimento da moldação;
- Supressão da formação de silício primário;
- Redução da adesão ao molde.

Algumas destas melhorias de propriedades tais como a resistência mecânica e a maquinabilidade podem ser facilmente relacionadas com a alteração do tamanho e da morfologia do silício de uma forma relativamente grosseira e acicular para uma forma mais fina e fibrosa existente após a modificação. Já no caso da maquinabilidade, tanto esta como a vida da ferramenta de maquinagem são melhoradas devido ao refinamento do silício eutético cristalino de elevada dureza [Metallurg Aluminium].

Se o objectivo final passar por otimizar o processo de fundição, é importante que as alterações na solidificação devidas à modificação, ou à alteração do tipo de modificador, sejam totalmente percebidas. É o que se irá explicar nas próximas secções [Metallurg Aluminium].

2.2.7.2. Funcionamento dos modificadores

O silício solidifica de uma forma cristalina, formando uma estrutura ordenada de forma plana. De modo a manter a regularidade da sua estrutura, ele apenas pode crescer em

certas direcções específicas, tal como mostra a Figura 2.21, em que átomos de silício se vão acumulando em planos ao longo da frente de crescimento [Metallurg Aluminium].

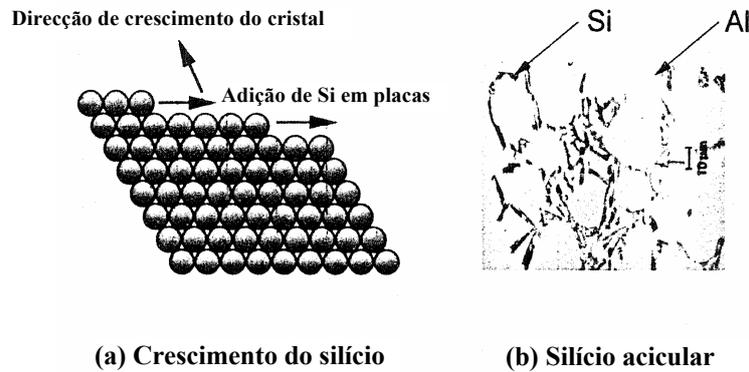


Figura 2.21 – Crescimento e formação do silício acicular [Metallurg Aluminium].

Por este motivo, em ligas hipoeutéticas e eutéticas não modificadas, o silício pode ser observado como placas de forma afiada e angular, denominada “acicular” [Metallurg Aluminium].

Durante este crescimento do cristal de silício é possível que se formem defeitos do tipo macla, como resultado da alteração da orientação do cristal ao longo de um plano (Figura 2.22). Este defeito pode ocorrer de forma natural (maclagem natural) (Figura 2.22a), mas também pode ser induzido se um átomo estranho é adsorbido na frente de crescimento do cristal de silício, perturbando a estrutura (maclagem induzida) (Figura 2.22b) [Metallurg Aluminium].

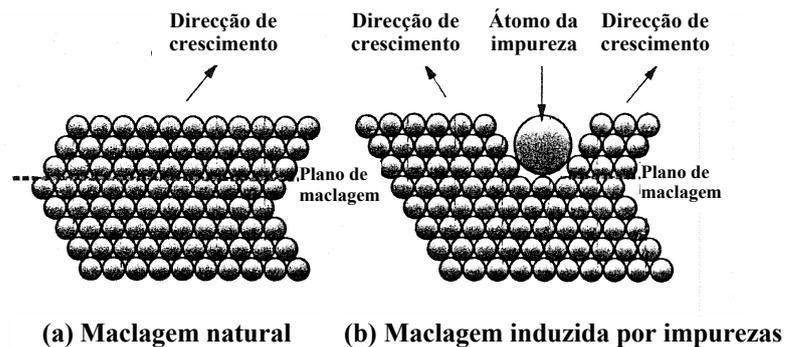


Figura 2.22 – Formação de maclagem no cristal de silício [Metallurg Aluminium].

Por não ocorrer com frequência, a maclagem natural não apresenta grande efeito na estrutura bruta cristalina. O mesmo já não se pode dizer da maclagem induzida por impurezas, que ocorre de forma muito mais significativa, embora com uma deposição repetida de átomos de silício na frente de crescimento, que leva a uma ramificação contínua do cristal. Isto acaba por resultar na microestrutura de silício fibroso típica de uma liga modificada (Figura 2.23)

[Metallurg Aluminium].

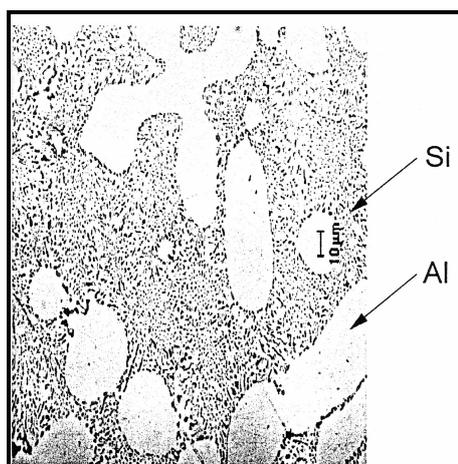


Figura 2.23 – Estrutura fibrosa do silício modificado na liga A413 (AlSi12) [Metallurg Aluminium].

A impureza referida anteriormente não é mais do que o elemento modificador adicionado à liga, apresentando o tamanho do seu átomo um papel extremamente importante no desenvolvimento desta maclagem induzida [Metallurg Aluminium].

2.2.7.3. Elementos modificadores

Os modificadores são um conjunto de elementos que, quando adicionados às ligas de alumínio-silício, afectam o crescimento do silício, modificando a sua morfologia de uma forma grosseira e acicular para uma mais fina e fibrosa [Metallurg Aluminium].

Os elementos mais frequentemente usados como modificadores são o sódio e o estrôncio. Apesar de frequentemente classificado como modificador, o antimónio actua mais como um refinador do silício, uma vez que (juntamente com o fósforo) diminui o tamanho do eutético e do silício primário, promovendo a nucleação e não afectando a sua morfologia [Metallurg Aluminium].

Outros elementos conhecidos por apresentarem propriedades de modificação ou refinamento são o cálcio, o arsénio (As), o lítio e o enxofre. Estes elementos não são geralmente usados junto com o antimónio devido a um ou à combinação dos seguintes factores [Metallurg Aluminium]:

- Envenenamento do efeito do sódio e/ou estrôncio;
- Efeitos negativos noutras propriedades;
- Inexistência de métodos eficientes de adição até ao momento;
- Implicações significativas na saúde e segurança.

2.2.7.4. Escolha do modificador

A escolha entre o sódio e o estrôncio como modificadores a usar pode ser determinada por muitos factores. A Tabela 2.4 mostra uma comparação das vantagens e desvantagens da utilização de cada um destes modificadores [Metallurg Aluminium].

Tabela 2.4 – Comparação entre o sódio e do estrôncio como modificadores do eutético [Metallurg Aluminium].

	Sódio	Estrôncio
Rendimento na incorporação	Baixo, variável e dependente do operador	Alto e consistente
Tempo de contacto	Imediato	Até 10-20 minutos
Desvanecimento	Rápido (20-40 minutos)	Lento (mais de 8 horas)
Problemas ambientais	Fumos e ataque do refractário	Limpo e livre de fumos
Sobre-modificação	Possível devido à dificuldade de controlo da adição	Improvável
Efeito modificador	Muito alto	Alto
Nível de adição (típico)	50 ppm	150 ppm
Facilidade de manuseamento	Deve estar protegido da humidade	Não-reactivo com a humidade

Apesar de ser mais poderoso do que o estrôncio, o sódio apresenta um rápido desvanecimento, formação de fumos, e dificuldade de controlo de adição, razões pelas quais ele foi substituído gradualmente pelo primeiro em quase todas as fundições [Metallurg Aluminium].

A modificação é mais difícil de levar a cabo na presença de velocidades de arrefecimento mais baixas (existentes por exemplo no processo de vazamento em areia) e/ou de secções mais espessas, facto que leva geralmente à necessidade de aumento dos níveis de adição nestas situações. Outra prática usual passa pelo uso de pontos ou regiões de arrefecimento do fundido, de modo a evitar a ocorrência de porosidade em zonas massivas mais isoladas [Metallurg Aluminium].

A selecção final do modificador a usar numa determinada aplicação vai estar sempre apoiada nos factores atrás discutidos. Contudo, e dum ponto de vista prático, sempre que estiverem em causa factores tais como a necessidade de optimização de processos, a redução dos níveis de sucata, e o aumento da produtividade e da fiabilidade dos fundidos, o estrôncio afigura-se como a escolha mais acertada [Metallurg Aluminium].

2.2.7.5. Influência dos modificadores na alimentação

O efeito do sódio e do estrôncio na alimentação é complexo, e é determinado por muitos factores tais como a taxa de arrefecimento, o nível de adição e a composição química da liga [Metallurg Aluminium].

Apesar da afinação de grão ser o meio mais poderoso de controlo da ocorrência de rechupes nos fundidos durante a solidificação, estes também podem ser controlados através da modificação por alteração da forma da frente de crescimento do eutético [Metallurg Aluminium].

Esta forma varia contudo consoante se esteja a usar sódio ou estrôncio como modificador. Assim, num banho modificado com sódio a frente de crescimento do eutético é tipicamente plana, permitindo uma solidificação regular através da rede dendrítica e uma retenção mínima de bolsas de líquido. Já num banho modificado com estrôncio, a frente de crescimento pode ser mais irregular (apesar de a taxas de arrefecimento mais baixas), permitindo o aprisionamento de zonas líquidas e assim a ocorrência de microporosidade [Metallurg Aluminium].

2.2.7.6. Influência dos modificadores na porosidade

Apesar do papel desempenhado pelos modificadores na formação de porosidade estar em constante debate, há porém uma certeza: a modificação afecta directamente a porosidade. Se em alguns casos isto é vantajoso, noutros não [Metallurg Aluminium].

Uma característica comum das ligas modificadas reside na tendência para o aumento da porosidade em zonas massivas isoladas (saliências, etc.) ou em mudanças de secção (cantos ou reforços). Tal ocorre muitas vezes como resultado de um molde mal projectado ou de um mau posicionamento dos gitos e/ou alimentadores. Pode também ocorrer devido à simples troca do sódio pelo estrôncio como modificador, uma vez que este último tem tendência a nuclear o hidrogénio existente no banho, dificultando a sua libertação para a atmosfera durante a solidificação da liga [Metallurg Aluminium].

Um dos papéis dos modificadores passa pelo controlo da dispersão da porosidade num fundido, seja ela causada por gás ou por rechupe. Podendo melhorar a capacidade de alimentação, os modificadores ajudam a transferir a porosidade da zona útil do fundido para alimentadores ou canais de gitagem. Na presença de secções isoladas, a porosidade irá contudo formar-se nas últimas zonas a solidificar, tais como pontos quentes, saliências e secções espessas. Nestas situações, a melhor solução passa por tentar dispersar essa porosidade por toda a secção. Há teorias que relacionam a facilidade de nucleação de poros com a reduzida tensão superficial típica dos banhos modificados. Nestes casos, se os poros se formam de forma mais fácil, então surgirão mais cedo durante a solidificação, e assim serão mais numerosos e pequenos, e encontrar-se-ão dispersos no fundido de modo homogéneo [Metallurg Aluminium].

De uma forma resumida, o importante passa por saber que genericamente, o estrôncio contribui para uma redistribuição da macro e da microporosidade, isto é, na presença de uma mesma quantidade de poros, eles serão mais pequenos e encontrar-se-ão mais dispersos [Metallurg Aluminium].

2.2.7.7. Melhoria de processos de fundição usando a modificação com estrôncio

Todos os processos de fundição podem ser melhorados pelo recurso à modificação do banho com estrôncio [Metallurg Aluminium].

De facto, uma das principais vantagens do uso de estrôncio reside no facto de ele contribuir para que uma microestrutura pareça que resultou de uma solidificação mais rápida do que aquela que realmente ocorreu. Desta forma, muitas das vantagens de uma solidificação rápida podem ser atingidas sem recurso a novos moldes, a arrefecimento com água, ou a outros métodos mais dispendiosos [Metallurg Aluminium].

Isto é aplicável mesmo no caso de vazamentos com velocidades de solidificação relativamente altas. A Figura 2.24 mostra a microestrutura de uma peça obtida por fundição injectada na liga A380, que foi sujeita a uma taxa de solidificação muito elevada [Metallurg Aluminium].

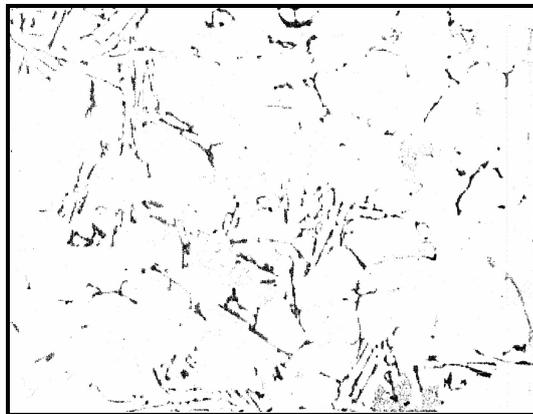


Figura 2.24 – Microestrutura de uma peça obtida por fundição injectada na liga A380 (AlSi8Cu3), mostrando silício não-modificado e parcialmente modificado (500×) [Metallurg Aluminium].

Como evidencia a imagem, mesmo na presença de taxas de solidificação elevadas pode não se atingir um estado de total modificação. Tornou-se recentemente evidente que no processo de fundição injectada com ligas de alumínio-silício, especialmente para fundidos de maior dimensão e massividade, a adição de estrôncio pode trazer benefícios claros, nomeadamente em termos de propriedades mecânicas e consistência dos fundidos (Figura 2.25) [Metallurg Aluminium].

Apesar destes, o maior benefício decorrente da modificação com estrôncio é, sem dúvida, a melhoria do controlo da distribuição da porosidade e dos microrechupes [Metallurg Aluminium].

2.2.7.8. Níveis de adição de estrôncio

A quantidade de estrôncio a adicionar ao banho depende não apenas do grau de modificação necessário, mas também de [Metallurg Aluminium]:

- Quantidade de silício da liga;

- Taxa de arrefecimento;
- Espessura da secção;
- Método de vazamento;
- Tempo de espera;
- Temperatura da liga;
- Tipo de modificador usado.

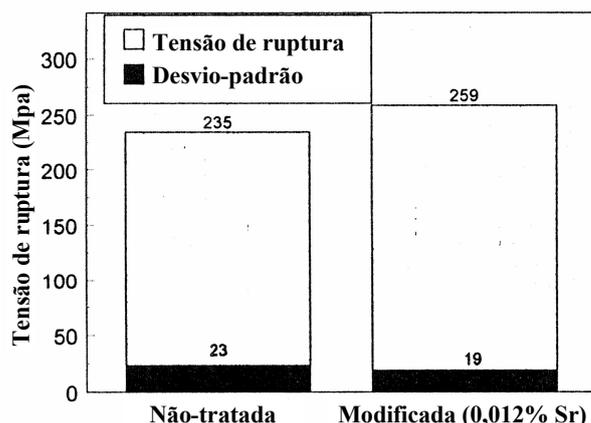


Figura 2.25 – Efeito da modificação com estrôncio na resistência à tracção de um fundido obtido por fundição injectada na liga A380 (AlSi8Cu3) [Metallurg Aluminium].

A Tabela 2.5 dá uma indicação de alguns níveis típicos de adição de estrôncio, em função da quantidade de silício da liga [Metallurg Aluminium].

Tabela 2.5 – Níveis de adição sugeridos para modificadores de estrôncio [Metallurg Aluminium].

Si (%)	4	6	8	10	12
Sr (%)	0,01	0,015	0,02	0,025	0,030
Sr (ppm)	100	150	200	250	300

Em geral, pode-se dizer que para a maioria das aplicações são adequadas quantidades de estrôncio na ordem dos 0,01 a 0,02% (100 a 200 ppm) [Metallurg Aluminium].

Geralmente, níveis de silício superiores requerem a adição de uma maior quantidade de modificador, devido ao aumento do volume de eutético formado. Essa quantidade pode ainda ter que subir, dependendo dos níveis iniciais de impurezas no banho (por exemplo, se no banho estiverem presentes níveis significativos de fósforo e de antimónio, será necessária uma quantidade suplementar de modificador) [Metallurg Aluminium].

2.2.7.9. Medição do nível de modificação

O grau de modificação do banho é medido usando a escala desenvolvida pela *American Foundry Society (AFS)* que se encontra representada na Tabela 2.6 [Metallurg Aluminium].

Tabela 2.6 – Sistema de classificação da modificação da AFS [Metallurg Aluminium].

Avaliação	Classificação	Morfologia do silício
AFS 1	Totalmente não-modificado	Placas grandes Partículas aciculares
AFS 2	Lamelar	Lamelas Partículas aciculares
AFS 3	Modificação parcial	Lamelas começam a partir Partículas aciculares
AFS 4	Não-lamelar	Maioria das lamelas partidas Poucas partículas aciculares restam
AFS 5	Modificado	Partículas fibrosas Partículas aciculares desapareceram
AFS 6	Super modificado	Estrutura fibrosa extremamente fina

2.2.7.10. Activação, desvanecimento e reactividade

Há uma série de factores a considerar quando se usa o estrôncio como modificador [Metallurg Aluminium].

O primeiro de todos eles diz respeito ao tempo de activação. De modo a atingir o nível máximo de modificação após a adição, é geralmente necessário esperar pelo menos 15 minutos antes de proceder ao início dos vazamentos. Isto permite uma fusão completa do modificador. No caso do estrôncio, são também suficientes 15 minutos para que ele reaja com todos os resíduos de fósforo existentes no banho, antes da sua modificação [Metallurg Aluminium].

Outro factor prende-se com o desvanecimento. Apesar de muito lentamente, o estrôncio desvanece por oxidação. Qualquer coisa que promova a oxidação, tal como as chamas de um forno de fusão a gás, contribuem directamente para um aumento do desvanecimento. Se o estrôncio for adicionado na colher ou no forno de vazamento, normalmente ele permanecerá activo entre 10 a 12 horas após a sua adição [Metallurg Aluminium].

A reactividade é mais um factor a ter em conta. No caso do estrôncio, esta é particularmente intensa na presença de elementos tais como o cloro e o flúor. Desta forma, o estrôncio deve ser apenas adicionado após qualquer desgasificação ou fluxagem reactiva. Actualmente esta preocupação é infundada, uma vez que a maior parte das fundições já não

usa gases reactivos na desgasificação [Metallurg Aluminium].

A última coisa a ter em atenção prende-se com a saturação do refractário, quando se usa o estrôncio como modificador. Quando uma fundição começa a usar o estrôncio, são necessárias algumas semanas até que os refractários das colheres, dos fornos de vazamento, etc. fiquem saturados com estrôncio. Enquanto que antes disso predominam rendimentos de adição inferiores ou iguais a cerca de 85%, após a saturação facilmente se chegam a níveis consistentes da ordem dos 95% [Metallurg Aluminium].

2.2.7.11. Local e método de adição de modificadores

Tendo em consideração os tópicos abordados no ponto anterior, neste procuram-se resumir as condições óptimas em termos de locais e tempos de adição de modificadores [Metallurg Aluminium].

O lingote pré-modificado e as adições ao forno são menos eficazes devido às perdas por oxidação e ao desvanecimento. Uma vez que o tempo de activação é necessário, não se deve adicionar o modificador tão tarde como o afinador de grão. Isto significa que deve ser feita uma análise do processo de modo a determinar o melhor local para o fazer cerca de 15 a 30 minutos antes do início dos vazamentos [Metallurg Aluminium].

2.2.8. Ligas eutécticas e hipereutécticas

Nas ligas eutécticas, a adição de estrôncio não só provoca uma deslocação do ponto eutéctico para cima (temperaturas mais elevadas), como leva a que elas adquiram um comportamento tipicamente hipoeutéctico (deslocação do diagrama de equilíbrio para a esquerda) [Metallurg Aluminium].

Contrariamente ao que acontece na solidificação das ligas hipoeutécticas, em que o alumínio começa a solidificar antes do eutéctico, nas hipereutécticas esse lugar é ocupado pelo silício [Metallurg Aluminium].

Nestas ligas com % Si superior a 12%, a afinação do grão é geralmente garantida pelo uso de fósforo [Metallurg Aluminium].

2.2.9. Sequências de tratamento do banho na fundição

A ordem pela qual os tratamentos do banho são efectuados é muito importante, quando se pretende a máxima eficiência na preparação do mesmo. Alguns tratamentos precisam de ser realizados antes de outros, ou algum tempo antes dos vazamentos se iniciarem [Metallurg Aluminium].

A sequência de tratamento do banho encontra-se altamente dependente do modo como é executada a operação. A fusão, a desgasificação, a transfega e o vazamento podem ser feitos de muitas maneiras dependendo da fundição. Existem por exemplo fundições em que a adição do afinador de grão e do modificador do eutéctico é feita em simultâneo. Tudo isto torna difícil a recomendação de uma determinada sequência geral para o tratamento do banho

[Metallurg Aluminium].

Apesar disso, uma sequência de tratamento típica pode ser observada na Figura 2.26 [Metallurg Aluminium].

