

FABRICO DE PEÇAS METÁLICAS UTILIZANDO MOLDAÇÕES CERÂMICAS E MOLDAÇÕES EM GESSO

Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica

João Carlos Oliveira Nunes

FACULDADE DE ENGENHARIA
DA
UNIVERSIDADE DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO
INDUSTRIAL

FEUP-1999

Resumo

Este trabalho situa-se no campo da Fundição de Precisão, no qual foram estudados processos de fabrico de moldes de precisão para a produção de peças metálicas por fundição.

Foram abordados os processos de Moldações Cerâmicas e de Moldações em Gesso dando-se destaque a este último processo.

No processo de Moldações em Gesso testaram-se amostras comerciais, para uma melhor compreensão do processo, e foram elaboradas misturas para produzir moldações para este processo. Foi dado particular interesse à influência da consistência na densidade e resistência mecânica em verde e após ciclo térmico.

Foram ainda realizados ensaios de permeabilidade e rugosidade.

No processo de Moldações Cerâmicas foi obtida uma moldação utilizando o processo implementado no INEGI/CETECOFF.

Fez-se no final uma análise de custos aos processos envolvidos durante este trabalho.

Abstract

This work is placed in the field of Precision Casting in which were studied processes of precision moulds production for production of castings.

Two processes were in study: the Ceramic Moulding process and the Plaster Moulding, been the last one the main point of interest of this work.

For the Plaster Moulding process, for better understanding of the process, were tested commercial samples and new mixtures prepared. Particular interest was given to consistency influence on density and in green and dry mechanical properties.

Permeability and roughness were also performed.

In the Ceramic Moulding process a mould was obtained by the process implemented in INEGI/CETECOFF.

The costs of these processes were also analysed

Résumé

Ce travail se situe dans l'univers de la Fonderie de Précision. Il se rapporte au moulage de moules de précision pour la fonderie.

Les procédés de Moulage Céramique et dans le Plâtre sont étudiés. Le dernier processus est le principal point d'intérêt dans ce travail.

Dans le processus de moulage à base de plâtre, pour un meilleur entendement du processus, des produits commerciaux sont testés, et des mélanges pour le processus sont étudiés. Particulièrement intéressant est donné à la consistance, la densité et la résistance mécanique avant et après étuvage.

Essais de perméabilité et rugosité sont réalisés dans les matériaux.

Dans le processus de Moulage Céramique, le processus de INEGI/CETECOFF est le principal point d'étude.

Une analyse des coûts engagés dans les processus est faite.

Prefácio

Ao longo dos últimos anos, o INEGI/CETECOFF tem vindo a desenvolver o estudo e a tecnologia no campo das Moldações Cerâmicas para a fundição de precisão, nomeadamente no Processo Shaw e no processo de fundição por cera perdida (Investment Casting).

O Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI), em cooperação com o INEGI/CETECOFF (Unidade de Fundição e Novas Tecnologias) tem vindo a desenvolver e utilizar moldações cerâmicas para o fabrico de ferramentas e protótipos metálicos.

O trabalho que se vai realizar tem por objectivo o estudo do processo existente, mas também, o de desenvolver variantes deste processo por forma a torná-lo cada vez mais atractivo para um grande número de aplicações industriais.

Ao contrário das moldações cerâmicas, o processo de Moldações em Gesso, apesar do seu interesse no campo da fundição de precisão e do interesse que o INEGI/CETECOFF demonstra neste processo, não têm sido objecto de um estudo aprofundado para uma possível implementação do mesmo.

O presente trabalho surge assim, como uma sequência lógica para a exploração de uma área que, não está desenvolvida e que é de extrema importância para o domínio de uma tecnologia global que permitirá o fabrico rápido de ferramentas utilizando moldações cerâmicas e moldações em gesso.

Agradecimentos

Ao Prof. Jorge Lino, orientador deste trabalho, pelo empenho demonstrado ao longo de todo o trabalho, às pessoas que no INEGI/CETECOFF me ajudaram, nomeadamente o Eng. Rui Neto, Eng.^a Teresa Duarte, Eng. Bártolo Paiva e a Eng.^a Susana Ribeiro.

Quero também agradecer a ajuda sempre prestável da Armanda e do Sr. Fernando. Agradeço ainda a ajuda do Eng. João Ribeiro, na altura aluno finalista, o apoio prestado.

Gostaria ainda de agradecer ao CINFU-Centro de Formação para a Indústria da Fundação, nas pessoas do Eng. Fernando Barbosa e do Sr. Soares a colaboração prestada na realização dos ensaios de permeabilidade.

Por último (e os últimos são sempre os primeiros) agradeço o apoio do meu colega Eng. João Rocha, à mulher dele, Catarina, e à minha mãe por me terem aturado durante este tempo todo. Agradeço também ao meu irmão Zé a ajuda no computador. Gostaria ainda de agradecer aos meus colegas do Instituto Politécnico de Bragança o apoio prestado.

Deixo para o fim um último agradecimento à minha gata Michele, pelas horas de companhia (e distração) que me dispensou durante o longo processo de escrita desta tese.

Índice

Índice de figuras e tabelas.....	10
1.Introdução.....	14
1.1 Processos de fundição.....	14
1.2 Fundição de precisão.....	23
2. Moldações em Gesso (Plaster Moulding).....	36
2.1 Gesso de Paris (Plaster of Paris).....	46
2.2 Descrição do processo.....	49
2.2.1 Processo convencional.....	49
2.2.2 Processo “Antioch”.....	52
2.2.3 Moldações em gesso porosas.....	54
2.3 Fabrico das Moldações em Gesso.....	56
2.3.1 Preparação da barbotina (Plaster slurry).....	56
2.3.2 Tempo de presa (cura).....	67
2.3.3 Secagem e calcinação.....	68
3. Moldações Cerâmicas.....	70
4. Características das moldações.....	74
4.1 Permeabilidade.....	74
4.2 Resistência mecânica.....	76
5.Método Experimental e Análise de Dados.....	78
5.1 Composições comerciais.....	78
5.1.1 Caracterização dos produtos SC1 e P+.....	82
5.1.1.1 Análise química e de fases.....	82

5.1.1.2 Caracterização granulométrica	83
5.1.1.3 Densidade.....	86
5.1.1.3.1 Densidade teórica do SC1 e P+.....	87
5.1.1.3.2 Determinação da densidade real.....	88
5.1.1.4 Resistência mecânica.....	90
5.1.1.5 Permeabilidade.....	91
5.1.1.6 Rugosidade.....	92
5.2 Elaboração de composições.....	93
5.2.1 Caracterização dos materiais utilizados nas misturas A, B e C.....	96
5.2.1.1 Densidade.....	96
5.2.1.2 Distribuição granulométrica.....	97
5.2.1.2.1 Distribuição granulométrica da areia AFS 50/60.....	97
5.2.1.2.2 Distribuição granulométrica do gesso cerâmico.....	98
5.2.1.2.3 Distribuição granulométrica do talco.....	99
5.2.1.2.4 Distribuição granulométrica do cimento CA-14.....	100
5.2.2 Mistura A	101
5.2.2.1 Determinação do ciclo térmico.....	104
5.2.2.2 Densidade	104
5.2.2.3 Resistência mecânica.....	107
5.2.2.4 Ciclo térmico sem calcinação.....	108
5.2.2.5 Permeabilidade.....	109
5.2.2.6 Observações.....	110
5.2.3 Mistura B.....	111
5.2.3.1 Densidade.....	111
5.2.3.2 Resistência mecânica.....	113
5.2.3.3 Permeabilidade.....	112
5.2.4 Mistura C.....	114
5.2.4.1 Densidade.....	115
5.2.4.2 Resistência mecânica.....	116
5.2.4.3 Permeabilidade.....	117
5.2.5 Rugosidade das misturas A, B e C.....	117
5.3 Moldações cerâmicas.....	118