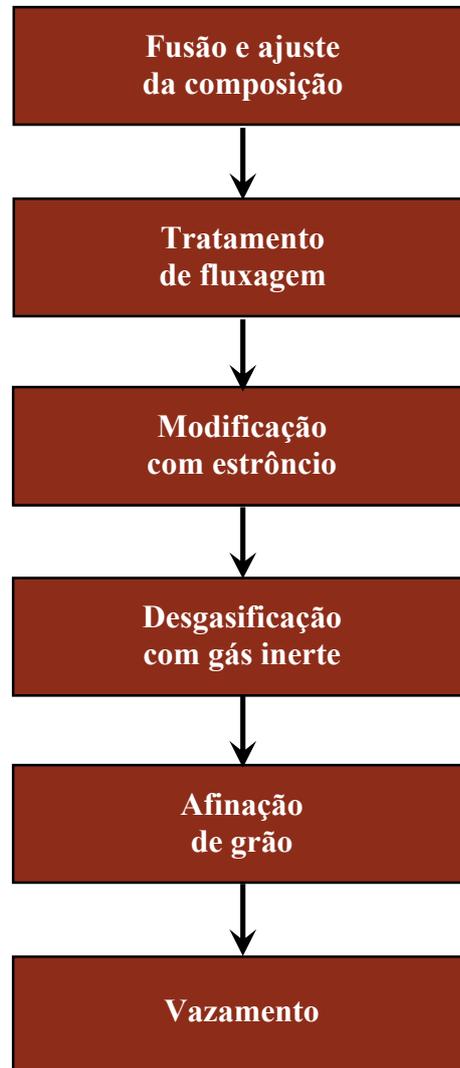


Figura 2.26 – Sequência típica de tratamento do banho [Metallurg Aluminium].

CAPÍTULO 3

Trabalho experimental

De modo a atingir os objectivos enunciados no final do Capítulo 1, neste capítulo descrevem-se todas as fases do trabalho experimental.

3.1. Descrição do processo

Na ZCP, o processo de fabrico de impulsores para turbocompressores por vazamento em contragravidade de ligas de alumínio em moldações em gesso encontra-se distribuído por várias secções, de acordo com o organigrama da Figura 3.1.

Seguidamente apresenta-se uma descrição do processo em cada uma das secções referidas.

3.1.1. Moldações

Na secção de Moldações produzem-se moldações de gesso por vazamento de uma barbotina obtida pela mistura de gesso em pó com água, em placas-molde com os modelos das peças a produzir.

3.1.1.1. Equipamento

Encontrando-se fixas a pequenos carros que circulam na linha de produção de moldações, estas placas são revestidas a silicone e possuem os modelos em silicone dos impulsores a produzir. Sobre elas é colocada uma caixa de moldação, de modo a obter-se a cavidade onde se vai vazar a barbotina de gesso (Figura 3.2).

Em termos de equipamento, esta secção é basicamente composta por uma máquina de mistura automática de gesso em vácuo (Figura 3.3) e por uma linha de produção de moldações (Figura 3.4).

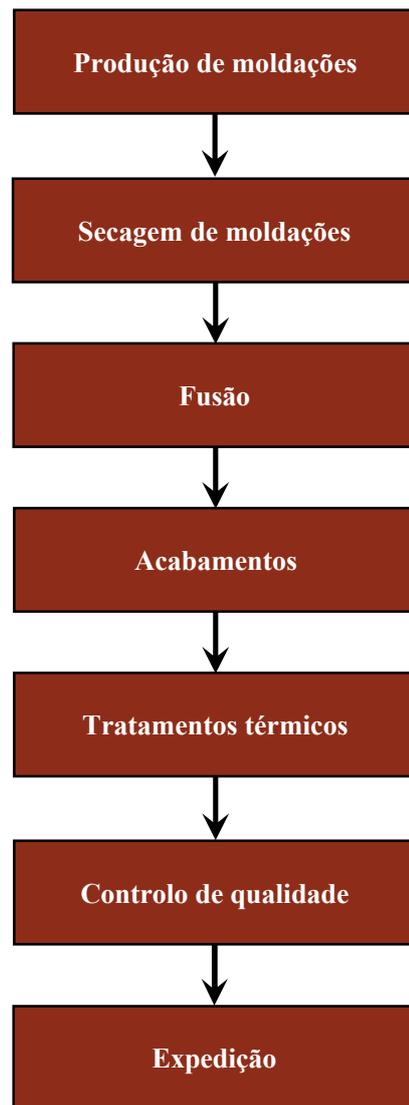


Figura 3.1 – Etapas do processo de produção de impulsores para turbocompressores por vazamento em contragravidade de ligas de alumínio em moldações em gesso.



Figura 3.2 – Placa-molde com impulsores em silicone e respectiva caixa de moldação.



Figura 3.3 – Máquina de mistura automática de gesso com água em vácuo.



Figura 3.4 – Linha de produção de moldações (A → Máquina de mistura; B → Posto de vazamento; C → Posto de nivelamento; D → Posto de desmoldação; E → Posto de lavagem de placas-molde).

A máquina de mistura automática encarrega-se não só de efectuar a mistura de gesso com água desionizada em vácuo, como também de efectuar a pesagem automática de ambos, de modo a evitar assim a possibilidade de ocorrência de erro humano nesta operação tão determinante na qualidade final do produto.

Relativamente à linha de moldações, como evidencia a Figura 3.4, nela existem quatro postos de trabalho bem definidos (Figura 3.5):

1. Posto de vazamento da barbotina preparada pela máquina de mistura nas placas-molde (Figura 3.5A), constituído por:

- Calha de vazamento da barbotina, cuja principal função é permitir dosear e vaziar em iguais condições de fluidez, barbotina para 3 placas-molde em simultâneo. Objectivo final: aumento de produtividade;
- Mesa vibratória com dispositivos de fixação dos carros porta-placas. A necessidade de vibração prende-se unicamente com a necessidade de evitar a adesão de bolhas de ar à superfície dos modelos em silicone, com posterior

aparecimento de bolhas de metal na superfície dos fundidos.

2. Posto de nivelamento da face superior das moldações (Figura 3.5B);

3. Posto de desmoldação de moldações (Figura 3.5C), constituído por:

- Máquina de desmoldação de accionamento hidráulico, que se encarrega de extrair de forma totalmente automática a moldação da placa-molde, e posteriormente da caixa de moldação;
- Posto de inspeção visual e de limpeza das moldações desmoldadas.

4. Posto de lavagem, enxaguamento e secagem de placas-molde e caixas de moldação (Figura 3.5D).



Figura 3.5 – Postos de trabalho na linha de produção de moldações em gesso (A → Posto de vazamento; B → Posto de nivelamento; C → Posto de desmoldação; D → Posto de lavagem de placas-molde).

3.1.1.2. Processo

A produção de moldações tem início com a mistura de gesso (gesso poroso de elevado teor de água) com água desionizada em vácuo, na máquina de mistura já referida atrás.

Após a mistura, o operador dá então início à operação de vazamento da barbotina nas placas-molde, que já se encontram previamente preparadas no posto de vazamento (Figura 3.6). Todo este vazamento é efectuado sob vibração imposta por uma mesa vibratória à qual as placas estão fixas.

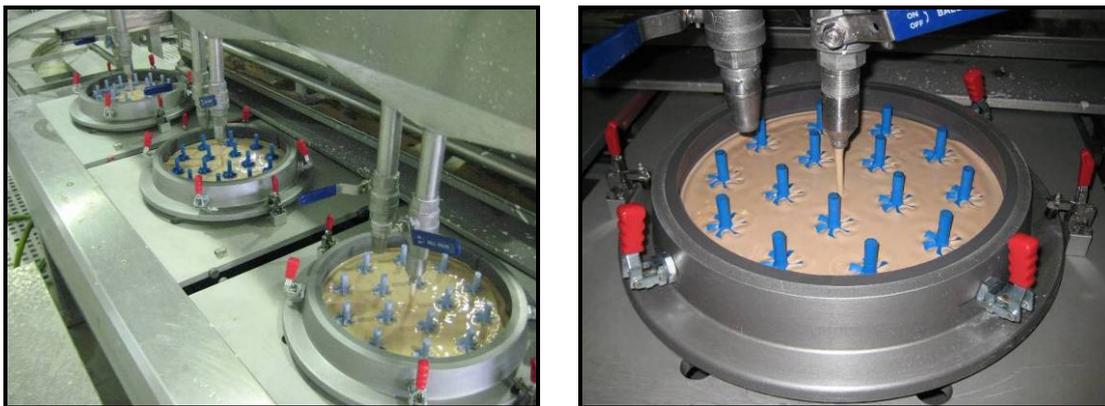


Figura 3.6 – Vazamento da barbotina da calha de vazamento para as 3 placas-molde.

Finalizado o vazamento da barbotina nas placas, estas são deslocadas ao longo da linha até ao posto de nivelamento, e todos os utensílios utilizados na mistura e vazamento da barbotina são convenientemente limpos com água corrente.

Neste posto, procede-se então ao nivelamento das moldações por raspagem da sua face superior com uma régua de cabelo (Figura 3.7), de modo a garantir o máximo de planeza às mesmas.

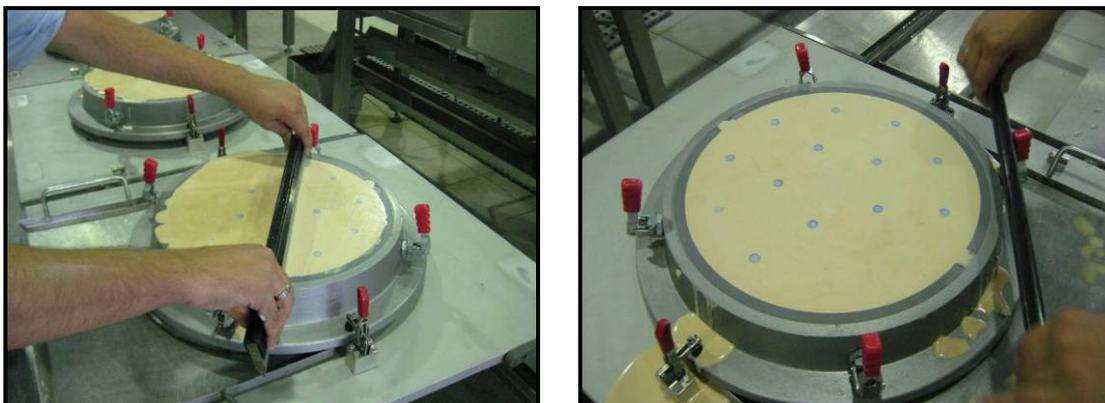


Figura 3.7 – Nivelamento da face superior da moldação com uma régua de cabelo.

A seguir, as placas com o gesso vazado ficam em repouso até ao momento de extracção de cada moldação da sua placa-molde (desmoldação).

A desmoldação de uma moldação (Figura 3.8) é efectuada de modo puramente mecânico numa máquina de desmoldação hidráulica própria para o efeito, que se encarrega de extrair a moldação da placa-molde e da caixa de moldação envolvente.

Após a desmoldação, as moldações (Figura 3.9) são então cuidadosamente inspeccionadas e limpas pelo operador, numa operação que visa a detecção e marcação de possíveis defeitos, bem como a eliminação de rebarbas, arredondamento de arestas vivas e limpeza final com ar comprimido (Figura 3.10).

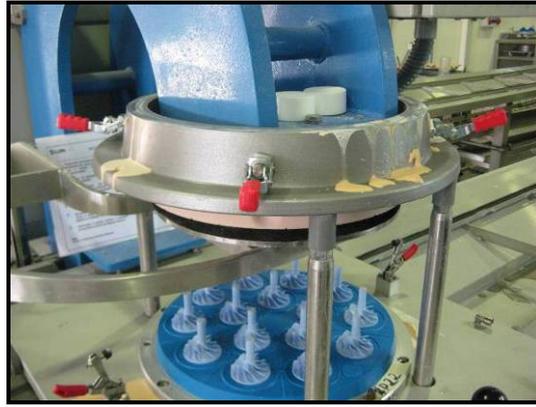


Figura 3.8 – Extracção da moldação de gesso da placa-molde (desmoldação).



Figura 3.9 – Moldação de gesso após desmoldação.



Figura 3.10 – Eliminação de rebarbas e de arestas vivas, e limpeza da moldação com ar comprimido.

A seguir, cada moldação é colocada sobre um tabuleiro no interior da mufla de secagem de moldações (Figura 3.11), encontrando-se assim pronta para iniciar o processo de secagem.



Figura 3.11 – Colocação da moldação no interior da mufla de secagem de moldações.

Antes de voltarem a poder ser usadas, as placas-molde e respectivas caixas de moldação são lavadas, enxaguadas e devidamente secas (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Lavagem de uma placa-molde.

Após isto, as placas-molde e respectivas caixas de moldação encontram-se novamente preparadas a iniciar o ciclo de produção de moldações descrito anteriormente.

3.1.2. Secagem de moldações

A secagem das moldações produzidas é efectuada em muflas eléctricas (10 muflas no total, actualmente) (Figura 3.13), que promovem não só o aquecimento (segundo um determinado ciclo de secagem imposto pelo operador) como a circulação de ar forçado no seu interior. Cada uma destas muflas apresenta uma capacidade máxima de secagem de 24 moldações.

O vapor de água libertado durante a secagem é libertado para a atmosfera sem extracção forçada, por intermédio de 2 chaminés existentes no topo de cada mufla.

Por uma questão de rentabilização, a secagem das moldações produzidas é geralmente

iniciada mal uma mufla de secagem se encontre completamente cheia com 24 moldações, sendo imposto o ciclo térmico evidenciado na Figura 3.14.

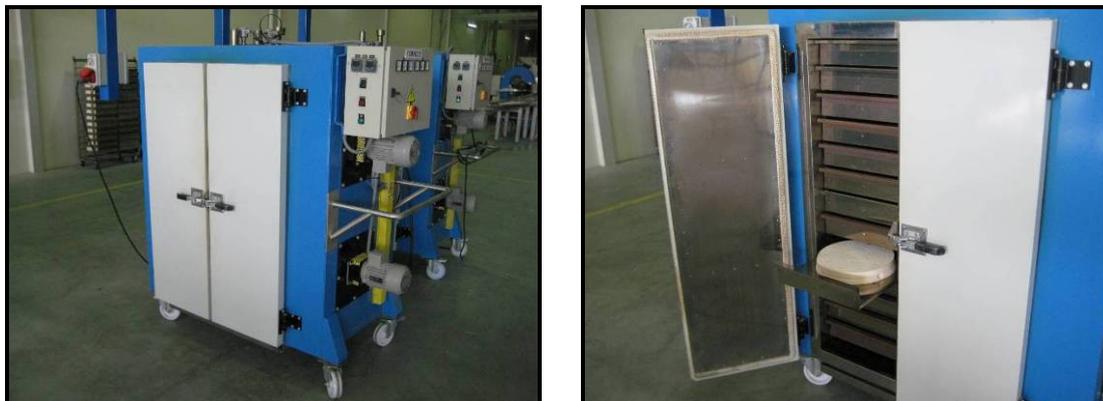


Figura 3.13 – Mufla eléctrica de secagem de moldações de gesso.

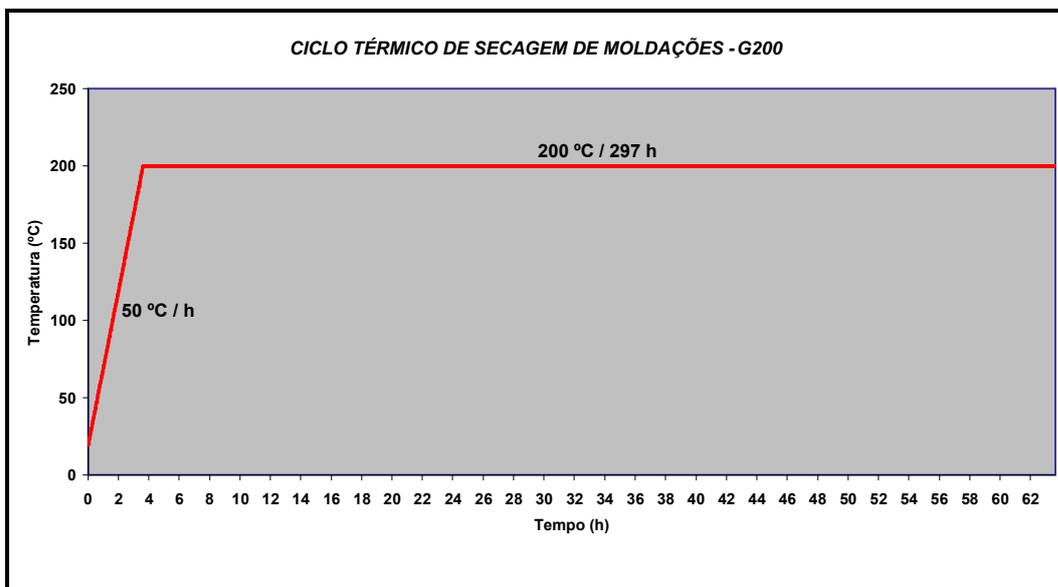


Figura 3.14 – Ciclo térmico G200 imposto na secagem de moldações de gesso (temperatura de pré-aquecimento de 200°C).

Em termos orientativos (uma vez que cada mufla tem o seu comportamento próprio), submetendo as 24 moldações presentes numa mufla ao ciclo de secagem acima descrito, elas encontram-se totalmente secas e prontas a ser usadas no vazamento de alumínio em aproximadamente 24 horas após o início da secagem.

3.1.3. Fusão

Na secção de Fusão (Figura 3.15), as moldações previamente produzidas e já

devidamente secas são vazadas com liga de alumínio através de um processo de vazamento em contragravidade assistido por vácuo. Actualmente, na ZCP efectua-se vazamentos:

- Nas ligas Al-Si (alumínio-silício):
 - **354** (AA), ou Al-Si9-Cu1,8-Mg0,5 (ISO);
 - **C355** (AA), ou Al-Si5-Cu1,3-Mg0,5 (ISO);
- Na liga Al-Zn (alumínio-zinco):
 - **712** (AA), ou Al-Zn5,8-Mg0,6-Cr0,5-Ti0,2 (ISO).



Figura 3.15 – Aspecto geral da secção de Fusão.

3.1.3.1. Equipamento

Na Fusão, a fusão/manutenção da liga é efectuada num forno eléctrico duplo (com 2 cadinhos de 300kg de capacidade), associado a um pórtico (Figura 3.16) que sustenta os 2 postos alternados usados no vazamento das moldações de gesso com alumínio (Figura 3.17).



Figura 3.16 – Forno duplo de fusão/manutenção de alumínio e respectivo pórtico com duplo posto de vazamento.



Figura 3.17 – Posto de vazamento.

Cada posto de vazamento é constituído por uma câmara de vácuo, que encerra a moldação durante o vazamento. Esta câmara é composta por uma placa porta-tubos (onde são colocados os tubos de aspiração do metal) (Figura 3.18), pelo anel de compressão radial da moldação (Figura 3.19), pelo anel da câmara de vazamento (Figura 3.20) e por uma placa de arrefecimento refrigerada internamente com água termostatzada (Figura 3.20 e Figura 3.21).

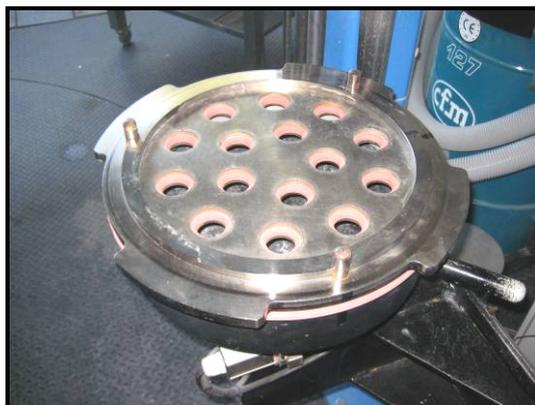


Figura 3.18 – Placa porta-tubos de aspiração de metal.



Figura 3.19 – Anel de compressão radial da moldação sobre a placa porta-tubos.

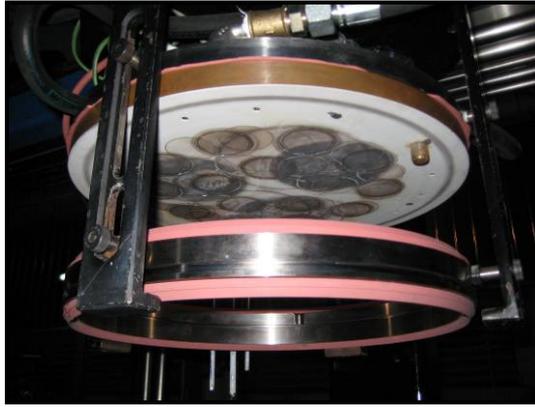


Figura 3.20 – Anel da câmara de vazamento e placa de arrefecimento.

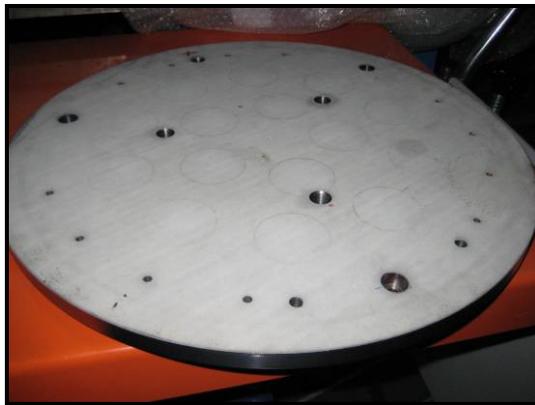


Figura 3.21 – Placa de arrefecimento refrigerada.

Esta placa é responsável não só por comprimir a moldação no interior da câmara de vazamento, como por extrair calor dos fundidos após o enchimento das cavidades da moldação. Serve também de suporte aos tubos de aplicação de vácuo e de injeção de argon no interior da câmara de vazamento, bem como aos sensores de vácuo e de temperatura que se encontram ligados ao PLC de controlo e de aquisição de dados (Figura 3.22).



Figura 3.22 – PLC de controlo e de aquisição de dados do vazamento.

Este PLC não só adquire os sinais de vácuo e de temperatura enviados dinamicamente da câmara de vazamento, como avisa o operador no caso de algum destes sinais se encontrar fora dos parâmetros pré-estabelecidos para cada referência de peça que se esteja a vaziar. A estabilidade da operação mais importante de todo este processo produtivo fica assim devidamente garantida e independente da acção e da interpretação humana.

3.1.3.2. Processo

O vazamento das moldações entretanto secas tem início apenas após o tratamento do banho metálico. Este tratamento compreende não só a afinação da composição química do banho, como a sua correcta limpeza com recurso a fluxagem e desgasificação.

Nessa altura, o operador apenas tem que se certificar se todas as restantes condições estão reunidas para que a sessão de vazamentos se possa iniciar.

Verificadas estas condições, o vazamento de uma moldação tem início com a retirada dos tubos de aspiração (Figura 3.23) do interior da mufla de pré-aquecimento e colocação dos mesmos na placa porta-tubos (Figura 3.24).



Figura 3.23 – Tubo de aspiração de metal.



Figura 3.24 – Colocação dos tubos de aspiração na placa porta-tubos.

Segue-se a retirada da moldação do interior da mufla de secagem, a qual é então colocada sobre a placa porta-tubos, de tal forma que cada cavidade se encontra na direcção de um dos tubos de aspiração previamente colocados na placa (Figura 3.25).



Figura 3.25 – Moldação posicionada para o início da operação de vazamento.

Seguidamente, o operador dá início ao ciclo de vazamento, o qual compreende:

- Fecho da câmara de vazamento, com compressão da moldação entre os tubos de aspiração e a placa de arrefecimento refrigerada (Figura 3.26);



Figura 3.26 – Fecho da câmara de vazamento.

- Movimentação da câmara de vazamento com a moldação para o “Posto de Purga” (Figura 3.27);



Figura 3.27 – Câmara de vazamento no “Posto de Purga”, pronta para efectuar a purga e a injeção de árgon.

- Purga da câmara de vazamento com “Vácuo Total” (pressão relativa $\approx -800\text{mbar}$) para extrair grande parte do ar do seu interior, seguida de injeção de árgon para protecção de todo o interior e da moldação contra a oxidação do alumínio a vazar;
- Movimentação da câmara de vazamento com a moldação do “Posto de Purga” para o “Posto de Vazamento”;
- Aplicação de “Vácuo Parcial” durante o “Tempo de Vazamento” (os valores deste vácuo e do tempo de vazamento dependem da referência a vazar), de modo a aspirar metal do banho para o interior das cavidades da moldação, por intermédio dos tubos de aspiração (Figura 3.28);



Figura 3.28 – Câmara de vazamento no “Posto de Vazamento”, durante o vazamento de alumínio na moldação.

- Entrega da moldação vazada ao operador (Figura 3.29).

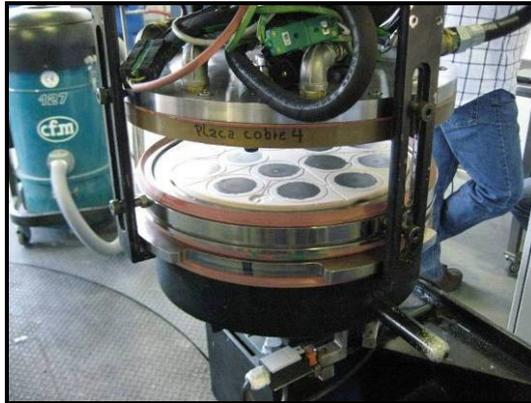


Figura 3.29 – Abertura da câmara de vazamento, após o vazamento da moldação.

Após o vazamento, o operador apenas tem então que transportar a moldação para um *trolley* de transporte, onde ela vai arrefecer até à temperatura ambiente, antes de se iniciar o seu abate (Figura 3.30).



Figura 3.30 – Moldação vazada colocada num *trolley* de transporte para arrefecimento.

3.1.4. Acabamentos

Na secção dos Acabamentos (Figura 3.31) a sequência de trabalhos inicia-se com moldações acabadas de vazar provenientes da Fusão, e termina com peças fundidas já inspeccionadas visualmente, e devidamente rebarbadas e granalhadas, prontas a enviar para tratamento térmico.

O processo inicia-se assim com o corte das moldações anteriormente vazadas, com vista a separar os gomos/alimentadores das peças fundidas.

Depois de regular a altura do corte a efectuar (varia de referência para referência), procede à execução da operação propriamente dita (Figura 3.32), tendo a cuidado de a

executar suavemente e com uma velocidade constante de modo a garantir a melhor superfície de corte possível aos fundidos.



Figura 3.31 – Aspecto geral da secção de Acabamentos.



Figura 3.32 – Corte do sistema de gitagem/alimentação de uma moldação vazada.

Após o corte, a moldação segue para o posto de abate, onde é partida manualmente para se proceder à separação dos fundidos do gesso que os envolve (Figura 3.33).



Figura 3.33 – Abate de uma moldação vazada.

No final do abate, apesar de a moldação já não existir fisicamente, os impulsores fundidos ainda apresentam gesso entre as suas alhetas, como evidenciam as imagens da Figura 3.34.



Figura 3.34 – Impulsores fundidos após a operação de abate de uma moldação.

Este gesso é removido com recurso a um martelo vibratório, tal como evidencia a Figura 3.35.



Figura 3.35 – Remoção do gesso existente entre as alhetas de um impulsor no martelo de vibração pneumática.

Após limpeza da peça com ar comprimido, esta é então cuidadosamente colocada em tabuleiros plásticos próprios (Figura 3.36), e enviada para a próxima operação, a rebarbagem.

Nesta operação procede-se não só à rebarbagem do topo do tarugo do impulsor, de modo a eliminar a rebarba deixada pelo corte das moldações (Figura 3.37), como à rebarbagem da sua base (Figura 3.38), em máquinas próprias para o efeito (Figura 3.39 e Figura 3.40).



Figura 3.36 – Colocação de impulsores num dos tabuleiros de transporte, e impulsor após a operação de vibração pneumática.



Figura 3.37 – Aspecto do topo do tarugo de uma peça antes e depois da rebarbagem.

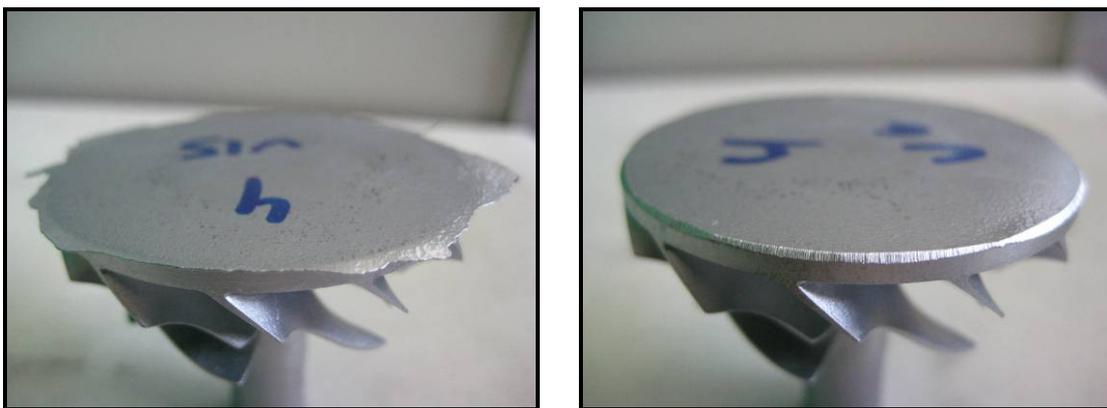


Figura 3.38 – Aspecto da base de uma peça antes e depois da rebarbagem.



Figura 3.39 – Máquina de rebarbagem do topo do tarugo de peças fundidas.



Figura 3.40 – Máquina de rebarbagem da base de peças fundidas.

Uma vez a peça rebarbada, e caso necessário, é altura de executar o polimento da sua superfície. Após uma breve inspeção visual, as peças recuperáveis são polidas com recurso a uma máquina de polimento própria (Figura 3.41).



Figura 3.41 – Polimento da superfície de um impulsor com recurso a uma máquina de polimento.

Por fim, segue-se a operação de granalhagem por projecção de granalha de vidro, executada com recurso a uma granalhadora automática por depressão (Figura 3.42).



Figura 3.42 – Granalhadora automática de peças fundidas.

Após a execução da granalhagem dá-se início a uma preparação cuidadosa da carga para tratamento térmico. Para isso, as peças são colocadas no interior de um cesto metálico (Figura 3.43), ficando assim tudo preparado para o início de um tratamento térmico.



Figura 3.43 – Cesto de tratamentos térmicos carregado com impulsores prontos a tratar termicamente.

3.1.5. Tratamentos térmicos

Nos Tratamentos Térmicos (Figura 3.44) as peças produzidas e já acabadas são sujeitas a diferentes ciclos térmicos (consoante as ligas em que são produzidas), com vista à melhoria das suas propriedades mecânicas por transformação metalúrgica.



Figura 3.44 – Aspecto geral da secção de Tratamentos Térmicos.

3.1.5.1. Equipamento

Esta secção é composta por 2 fornos, onde se executam dois tratamentos térmicos distintos e sequenciais (Figura 3.45):

- Tratamento térmico de **homogenização**;
- Tratamento térmico de **envelhecimento**.



Figura 3.45 – Fornos de homogenização e de envelhecimento, respectivamente.

O forno de homogenização é basicamente composto por:

1. Câmara de aquecimento com ventilação forçada:

- Nesta câmara promove-se uma recirculação de ar quente forçado, previamente aquecido por passagem através de resistências eléctricas, através da carga existente no seu interior;
- O controlo da temperatura no seu interior durante a execução do ciclo térmico é efectuado por intermédio de um controlador (Figura 3.46) e de um conjunto de termopares de controlo e indicação;



Figura 3.46 – Controlador de temperatura do forno de homogeneização.

- No interior da câmara existe uma “aranha” para fixação e elevação do cesto com a carga a tratar (Figura 3.47) por intermédio de um motor eléctrico auxiliado por contrapesos.



Figura 3.47 – “Aranha” para fixação e elevação do cesto com a carga a tratar.

2. Tanque de água para imersão imediata do cesto com a carga após abertura do forno:

- Este tanque possui cerca de 2800 litros de água corrente que, imediatamente antes da imersão do cesto, deverão estar em agitação a cerca de 80°C. Para isso, encontra-se munido de um conjunto de resistências eléctricas de aquecimento e de uma bomba de circulação de água (Figura 3.48);
- Por intermédio de um motor eléctrico, este tanque circula sobre carris entre a posição de repouso e a posição de imersão do cesto (debaixo do forno) (Figura 3.49).

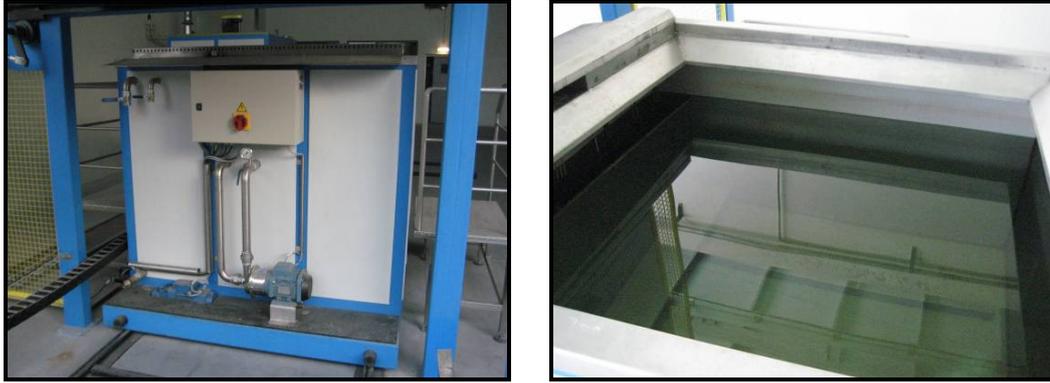


Figura 3.48 – Tanque de água do forno de homogeneização.



Figura 3.49 – Deslocação do tanque de água em relação ao forno de homogeneização.

O forno de envelhecimento é composto por uma câmara de aquecimento com ventilação forçada, na qual se promove uma recirculação de ar quente, previamente aquecido por passagem através de resistências eléctricas, através da carga existente no seu interior.

Tal como no forno de homogeneização, o controlo da temperatura no interior da câmara também é efectuado por intermédio de um controlador (Figura 3.50) e de um conjunto de termopares de controlo e indicação.

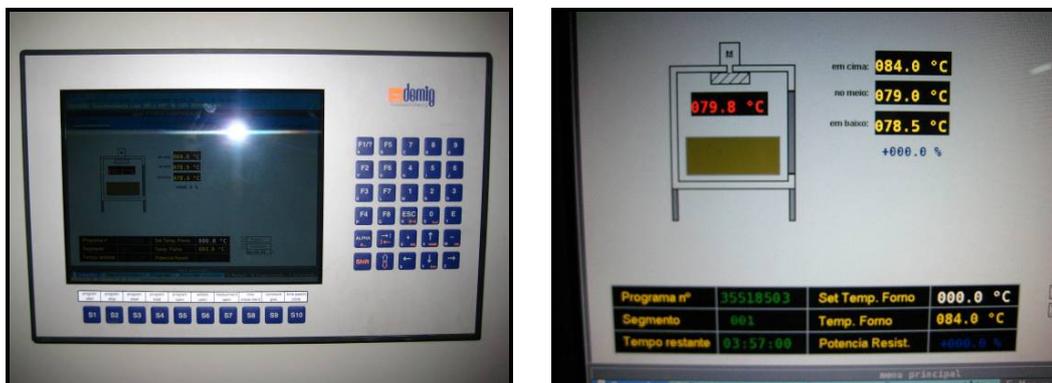


Figura 3.50 – Controlador de temperatura do forno de envelhecimento.

3.1.5.2. Processo

Vindo o cesto já carregado com peças desde o final das operações no sector de Acabamentos, o operador dos Tratamentos Térmicos apenas o tem que fixar à “aranha” de suporte, dando início à subida da mesma para o interior da câmara (Figura 3.51). Seguidamente encerra a câmara e inicia o ciclo térmico já programado no controlador.



Figura 3.51 – Sequência de subida do cesto para o interior da câmara do forno de homogenização.

Uma vez terminado o ciclo de tratamento, o operador procede então à deslocação do tanque de água para baixo da câmara do forno, e à descida do cesto com a carga, até este estar completamente imerso na água (Figura 3.52).



Figura 3.52 – Cesto com a carga imerso na água do tanque do forno de homogenização.

Após ser retirado do interior do tanque do forno de homogenização, o cesto é então colocado no interior do forno de envelhecimento (Figura 3.53), dando o operador início ao ciclo térmico já programado no controlador.

Finalizado o envelhecimento da carga, o operador procede então à deslocação do cesto com a carga para o exterior do forno, ficando a mesma a arrefecer naturalmente até à temperatura ambiente.



Figura 3.53 – Movimentação do cesto para o interior da câmara do forno de envelhecimento.

Nesta secção, o processo termina com a remoção das peças tratadas do interior dos cestos, as quais são de seguida enviadas para o controlo de qualidade.

3.1.6. Controlo de qualidade

Consoante as especificações exigidas pelo cliente, no Controlo de Qualidade (Figura 3.54) os impulsores podem ser sujeitos a controlo por:

- **Ultra-sons por imersão**, para detecção de:
 - Porosidade e/ou rechupes internos ao longo do seu eixo axial com uma dimensão superior a 1,0mm.
- **Líquidos penetrantes**, para detecção de:
 - Filmes de óxidos superficiais;
 - Inclusões superficiais;
 - Fissuração superficial.



Figura 3.54 – Aspecto geral da secção de Controlo de Qualidade.

Ocupando uma divisão própria dentro da nave industrial, a secção de Controlo de Qualidade é constituída pelo posto de inspecção por ultra-sons por imersão e pela linha de inspecção por líquidos penetrantes.

Nesta secção, todas as peças produzidas começam por ser inspeccionadas por ultra-sons, recorrendo-se para isso a um equipamento de inspecção por imersão (Figura 3.55), constituído por 2 sondas de inspecção imersas e alinhadas com o eixo da peça (Figura 3.56), e por um aparelho receptor do sinal emitido por aquelas (Figura 3.57).



Figura 3.55 – Equipamento de inspecção de peças por ultra-sons.



Figura 3.56 – Peça imersa em água e devidamente alinhada com as sondas de inspecção, durante a inspecção por ultra-sons.



Figura 3.57 – Sinal recebido durante a inspecção de uma peça por ultra-sons.

Por interpretação do sinal gráfico recepcionado por este equipamento, torna-se assim possível averiguar a existência ou não de porosidade e/ou rechupes internos nas peças analisadas.

Seguidamente, as peças iniciam a preparação para o controlo por líquidos penetrantes. Para isso, são carregadas num cesto próprio, e são imersas no líquido penetrante, para que o mesmo consiga penetrar em toda a sua superfície (Figura 3.58).



Figura 3.58 – Imersão das peças no líquido penetrante.

Uma vez retiradas do líquido, as peças são deixadas a escorrer durante aproximadamente 5 minutos, após os quais se procede à sua lavagem com água corrente, com o auxílio do chuveiro (Figura 3.59).



Figura 3.59 – Lavagem das peças com um chuveiro, após imersão no líquido penetrante.

Segue-se a secagem, com o tabuleiro de peças a ser introduzido no interior da mufla termo-ventilada durante cerca de 30 minutos (Figura 3.60).

Uma vez secas, as peças são colocadas no interior do tanque de revelação, e sobre elas é aplicado pó revelador com a pistola de aplicação, de modo a obter uma fina camada sobre a superfície das peças (Figura 3.61).

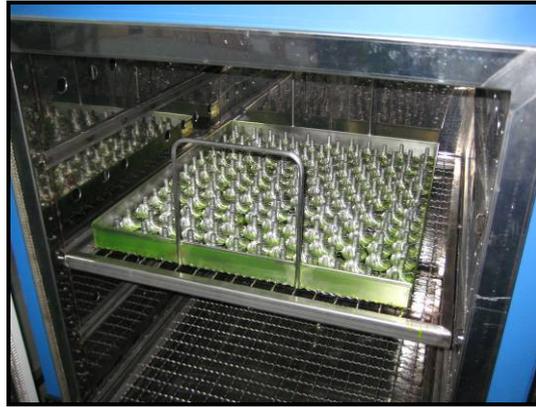


Figura 3.60 – Secagem das peças numa mufla termo-ventilada.



Figura 3.61 – Aplicação de pó revelador sobre as peças.

Decorridos 15 minutos de permanência no tanque de revelação (necessários para que o revelador possa trazer à superfície o líquido penetrante existente nos possíveis defeitos), as peças estão em condições de serem inspeccionadas com recurso a iluminação ultra-violeta (Figura 3.62).



Figura 3.62 – Impulsor durante a inspeção com iluminação ultravioleta.

3.2. Melhorias introduzidas durante a implementação industrial

Uma das prioridades aquando da transferência deste processo do ambiente laboratorial do INEGI para as instalações industriais da ZCP consistiu em testar a sua robustez numa situação o mais semelhante possível à de produção real. Com isso pretendia-se não só ter uma percepção dos pontos fortes do processo, mas principalmente identificar os pontos mais problemáticos, sobre os quais deveria recair maior atenção.

Assim, durante o arranque do processo verificaram-se os seguintes problemas nas peças fundidas:

1. Linhas de fractura superficiais:

- Estas linhas são defeitos positivos que apareciam na maior parte das vezes no tarugo (no alinhamento do bordo de ataque), estendendo-se pela peça de forma contínua ao longo das suas alhetas e do seu corpo (Figura 3.63);

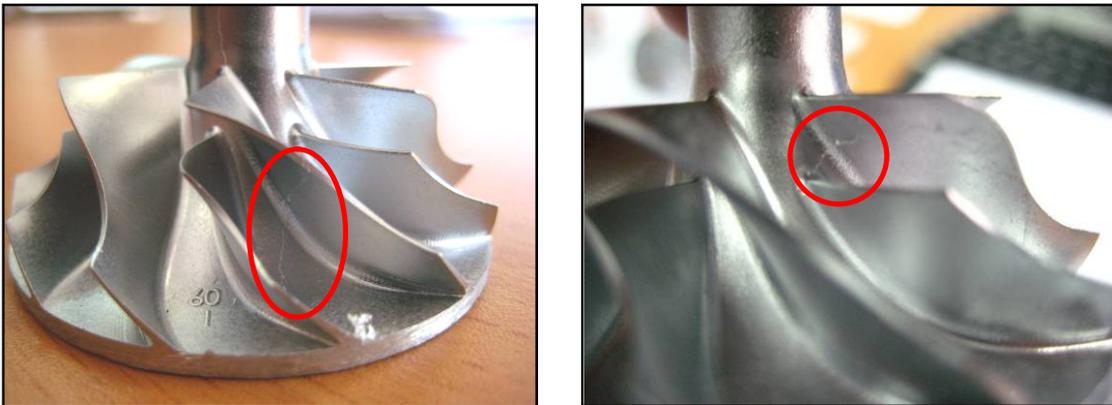


Figura 3.63 – Impulsores com fissuração superficial.