5.4 Análise de custos.....	120
6. Conclusões.....	124
7.Bibliografia.....	126
8. Anexos I.....	131

Índice de Figuras e Tabelas

Figuras

Figura 1.1: Esquema de uma caixa de moldação.....	18
Figura 1.2:Esquema básico do processo clássico de fundição de precisão para moldações cerâmicas.....	35
Figura 2.1: Comparação de tempos de arrefecimento para provetes vazados em 5 tipos diferentes de moldações.....	41
Figura 2.2: Expansão linear da sílica cristalina (quartzo) e da sílica fundida (amorfa) com a temperatura.....	57
Figura 2.3: Forma recomendada para uma cuba e posição da hélice para a mistura de barbotinas para a produção de moldes em gesso.....	65
Figura 2.4: Posicionamento do disco no processo de moldações em gesso porosas.....	66
Figura 2.5: Esquema em corte de um disco de borracha para a preparação da barbotina no processo de moldações em gesso porosas.....	67
Figura 4.1: Teste de flexão em três pontos para provetes cerâmicos.....	77
Figura 5.1: Exemplo de um ciclo de secagem e calcinação para moldes produzidos com o HYDRACAST SC1 e HYCRACST P+ para a fundição de ligas de alumínio.....	81
Figura 5.2: Análise granulométrica da amostra P+, apresentando a distribuição parcial e parcial acumulada em percentagem.....	84
Figura 5.3: Análise granulométrica da amostra SC1, apresentando a distribuição parcial e parcial acumulada em percentagem.....	85
Figura 5.4:Variação da %parcial do P+ e SC1 em função do diâmetro das partículas.....	86
Figura 5.5: Representação gráfica da distribuição granulométrica da areia de sílica AFS 50/60.....	97
Figura 5.6: Curvas de distribuição granulométrica do gesso cerâmico.....	98
Figura 5.7: Curvas de distribuição granulométrica do talco.....	99
Figura 5.8: Curvas de distribuição granulométrica do cimento CA-14.....	100
Figura 5.9: Variação da densidade em verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação com a consistência	106
Figura 5.10:Variação da resistência à flexão para provetes secos com a consistência.....	108

Figura 5.11:Variação da densidade real em verde e após ciclo térmico com a consistência112

Figura 5.12: Variação da resistência à flexão em função da consistência para provetes secos para a mistura B.....113

Tabelas

Tabela 1.1: Tolerâncias de contracção típicas para modelos para diferentes ligas..... 19

Tabela 1.2: Características de alguns materiais utilizados no fabrico de moldes de fundição.....20

Tabela 1.3:Sistema de classificação de processos de fundição baseado no tipo de molde.....22

Tabela 1.4: Características dos principais métodos de fundição de ligas de alumínio.....24

Tabela 1.5: Tolerâncias para quatro diferentes ligas para o processo de fundição em areia (secções pequenas).....26

Tabela 1.6: Tolerâncias para os processos Shell e Investment Casting para ligas ferrosas e não ferrosas (secções pequenas).....27

Tabela 1.7: Tolerâncias para quatro diferentes ligas no processo de Fundição injectada para secções pequenas.....27

Tabela 1.8: Acabamento superficial para alguns processos de fundição.....31

Tabela 1.9: Comparação entre o processo de Moldações Cerâmicas e o Processo de Cera Perdida (Investment Castings).....33

Tabela 2.1: Tolerâncias típicas sugeridas para o processo de moldações em gesso.....40

Tabela 2.2: Relação entre o aumento de volume, o peso e a permeabilidade para moldações em gesso porosas.....55

Tabela 2.3: Teor em óxidos no cimento Portland normal.....58

Tabela 2.4: Composição estequiométrica teórica e típica do talco comercial.....59

Tabela 2.5: Processo “Capaco”60

Tabela 2.6: Exemplo de mistura.....60

Tabela 2.7: Exemplo de mistura seca (pode ser utilizada para ligas de Cu).....60

Tabela 2.8: Exemplo de mistura para fundição de ligas de Cu.....61

Tabela 2.9: Composição típica para o processo em meias-caixas de moldação.....61

Tabela 2.10: Composição típica para o processo “Antioch”61

Tabela 2.11: Variação da resistência à compressão de provetes em gesso (após secagem), com a consistência.....63

Tabela 3.1: Características de alguns materiais refractários.....70

Tabela 3.2: Dimensões e respectivas tolerâncias representativas do processo de moldações cerâmicas.....73

Tabela 5.1:Características das misturas HYDRACAST fornecidas pela UCPI.....80

Tabela 5.2: Análise química das amostras de SC1 e P+ obtidas por fluorescência de raios X.....82

Tabela 5.3: Distribuição granulométrica do P+.....83

Tabela 5.4: Distribuição granulométrica do SC1.....84

Tabela 5.5: Densidade absoluta obtida para o SC1 e P+.....88

Tabela 5.6: Densidades reais em verde e após ciclo térmico do SC1 e P+.....88

Tabela 5.7: Percentagem de poros nas amostras de SC1 e P+ após ciclo térmico.....89

Tabela 5.8: Resistência à flexão de provetes de SC1 e P+ no estado verde e após ciclo térmico.....90

Tabela 5.9: Resultados da permeabilidade para o SC1 e P+ após ciclo térmico.....91

Tabela 5.10: Rugosidade superficial do SC1 e P+ após ciclo térmico.....92

Tabela 5.11: Composição em percentagem das misturas secas A, B e C.....95

Tabela 5.12: Densidade teórica para os vários materiais utilizados nas misturas A, B e C.....96

Tabela 5.13: Distribuição granulométrica da areia AFS 50/60.....97

Tabela 5.14: Distribuição granulométrica do gesso cerâmico.....98

Tabela 5.15: Distribuição granulométrica do talco.....99

Tabela 5.16: Distribuição granulométrica do cimento CA-14.....100

Tabela 5.17: Verificação da existência de resíduo no final do tempo de mistura para três tempos de mistura diferentes.....103

Tabela 5.18: Verificação da existência ou não de sedimentação nas amostras vazadas.....104

Tabela 5.19: Densidade real para amostras em verde e após ciclo térmico para quatro diferentes consistências.....106

Tabela 5.20: Porosidade após ciclo térmico da mistura A em função da consistência107

Tabela 5.21: Resistência à flexão de provetes secos para a mistura A para várias consistências.....107

Tabela 5.22: Densidade e resistência mecânica para a mistura A, com uma consistência de 0.55 só com secagem.....109

Tabela 5.23: Permeabilidade em função da consistência para a mistura A109

Tabela 5.24: Densidade em verde e após ciclo térmico em função da consistência para a mistura B.....111

Tabela 5.25: Porosidade da mistura B após ciclo térmico para três consistências diferentes.....112

Tabela 5.26: Variação da resistência à flexão com a consistência para a mistura B.....113

Tabela 5.27: Permeabilidade após ciclo térmico da mistura B para três consistências diferentes.....114

Tabela 5.28: Densidade real e após ciclo térmico para a mistura C.....115

Tabela 5.29: Resistência á flexão em verde e após ciclo térmico para a mistura C.....116

Tabela 5.30: Valor obtido para a permeabilidade da mistura C.....117

Tabela 5.31: Valores das rugosidades obtidas para as misturas A, B e C..... 117

Tabela 5.32: Componentes para uma mistura destinada ao fabrico de uma moldação cerâmica..... 118

Tabela 5.33: Custos dos materiais da mistura C por kg.....120

Tabela 5.34: Custo das misturas utilizadas nas moldações.....120

Tabela 5.35: Quantidades necessárias para produzir um molde de 1 litro para três diferentes misturas..... 121

Tabela 5.36: Custos de produção de um molde de 1 litro para três diferentes misturas.....121

Tabela 5.37: Custos e teores de matérias-primas utilizadas na produção da moldação cerâmica do ponto 5.3.....122

Tabela 5.38: Custos envolvidos na produção de uma moldação de 5.46 dm³ para quatro tipos de misturas diferentes.....123

Quadro 1.1: Factores de precisão envolvidos na produção das moldações.....29

1. Introdução

1.1 Processos de Fundição

A indústria de fundição tem á sua disposição diferentes processos para a produção de peças metálicas e, por certo, alguns destes métodos são mais apropriados do que outros para o fabrico de determinada peça ou peças. Apesar de uma fundição poder utilizar mais do que um processo, esta escolha é, principalmente, orientada pela classe do produto e pelos factores económicos em jogo. Factores como o tamanho da peça, forma, complexidade, quantidade, acabamento superficial e precisão dimensional, têm que ser tomados em consideração aquando da selecção do processo mais económico. Os custos de produção mais elevados de certos processos podem, em muitos casos, serem compensados pela sua elevada precisão. Com maior precisão, certas operações de acabamento ou maquinagem podem ser eliminadas, reduzindo-se, assim, o preço bruto da peça fundida.

A tecnologia de fundição permite a produção de peças com qualquer forma geométrica, de qualquer dimensão e praticamente em qualquer metal ou liga.

Apesar dos processos de fundição serem muitos e variados, todos eles consistem, basicamente, na obtenção de peças através da solidificação de um metal ou liga metálica no interior de uma moldação (conjunto de elementos em materiais apropriados que definem o molde) com a configuração desejada da peça a obter. Praticamente, quase todos os tipos de metais e ligas metálicas podem ser vazadas em moldes desde o seu estado líquido.

A técnica da fundição, pode dizer-se, consiste essencialmente na aplicação, pura e simples, do princípio de Arquimedes [1]:

“O líquido toma a forma do vaso que o contém”

Fundição é também a designação, aplicada ao acto de fundir os metais e suas ligas, à obra fundida e ainda á oficina onde ela é praticada [1].