- Quando aparece desta forma, este defeito é motivo para reprovação imediata da peça, uma vez que dificilmente a sua reparação poderá ser efectuada sem deixar marcas superficiais na mesma.

2. Bolhas superficiais:

- Apesar de algumas vezes também surgirem nas superfícies do corpo e da base, e na superfície superior das alhetas, estas bolhas apareciam sobretudo na superfície inferior das alhetas e na concordância entre estas e o corpo (Figura 3.64);
- Apesar das peças serem recuperáveis quando as bolhas aparecem na superfície das alhetas, quando elas surgem na concordância entre estas e o corpo dificilmente a recuperação se executa sem deixar vestígios;
- Mesmo sendo as peças recuperáveis, este defeito deve ser evitado ao máximo, para incutir a cada peça o mínimo de custo de recuperação.

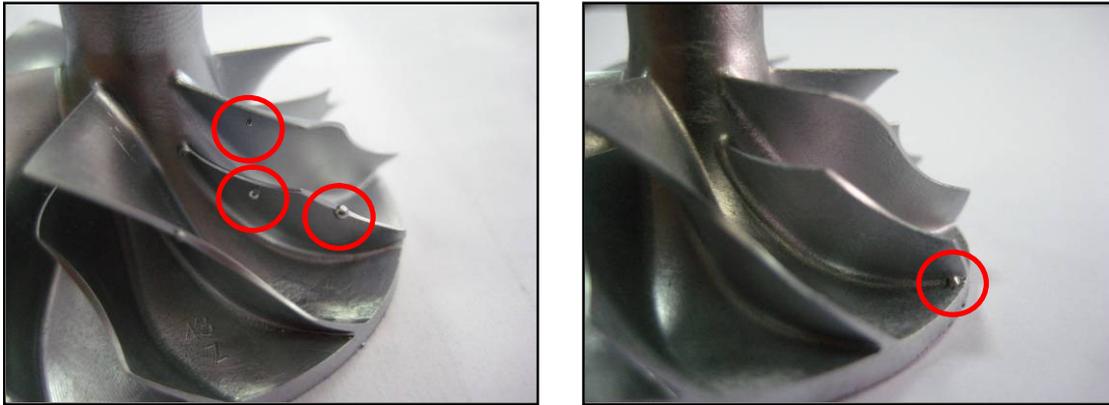


Figura 3.64 – Impulsores com bolhas superficiais.

3. Reacções superficiais metal-gesso:

- Estas reacções eram algo “violentas” na forma em que se manifestavam, ao impedir muitas vezes o enchimento total da cavidade (Figura 3.65);



Figura 3.65 – Impulsor com vestígios de reacção metal-gesso.

- Obviamente, este defeito motiva a reprovação imediata da peça.

4. Filmes de óxidos na microestrutura (Figura 3.66):

- Os filmes de óxidos existentes apareciam maioritariamente na superfície da base dos impulsores, como resultado de esta ser a zona preenchida com o metal que segue na frente de enchimento da cavidade aquando do vazamento, e que por isso sofre mais oxidação;
- Sendo o pior pesadelo dos fabricantes de turbocompressores, se detectados, os filmes de óxidos motivam a reprovação imediata do impulsor em causa. Tal prende-se com o facto de hoje em dia eles serem responsáveis pela maior parte das falhas dos “turbos” em serviço, ao serem o ponto inicial de propagação de fissuras de fadiga oligocíclica (tipo de fadiga a que o conjunto impulsor/turbina mais está sujeito devido às constantes acelerações e desacelerações num curto espaço de tempo);

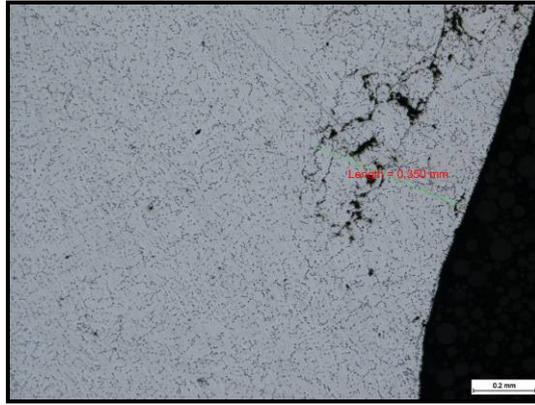


Figura 3.66 – Filme de óxido num impulsor.

- Tendo em conta os 2 pontos atrás referidos e a Figura 3.67, que mostra a distribuição de esforços num impulsor em funcionamento, torna-se fácil perceber a gravidade da presença de filmes de óxido nestes componentes.

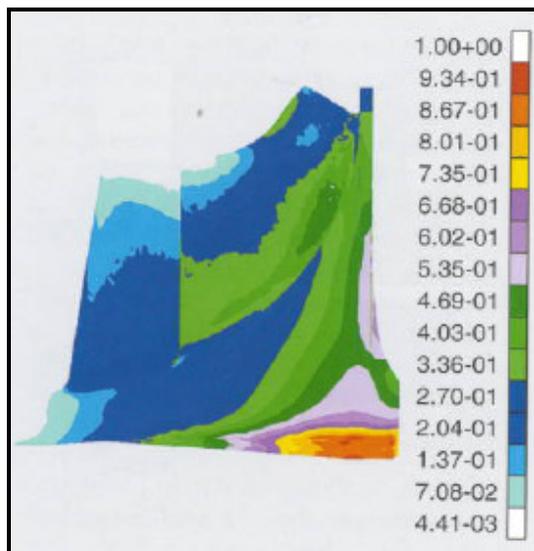


Figura 3.67 – Distribuição de esforços num impulsor em funcionamento [Mayer, 1996].

Tendo merecido bastante atenção de toda a equipa, na altura procurou-se não só identificar correctamente e isolar cada um destes problemas, como identificar todas as possíveis causas de ocorrência dos mesmos. Deste modo, para os problemas acima referidos foram apontadas as seguintes possíveis causas, também resumidas na Tabela 3.1.

1. Linhas de fractura superficiais:

- Resistência mecânica do gesso insuficiente:
 - Se o gesso não apresentar uma resistência mecânica suficiente para suportar os esforços a que a moldação está sujeita durante a desmoldação (estado “verde”), ou durante o vazamento de alumínio (estado seco), esta

irá ceder e fracturar, originando linhas de fractura nas peças vazadas.

- Temperatura e/ou tempo de secagem excessivos:
 - Na presença de uma secagem demasiado extensa ou efectuada a uma temperatura demasiado alta, as camadas mais superficiais das moldações tendem a sofrer decomposição química e excessiva contracção, aumentando a probabilidade de ocorrência de fissuração.

2. Bolhas superficiais:

- Bolhas de ar presentes na superfície das moldações, na zona das cavidades (Figura 3.68):



Figura 3.68 – Bolhas de ar na superfície de uma moldação.

- A formação destas bolhas de ar ocorre geralmente durante o vazamento da barbotina nas placas-molde;
- Uma vez fixas aos modelos em silicone, estas bolhas apresentam alguma dificuldade em se libertarem deles, muito por culpa da tensão superficial da barbotina.

3. Reacções superficiais metal-gesso:

- Secagem incompleta das moldações:
 - Este problema resulta directamente da presença de humidade nas moldações. Ao ser aspirado, o metal sobe pelos tubos de aspiração e entra na cavidade da moldação. Se esta não estiver completamente seca irá então haver uma reacção entre a liga e os vestígios de humidade ainda existentes, com conseqüente formação de vapor de água sob pressão, originando o problema sentido.

4. Filmes de óxidos na microestrutura:

- Turbulência durante o enchimento das cavidades com alumínio:
 - Havendo turbulência durante o trajecto do metal desde o banho até ao enchimento completo das cavidades da moldação, irá haver não só uma maior superfície do metal exposta à atmosfera e à oxidação, como o metal

entretanto oxidado irá ser “engolido” pelo fluxo turbulento. Desta forma não só haverá mais filmes de óxidos (óxidos novos), como os filmes entretanto formados serão incorporados no seio do metal, aparecendo espalhados pelo fundido.

Tabela 3.1 – Possíveis causas dos problemas existentes aquando da implementação industrial do processo.

Problemas	Possíveis causas	Secção a intervir
Linhas de fractura superficiais	Resistência mecânica do gesso insuficiente	Moldações
	Temperatura e/ou tempo de secagem excessivos	Secagem de moldações
Bolhas superficiais	Bolhas de ar na superfície das moldações	Moldações
Reacções superficiais metal-gesso	Secagem incompleta das moldações	Secagem de moldações
Filmes de óxidos na microestrutura	Turbulência durante o enchimento das cavidades	Fusão

Seguidamente far-se-á então uma descrição da metodologia adoptada na tentativa de resolução de cada um destes problemas.

3.2.1. Linhas de fractura superficiais

3.2.1.1. Resistência mecânica do gesso insuficiente

Sabendo estar na presença do gesso usado pelos restantes fabricantes de impulsores a nível mundial (sendo por isso a opção mais sensata), e partindo da formulação base já usada, optou-se por aumentar a resistência mecânica das moldações à custa da redução da quantidade de água presente em cada uma delas.

Para tal foi efectuado um trabalho de afinação desta formulação ao processo existente na ZCP, no qual, depois de contactar com o processo no terreno, o produtor de gesso se limitou a preparar o mesmo para, na presença de menos água (inicialmente usava-se uma proporção água/gesso recomendada de 1,23 ; no final da afinação esta proporção era de 1,15), apresentar um comportamento melhor que o inicial, nomeadamente em termos de:

- *Resistência à flexão:*
 - Objectivo: aumentar face à formulação inicial.
- *Permeabilidade:*
 - Foi inevitável uma redução de permeabilidade com esta alteração da

proporção água/gesso de 1,23 para 1,15.

- *Fluidez durante o vazamento:*
 - Objectivo: manter a fluidez da formulação inicial.
- *Evolução da viscosidade com o tempo:*
 - Objectivo: atrasar ao máximo o início da cura do gesso (e logo o início do aumento da viscosidade da barbotina), para se dispor do máximo tempo de trabalho possível.
- *Tempo de cura:*
 - Objectivo: diminuir o tempo de cura, e logo o tempo de desmoldação face à formulação inicial.

Para efectuar este trabalho foi crucial a existência de meios laboratoriais (não só no produtor de gesso, como também no Laboratório de Cerâmica da ZCP) de ensaio e de medida das propriedades do gesso directamente afectadas com a modificação da formulação. Entre esses ensaios temos:

- **Ensaio de flexão em 3 pontos:**
 - Este ensaio é efectuado sobre um provete de gesso de forma paralelepípedica (140×25×10mm) (Figura 3.69) (obtido por vazamento da barbotina num molde) numa máquina de ensaio de flexão em 3 pontos (Figura 3.70 e Figura 3.71), com uma distância entre apoios de 100mm.



Figura 3.69 – Provete de gesso para ensaio de flexão em 3 pontos.



Figura 3.70 – Máquina de ensaio de flexão em 3 pontos.

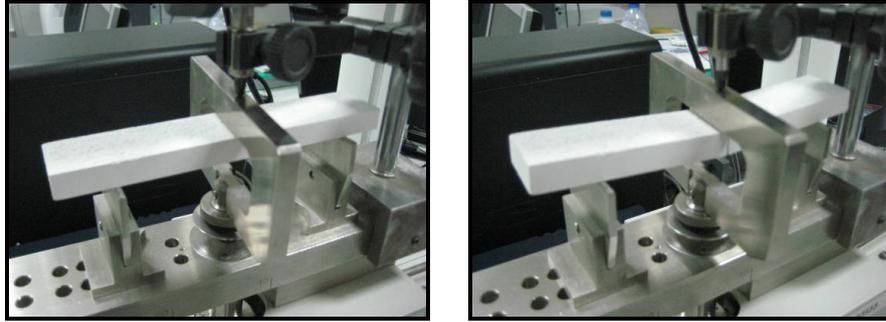


Figura 3.71 – Ensaio de flexão em 3 pontos sobre um provete de gesso.

• **Ensaio de permeabilidade:**

- Este ensaio é efectuado sobre um provete de gesso de forma cilíndrica ($\text{Ø}49 \times L12\text{mm}$) (Figura 3.72) (obtido por vazamento da barbotina num molde em silicone) num dispositivo de ensaio de permeabilidade (Figura 3.73). Este dispositivo submete inicialmente o provete a uma diferença de pressão de 700mbar (um dos lados do provete está à pressão atmosférica, enquanto o outro se encontra sob um vácuo relativo de -700mbar), sendo a permeabilidade estimada (de uma forma relativa) pelo tempo que o sistema leva a igualar a pressão de ambos os lados do provete.



Figura 3.72 – Provete de gesso para ensaio de permeabilidade.

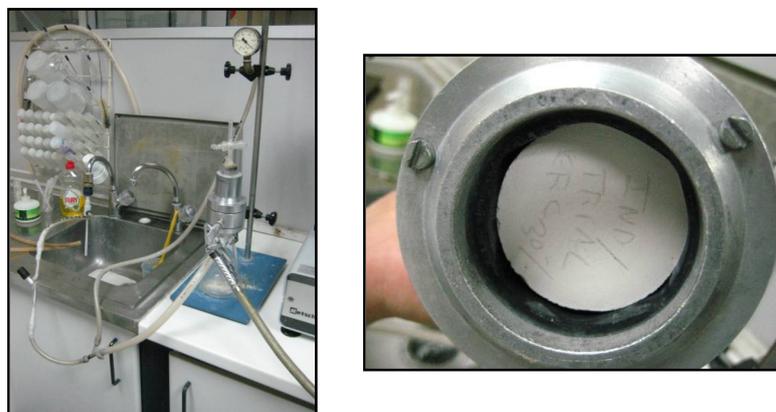


Figura 3.73 – Dispositivo de ensaio de permeabilidade, e colocação do provete no mesmo.

- **Ensaio de fluidez:**

- Este ensaio é efectuado com recurso a um simples tubo cilíndrico de dimensões bem definidas ($\text{Ø}_{\text{int}}30 \times 103\text{mm}$), que é cheio de barbotina e logo depois levantado na perpendicular à placa em que está assente, deixando que aquela se espalhe livremente (Figura 3.74). Forma-se assim um círculo de gesso com um diâmetro que é calculado pela média de dois diâmetros medidos perpendicularmente um ao outro, e que dá uma indicação directa da fluidez do gesso na altura do vazamento.



Figura 3.74 – Ensaio de fluidez de gesso.

- **Ensaio de viscosidade:**

- Este ensaio é efectuado com recurso a uma máquina de ensaio de viscosidade *Sheen Digital Rotoviscometer 455N/15* (Figura 3.75), a qual apenas se limita a medir a evolução da viscosidade da barbotina com o tempo, por medição do binário oferecido pela mesma à rotação de um disco perfurado (Figura 3.76) que nela se encontra mergulhado (Figura 3.76). Normalmente, um parâmetro indicativo desta viscosidade é o tempo que leva a atingir o valor de 3 Poise.



Figura 3.75 – Máquina de ensaio de viscosidade *Sheen Digital Rotoviscometer 455N/15*, e respectivo disco perfurado.

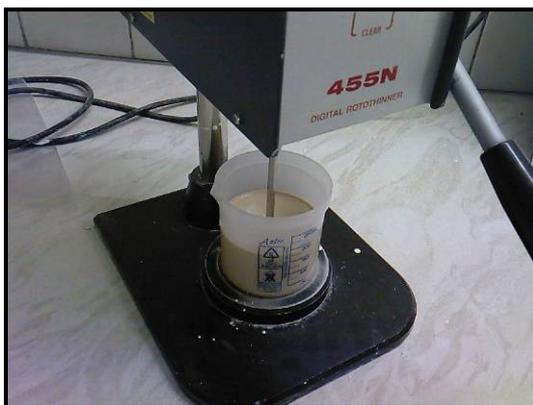


Figura 3.76 – Ensaio de viscosidade de gesso.

Na Tabela 3.2 encontram-se comparadas a formulação de gesso inicial e final em termos do seu comportamento médio global.

Tabela 3.2 – Comportamento das formulações de gesso antiga e nova.

Parâmetros	Formulação	
	Antiga	Nova
Proporção Água/Gesso	1,23	1,15
Resistência à flexão (MPa)	0,3043	0,4079
Permeabilidade -700 a 0mbar (seg.)	0:21	0:24
Fluidez (mm)	235	230
Viscosidade – Tempo para 3 Poise (min:seg)	6:10	7:30
Tempo de <i>gloss-off</i> (min:seg)	8:00	10:20
Tempo de cura (min:seg)	20:00	20:00

Com esta evolução na formulação do gesso conseguiu-se uma **redução de 18,2% na taxa global de sucata**.

3.2.1.2. Temperatura e/ou tempo de secagem excessivos

Como já se referiu, se as moldações de gesso forem secas durante demasiado tempo ou a uma temperatura demasiado elevada para o tipo de gesso, as suas camadas mais superficiais irão sofrer decomposição química e excessiva contracção, aumentando a probabilidade de ocorrência de fissuração.

Na expectativa de que este fenómeno também poderia estar a ser em parte responsável

pela presença de linhas de fractura nas peças, houve então a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o processo de secagem das moldações, nomeadamente sobre o comportamento das mesmas durante todo este ciclo. Para isso, utilizou-se um sistema informático de monitorização de temperaturas (sistema composto por um computador pessoal com um software *LabView 8.0*, ligado a uma placa de aquisição de dados analógica-digital *National Instruments TBX-68T*, da qual por sua vez saem 14 termopares tipo K a colocar nas moldações) (Figura 3.77) para determinar a evolução da temperatura de cada uma das 24 moldações existentes numa mufla totalmente cheia, durante vários ciclos térmicos de secagem impostos.



Figura 3.77 – Sistema informático de aquisição de dados, respectiva placa de aquisição analógica-digital *National Instruments TBX-68T*, e interface de comunicação com o operador.

O objectivo final deste ensaio passou por:

- Conhecer a evolução da temperatura no interior de uma moldação perante um determinado ciclo térmico imposto;
- Determinar a última região das moldações a secar, atendendo ao fluxo de ar quente a que estão sujeitas no interior das muflas de secagem;
- Determinar o tempo ao fim do qual a última região a secar de cada uma das 24 moldações existentes numa mufla apresenta uma temperatura estável e igual à presente no interior dessa mesma mufla (tempo de secagem);

- Determinar a ordem de secagem das 24 moldações em cada uma das 10 muflas existentes (apesar de apresentarem uma construção idêntica, cada mufla tem o seu comportamento próprio, diferente de todas as outras).

Uma das primeiras medidas tomadas antes de iniciar este conjunto de ensaios passou por numerar todos os tabuleiros de secagem de moldações presentes no interior de uma mufla da forma evidenciada na Figura 3.78 (TB1 a TB24).

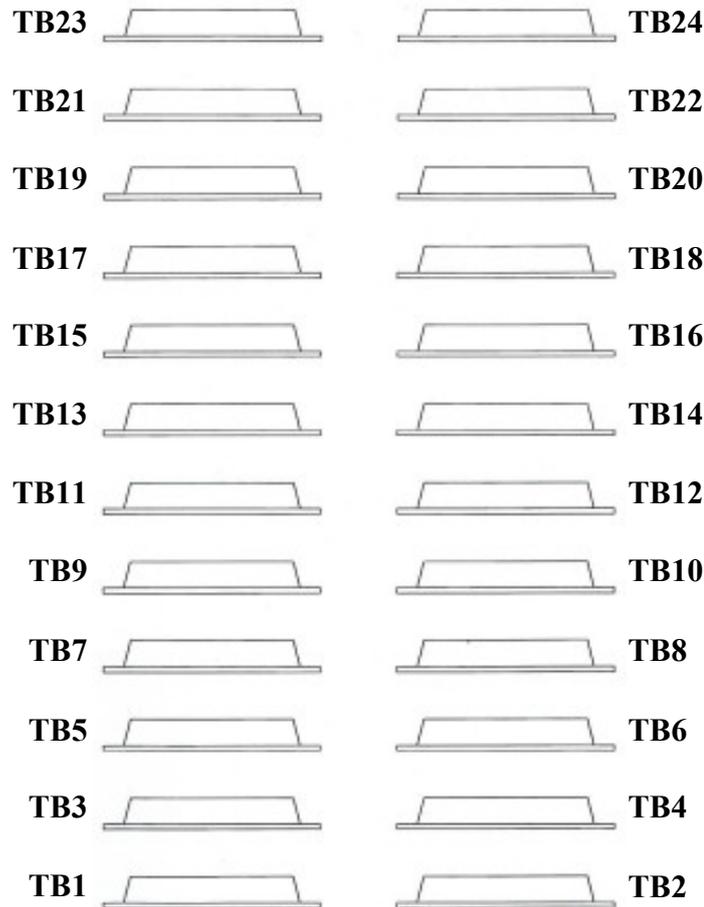


Figura 3.78 – Identificação de todos os tabuleiros de secagem de moldações presentes no interior de uma mufla.

Seguidamente apresenta-se então toda a metodologia de abordagem a cada um dos tópicos acima descritos.

3.2.1.2.1. Evolução da temperatura no interior de uma moldação perante um determinado ciclo térmico imposto

A evolução da temperatura no interior de uma moldação durante um ciclo de secagem foi inicialmente determinada através da simples colocação de 1 termopar no interior de uma das muflas de secagem (ao nível do tabuleiro TB2), e de outros 6 no ponto central (localizado no alinhamento do centro da moldação, a cerca de 22mm de distância ao tabuleiro)

(Figura 3.79) de 6 moldações colocadas nos tabuleiros TB7, TB8, TB9, TB10, TB23 e TB24.

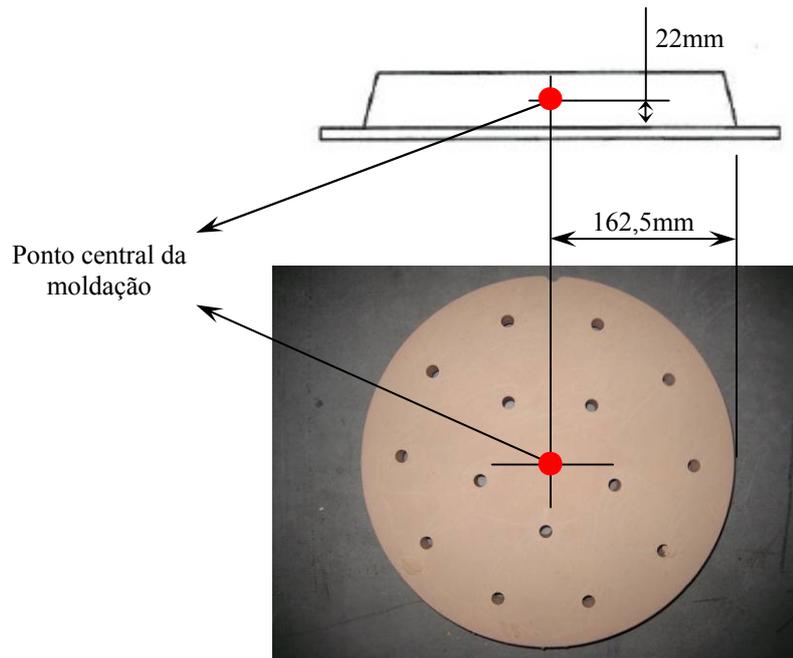


Figura 3.79 – Posicionamento do termopar de monitorização no ponto central da moldação.

Tendo sido aplicado um ciclo térmico bastante simples (basicamente fixou-se a temperatura de cada um dos programadores em 200°C, tendo a velocidade de subida até essa temperatura sido determinada pela potência máxima de cada mufla), após processamento da informação adquirida obteve-se o gráfico da Figura 3.80.

Pela análise do gráfico torna-se evidente que:

- Apesar de ambos os programadores imporem o ciclo térmico assinalado a vermelho, a temperatura no interior da mufla (linha verde alface) leva cerca de 3 horas (partindo do momento em que os programadores estabilizaram nos 200°C) a estabilizar a uma temperatura de cerca de 205°C;
- Devido às heterogeneidades de temperatura dentro da mufla, as 6 moldações monitorizadas não passam pelos mesmos estágios de secagem em simultâneo, nem apresentam exactamente a mesma temperatura final (neste caso, a temperatura final das 6 moldações encontra-se na gama dos 193 aos 205°C, correspondentes às moldações dos tabuleiros TB24 e TB7, respectivamente). Contudo, isto não constitui nenhum problema, uma vez que o processo é tolerante a uma heterogeneidade desta magnitude (nomeadamente no que toca à influência desta temperatura de pré-aquecimento das moldações sobre o enchimento das alhetas e na microestrutura dos impulsores, principalmente ao nível das suas alhetas);

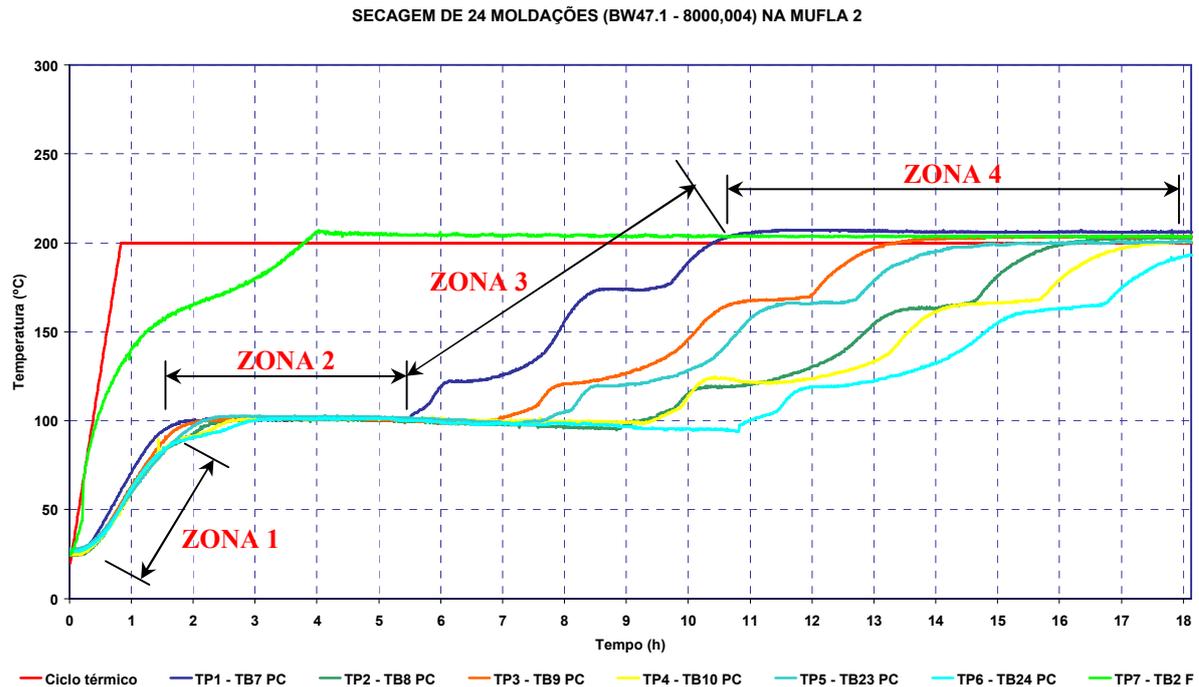


Figura 3.80 – Monitorização da evolução da temperatura no ponto central de 6 molações, durante um ciclo de secagem de 24 molações efectuado a 200°C (temperatura fixa) na mufla 2.

- Devido à subida da temperatura no interior da mufla, no início do ciclo de secagem (ZONA 1) ocorre uma subida da temperatura das molações, que é tanto mais rápida quanto maior for a velocidade de subida daquela;
- Na ZONA 2 a temperatura das molações não sobe acima dos 100°C durante um período que pode ser encurtado com o aumento da temperatura no interior da mufla. Neste caso, só após cerca de 5,5 horas após o início do ciclo ocorre uma subida da temperatura na molação do tabuleiro TB7, seguindo-se as molações dos tabuleiros TB9 (≈ 7 horas), TB23 ($\approx 7,3$ horas), TB2 ($\approx 9,2$ horas), TB10 ($\approx 9,3$ horas) e TB24 ($\approx 10,8$ horas);
- Após a subida deste patamar (ZONA 3), a secagem das molações passa por 2 estágios mais ou menos bem definidos em torno dos 120/125°C e dos 165/175°C, nos quais a sua temperatura estabiliza ligeiramente. Apesar de praticamente não haver informação disponível que permita justificar estes estágios, pensa-se que eles correspondem à transição do estado hidratado para o hemihidratado, e deste para o desidratado (de acordo com a consulta bibliográfica efectuada [P.M.C.A., 1983]);
- Uma vez estabilizada a temperatura das molações (ZONA 4), ela mantém-se estável até que estas são retiradas para o vazamento. Contudo, um estágio demasiado moroso nesta zona da curva de secagem levará à fragilização da molação, com aumento da probabilidade de ocorrência de fissuração da mesma.

3.2.1.2.2. Determinação da última região das moldações a secar

A determinação da última região das moldações a secar foi efectuada de modo exaustivo por colocação de 11 termopares em moldações colocadas em todas as posições do interior das muflas de secagem, de acordo com o seguinte esquema de posicionamento.

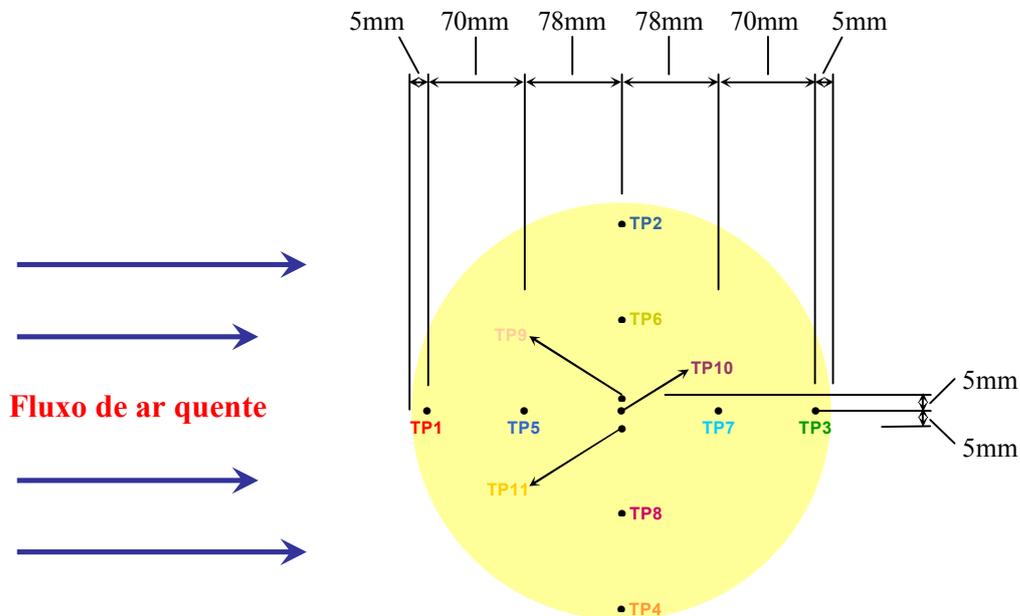


Figura 3.81 – Posicionamento dos termopares de monitorização na moldação.

À excepção dos termopares TP9 e TP11 (colocados a cerca de 5mm de distância do tabuleiro e da superfície, respectivamente), todos os restantes foram colocados ao nível da secção média da moldação (secção paralela ao tabuleiro, que passa no ponto central da moldação), ou seja, a cerca de 22mm do tabuleiro.

Devido ao facto de em todas os tabuleiros das muflas a ordem de secagem ter sido sensivelmente a mesma, apenas se irão apresentar os resultados da monitorização efectuada às moldações com a secagem mais rápida e mais lenta (a determinação da ordem de secagem das moldações irá ser apresentada no ponto 3.2.1.2.4) na maior parte das muflas, isto é, as moldações dos tabuleiros TB5 e TB24, respectivamente.

Observando os 2 gráficos de monitorização (Figura 3.82 e Figura 3.83), facilmente se chega à conclusão que:

- Dos 11 pontos monitorizados, em ambas as moldações a última zona a secar corresponde à monitorizada pelo termopar TP7 (curva azul clara);
- Não existem grandes diferenças entre a velocidade de secagem das secções média (representada pelo termopar TP10) e inferior (representada pelo termopar TP9) da moldação.

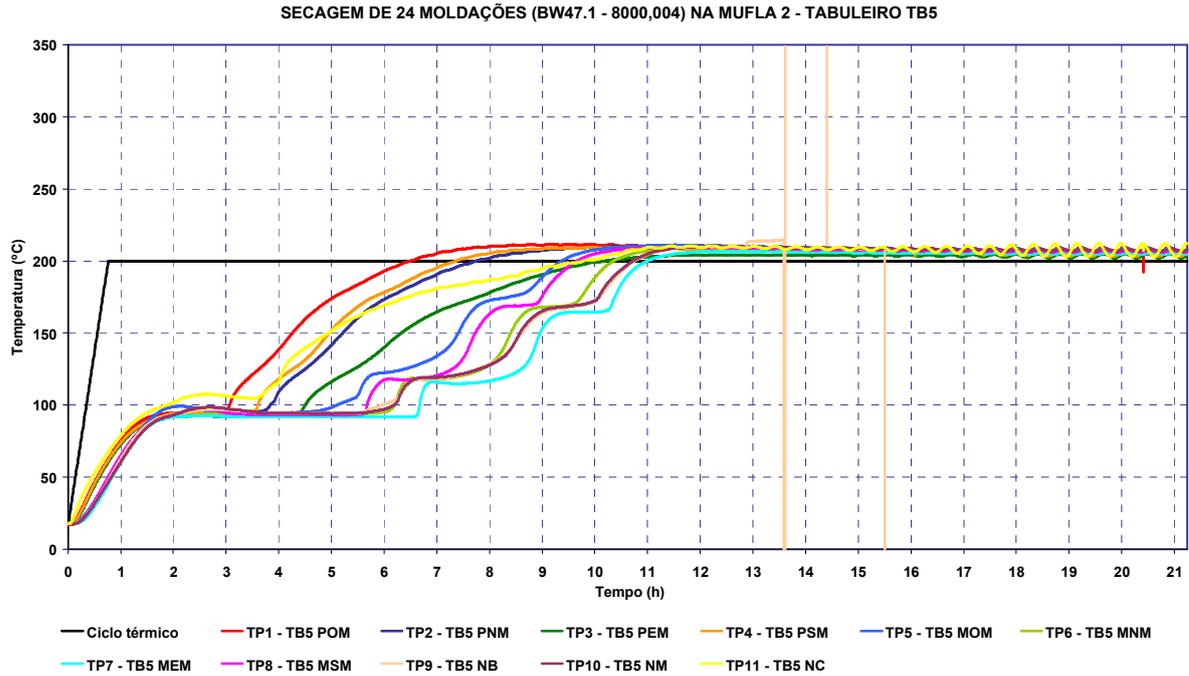


Figura 3.82 – Monitorização da evolução da temperatura em 11 diferentes pontos de uma moldação seca no tabuleiro TB5, durante um ciclo de secagem de 24 moldações efectuado a 200°C (temperatura fixa) na mufla 2.

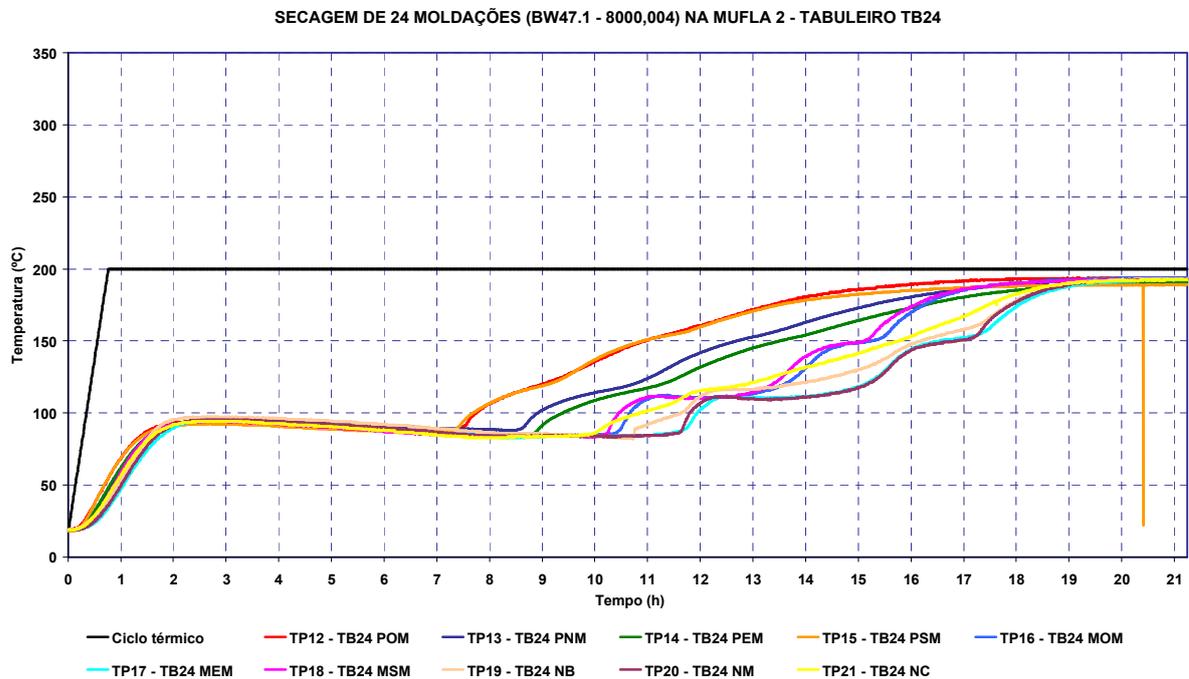


Figura 3.83 – Monitorização da evolução da temperatura em 11 diferentes pontos de uma moldação seca no tabuleiro TB24, durante um ciclo de secagem de 24 moldações efectuado a 200°C (temperatura fixa) na mufla 2.

Perante estes resultados, convencionou-se assim que a localização do último ponto a

secar seria a referida na Figura 3.84.

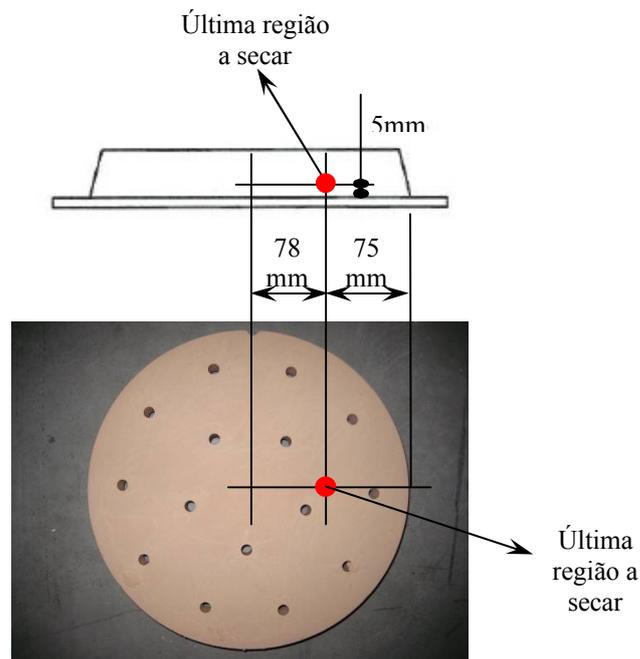


Figura 3.84 – Última região das moldações a secar.

3.2.1.2.3. Determinação do tempo de secagem das 24 moldações de uma mufla

Tendo como imposições:

- As 24 horas de um dia como duração máxima da secagem de todas as 24 moldações de uma mufla (por questões de produtividade e gestão da produção),
- Uma temperatura de estágio máxima de 250°C para o gesso (acima desta temperatura ocorre decomposição química, e logo fragilização da moldação), e
- Uma velocidade máxima estimada de arrefecimento das moldações secas de 50°C/h,

entretanto começou-se então a tentar determinar quais os ciclos de secagem mais apropriados para cada tipo de moldação.

Para isso, optou-se por iniciar a abordagem com o ciclo térmico representado na Figura 3.85, tendo sido monitorizada a secagem de todas as 24 moldações (na última zona a secar de cada uma delas) em cada uma das 10 muflas.

Assumindo que:

- Uma moldação está convenientemente seca e pronta a vazar a partir do momento em que a sua temperatura interior estabiliza em torno do valor de temperatura do interior da mufla, e que
- As moldações de uma mufla estão prontas a ser vazadas a partir do momento em que apresentem uma temperatura estável e igual à temperatura imposta,

na Tabela 3.3 encontram-se então resumidos os tempos de secagem obtidos para cada uma das

10 muflas, bem como as temperaturas média, máxima e mínima de todas as moldações.