Este processo tecnológico é talvez o processo de conformação de materiais metálicos que maior liberdade de formas permite, com a vantagem da optimização do factor económico, pelo facto de ser o caminho mais curto entre a matéria prima e a forma final do produto, englobando um conjunto de tecnologias alternativas que pela sua multiplicidade, põe em jogo um grande número de parâmetros abrangidos pelos mais variados ramos da ciência [1].

O objectivo da fundição é pois, o de produzir peças com determinadas propriedades, tanto metalúrgicas como mecânicas, e com a forma, dimensões, acabamento e tolerâncias definidas na fase do projecto dessas mesmas peças. Quando a qualidade final das peças não corresponde aos requisitos exigidos pelo projecto, é por vezes necessário proceder a operações de acabamento ou de tratamento térmico posterior, conforme os casos que se apresentem. O acabamento superficial é, normalmente, feito por arranque de apara ou por forjamento, já que as propriedades mecânicas intrínsecas aos aspectos metalúrgicos podem ser optimizadas por tratamentos térmicos.

De uma forma genérica os diferentes processos podem-se dividir em (adaptado de [1,2,3]):

1. Fundição em areia
 - 1.1 Areia verde
 - 1.2 Areia auto-secativa
 - 1.2.1 Shell
 - 1.2.2 Moldação em vácuo
2. Fundição centrifugada

3. Investment casting (cera perdida)
4. Moldação em gesso (Plaster moulding)
5. Moldações cerâmicas: Processo Shaw e Processo Unicast
6. Fundição Injectada
7. Fundição em molde permanente

Como foi referido anteriormente, existem actualmente vários processos tecnológicos para se obterem peças por fundição, mas todos exigem um modelo – que tem a forma da peça a fundir – e um molde, obtido a partir do modelo.

Por modelo considera-se (definição que vai ser utilizada nesta tese) um corpo com a forma geométrica da peça metálica a obter que por moldagem, ou seja, por encalque e compactação de um material refractário sob esse mesmo modelo, vai originar uma cavidade onde será vazado o metal [1,3].

A moldação será então, o conjunto de materiais ou material que contem a cavidade onde o metal será vazado, sendo esta cavidade moldante com a configuração e dimensões geométricas do modelo designada de molde [1,3].

A moldação tem que ser feito num material que resista ao choque térmico e estes materiais para o molde, são de uma maneira geral a areia, metal, gesso e materiais cerâmicos.

A figura 1.1 representa um esquema de uma caixa de moldação em areia onde podem ser identificados o modelo, a moldação e o molde. O modelo dá origem à cavidade moldante, ou seja, ao molde.

Os modelos utilizados para produzir peças metálicas com as dimensões desejadas, não são dimensionalmente (em termos de tolerâncias) iguais às peças a produzir. Devido a problemas de contracção do metal durante a solidificação do mesmo, a possíveis operações de acabamento como a maquinagem, torna-se necessário adicionar à tolerância exigida para a peça final, outras tolerâncias para compensar todos esses fenómenos e operações possíveis. A dimensão do modelo vai ser, então, a soma das dimensões exigidas para a peça com as tolerâncias necessárias. Estas dimensões do modelo são transferidas para o molde.

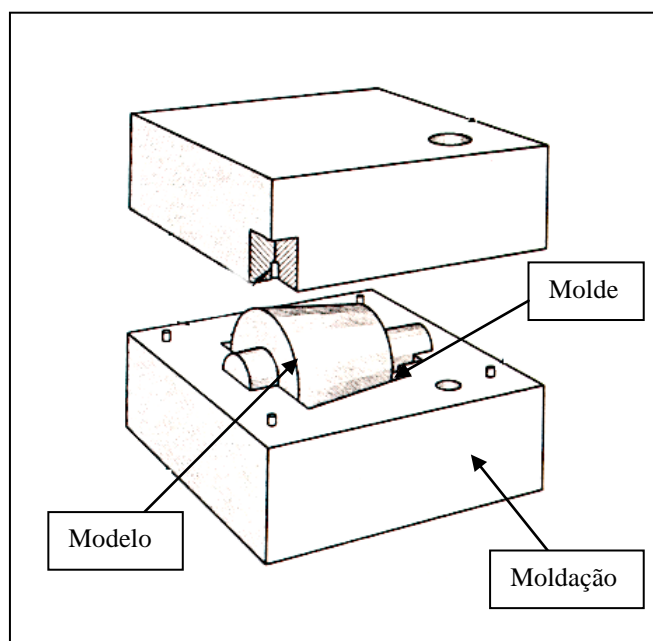


Figura 1.1: Esquema de uma caixa de moldação (adaptado de [3]).

Na tabela 1.1 dá-se a título de exemplo, as tolerâncias típicas, para modelos de fundição, para compensar as contracções durante a solidificação de algumas ligas metálicas.

Tabela 1.1:Contracções de diferentes ligas metálicas e tolerâncias típicas para os modelos (adaptado de [3])

Liga	Contração (%)	Tolerância (mm/m)
Aço	1.6	15/7
Ferro nodular	0.8	7/8
Alumínio	1.3	13/1
Bronze	1.4	14/4
Magnésio	1.3	13/1

A madeira é o material mais utilizado para os modelos, os quais também podem ser realizados em metal, materiais compósitos, cera e em plástico [3].

Os modelos em madeira têm a vantagem de serem os mais baratos e fáceis de produzir. Contudo, eles são susceptíveis à humidade o que pode originar alterações dimensionais (contrações, dilatações), as quais são transferidas para o molde e por conseguinte para a peça final [3].

Os modelos em metal, quando comparados com os em madeira, são mais dispendiosos mas, em contrapartida têm maior resistência mecânica, maior resistência ao desgaste e são dimensionalmente estáveis em presença de humidade. Permitem obter peças com grande precisão dimensional e são especialmente indicados para a produções em larga escala e em processos automáticos de injeção de metal com ou sem auxílio de pressão [3].

Os modelos em plástico têm um ciclo de vida mais longo (sendo este definido como a quantidade de fundidos que se pode obter com um modelo) do que aqueles que são feitos em madeira, mas são também mais caros.

Vários modelos em plástico podem ser obtidos a baixo custo, a partir de um único modelo mãe, geralmente em madeira. Têm excelente estabilidade dimensional e podem ser produzidos com menores custos do que os produzidos em metal [3]. De uma forma geral, estes modelos em plástico são feitos em poliuretano ou resina *epoxy* e têm as seguintes características [3]:

- Têm maior resistência à compressão, à flexão, à abrasão e ao impacto do que os modelos feitos em madeira,
- São resistentes às variações ambientais e ao ataque químico,
- Ligam-se com facilidade a outros materiais o que os torna um bom material para a reparação de outros modelos,
- São fáceis de desmoldar.

A tabela 1.2 fornece alguns dados sobre as características de alguns materiais que podem ser utilizados no fabrico de modelos para fundição.

Tabela 1.2: Características de alguns materiais utilizados no fabrico de moldes de fundição (adaptado de [3]).

	Madeira	Alumínio	Ferro fundido	Poliuretano
Maquinagem	E	B	R	B
Resistência ao desgaste	F	B	E	E
Resistência mecânica	F	B	E	F
Reparação	E	R	B	E
Resistência à corrosão	E	E	F	E

Legenda : E = excelente, B = boa, R = razoável, F = fraca

O tipo de modelo a utilizar para a produção de determinada peça metálica vai depender [3]:

- Do número de fundidos a produzir,
- Do processo de fundição a utilizar,
- Do desenho da peça metálica a obter,
- Das tolerâncias dimensionais requeridas.

Os processos de fundição podem ser catalogados através duma classificação baseada no tipo de molde (moldação), que pode ser reutilizável ou não, e, de uma forma análoga, pode-se realizar essa classificação, ou subclassificação, em relação ao modelo utilizado que, também, pode ser reutilizável ou não [1,3].

Uma segunda classificação pode ser obtida através do tipo de ligante utilizado para a ligação dos materiais que vão constituir a moldação, ou seja, o molde [1,3].

Em fundições que utilizam moldes permanentes, os processos podem ser classificados em função do tipo de mecanismo utilizado para encher o molde com o metal fundido [1,3].

Processos convencionais em areia e outros em que o material para produzir o molde é ligado quimicamente por um ligante, utilizam um modelo permanente mas, o molde é utilizado apenas uma vez. Moldes permanentes são utilizados em vários processos de fundição, por exemplo, na fundição injectada são em metal, sendo de uma maneira geral utilizados para produções em larga escala. Processos como o de cera perdida implicam a utilização de um modelo para cada peça a fundir.

A tabela 1.3 apresenta uma possível classificação para os vários tipos de processos de fundição.

Tabela 1.3: Sistema de classificação de processos de fundição baseado no tipo de molde [1].

Moldações perdidas	Moldações permanentes
<p>A. Modelos permanentes</p> <p>1. Moldação em areia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Moldação em areia verde • Moldação em areia seca (auto-secativa) • Moldação em CO₂/silicato • Moldação em “Shell-Moulding” • Moldação em “caixa-fria” • Moldação de selagem em vácuo <p>2. Processos de fundição com moldação em agregado cerâmico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Moldações cerâmicas • Moldações em gesso <p>B. Modelos perdidos</p> <p>1. Moldação em areia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Processo de moldação com modelo evaporável <p>2. Moldação em agregado refractário</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelos perdidos – processo de cera perdida 	<p>1. Processos em moldações metálicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Processo de vazamento por gravidade em moldações metálicas • Processo de vazamento sob pressão em moldações metálicas • Processo de vazamento sob baixa-pressão em moldações metálicas <p>2. Vazamento por centrifugação</p> <p>3. Vazamento em moldações com pressões contra-gravíticas</p> <p>4. Vazamento em moldações metálicas por compressão mecânica</p> <p>5. Vazamento contínuo em moldações metálicas</p>

Cada processo tem que ter em conta os fenómenos que podem ocorrer no interior da moldação, assim que o metal fundido entra em contacto com as paredes da mesma, tais como a velocidade de arrefecimento, decomposição de aditivos e ligantes, aspecto do fundido e tolerância dimensional do mesmo.

Como qualquer processo tecnológico, o processo de fundição tem vantagens e desvantagens. Na escolha de um processo de fundição podem considerar-se relevantes os seguintes factores [4,5]:

- Quantidade de peças a fundir,
- Desenho do fundido,
- Tolerâncias exigidas,
- Complexidade,
- Especificação do metal,
- Acabamento superficial requerido,
- Custos de equipamentos e materiais,
- Custos de maquinação versus custos de fundição,
- Limites financeiros no que concerne aos custos,
- Especificações de entrega.

Não se pretende que todas estas características estejam todas presentes em qualquer um dos processos de fundição, nem são elas, tão pouco, necessárias quando se pretende obter determinada peça fundida. Geralmente, é possível obter um fórmula simples para a escolha de um determinado processo. Usando valores como o custo de equipamento, quantidade de peças a fundir, custo unitário do fundido, acabamento e tolerâncias exigidas pode-se chegar facilmente ao processo mais indicado.

A tabela 1.4 apresenta um resumo dos critérios gerais para a selecção do processo de fundição mais indicado para a fundição de peças em alumínio.

Tabela 1.4- Características dos principais métodos de fundição de ligas de alumínio (adaptado de [6])¹.

Características dos fundidos	Processos de fundição					
	Areia	Molde permanente	Fundição injectada	Shell moulding	Moldação em gesso	Investment casting
Peso dos fundidos	Desde algumas gramas até 2 toneladas	Desde algumas gramas até <20 Kg	Desde algumas gramas até <35 Kg	< 10 Kg	Desde algumas gramas até <20 Kg	Desde algumas gramas até <35 Kg
min.	3 – 4	3 – 4	1 – 2	≤ 4	2	0.8 – 1.2
Espessura das peças (mm)						
máx.	—	50	< 50			12 ou maior em certos casos
Diâmetro mínimo de furos obtidos por machos (mm)	7	9	3	5	7	0.6 – 1
Tolerância média (mm)	±2 em 250	±4 em 25 adicionar 0.05 por cada 25 mm adicionais	±0.05 em 25	±0.15 em 25	±0.15 em 25	±0.15 em 25 (±0.05 em 25 é possível)
Ao longo da linha de apartação	±2 em 250	adicionar 0.15 – 0.3 aos valores acima	adicionar 0.08 – 0.15 aos valores acima	adicionar 0.15 – 0.4 aos valores acima	adicionar 0.25 aos valores acima	—
Acabamento superficial	0	2	4	2	4	4
Tipo de equipamento e ferramentas	Madeira, plástico, modelos em metal, caixa de machos	Molde metálico	Molde metálico	Modelos em metal	Modelos em plástico ou em metal	Moldações metálicas para a produção dos moldes em cera
Taxas de produção	2	3	4	2	0	0
Custo do equipamento	4	1	0	2	2	2
Tempo de produção de protótipos	4	1	1	2	2	2
Pressão de aperto	2	4	3	2	1	1
Razão metal vazado/peso das peças fundidas	0	2	4	2	1	1
Contração após vazamento	2	1	1	2	4	4

¹ As classificações atribuídas são numa escala de 0 a 4, sendo 4 a melhor.

1.2 Fundição de Precisão

A fundição de precisão é um processo que se poderá caracterizar, principalmente, pelo grau de reprodutibilidade dos fundidos e pela sua exactidão dimensional.

Devido aos avanços tecnológicos e às exigências cada vez maiores do mercado de fundição, é requerido às fundições peças com uma qualidade melhorada, ou seja, com maior precisão dimensional, melhor acabamento superficial e metalúrgicamente íntegras. Estes atributos de qualidade só têm sido possíveis através dos avanços tecnológicos ocorridos na indústria da fundição.

Torna-se pois claro que, tendo como objectivo a obtenção de peças com maior precisão, é necessário recorrer a tecnologias mais avançadas e equipamentos de fundição mais versáteis e ainda a um controlo mais eficiente e preciso. Estes factores, como seria de esperar, aumentam os custos de produção das peças a obter.

Neste campo encontramos a fundição de precisão. Este não é um processo de fundição, mas sim um conjunto de processos, com mais ou menos encargos financeiros, que primam por obter peças de elevada precisão dimensional, qualidade superficial superior aos processos mais convencionais e excelente integridade metalúrgica [3,7].

Encontramos assim, vários processos que podem pertencer à fundição de precisão, dos quais podemos destacar [8,9,10]

- Investment Casting (cera perdida),
- Moldações Cerâmicas (Processo Shell, Shaw e Unicast),
- Fundição Injectada,
- Moldações em Gesso (Plaster Moulding).

Independentemente do processo de fundição que se utilize para obter determinada peça, as características dimensionais, de forma, mecânicas, metalúrgicas e

outras variam de exemplar para exemplar. Esta variabilidade caracteriza-se, quer pela dispersão de valores, quer pelas medidas (estatisticamente) centrais que determinam a exactidão do valor da propriedade ou cota avaliada [11].

Precisão no contexto da fundição, deverá, acima de tudo ser sinónimo de minimização da variabilidade das características dos fundidos, devendo ser exigido a estes a manutenção consistente das especificações dentro de intervalos de muito pequena amplitude, independentemente da sua natureza [11]. Assim, o conceito de precisão em fundição abrange a precisão a nível metalúrgico, dimensional e geométrico, entre outros [11].

Em fundição é comum confundir-se precisão com tolerância, sendo habitual, por exemplo, falar-se em obter peças com uma precisão de $\pm x$ mm.

A tolerância é identificada através dos desvios superior e inferior máximos que a dimensão poderá apresentar relativamente à cota nominal. As tolerâncias possíveis dependem da natureza do processo e, em muitos casos, do tipo de metal a vaziar (ponto de fusão, contracção durante a solidificação) [11].

As tolerâncias comerciais para alguns processos de fundição estão representadas nas tabelas 1.5 a 1.7.

Tabela 1.5: Tolerâncias para quatro diferentes ligas para o processo de fundição em areia (secções pequenas) [4].

Fundição em Areia		
Ligas	Tolerância (mm)	Dimensão (mm)
Alumínio	± 0.79	≤ 203
Cobre -berílio	± 1.57	≤ 356
		≤ 610
		≤ 914
Cobre	± 2.32	> 914
Aços	± 1.57	Ao longo da linha de apartação adicionar de ± 0.37 a ± 1.62

Tabela 1.6: Tolerâncias para os processos Shell e Investment Casting para ligas ferrosas e não ferrosas (secções pequenas) (adaptado de [4]).

Processo Shell (principais ligas: ferrosas e não ferrosas)		Investment Casting (principais ligas: ferrosas e não ferrosas)	
Dimensão (mm)	Tolerância (mm)	Dimensão (mm)	Tolerância (μm)
0 a 25.4	± 0.25	0 a 12.7	± 75
25.4 a 76.2	± 0.41	12.7 a 25.4	± 125
76.2 a 152.4	± 0.76	25.4 a 38.1	± 175
152.4 a 304.8	± 1.57	> 50.8	± 0.005 mm/mm
> 304.8	± 2.36	Posicionamento de furos	± 0.005 mm/mm

Tabela 1.7: Tolerâncias para quatro diferentes ligas no processo de Fundição injectada para secções pequenas (adaptado de [4]).