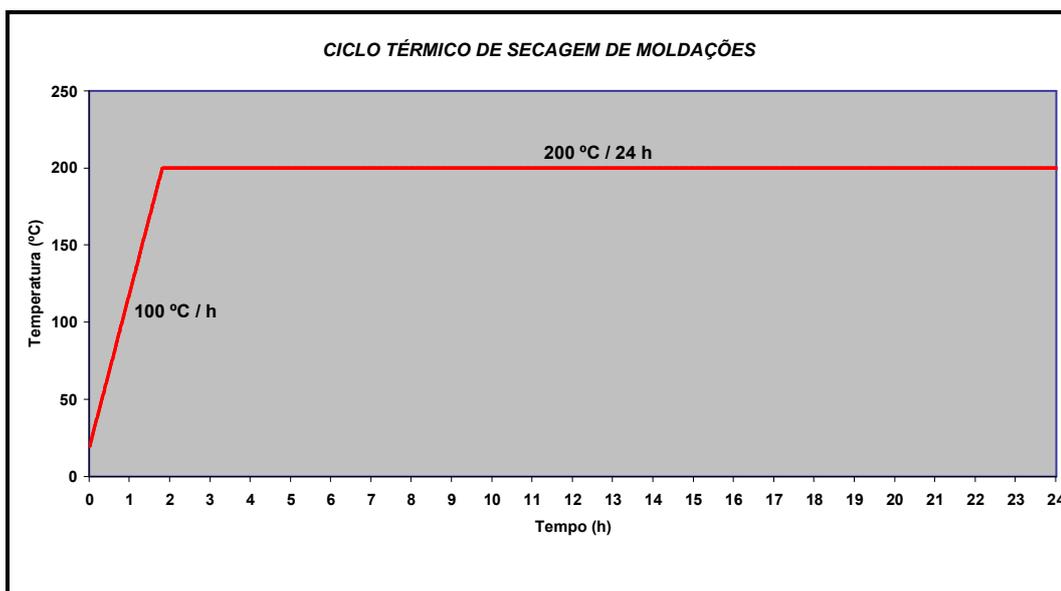


Figura 3.85 – Ciclo térmico inicialmente imposto para determinação do tempo de secagem das 24 moldações de uma mufla.

Tabela 3.3 – Tempos de secagem e temperaturas média, máxima e mínima de todas as moldações, nas 10 muflas de secagem actualmente existentes na ZCP.

Mufla de secagem	Tempo total (h)	Temperaturas (°C)				
		Média	Máxima	Mínima	Amplitude térmica	Desvio-padrão
1	19,5	197	203	192	11	3,075
2	19,5	199	223	189	34	6,439
3	19,0	205	213	193	20	5,183
4	20,0	198	222	190	32	6,421
5	20,0	193	198	185	13	3,092
6	22,0	196	203	191	12	3,516
7	22,0	197	204	189	15	4,065
8	22,0	200	210	189	21	5,208
9	20,0	201	215	192	23	4,785
10	23,0	197	204	187	17	5,028

Pela análise da tabela anterior podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- Apesar de apresentarem uma construção idêntica, todas as muflas de secagem apresentam o seu comportamento particular, diferindo entre si não só em termos das temperaturas absolutas (Temperatura média mais baixa: Mufla 5 → 193°C ; Temperatura média mais elevada: Mufla 3 → 205°C) como das amplitudes térmicas (Amplitude térmica mais baixa: Mufla 1 → 11°C ; Amplitude térmica mais elevada: Mufla 2 → 34°C) registadas no seu interior;
- Impondo o ciclo térmico de secagem da Figura 3.85 pode-se convencionar que **qualquer mufla está pronta a seguir para vazamento após 23 horas de ter iniciado esse ciclo.**

Face a estes resultados, e tendo presente a duração máxima do processo de secagem (24 horas), decidiu-se entretanto diminuir a velocidade de aquecimento do ciclo de secagem da Figura 3.85 de 100 para 50°C/h (ciclo de secagem G200, representado na Figura 3.14), com o único objectivo de também estimar o efeito prático da redução do choque térmico no aquecimento sobre a integridade das moldações verdes. Apesar de não se ter executado um plano formal de monitorizações de secagem, por medição local da temperatura das moldações (no seu último ponto a secar) após 24 horas de secagem na Mufla 10 (mufla menos performante em termos de duração de secagem, tal como evidencia a Tabela 3.3) constatou-se que todas elas se encontravam com temperaturas estabilizadas na ordem dos 200°C.

Através de testes já efectuados, constatou-se entretanto que a descida da temperatura de pré-aquecimento da moldação de 200 para 160°C contribui significativamente para uma melhoria microestrutural dos fundidos, pelo que recentemente se implementou um novo ciclo de secagem (ciclo de secagem P160) (Figura 3.86). Conseguindo secar todas as moldações de todas as muflas em cerca de 25 horas (já verificado por medições de temperatura locais, embora sem registo de monitorização) (insuficiente dado a necessidade de o fazer em 24 horas), este ciclo apenas acrescenta duas novas etapas ao ciclo de secagem G200: uma rampa de descida de 200 para 160°C (a uma velocidade de 40°C/h), e um estágio a 160°C.

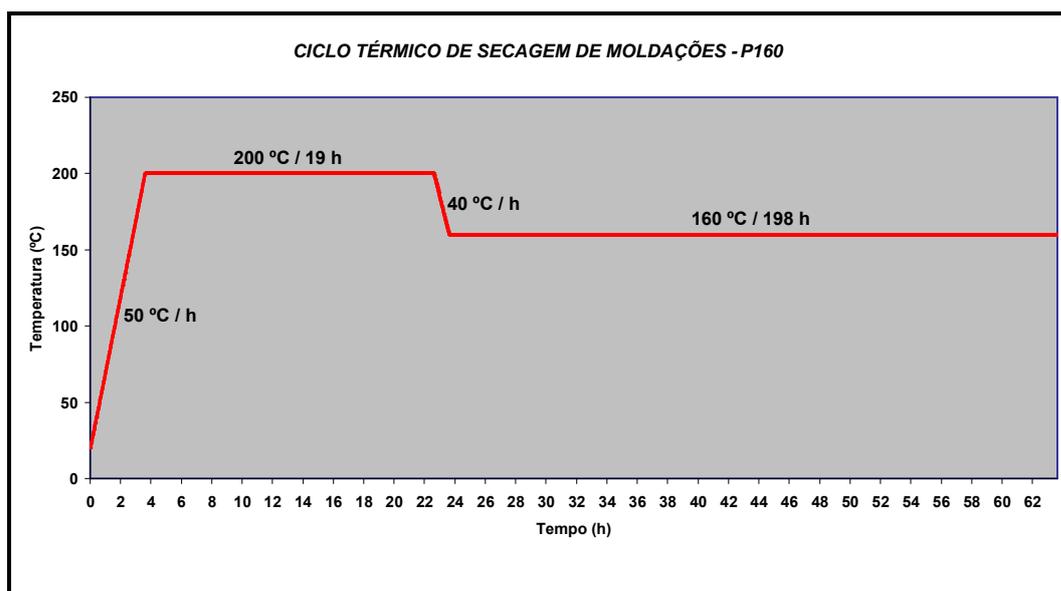


Figura 3.86 – Ciclo térmico P160 imposto na secagem de moldações de gesso (temperatura de pré-aquecimento de 160°C).

Contudo, ainda não foi executado um plano formal de monitorizações com este novo ciclo, uma vez que ainda estão previstas mais melhorias, principalmente em relação (Figura 3.87):

- À velocidade de aquecimento da primeira rampa (já se verificou que pode ser aumentada de 50 para 150 ou mesmo 200°C/h, sem comprometer a integridade das moldações, uma vez que a possibilidade de fragilização por choque térmico só se coloca quando as moldações estão secas);
- À substituição do estágio a 200°C durante 19 horas por outro a 250°C durante menos tempo (prevê-se que cerca de 12 ou 13 horas).

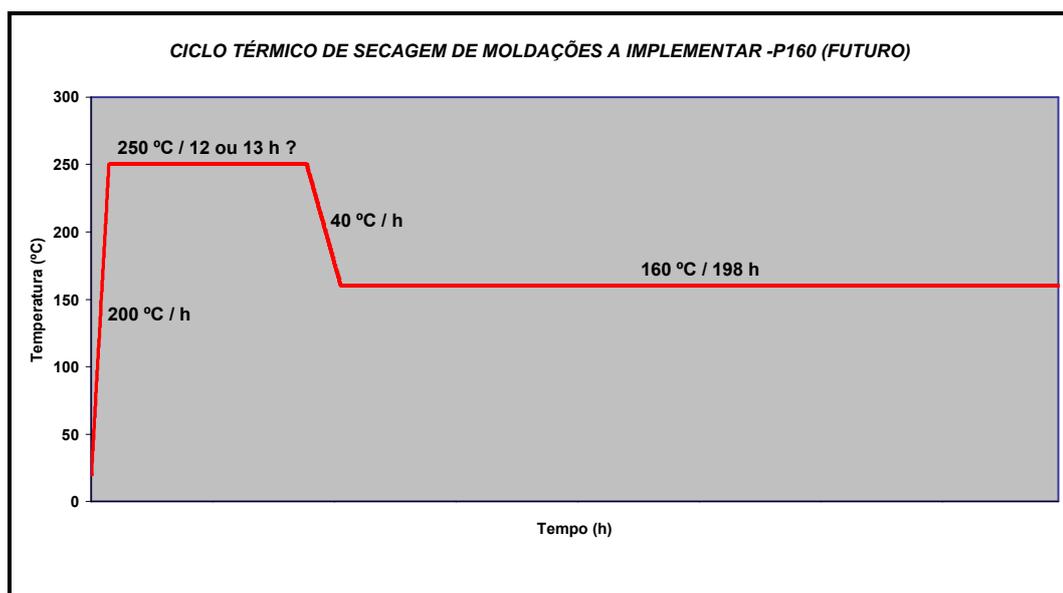


Figura 3.87 – Ciclo térmico a desenvolver para implementação em substituição do actual P160 na secagem de moldações de gesso.

Tais melhorias apenas têm em vista encurtar o tempo total de secagem para um valor bem inferior a 24 horas (espera-se um valor em torno das 17 horas), contribuindo assim para um aumento da produtividade e da flexibilidade de produção, sem comprometer de modo algum a integridade das moldações.

3.2.1.2.4. Determinação da ordem de secagem das 24 moldações de uma mufla

Assumindo as mesmas condições já descritas no ponto anterior, inclusive o ciclo térmico da Figura 3.85, através da monitorização realizada foi também possível determinar a ordem de secagem das 24 moldações presentes em cada uma das 10 muflas (Tabela 3.4).

Apesar de em termos práticos não ser tão relevante como o conhecimento da duração total do ciclo de secagem, tal vem mais uma vez ilustrar as diferenças de funcionamento entre cada uma das muflas, perante as mesmas condições.

Tabela 3.4 – Ordem de secagem das 24 moldações presentes em cada uma das 10 mufas de secagem actualmente existentes na ZCP.

Ordem de secagem	Mufas / Tabuleiro da moldação									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 ^a	19	17	19	5	3	5	5	5	5	3
2 ^a	17	15	17	3	5	3	3	3	3	5
3 ^a	5	5	5	17	17	7	7	7	7	17
4 ^a	3	19	3	7	7	19	19	6	4	7
5 ^a	7	3	21	15	15	17	6	8	6	15
6 ^a	21	7	15	19	19	15	17	9	9	19
7 ^a	13	21	7	9	13	9	15	17	11	4
8 ^a	9	23	13	13	4	21	21	19	8	13
9 ^a	11	13	18	6	11	13	8	15	13	9
10 ^a	23	9	9	8	6	11	9	11	17	11
11 ^a	20	18	20	21	9	6	13	13	15	6
12 ^a	18	20	11	4	21	4	11	4	19	8
13 ^a	22	11	16	18	8	8	4	21	10	10
14 ^a	6	22	23	10	18	18	18	18	12	18
15 ^a	16	25	22	20	10	16	16	16	14	20
16 ^a	25	16	25	16	23	10	20	10	20	21
17 ^a	8	4	14	12	20	20	10	12	23	12
18 ^a	4	6	4	23	16	12	14	14	16	23
19 ^a	10	8	6	25	12	22	23	20	18	14
20 ^a	24	14	8	14	22	23	22	23	21	22
21 ^a	14	10	12	24	14	25	25	22	25	25
22 ^a	12	24	10	-	25	24	12	25	22	24
23 ^a	26	12	24	-	24	26	24	24	26	26
24 ^a	-	26	26	-	-	-	26	26	24	-

3.2.2. Bolhas superficiais

3.2.2.1. Bolhas de ar na superfície das moldações

Devido ao facto de estas bolhas se formarem geralmente durante o vazamento da barbotina nas placas-molde, tornou-se evidente que as atenções deveriam recair sobre a melhoria da vibração aplicada à mesa de fixação dessas placas, como forma de evitar que as bolhas permaneçam em contacto com os modelos em silicone durante e após o vazamento.

Seguidamente apresenta-se a abordagem efectuada no sentido da optimização desta vibração. Estando a correlação entre a escala de variação de frequência de vibração e o valor efectivo da mesma perfeitamente definida, para facilitar a explicação consideram-se os valores daquela escala (0,0 a 10,0).

3.2.2.1.1. Optimização da vibração durante o vazamento das moldações

O processo de optimização da vibração durante o vazamento das moldações foi efectuado inicialmente para minimizar a falta de eficácia de um sistema de vibração que estava longe de ser o melhor (motor eléctrico com massas excêntricas suspenso directamente na mesa). Assim, trabalhou-se no sentido de reduzir a quantidade de bolhas nos fundidos por ajuste da frequência de vibração do motor acoplado à mesa de vazamento de moldações.

Tendo em consideração que a vibração a impor deveria ter uma baixa frequência e uma elevada amplitude, tal restringiu logo ao início a gama total de frequências ao intervalo 8,0 a 9,0 da escala de regulação. Para atacar o problema, organizou-se então um desenho de experiências (DOE) que consistiu em efectuar 9 vazamentos de 3 moldações cada um (1 moldação em cada uma das 3 posições da mesa vibratória de vazamento) com 3 frequências de vibração distintas. Assim, para cada uma das frequências efectuaram-se:

- 3 vazamentos (9 moldações) com uma frequência correspondente ao valor 8,0 na escala;
- 3 vazamentos (9 moldações) com uma frequência correspondente ao valor 8,5 na escala;
- 3 vazamentos (9 moldações) com uma frequência correspondente ao valor 9,0 na escala.

Os resultados foram contabilizados por contagem do número total de bolhas presentes em cada um dos 15 impulsores de cada moldação vazada. Contudo, por uma questão de espaço, na Tabela 3.5 apenas está referido o número médio de bolhas presentes nas 3 moldações vazadas em cada posição da mesa, para cada frequência de vibração.

Adicionalmente, com base no valor médio do número de bolhas de cada impulsor numa moldação foi possível obter os gráficos das Figura 3.88 a Figura 3.90, para cada uma das posições da mesa vibratória de vazamento.

Tabela 3.5 – Número médio de bolhas nas moldações vazadas nas 3 posições da mesa de vazamento, com várias frequências de vibração.

Valor da escala de vibração	Média / D. padrão	Posição da moldação	Número médio de bolhas na moldação
8,0	Média	1	15,3
		2	12,3
		3	3,7
	Desvio-padrão	1	1,15
		2	2,52
		3	0,58
8,5	Média	1	15,0
		2	14,3
		3	8,0
	Desvio-padrão	1	3,61
		2	3,06
		3	1,73
9,0	Média	1	7,7
		2	2,7
		3	9,7
	Desvio-padrão	1	0,58
		2	0,58
		3	0,58

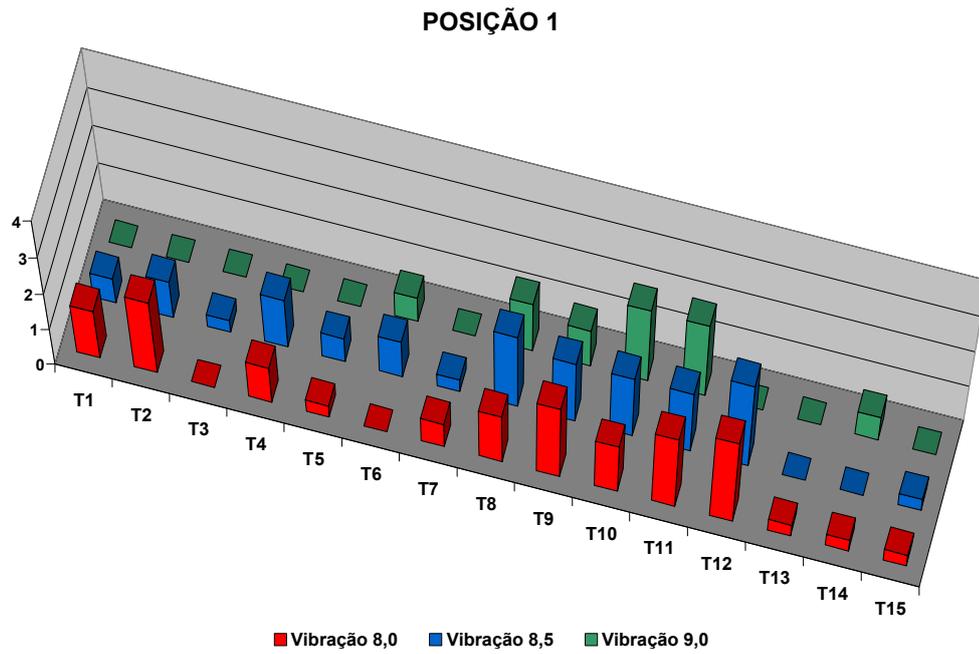


Figura 3.88 – Número médio de bolhas de cada impulsor numa moldação vazada na posição 1 (posição da direita) da mesa vibratória de vazamento, para cada uma das vibrações testadas.

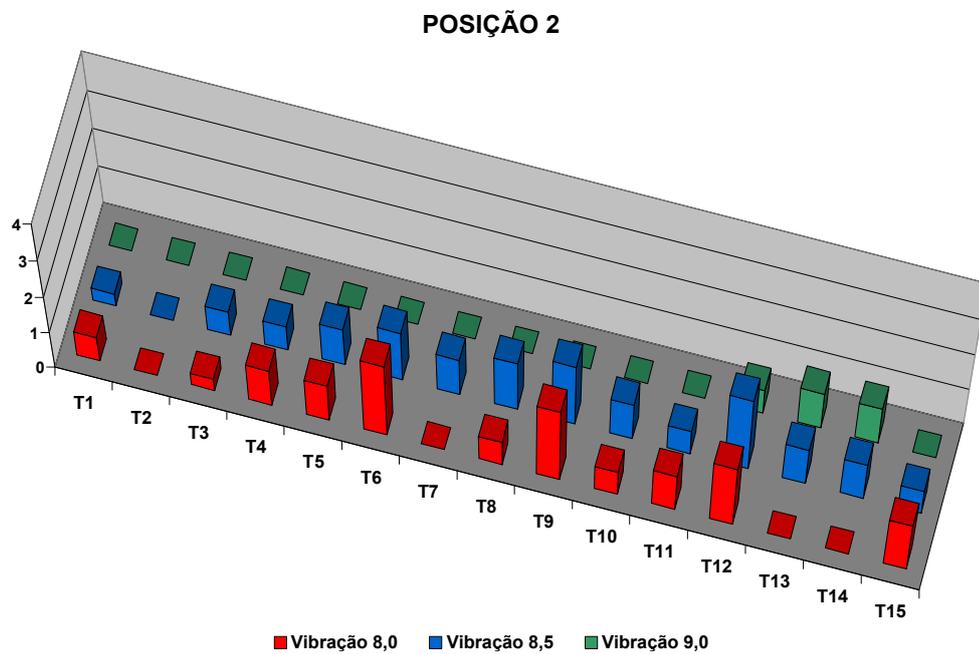


Figura 3.89 – Número médio de bolhas de cada impulsor numa moldação vazada na posição 2 (posição do meio) da mesa vibratória de vazamento, para cada uma das vibrações testadas.

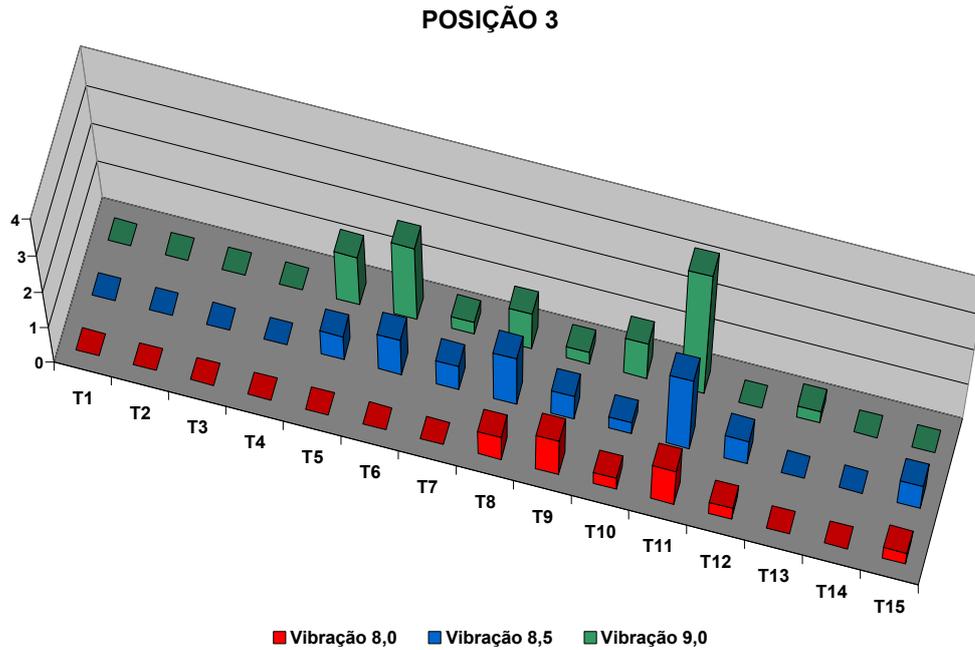


Figura 3.90 – Número médio de bolhas de cada impulsor numa moldação vazada na posição 3 (posição da esquerda) da mesa vibratória de vazamento, para cada uma das vibrações testadas.