Fundição injectada			
Ligas	Tolerâncias comerciais (μm)	Tolerâncias adicionais (μm) acima de 25 a 300 mm	Tolerâncias adicionais (μm) acima de 300 mm
Zinco	± 75	± 25	± 25
Alumínio	± 100	± 37	± 25
Cobre	± 175	± 50	
Magnésio	± 100	± 37	± 25

A exactidão indica os desvios da dimensão relativamente à dimensão nominal. Exactidão e rigor referem o mesmo conceito [11].

A precisão traduz a variabilidade da dimensão, ou grandeza, e poderá em fundição ser definida como o grau de variação das características de um lote de peças obtidas por um mesmo processo de fundição [11]. Uma medida deste grau de variação poderá ser a “capabilidade” do processo [11].

A produção de uma peça por fundição engloba diversas etapas, cada uma delas contribuindo, em maior ou menor grau, para a qualidade, nomeadamente a sua precisão, do fundido final. Esta precisão não só é afectada pela variabilidade e controlo de inúmeros factores, de ordem física, térmica, mecânica ou processuais. São factores presentes desde o projecto ao controlo do produto, e que de forma relevante intervêm

nas diferentes fases do processo de fundição. A precisão é ainda influenciada por factores de transferência de imprecisões entre as fases consecutivas dos processos, sendo ainda relevante a influência do factor humano, quer na fase do projecto, quer na condução e controlo do processo de fundição. Pode-se, então afirmar que quanto maior for o numero de operações para a obtenção de determinado fundido, menor será, em princípio, o grau de precisão que ele poderá apresentar [11].

Dos factores que se apresentam como mais críticos ou determinantes para a qualidade final dos fundidos, podem-se salientar [11]:

- Precisão dimensional e geométrica dos moldes e moldações,
- Estabilidade dimensional dos moldes e moldações,
- Variabilidade da temperatura das moldações,
- Material da moldação,
- Estado de conservação dos equipamentos de fabrico das moldações.

A qualidade geométrica e a superficial dependem principalmente da natureza da moldação e dos fenómenos de origem térmica envolvidos durante o processo, estando directamente relacionados com [11]:

- Exactidão dos moldes utilizados,
- Exactidão e precisão das moldações executadas,
- Comportamento das moldações durante o vazamento,
- Comportamento do metal e das moldações durante a solidificação.

A exactidão e precisão com que é obtida uma moldação depende, em primeiro lugar, da exactidão do molde utilizado. As variações deste, quer geométricas quer

dimensionais, transmitem-se às moldações produzidas, às quais se vão adicionar as variações resultantes do próprio processo de moldação.

Há factores que influenciam a precisão que são comuns a todos ou a vários processos, e outros, específicos de cada um, podendo-se de uma maneira geral, serem distribuídos por três grupos principais [11] (ver quadro 1.1):

- Factores operatórios,
- Factores térmicos,
- Factores estruturais dos meios e materiais utilizados.

Quadro 1.1: Factores de precisão envolvidos na execução das moldações [11].

		Moldação em areia			Moldação permanente	Moldação em materiais cerâmicos
		Verde e Autosecativa	Termoendurecível	Não aglomerada		
Factores operatórios	Uniformidade e espessura da pintura refractária/desmoldante					Método da aplicação do cerâmico
	Desmoldação Fecho da moldação Selagem do plano de apartação Manuseamento Tempo de espera até ao vazamento			Parâmetros da vibração	Intensidade do vácuo	
	Processo de compactação Deformabilidade das caixas de moldação					
Factores térmicos		Parâmetros do processo de cura		Temperatura da moldação	Parâmetros do processamento térmico	
Factores estruturais e dos meios utilizados	Índice de finura e dispersão granulométrica da areia					Características reológicas dos cerâmicos

Como características principais da fundição de precisão podemos salientar [8,12,13]:

- Exactidão dimensional, tolerâncias de $\pm 80 \mu\text{m}$ são o usualmente indicado,
- Acabamento superficial de elevada qualidade (ver tabela 1.8),
- Versatilidade das ligas a utilizar. É adaptável à fundição de ligas que necessitam de ser vazadas em condições de vácuo ou sob protecção de uma atmosfera inerte,
- Baixo custo por unidade,
- Capacidade de produção de peças de dimensões variáveis – desde algumas gramas até 725 kg,
- Capacidade de obtenção de pormenores, superficiais ou de forma, intrincados e complexos que seriam difíceis ou impossíveis de obter por processos de fundição tradicionais ou por maquinagem,
- Acabamento reduzido ao mínimo, minimizando a importância de seleccionar metais fáceis de maquinar,

Como conclusão, podemos dizer que os parâmetros a que os fundidos obtidos por um determinado processo têm que cumprir, para que esse processo seja considerado de precisão são [14]:

- Precisão dimensional,
- Bom acabamento superficial e aparência,
- Integridade metalúrgica.

Tabela 1.8: Acabamento superficial para alguns processos de fundição (adaptado de [4])

Processo	Acabamento superficial (μm)
Investment casting (cera perdida)	1.6 – 3.2
Moldação em gesso	1.6 – 3.2
Moldações cerâmicas	2.0 – 3.2
Fundição injectada	0.8 – 1.6
Molde permanente	Alumínio: 3.8 – 6.4 Ligas de cobre: 3.8 – 6.4 Ligas ferrosas: 5.1 – 8.9
Fundição em areia	Não ferrosas: 3.8 – 8.9 Ferrosas: 7.6 – 17.8

Um dos sectores de particular interesse para a indústria de fundição é a industria de moldes, a qual exige rápida execução de ferramentas ou moldes, para a produção de pré-séries ou peças definitivas.

As moldações cerâmicas permitem produzir rapidamente peças ou ferramentas por fundição, com detalhes finos e superfícies bastante lisas, com elevada precisão dimensional e boa integridade metalúrgica, nos mais diversos materiais metálicos [14,15,16]. As moldações cerâmicas surgem assim, como um processo bastante atractivo para ser aplicado na indústria de moldes. Este processo é extremamente indicado para peças de pequenas dimensões, ou seja, valores inferiores a 50×50×25 mm até 250×250×250 mm, uma vez que para dimensões superiores, o custo da matéria-prima tem um peso demasiado elevado no custo final da moldação.

Para peças de grandes dimensões torna-se pois atraente a utilização de moldações compósitas [17].

A produção de moldações cerâmicas, para vazamento de ligas metálicas permite a obtenção rápida de ferramentas metálicas com elevado detalhe, a preços relativamente baixos. As ferramentas assim obtidas (moldes), dispensam quase por completo as técnicas de maquinagem associadas à produção tradicional de moldes metálicos para injeção de plásticos ou ferramentas para outros processos produtivos (por exemplo, forjamento). A obtenção das primeiras peças ou protótipos é assim bastante mais rápida

do que no processo tradicional, sendo esta uma das grandes vantagens da utilização deste processo de fabrico de ferramentas por fundição de precisão [18].

O processo de moldações cerâmicas permite assim dar respostas rápidas às solicitações do mercado, nomeadamente no desenvolvimento de novos produtos. Se a fase de desenvolvimento do produto for apoiada com as tecnologias de prototipagem rápida (por exemplo, o LOM – “Laminated Object Manufacturing”), torna-se possível encurtar ainda mais o prazo de obtenção dos primeiros protótipos metálicos ou pré-séries [18,19,20], o que é de uma importância crucial para a agressividade e competitividade que a indústria dos moldes exige.

As superfícies das moldações cerâmicas têm propriedades refractárias, o que lhes permite suportar elevadas temperaturas de vazamento dos metais, como é o caso do vazamento de ligas ferrosas, possuindo, também, excelente estabilidade térmica [21]. Este processo de fabrico é único em fundição, pois preenche a lacuna entre a fundição de precisão (investment casting), limitada a peças relativamente pequenas, e o vazamento em areia, que produz peças com rugosidade superficial muito elevada (ver tabela 1.6) e sem detalhes finos [22].

O processo de moldações cerâmicas apresenta uma vantagem em relação ao processo de cera perdida. Ao contrário deste processo, que exige um modelo por peça a fundir, podem utilizar-se modelos permanentes, facto que só por si reduz os custos de produção de determinada peça metálica

A tabela 1.9 apresenta uma comparação entre o processo de moldações cerâmicas e o processo de Investment Casting.

As tolerâncias dimensionais obtidas com as moldações cerâmicas são próximas das do processo Investment Casting (Processo de Cera Perdida–“Lost Wax Process”), já que as matérias primas utilizadas são em muitos casos as mesmas, ou sejam, areia de sílica e/ou zircónia ligadas por um ligante que pode ser o silicato de etilo, silicato de sódio ou sílica coloidal, podendo por isso ser considerada fundição de precisão. O custo poderá ser próximo do vazamento em areia, dependendo, no entanto dos diversos materiais cerâmicos usados [22].

Tabela 1.9: Comparação entre o processo de Moldações Cerâmicas e o Processo de Cera Perdida (Investment Castings)² [23]:

Exigências de fundição	Moldações Cerâmicas	Investment Casting
Acabamento superficial	80 – 125 μm	40 – 125 μm
Complexidade	Excelente, mas ligeiramente inferior à obtida por investment casting	Excelente
Capacidade de fundir secções finas	Excelente	Excelente
Tolerâncias	De ótimas a excelentes	Excelentes
Maquinagem	De uma forma geral muito reduzida, mas nem sempre eliminada	Mínimo de maquinagem exigido
Tempo de produção	Curto	Mais longo
Adaptabilidade a diferentes tipos de metais e ligas	Sem limitações	Sem limitações
Adaptabilidade a peças de diferentes tamanhos	Não há restrições, excepto à parte superior da moldação que não deve ultrapassar 50 kg	Limitado a peças pequenas
Custo dos modelos	Baixo custo	Custo elevado
Adaptabilidade a protótipos	Baixo custo	Custo elevado

As moldações cerâmicas permitem a reprodução rigorosa de formas e detalhes, tornando possível obter directamente as ferramentas, dispensando quase por completo as técnicas de maquinagem associadas à produção tradicional, de moldes metálicos para a injeção de plásticos ou ferramentas para outros processos produtivos. A obtenção das primeiras peças ou protótipos é assim bastante mais rápida do que no processo tradicional, sendo esta uma das grandes vantagens deste processo de fabrico de ferramentas por fundição de precisão.

² Esta tabela é uma compilação que serve apenas para termos comparativos e não para termos absolutos.

A conversão de modelos obtidos por técnicas de prototipagem rápida, em moldes metálicos ou ferramentas, utilizando moldações cerâmicas tem vindo a ocupar um lugar de destaque nas mais variadas indústrias [18]. Este facto deve-se essencialmente à necessidade de rapidamente obter peças funcionais ou protótipos, sem ter que recorrer a moldes obtidos pelos processos convencionais de produção dos mesmos.

Actualmente, para o fabrico de moldes recorre-se à maquinaria de blocos em aço ou, então, à abertura de cavidades moldantes por electroerosão. No caso de pequenas séries, poderá substituir-se os blocos de aço por blocos de alumínio. Este processo de fabrico de moldes além de ser moroso, é de elevado custo e com grandes desperdícios de matéria-prima [18,22].

Uma alternativa para a execução destes moldes e outras ferramentas, consiste em vazar o metal, em que estas ferramentas devem ser feitas, em moldações cerâmicas. O recurso à fundição nestes casos, deve assegurar uma boa reprodução de todos os pormenores dos modelos e boa qualidade superficial. Para esse efeito, a reprodução dos modelos deve ser feita por contra formas (negativos), usando elastómeros (silicones, poliuretanos) ou resinas epóxicas [22].

A partir das contraformas serão produzidas as moldações (ou modelos) em materiais cerâmicos de muito baixa granulometria [19,21,22] – as diferentes granulometrias são seleccionadas em função do grau de reprodutibilidade e resistências pretendidas. Por exemplo, moldações com grandes detalhes precisam, por um lado, de elevada percentagem de finos e por outro lado, precisam de resistência ao jacto de metal líquido, a qual é dada pelos cerâmicos de maior granulometria. Por vazamento de ligas de cobre, alumínio, ou ainda utilizando aços ou ferros fundidos, obtêm-se directamente as ferramentas (cavidades moldantes do molde metálico).

O processo clássico, de fundição em moldações cerâmicas, segue, basicamente, o diagrama de fluxo da figura 1.2.

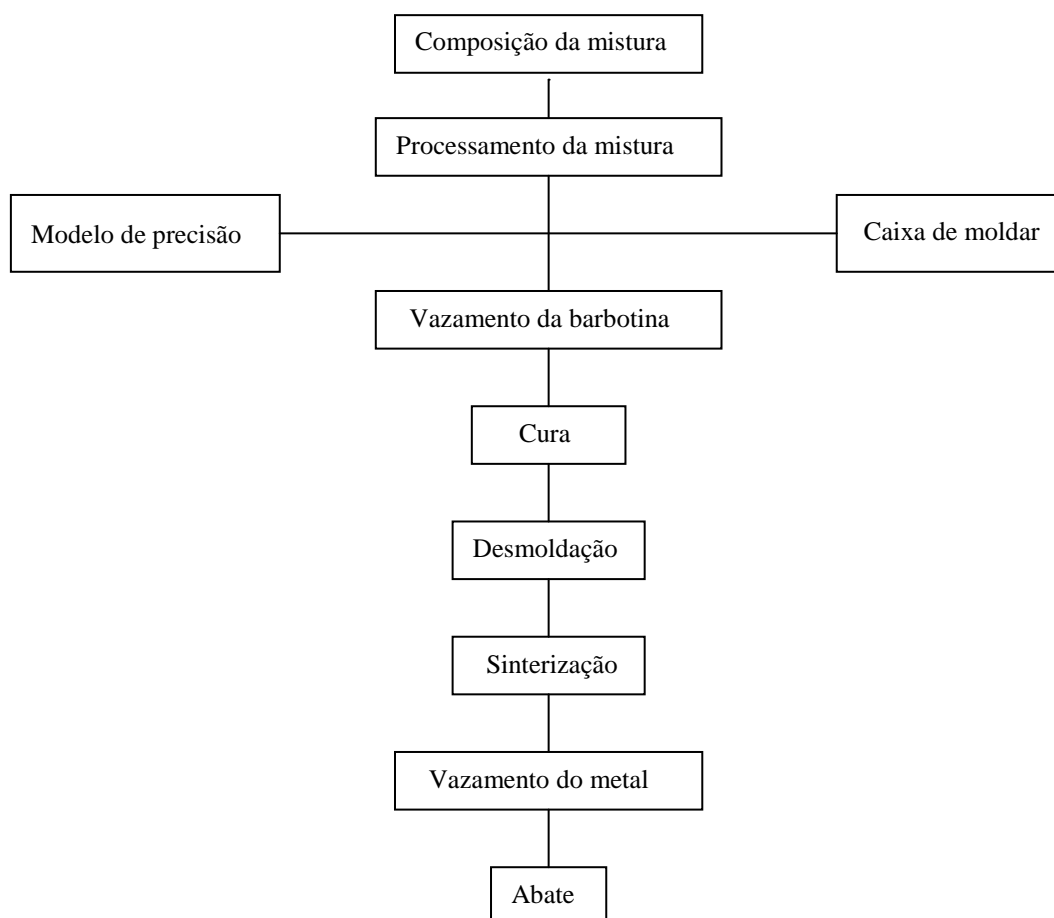


Figura 1.2-Esquema básico do processo clássico de fundição de precisão

Tendo em conta o que foi exposto, pode-se dizer que o processo de fabricação rápida de ferramentas, utilizando a fundição de precisão, tem as seguintes vantagens [7,8,10,12]:

- Fabrico rápido de moldes e outras ferramentas para obtenção de protótipos ou pré-séries,
- Facilidade de reparação, alteração do traçado e pormenores do molde metálico,

- Preço relativamente reduzido quando comparado com as tecnologias tradicionais de maquinagem e electroerosão,
- Utilização de diferentes tipos de materiais cerâmicos, consoante o grau de reprodutibilidade pretendido,
- Ausência de operações de maquinagem, a não ser eventuais facejamentos e pequenas operações de furação.

Por estes motivos o INEGI/CETECOFF, desenvolveu e tem vindo a aperfeiçoar um processo [18] para converter modelos obtidos por técnicas de prototipagem rápida, tais como a estereolitografia (SL), fabricação de objectos por camadas (LOM) ou técnicas tradicionais de fabricação de modelos, em moldes metálicos, com o objectivo principal de produzir ferramentas funcionais, directamente pelo vazamento de diferentes tipos de metais e ligas metálicas, em moldações cerâmicas de precisão.

Os materiais cerâmicos (molochite, zircão) e ligantes utilizados no processo têm custos que não podem ser ignorados, tornando-se pois aconselhável a utilização de moldações cerâmicas compósitas (em desenvolvimento no INEGI/CETECOFF) para a obtenção de ferramentas metálicas de dimensões elevadas. Por outro lado, a utilização de moldações em gesso (Plaster Moulding) pode-se tornar economicamente mais viável para a produção de alguns tipos de ferramentas, nomeadamente, obtenção de moldes de injeção para a indústria de plásticos.