A análise destes resultados permite tirar as seguintes conclusões:

- A falta de eficácia do sistema vibratório usado está bem patente na heterogeneidade existente não só entre as moldações vazadas nas 3 diferentes posições da mesa vibratória de vazamento, como entre moldações vazadas na mesma posição em vazamentos distintos (visível nos valores dos desvios-padrão);
- Em termos da quantidade média global de bolhas presentes nas 3 moldações vazadas de cada vez em cada uma das posições da mesa:
 - **A vibração correspondente à escala 9,0 é a mais eficaz** (7,7, 2,7 e 9,7 bolhas presentes em média por moldação vazada nas posições 1, 2 e 3, respectivamente);
 - A vibração correspondente à escala 8,0 surge em 2º lugar (15,3, 12,3 e 3,7 bolhas presentes em média por moldação vazada nas posições 1, 2 e 3, respectivamente);
 - A vibração correspondente à escala 8,5 é a menos eficaz (15,0, 14,3 e 8,0 bolhas presentes em média por moldação vazada nas posições 1, 2 e 3, respectivamente).
- As moldações vazadas na posição 1 da mesa apresentam menos bolhas à medida que se vai aumentando a frequência da vibração de 8,0 para 9,0 (15,3, 15,0 e 7,7 bolhas presentes em média por moldação vazada nas vibrações correspondentes às escalas 8,0, 8,5 e 9,0, respectivamente);
- As moldações vazadas na posição 2 da mesa apresentam ligeiramente mais

bolhas na frequência correspondente à posição 8,5 do que nas outras duas. Contudo, o melhor resultado é obtido na posição 9,0 (12,3, 14,3 e 2,7 bolhas presentes em média por moldação vazada nas vibrações correspondentes às escalas 8,0, 8,5 e 9,0, respectivamente);

- As moldações vazadas na posição 3 da mesa apresentam mais bolhas à medida que se vai aumentando a frequência da vibração de 8,0 para 9,0 (3,7, 8,0 e 9,7 bolhas presentes em média por moldação vazada nas vibrações correspondentes às escalas 8,0, 8,5 e 9,0, respectivamente).

Sabendo estar perante um sistema de vibração com as limitações já evidenciadas, entretanto recentemente procedeu-se à sua troca por um novo sistema de vibração por excêntrico (Figura 3.91).



Figura 3.91 – Sistema de vibração do posto de vazamento de moldações com um excêntrico.

Tal como mostra a Figura 3.91, este sistema é constituído por um motor, que se encontra fixo às pernas da mesa de vazamento, e que actua directamente sobre um excêntrico fixo ao tampo da mesa. Quanto maior for a excentricidade, maior será a amplitude da vibração imposta, sendo esta sempre imposta num plano perpendicular ao eixo de rotação do motor.

Não tendo ainda havido disponibilidade suficiente para comprovar numericamente a superior eficiência deste novo sistema face ao antigo, pela visualização dos vazamentos e por uma primeira análise do estado dos fundidos, não existem quaisquer dúvidas que não só há maior uniformidade de vibração entre as 3 posições da mesa, como a quantidade global de bolhas nas peças diminuiu fortemente.

3.2.3. Reacções superficiais metal-gesso

Como já foi referido, este problema resulta directamente da presença de humidade nas moldações, devido ao vazamento das mesmas ainda não completamente secas.

A partir do momento em que o processo de secagem das moldações passou a estar controlado, tal como foi descrito no ponto 3.2.1.2, este problema pura e simplesmente deixou de ocorrer.

3.2.4. Filmes de óxidos na microestrutura

3.2.4.1. Turbulência durante o enchimento das cavidades

Tal como já foi referido anteriormente, se a deslocação do metal desde o banho até ao enchimento completo das cavidades da moldação for efectuada na presença de um regime de escoamento turbulento, irá haver não só uma maior superfície do metal exposta à atmosfera e à oxidação, como o metal entretanto oxidado irá ser “engolido” pelo fluxo turbulento. Desta forma não só haverá mais filmes de óxidos (óxidos novos), como os filmes entretanto formados serão incorporados no seio do metal, aparecendo espalhados pelo fundido.

Perante este panorama, e estando perante um processo 100% dependente do vácuo e da permeabilidade da moldação para realização de um vazamento, tornou-se claro a abrangência do trabalho a desenvolver:

- Uniformização das condições de aplicação de vácuo sobre todas as cavidades de uma moldação durante o vazamento de metal;
- Controlo sobre o regime do escoamento do metal ao longo do seu trajecto ascendente desde o banho até ao completo preenchimento da cavidade.

Seguidamente faz-se uma apresentação da abordagem efectuada a cada um dos tópicos acima descritos.

3.2.4.1.1. Uniformização das condições de aplicação de vácuo sobre todas as cavidades de uma moldação durante o vazamento de metal

A uniformização das condições de aplicação de vácuo sobre todas as cavidades da moldação tem por objectivo diminuir a perda de carga imposta pela moldação à proliferação do vácuo aplicado. Isto permite não só uma homogeneização natural na distribuição desse vácuo sobre todas as cavidades, como uma diminuição do seu valor de modo a assegurar um escoamento laminar do metal, sem comprometer o bom enchimento das peças.

No sentido de melhorar a distribuição do vácuo na moldação durante o vazamento de metal poder-se-ia:

- Aumentar a permeabilidade do gesso, e assim diminuir a perda de carga imposta pelo mesmo, ou
- Melhorar a geometria da moldação de modo a facilitar a aplicação do vácuo principalmente sobre os impulsores situados na zona mais interior da moldação.

Uma vez que a formulação de gesso já tinha sido optimizada principalmente para aumentar a sua resistência mecânica, encontrando-se no limite do desenvolvimento, cedo ficou claro que o único caminho a seguir seria a melhoria da geometria da moldação.

Para além das moldações com a superfície das cavidades completamente plana (geometria 1) (Figura 3.92) usadas até ao momento, decidiu-se então propor 2 novas geometrias alternativas a testar: as geometrias 2 (Figura 3.93) e 3 (Figura 3.94).

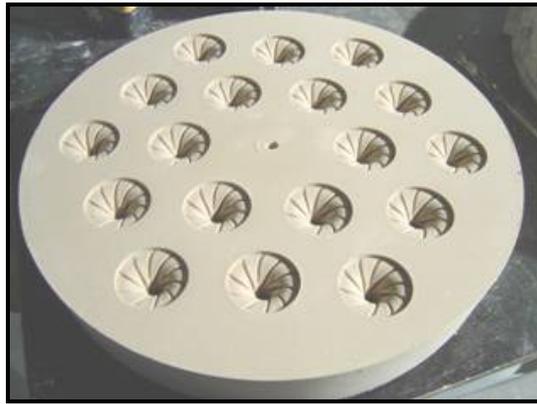


Figura 3.92 – Moldação com geometria 1.

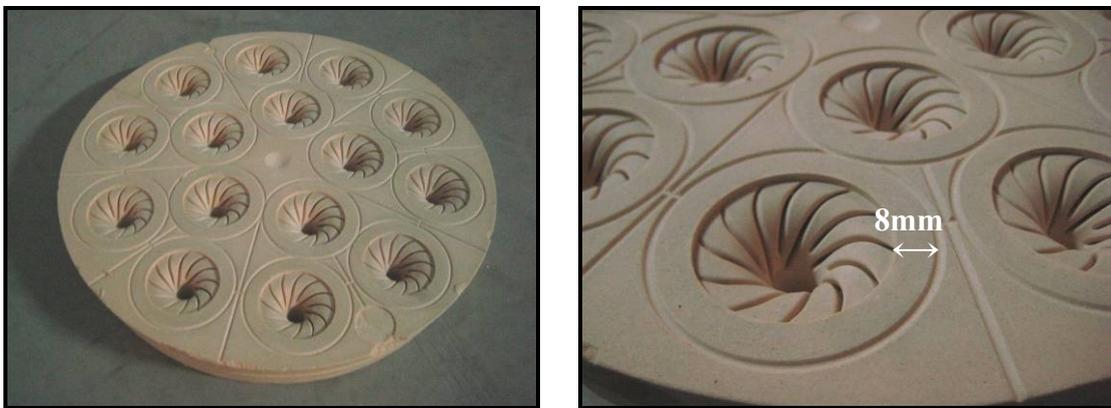


Figura 3.93 – Moldação com geometria 2.



Figura 3.94 – Moldação com geometria 3.

A geometria 2 acrescenta à geometria 1 um sistema de canais de vácuo em forma de meia-cana, com 1mm de profundidade, não só a envolver todas as cavidades (a uma distância de 8mm delas), como a estabelecer a comunicação de cada uma delas com a periferia da moldação (onde o vácuo é aplicado).

Já a geometria 3 foi obtida aplicando um rebaixamento da superfície da moldação com geometria 1 em cerca de 2mm, com excepção da região envolvente de cada cavidade numa extensão de 9mm.

Tendo todo a experiência de vazamento sido acumulada até aí com recurso a moldações com a geometria 1, sabia-se de antemão que o aparecimento dos primeiros impulsores mal-cheios ocorria quando o valor relativo do vácuo aplicado atingia os -300mbar. Decidiu-se então executar um simples DOE, que consistiu em vazar 9 moldações de cada uma das 3 geometrias sob as mesmas condições de vazamento, mas sob níveis de vácuo distintos. Assim, para cada uma das geometrias vazaram-se:

- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -200mbar;
- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -250mbar;
- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -275mbar.

Os resultados foram contabilizados por contagem do número de alhetas da totalidade dos 15 impulsores de uma moldação que se encontravam mal-cheias (Figura 3.95) (cada um dos impulsores em causa tem 12 alhetas), encontrando-se expressos na Tabela 3.6 em termos de percentagem média.

Tabela 3.6 – Percentagem de alhetas mal-cheias no vazamento de moldações das 3 geometrias em teste, sob 3 níveis de vácuo distintos.

Geometria da moldação	Nº da moldação	Vácuo relativo (mbar)		
		-200	-250	-275
1	1	76 %	14 %	0 %
	2	84 %	10 %	0 %
	3	82 %	11 %	2 %
	Média	80,7 %	11,7 %	0,7 %
	D. padrão	4,16	2,08	1,15
2	1	24 %	0 %	0 %
	2	29 %	3 %	0 %
	3	24 %	1 %	0 %
	Média	25,7 %	1,3 %	0 %
	D. padrão	2,89	1,53	0

Geometria da moldação	N° da moldação	Vácuo relativo (mbar)		
		-200	-250	-275
3	1	14 %	0 %	0 %
	2	12 %	0 %	0 %
	3	12 %	0 %	0 %
	Média	12,7 %	0 %	0 %
	D. padrão	1,15	0	0

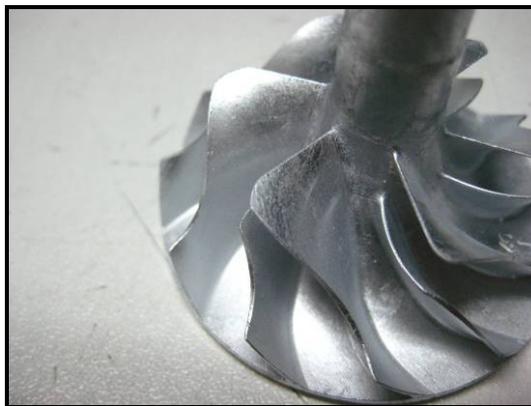


Figura 3.95 – Impulsor com alhetas mal-cheias.

Embora estes resultados não traduzam directamente a uniformidade da distribuição de vácuo nas várias cavidades de cada moldação, eles mostram claramente que:

- Em termos de redução do nível de vácuo mínimo necessário para vaziar peças bem-cheias:
 - **A geometria 3 é a mais eficaz** (12,7% de alhetas mal-cheias a -200mbar);
 - A geometria 2 surge em 2º lugar (25,7% de alhetas mal-cheias a -200mbar; 1,3% de alhetas mal-cheias a -250mbar);
 - A geometria 1 é a menos eficaz (80,7% de alhetas mal-cheias a -200mbar; 11,7% de alhetas mal-cheias a -250mbar; 0,7% de alhetas mal-cheias a -275mbar).
- Em termos de consistência de resultados entre vazamentos:
 - A geometria 3 é novamente a mais eficaz (desvio-padrão de 1,15 a -200mbar);
 - A geometria 2 surge em segundo lugar (desvio-padrão de 2,89 a -200mbar ; desvio-padrão de 1,53 a -250mbar);
 - A geometria 1 é mais uma vez a menos eficaz (desvio-padrão de 4,16 a -200mbar ; desvio-padrão de 2,08 a -250mbar).

Apesar de ter ficado claro que a geometria 3 se revelou a mais eficaz das 3 testadas, ela acabou por não ser adoptada, em detrimento da geometria 2. Tal decisão foi motivada pelo facto de:

- A geometria 3 limitar fortemente o diâmetro máximo do impulsor admitido por cada tipo de distribuição de placa-molde;
- Para diâmetros de impulsores maiores, haver o risco de quebra das paredes envolventes das cavidades, por excesso de pressão sobre as mesmas (devido à reduzida área de contacto com a placa de arrefecimento da câmara de vazamento de alumínio).

Outra experiência efectuada no sentido de evidenciar a uniformidade de distribuição de vácuo pelas cavidades da moldação, conseguida com a geometria 2, passou pelo vazamento de moldações, aplicando diferentes níveis de vácuo de valor muito reduzido, com o único intuito de sustentar a coluna de metal durante a sua solidificação em diferentes alturas, dentro do sistema de gitagem. Esse ensaio encontra-se resumido na Tabela 3.7.

A análise dos resultados obtidos no ensaio mostra claramente que **independentemente do nível de vácuo aplicado, se verifica uma uniformidade de altura das colunas de metal correspondentes a cada uma das cavidades**. Tal é mais uma prova da uniformidade de vácuo conseguida com o recurso à geometria 2.

3.2.4.1.2. Controlo sobre o regime de escoamento do metal ao longo do seu trajecto ascendente desde o banho até ao completo preenchimento da cavidade

Uma vez definida a geometria da moldação a adoptar, e na presença de todas as outras condições influentes no resultado do vazamento (tais como a permeabilidade e a temperatura da moldação, a temperatura dos tubos de aspiração, a temperatura da liga metálica, e a temperatura da placa de arrefecimento) devidamente definidas, apenas havia um trabalho de afinação a fazer, que passava por:

- Determinar o valor mínimo de vácuo necessário para não haver nenhuma probabilidade de aparecimento de peças mal-cheias;
- Confirmar a existência de uma gama de valores de vácuo (iniciada nesse valor mínimo) possíveis de aplicar de modo a simultaneamente ter peças bem-cheias, sem qualquer vestígio de turbulência (fosse ele a existência de poros interiores, ou óxidos superficiais ou internos).

Esse trabalho foi executado mais uma vez com recurso a um DOE, que consistiu em vazar 18 moldações da geometria 2 sob as mesmas condições de vazamento, mas sob níveis de vácuo distintos:

- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -225mbar;
- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -250mbar;
- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -275mbar;
- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -300mbar;
- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -325mbar;
- 3 moldações com aplicação de um vácuo relativo de -350mbar.

Tabela 3.7 – Ensaio da homogeneidade na distribuição do vácuo nas cavidades de uma moldação.

Vazamento	Vácuo relativo (mbar)	Fotografia	
1	-40		
2	-42		
3	-46		
4	-47		
5	-51		
6	-56		

Os resultados deste ensaio foram contabilizados mais uma vez por contagem do número de alhetas mal-cheias, e também por:

- Inspeção da porosidade interna com recurso à técnica de Raio X (Figura 3.96);

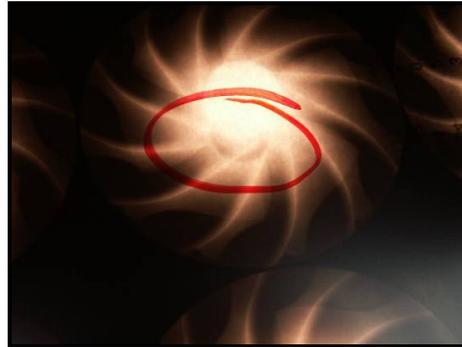


Figura 3.96 – Chapa de inspeção de um impulsor com um poro interno em Raio X.

- Inspeção da quantidade de impulsores por vazamento com filmes de óxido, com recurso à técnica de líquidos penetrantes (Figura 3.97) e à maquinagem da base dos mesmos (zona de maior probabilidade de acumulação de filmes de óxido) para inspeção visual da superfície maquinada (técnica que passa pela maquinagem de fatias da base de um impulsor, desde os 0,8 até aos 1,4mm de profundidade, em passos de 0,2mm) (Figura 3.98).



Figura 3.97 – Impulsor com óxidos superficiais, detectados por líquidos penetrantes.

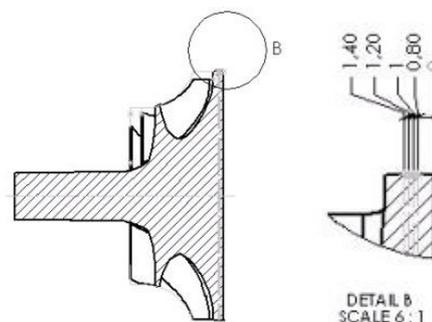


Figura 3.98 – Método de detecção de óxidos alojados na base de um impulsor, por maquinagem.

Os valores obtidos encontram-se expressos na Tabela 3.8, em termos de percentagem média de alhetas mal-cheias (regime laminar) e percentagem média de poros internos e filmes de óxido (regime turbulento).

Tabela 3.8 – Percentagem de alhetas mal-cheias (MC) (regime laminar), e de poros internos (PI) e filmes de óxido (OX) (regime turbulento) no vazamento de moldações da geometria 2, sob 6 níveis de vácuo distintos.

Nº da moldação	Vácuo relativo (mbar)					
	-225	-250	-275	-300	-325	-350
1	14 % (MC)	2 % (MC)	0 %	0 %	0 %	6 % (OX) ; 2 % (PI)
2	11 % (MC)	0 %	0 %	0 %	0 %	6 % (OX) ; 1 % (PI)
3	12 % (MC)	2 % (MC)	0 %	0 %	1 % (OX)	7 % (OX) ; 2 % (PI)
Média	12,3 % (MC)	1,3 % (MC)	0,0 %	0,0 %	0,3 %	6,3 % (OX) ; 1,7 % (PI)
D. padrão	1,53	1,15	0,00	0,00	1,58	0,58 (OX ; PI)

Os resultados obtidos mostram claramente que **a região segura para trabalhar se encontra entre os -275 e os -300mbar de vácuo relativo.**

De modo a complementar os resultados assegurados por este DOE, decidiu-se também recorrer ao precioso auxílio da monitorização dos vazamentos de alumínio nas moldações de gesso. Para tal utilizou-se um sistema informático de monitorização de vácuo e de temperatura, composto por um computador pessoal com um software *LabView 8.0*, ligado a uma placa de aquisição de dados analógica-digital *National Instruments Ni cDAQ-9172*, que recebe os sinais enviados por um conjunto de sensores de vácuo analógicos e por um conjunto de termopares fixos à placa de arrefecimento da câmara de vazamento (Figura 3.99).

Durante todo o ciclo de vazamento, este sistema permite assim determinar a evolução:

- Dos níveis de vácuo nas tubagens de “Vácuo Total” e de “Vácuo Parcial”, a partir de 2 sensores de vácuo analógicos *WIKA Transmitter S-10* (Figura 3.100);
- Dos níveis de vácuo na periferia e no centro da moldação a vazar, a partir de outros 2 sensores de vácuo analógicos *WIKA Transmitter S-10* fixos à placa de arrefecimento;
- Da temperatura de uma das peças da moldação vazada, e da água de arrefecimento da placa, a partir de 2 termopares do tipo K fixos à placa de arrefecimento da câmara de vazamento. É de referir que o termopar que mede a temperatura da peça também é usado para detecção do instante de contacto do metal aspirado do banho com a placa de arrefecimento.