Ao longo dos últimos anos, o INEGI/CETECOFF tem vindo a desenvolver o estudo e a tecnologia no campo das Moldações Cerâmicas para a fundição de precisão, nomeadamente no Processo Shaw e no processo de fundição por cera perdida (Investment Casting).

Ao contrário das moldações cerâmicas, o processo de Moldações em Gesso, não têm sido objecto de estudos sistemáticos que permitam estabelecer um procedimento para a implementação do processo sem ter que recorrer a receitas comerciais.

O presente trabalho surge assim, como uma sequência lógica para a exploração de uma área que, não está suficientemente desenvolvida no nosso país e que é de

extrema importância para o domínio de uma tecnologia global que permitirá o fabrico rápido de ferramentas utilizando moldações cerâmicas ou moldações em gesso.

Tendo em conta estes factos, procurou-se com este trabalho criar uma mistura que permitisse o fabrico de moldações em gesso a preços mais reduzidos do que as formulações comerciais. As moldações em gesso assim obtidas possibilitarão, em determinados casos, vazar ligas metálicas a preços mais reduzidos do que os obtidos utilizando moldações cerâmicas.

Serão estudadas misturas comerciais elaboradas para o processo de Moldação em Gesso, sendo este estudo centrado nas seguintes características:

- Composição química,
- Granulometria,
- Densidade,
- Resistência mecânica em *verde* e após ciclo térmico de secagem e calcinação,
- Rugosidade
- Permeabilidade.

Pretende-se assim obter um conhecimento mais aprofundado do processo de moldações em gesso o que irá possibilitar a formulação de misturas, a mais baixo preço para o mesmo processo. Os materiais a utilizar para as misturas serão caracterizados em termos de densidade, permeabilidade e resistência mecânica.

Será igualmente realizada uma análise da viabilidade económica do processo fazendo uma análise comparativa, em termos de custos, entre as moldações obtidas com misturas comerciais e as obtidas neste trabalho.

Finalmente, espera-se com este trabalho tentar otimizar um processo, para a produção de determinadas peças metálicas vazadas em moldações em gesso, com custos inferiores ao das formulações comerciais ou das moldações cerâmicas.

2. Moldações em Gesso (Plaster Moulding)

A obtenção de peças metálicas através de moldações em gesso, tem-se tornado, ao longo dos anos, um processo muito utilizado na fundição de materiais não ferrosos, tais como o alumínio, magnésio, prata, ouro, zinco e ligas de cobre [23,24,25].

O gesso como material para moldes de fundição de ligas não ferrosas, tem sido utilizado desde há vários séculos. Apesar de Leonardo Da Vinci e Benvenuto Cellini terem utilizado o gesso, já os chineses o tinham feito anteriormente. As primeiras utilizações do gesso em fundição, foram em grande parte para a produção de estatuária [26]. Os quatro processos reconhecidos de fundição em moldação em gesso são [1,3]:

- Processo convencional – moldações em bloco (Conventional plaster molded castings),
- Meias caixas de moldação (Match-plate pattern plaster molded castings),
- Processo “Antioch”,
- Moldações em gesso porosas (The foamed plaster process). Este processo também pode ter a designação de *processo de moldação com gesso em espuma* [1].

As moldações em gesso, obtidas por qualquer um destes processos, são especialmente adaptáveis à produção de fundidos não ferrosos. No caso dos materiais ferrosos, devido às elevadas temperaturas de vazamento, o enxofre presente no gesso reage com o metal líquido, originando peças com má qualidade superficial e moldes de baixa resistência mecânica [23,24]. Apesar do processo de moldações em gesso não ser

considerado um concorrente directo dos processos em molde permanente, fundição em areia ou fundição injectada, é reconhecido como um processo capaz de produzir peças não possíveis de obter por esses mesmos processos [24,27], com grande rigor dimensional (maior do que aquele que pode ser obtido por moldações de areia, incluindo o de Shell Moulding ou o vazamento por gravidade em moldes metálicos permanentes [1]), pormenores complexos e a obtenção de secções finas não possíveis de obter por qualquer outro processo. Por outro lado, é um processo considerado competitivo, especialmente no caso de peças de grandes dimensões em alumínio ou ligas à base de cobre, quando comparado com o processo de cera perdida [24].

A tabela 2.1 demonstra o tolerânciamento dimensional que pode ser obtido com este processo de fundição.

Tabela.2.1: Tolerâncias típicas sugeridas para o processo de moldações em gesso (adaptado de [18])

Dimensões (mm)	Tolerâncias normais (mm)	Tolerâncias de alta qualidade (mm)
<50	± 0.25	± 0.13
]50, 75]	± 0.40	± 0.25
]75,100]	±0.50	±0.32
]100,125]	±0.60	±0.37
]125,150]	±0.68	±0.40
]150,175]	±0.74	±0.42
]175,200]	±0.78	±0.45
]200,225]	±0.85	±0.47
]225,250]	±0.92	±0.50
Varição máxima	±1.00	—

Nota: para dimensões que atravessem o plano de apartação, deve-se adicionar uma tolerância entre ±0.25 a ±0.38 mm.

Devido à natureza isolante dos moldes desidratados (a condutividade térmica do gesso é 0.20-0.45 cal/m.s °C [1]), a taxa de arrefecimento do metal dentro do molde é

bastante baixa, o que permite o enchimento das secções mais finas, promove a uniformidade em termos da estrutura metalúrgica e propriedades mecânicas, assim como evita os possíveis problemas de distorção das peças durante o arrefecimento [24]. Este facto é extremamente importante quando se pensa no aumento significativo dos custos que poderiam advir com operações subsequentes de desempenamento e de maquinagem.

A figura 2.1 compara os tempos de arrefecimento obtidos com peças idênticas em moldações em areia e em moldações em gesso obtidas pelo processo convencional e o pelo processo “Antioch” (processos que serão abordados nos pontos 2.2.1 e 2.2.2 respectivamente).

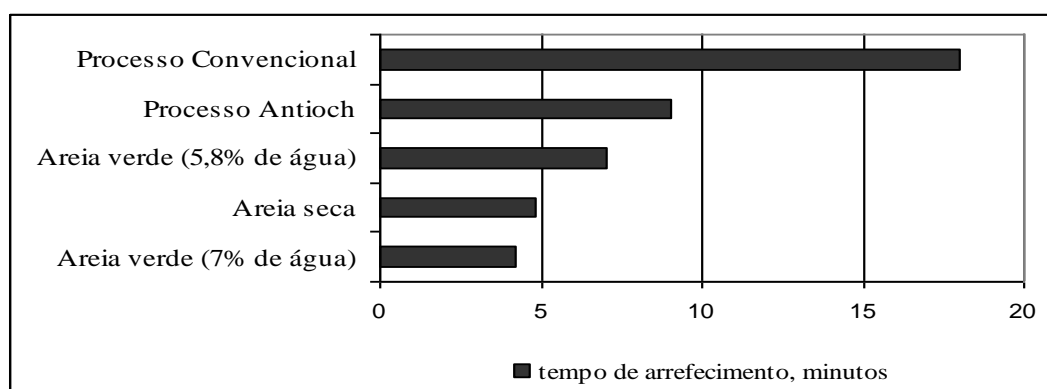


Figura 2.1- Comparação de tempos de arrefecimento para provetes vazados em 5 tipos diferentes de moldações (adaptado de [3,23]).

Por outro lado, este arrefecimento lento pode ser ao mesmo tempo, uma desvantagem, já que um arrefecimento lento pode causar um crescimento exagerado do grão, o que prejudica as propriedades mecânicas (nomeadamente, a tenacidade) finais das peças fundidas. Esta é a razão porque, de uma maneira geral, as peças metálicas produzidas por este processo têm propriedades mecânicas inferiores às produzidas, por exemplo, em moldações em areia [1].

Apesar de cerca de 90% das peças fundidas pelo processo de moldações em gesso pesarem menos de 10 kg, peças com cerca de 40 kg são produzidas em quantidades substanciais, podendo algumas chegar a pesar bastante mais. Uma peça em alumínio, com cerca de 2000 kg, foi fundida com sucesso por este processo [3,23].

De uma forma geral, as moldações em bloco de gesso, utilizam modelos permanentes [1], são constituídas por duas meias moldações, que após processadas paralelamente são montadas em bloco, para se proceder ao vazamento (processo idêntico ao de moldação em areia).