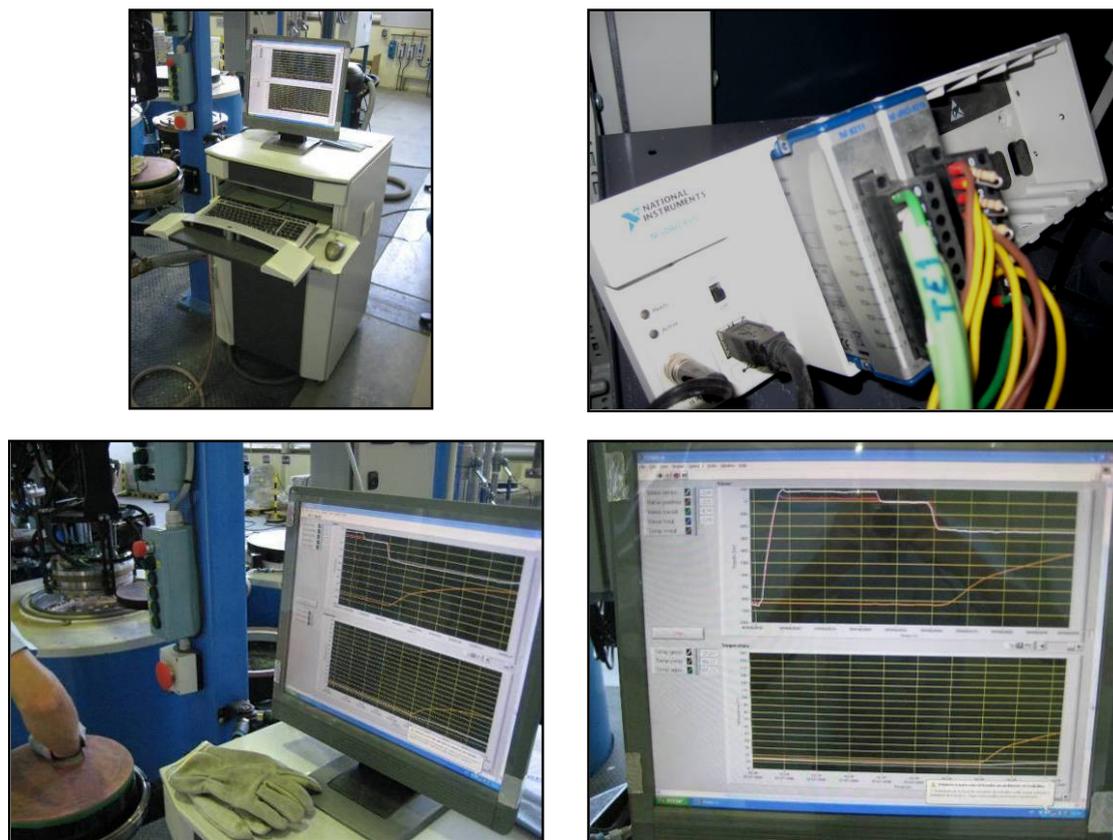


Figura 3.99 – Sistema informático de aquisição de dados, respectiva placa de aquisição analógica-digital *National Instruments Ni cDAQ-9172*, e interface de comunicação com o operador.



Figura 3.100 – Sensores de vácuo analógicos *WIK A Transmitter S-10* fixos às tubagens de “Vácuo Total” e “VácuoParcial”.

Apesar de ter um papel meramente auxiliar, não intervindo directamente no processo de vazamento, este sistema de aquisição permite fazer uma análise semelhante à executada pelo PLC de controlo e de aquisição de dados já descrito anteriormente, servindo-se inclusivé dos mesmos sensores de vácuo e de temperatura.

A Figura 3.101 mostra o gráfico obtido após processamento da informação adquirida durante um vazamento com uma moldação com geometria 2, usando um “Vácuo Parcial” relativo de -300mbar.

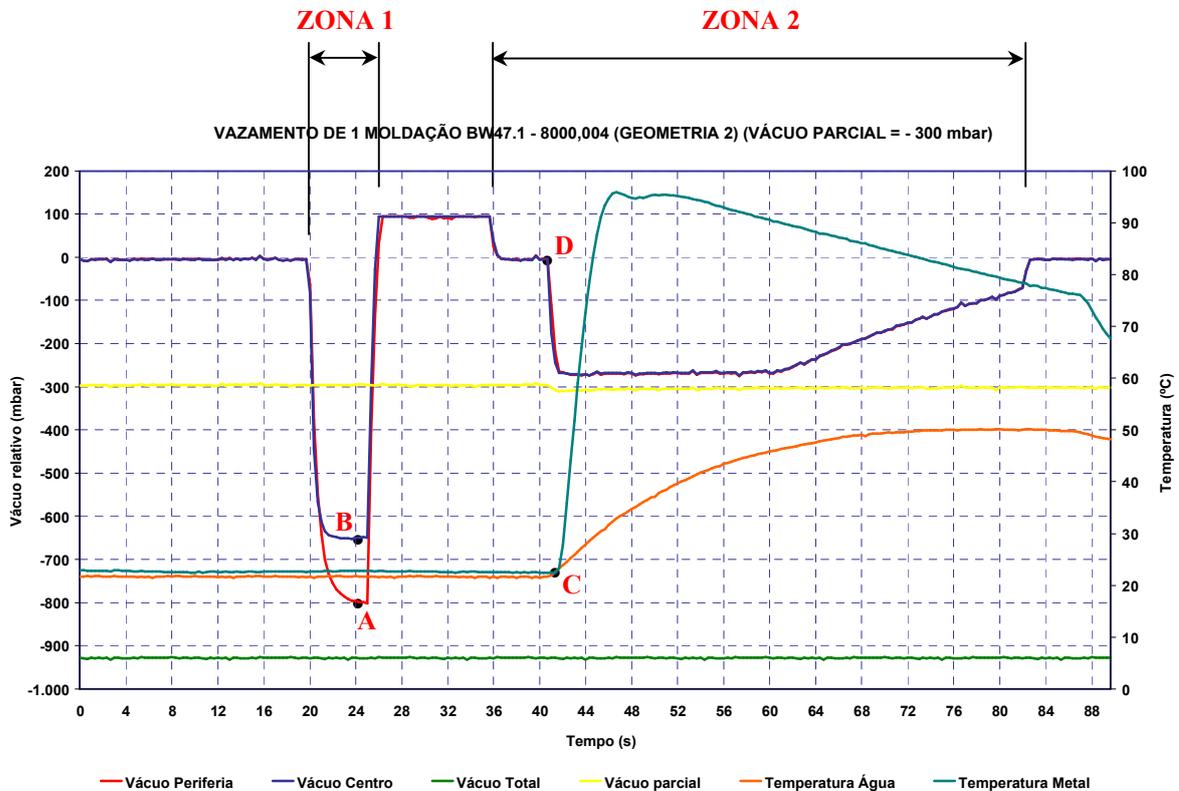


Figura 3.101 – Monitorização da evolução do nível de vácuo (nas tubagens de “Vácuo Total” e de “Vácuo Parcial”, e na periferia e no centro da moldação) e da temperatura (de uma das peças da moldação vazada, e da água de arrefecimento da placa), durante um vazamento com uma moldação com geometria 2.

A análise do gráfico de monitorização permite:

- Identificar perfeitamente 2 zonas:
 - ZONA 1:
 - Zona correspondente à purga efectuada antes do vazamento, por aplicação de “Vácuo Total” na câmara (ZONA 1.1 ; Objectivo: testar a estanquicidade do sistema) seguida de injeção de argon (ZONA 1.2 ; Objectivo: criar uma atmosfera protectora dentro da câmara).
 - ZONA 2:
 - Zona correspondente ao vazamento de liga na moldação, por aplicação de “Vácuo Parcial” na câmara.
- Verificar a estanquicidade do sistema, por comparação dos valores de estabilização do vácuo na periferia e no centro (Pontos A e B, respectivamente,

no gráfico da Figura 3.101) da moldação, durante a fase de purga;

- Calcular o tempo de enchimento das cavidades com base nas leituras do sensor de vácuo no centro da moldação e do termopar de leitura da temperatura na peça. Esse tempo é dado pela diferença entre o instante em que a temperatura começa a subir (Ponto C no gráfico da Figura 3.101), e o instante em que a sonda do centro da moldação detecta a aplicação de “Vácuo Parcial” na fase do vazamento (Ponto D no gráfico da Figura 3.101).

Sabendo empiricamente que no vazamento de ligas de alumínio, a velocidade de escoamento que marca a transição entre os regimes laminar e turbulento é de cerca de 0,5m/s, e sabendo a diferença de altura existente entre o banho e a placa de arrefecimento num vazamento (o valor correspondente a esta diferença é o percurso efectuado pelo metal durante o enchimento das cavidades), é imediato o cálculo do tempo de enchimento acima do qual entramos num regime de enchimento laminar. Assim, neste caso específico, sabendo que:

- Velocidade limite: $v_{lim} = 0,5\text{m/s}$;
- Diferença de altura entre o banho e a placa: $h \approx 145\text{mm}$;
- Tempo limite: $t_{lim} = \frac{h}{v_{lim}} \approx \frac{0,145}{0,5} = \mathbf{0,29\text{seg}}$

Ampliando um pouco o gráfico da Figura 3.101 na zona correspondente ao instante do enchimento das cavidades (Figura 3.102), é relativamente fácil de concluir que este se processou em sensivelmente 1 segundo (entre 40,7 e 41,7 segundos), daí **estarmos seguramente na presença de um regime de escoamento laminar durante o enchimento.**

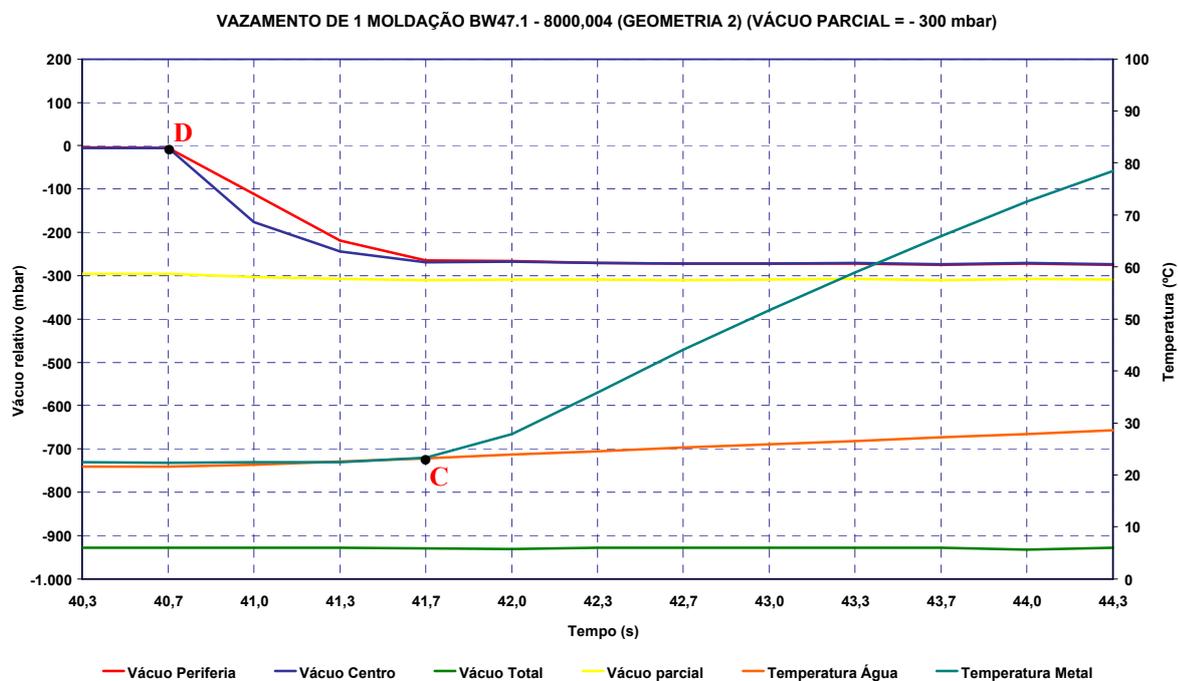


Figura 3.102 – Ampliação do gráfico da Figura 3.101 no instante do enchimento das cavidades da moldação.

CAPÍTULO 4

Conclusões e propostas de trabalhos futuros

4.1. Conclusões finais

O objectivo final deste trabalho passava pela criação de um conjunto de metodologias de optimização do processo de produção de impulsores em alumínio actualmente existente na ZCP, a nível de:

1. Processo de vazamento de gesso em placas-molde elastoméricas com recurso a vibração mecânica para isenção de bolhas;
2. Composição do gesso e do processo de secagem de moldações para garantir resistência mecânica e permeabilidade às mesmas, e tempos de secagem suficientemente curtos, de modo a tornar o processo industrialmente viável;
3. Condições de vazamento das ligas de alumínio:
 - 3.1. Limpeza das moldações secas e pré-aquecidas;
 - 3.2. Vácuo e impregnação das moldações com argon para diminuição da oxidação durante o vazamento;
 - 3.3. Temperaturas de pré-aquecimento das moldações;
 - 3.4. Temperatura e teor de hidrogénio das ligas a vazarem;
 - 3.5. Sistema de filtragem de filmes de óxidos.

Face ao trabalho experimental desenvolvido e apresentado, é de concluir que apesar da maioria destes objectivos já ter sido atingida actualmente no terreno (pontos 1, 2, 3.1, 3.2, 3.3 e 3.5), alguns deles não foram abordados neste trabalho por ainda não se terem recolhido dados científicos que comprovem os bons resultados das opções tomadas (pontos 3.1 e 3.3). Essa recolha e compilação de dados é proposta como trabalho futuro a realizar.

De salientar que a optimização dos pontos 3.4 e 3.5 ainda está em curso actualmente

no terreno, não havendo dados suficientes nem suficientemente rigorosos para apresentar neste relatório. A continuação da optimização destes dois pontos é também proposta como trabalho futuro.

De um modo geral, o desenvolvimento deste trabalho permitiu retirar as seguintes conclusões:

Optimização do processo de vazamento de gesso em placas-molde elastoméricas com recurso a vibração mecânica para isenção de bolhas

- O sistema vibratório existente no posto de vazamento de gesso nas placas-molde aquando da realização deste trabalho não era o mais eficiente. Isso ficou provado pela heterogeneidade verificada não só entre as moldações vazadas em simultâneo nas 3 diferentes posições da mesa, como entre moldações vazadas na mesma posição em vazamentos distintos;
- Embora ineficiente, o funcionamento deste sistema vibratório foi optimizado no sentido de proporcionar as melhores condições de vazamento para evitar a formação de bolhas na superfície das moldações. Com essa optimização concluiu-se que a vibração correspondente à escala 9,0 é a mais eficaz, uma vez que apesar de não eliminar totalmente as bolhas da superfície das moldações, minimiza o seu aparecimento;
- Recentemente já se procedeu à montagem de um novo sistema vibratório na mesa de vazamento, que já se comprovou ser muito mais eficiente que o seu antecessor. Por ainda não existirem dados numéricos que comprovem esse aumento de eficácia, sugere-se a sua abordagem como trabalho futuro a realizar;
- Pode também haver a necessidade de recorrer a processos alternativos complementares à vibração mecânica para eliminação das bolhas superficiais das moldações, tais como processos químicos para diminuição da tensão superficial da barbotina, aumentando a sua capacidade de molhagem. É outro dos trabalhos sugeridos para execução futura.

Optimização da composição do gesso e do processo de secagem de moldações para garantir resistência mecânica e permeabilidade às mesmas, e tempos de secagem suficientemente curtos, de modo a tornar o processo industrialmente viável

Optimização da composição do gesso

- A optimização da formulação do gesso utilizado no processo trouxe importantes benefícios ao processo, ao permitir reduzir a taxa global de sucata motivada pela fissuração superficial das moldações em 18,2%. Tal deveu-se ao aumento da resistência mecânica das moldações (por diminuição da proporção água/gesso usada na mistura), sem contudo prejudicar em demasia a sua permeabilidade (importante num processo totalmente dependente do vácuo, no vazamento da liga nas moldações) nem a sua fluidez (importante na remoção das bolhas da superfície da moldação, com o auxílio de vibração).

Optimização do processo de secagem de moldações

- O uso de um sistema de monitorização de temperaturas foi absolutamente crucial para conhecimento e optimização do processo de secagem de moldações;
- Apesar de apresentarem uma construção idêntica, todas as muflas de secagem apresentam o seu comportamento particular, diferindo entre si não só em termos das temperaturas absolutas registadas em várias zonas do seu interior, como das amplitudes térmicas. Contudo, isto não constitui nenhum problema para o processo, uma vez que ele é tolerante a uma heterogeneidade desta magnitude, nomeadamente no que toca à influência desta temperatura de pré-aquecimento das moldações sobre o enchimento das alhetas e na microestrutura dos impulsores, principalmente ao nível das suas alhetas;
- Apesar das diferenças de comportamento, e consequentemente da duração da secagem de moldações, convencionando-se que as moldações de qualquer mufla só podem ser vazadas após 25 horas (tempo que a última moldação leva a estar completamente seca na última mufla, com o programa de secagem P160), e de preferência não muito mais tarde do que isso, deixa de haver qualquer probabilidade de ocorrência de reacção superficial metal-gesso ou de fissuração superficial das moldações;
- Durante o ciclo de secagem, uma moldação não seca de forma homogénea, apresentando zonas (região superficial) que secam mais rápido do que outras (núcleo da moldação). Isto comprovou-se através da monitorização da evolução da temperatura em diferentes pontos de 2 moldações distintas, durante a sua secagem.

Optimização das condições de vazamento das ligas de alumínio

Vácuo e impregnação das moldações com argon para diminuição da oxidação durante o vazamento

- A optimização da geometria da moldação trouxe importantes melhorias não só à distribuição uniforme do vácuo por todas as cavidades da moldação durante o seu enchimento, como à diminuição do seu valor para níveis mais seguros em termos de laminaridade de escoamento;
- O facto de não se ter recorrido à geometria mais eficaz em termos de distribuição de vácuo pelos motivos atrás apresentados, mostra que na prática as melhores soluções estão muitas vezes dependentes de compromissos entre vários factores decisivos para o sucesso global dos resultados (neste caso vazar o fundido perfeito);
- Recorrendo à geometria 2 adoptada e aos parâmetros de vazamento usados nos ensaios descritos neste trabalho, deve-se usar um “Vácuo Parcial” relativo compreendido entre os -275 e os -300mbar, de modo a obter peças bem-cheias sem qualquer indício de turbulência no enchimento, com segurança;
- O recurso a um sistema de monitorização de vácuo e de temperaturas foi mais uma vez determinante no conhecimento e controlo do processo de vazamento, sendo mais um indicador da não existência de turbulência durante o enchimento das moldações nos testes efectuados.

4.2. Propostas de trabalhos futuros

Na sequência do que já foi referido atrás, como trabalhos futuros a desenvolver no sentido de não só completar os objectivos que se propunham neste projecto, mas também de melhorar ainda mais a estabilidade e o funcionamento do processo actual sugere-se:

- Recolha e compilação de dados científicos que comprovem os bons resultados das opções tomadas:
 - Na recente montagem do novo sistema vibratório na mesa de vazamento;
 - Na concepção de um aspirador especialmente concebido para fazer a limpeza das moldações pré-aquecidas prontas a vazar por aspiração (e não por projecção de ar comprimido);
 - Na diminuição da temperatura de pré-aquecimento das moldações de 200 para 160°C, de modo a melhorar a microestrutura dos fundidos sem recurso a afinadores de grão nem a modificadores do eutético;
- Ensaio de métodos alternativos que possam actuar de modo complementar à vibração mecânica no sentido da eliminação total das bolhas superficiais das moldações, tais como processos químicos para diminuição da tensão superficial da barbotina, aumentando a sua capacidade de molhagem;
- Optimização da metodologia utilizada na preparação do banho de alumínio de modo a reduzir o teor de hidrogénio nele presente;
- Estudo da influência da utilização de vários tipos de filtro na remoção de potenciais inclusões e filmes de óxido existentes no banho, que migrem para o interior das cavidades durante o enchimento;
- Optimização com recurso à monitorização do ciclo de secagem de moldações proposto na Figura 3.87, com o objectivo final de cumprir uma duração máxima de cerca de 17 horas de secagem em qualquer uma das 10 muflas existentes, e assim a aumentar a produtividade e a flexibilidade de produção, sem comprometer a integridade das moldações;
- Comprovação da estimativa efectuada para o tempo limite de enchimento de 0,29 segundos como sendo o tempo correspondente a uma transição entre escoamentos laminar e turbulento, com recurso não só à monitorização dos vazamentos, mas também à inspecção visual, por líquidos penetrantes e por Raio X, dos fundidos obtidos.

Bibliografia

Lucas, 1987 – Darlindo Batista Lucas, “Gesso, Gesso Cerâmico e Moldes Cerâmicos – Produção, Características e Ensaio”, Rev. Soc. Port. Ceram. Vid. - Vol.5 - Nº1 - Jan.-Mar. 1987, pp. 26-27 (1987)

Mayer, 1996 – Michael Mayer, “Turbochargers – Effective use of exhaust gas energy”, BorgWarner Turbo Systems, Verlag Moderne Industrie, pp. 19, 33 (1996)

Metallurg Aluminium – Metallurg Aluminium, “Melt Treatment in the Aluminium Foundry” - Technical Reference Guide, Technologica Vertriebsgesellschaft für technische Erzeugnisse m.b.H., Bad Homburg, Germany

Neto, 1985 – Rui Jorge Lemos Neto, “Ligas de Alumínio em Fundição” – Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Mecânica, Porto (1985)

Nunes, 1999 – João Carlos Oliveira Nunes, “Fabrico de Peças Metálicas Utilizando Moldações Cerâmicas e Moldações em Gesso” – Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Porto, pp. 39-51, 54-58, 62-65, 67-69, 74-77 (1999)

P.M.C.A., 1983 – The Plaster Mold Casting Association, “The Plaster Mold Casting Handbook”, The Plaster Mold Casting Association, pp. 3-21 (1983)

Clegg, 1991 – A. J. Clegg, “Precision Casting Processes”, Pergamon Press (1991)

Valente et al., 1993 – Joaquim Valente, Jorge Ribeiro, “Estudo das Inclusões nas Ligas de Alumínio”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Metalúrgica, Porto, pp. 4, 21-23, 33, 35-38 (1993)

il – <http://kaieiru.blogspot.com/2008/05/variable-geometry-turbocharger.html>