As moldações em areia utilizam geralmente modelos em madeira e são constituídas essencialmente por areia. As moldações em gesso, por outro lado, utilizam modelos maquinados em metal ou outro tipo de material, que não a madeira, tais como borrachas flexíveis de silicone (que facilitam bastante a desmoldação), resinas epoxy, obtendo-se um modelo de precisão rígido ou flexível. O material da moldação, consiste numa mistura de vários materiais em que o gesso cerâmico na forma de hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) é o principal elemento. A substituição da areia origina melhores acabamentos superficiais, maior detalhe de reprodução e maior exactidão dimensional. São também adicionadas ao gesso determinados materiais para se obterem melhores características em termos, por exemplo, de resistência mecânica, controle do tempo de presa e contracções do molde. [3,24,28].

A mistura dos diferentes materiais com a água é feita manualmente ou recorrendo a meios mecânicos. A barbotina assim obtida é normalmente vazada numa caixa de moldar, onde se encontra o modelo (ou meio modelo), do qual se pretende obter o negativo.

O modelo pode ser obtido por processos convencionais, por prototipagem rápida ou manualmente (utilizando a técnica da escultura). Na concepção do modelo deve-se ter em atenção as contracções e dilatações da moldação e as contracções do metal, que ocorrem durante a solidificação.

O modelo deve ser, imediatamente antes do vazamento da barbotina, revestido com um agente desmoldante, por exemplo um óleo de baixa viscosidade emulsionado com cera de água, grafite ou mica misturados com óleo parafínico [12].

É importante vazar a barbotina assim que esteja pronta, afim de não perder a viscosidade necessária para que possa fluir lentamente sobre a superfície do modelo. Este procedimento previne o aprisionamento de ar em pequenas depressões do modelo e ajuda a assegurar a obtenção de boa reprodutibilidade de detalhes. Para obter uma superfície lisa sem bolhas de ar, deve-se fazer vibrar a caixa de moldação onde foi vazada a barbotina.

O vazamento pode ser realizado em vácuo, com ajuda ou não de pressão [23,24], para não haver incorporação de ar na barbotina o que poderia causar a formação de bolhas de ar no molde. O vácuo também tem a função de melhorar a permeabilidade dos moldes, facto que se torna bastante importante na libertação de gases durante o vazamento do metal no molde [28].

O molde em gesso é desmoldado e colocado num forno para secagem. Com a secagem (desidratação) pretende-se que toda a água que se encontra no molde, seja livre ou de ligação, seja retirada. Esta necessidade de que os moldes sejam completamente desidratados, prende-se com o facto de o gesso ser praticamente impermeável aos gases [27]. O ciclo térmico vai depender do tipo de mistura e da quantidade de água adicionada.

Após este ciclo procede-se à montagem das diversas partes (se as houver) que constituem a moldação. O vazamento do metal pode, se necessário, ser realizado em condições de vácuo. Após solidificação do metal, a moldação é separada do fundido, sendo geralmente partida.

Praticamente não existem restrições quanto à complexidade de formas e de tamanhos das peças que podem ser obtidas por este processo. O processo não está limitado a pequenas produções. Produções da ordem dos milhares podem ser facilmente obtidas por reprodução dos modelos através do processo de produção de contra formas (negativos), já referido anteriormente.

O processo permite a produção de peças com formas complexas, sem praticamente a necessidade de acabamentos finais, como por exemplo, rotores de pás para bombas, turbinas para a indústria aeroespacial, componentes para fuselagem de aviões, instrumentos científicos e ópticos [1,3]. Utiliza-se também, no desenvolvimento de ferramentas, quer pela redução de custos quer pela economia de tempo, na produção de protótipos e peças experimentais para outros tipos de indústria de fundição, como é o caso da indústria da fundição injectada [27].

Uma das mais importantes e criativas aplicações deste processo, é na produção rápida e de baixos custos, de ferramentas para a indústria de fundição em areia e indústria de plásticos [24], e, especialmente no que se refere a este ultimo caso, à produção de moldes para a injeção de plásticos.

Nas fundições em areia, já há várias décadas que se utilizam, com sucesso, o processo de moldação em gesso para se obterem modelos em metal, em quantidades

razoáveis, que permitam grandes produções de uma determinada peça a fundir. Para tal é feito um primeiro modelo em madeira (ou num outro material) a partir do qual serão obtidas as cavidades moldantes, nas quais será vazado o metal, que de uma maneira geral são ligas de alumínio [24]. O processo utilizado, para a produção destes modelos é o de meias caixas de moldação em gesso, semelhante ao utilizado na fundição em areia, o que faz com que o modelo em madeira seja, no fundo, constituído por dois modelos, cada um deles dando origem a meia moldação em gesso. Depois de sofrerem o ciclo térmico de secagem, as duas meias moldações são montadas para ter lugar o vazamento.

Na indústria de injeção de plásticos, quer em termos de redução de custos quer em economia de tempo, este processo apresenta-se também como um método bastante interessante na produção de moldes. O processo é muito idêntico ao descrito para a fundição em areia, permitindo a utilização de modelos iniciais em madeira ou plástico que podem ser utilizados directamente na produção de negativos (ou para produção de modelos iguais em gesso). As vantagens deste processo são [1,3,12]:

- É possível obter peças com desenhos complexos,
- A exactidão dimensional dos fundidos é elevada, sendo semelhante à obtida pelo processo de cera perdida,
- Obtenção de peças com um bom acabamento superficial,
- Peças de secções finas (da ordem de 0.64 a 1 mm) são bem conseguidas,
- O arrefecimento lento minimiza o risco de empenamento das peças, promove a uniformidade da estrutura metálica e das propriedades mecânicas dos fundidos,
- Excelente réplica dos detalhes dos modelos,
- É 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. Pode-se assim, otimizar as propriedades mecânicas em áreas isoladas de peças complexas, reduzindo tensões residuais e distorções.

Como desvantagens pode-se citar [1,3,12]:

- Custos elevados (para grandes séries) devido ao longo tempo de processamento das moldações e à sua não reutilização,
- O processamento das moldações requer mais equipamento do que o necessário para a maior parte dos restantes processos,
- Devido à lentidão dos procedimentos necessários para a obtenção das moldações, é necessário multiplicar o número de modelos e equipamento de processamento, com vista ao cumprimento de prazos de entrega,
- A permeabilidade das moldações é extremamente baixa, sendo necessário vazamentos sob pressão ou vácuo, ou utilizar procedimentos especiais para aumentar a permeabilidade das moldações,
- É exigido um rigoroso controlo de todo o processo para garantir uma boa reprodutibilidade.

Os diferentes métodos que existem para este tipo de fundição são bastante semelhantes, variando apenas no tipo de mistura, técnicas de mistura e processos de cura.

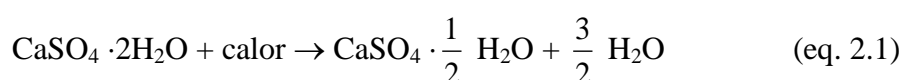
2.1 Gesso de Paris (Plaster of Paris)

O gesso é um mineral que cristaliza no sistema monoclinico, apresenta um hábito prismático e, geralmente é maciço e granular. É incolor mas, conforme as inclusões pode apresentar-se branco, cinzento, amarelo, castanho ou azulado. Tem brilho vítreo e é transparente ou translúcido. Tem dureza 2 (na escala de Mohs) e densidade 2.3 g/cm^3 [29].

A fórmula química do gesso (sulfato de cálcio bihidratado) é $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. É constituído por 79.1% de CaSO_4 e por 20.9% de $2\text{H}_2\text{O}$ [30] sendo a sua composição estequiométrica: 32.5% de CaO , 29.9% de H_2O e 46.6% de SO_3 [29,30].

É 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 [30].

O gesso cerâmico (gesso destinado a moldes cerâmicos) é constituído fundamentalmente por sulfato de cálcio hemihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, que é obtido pela 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 [29,31]. Este facto pode ser traduzido pela seguinte equação [29]:



O gesso para fundição divide-se em dois tipos: o cinzento, normalmente conhecido por *metal casting base* é menos puro e mais barato que o gesso branco, conhecido como *white moulding plaster* (gesso branco para moldar) [23].

A calcinação do gesso branco faz-se por dois processos diferentes dos quais resultam produtos diferentes: o α -hemihidratado (α -HH) e o β -hemihidratado (β -HH) [27]. O primeiro é obtido em autoclave sob pressão (aproximadamente 8 bar) e a temperaturas da ordem dos 170°C [31]. O segundo resulta da calcinação do gesso a temperaturas da ordem dos 120°C [3], à pressão atmosférica [31]. A completa desidratação dos hemihidratos, a temperaturas entre os 120 e os 150°C, dá origem à anidrite solúvel ou γ - CaSO_4 , facilmente reversível em presença de humidade [31]. Continuando a subir a temperatura e acima dos 320°C forma-se a anidrite insolúvel ou β - CaSO_4 [31].

O resultado dos dois processos de produção confere aos respectivos hemihidratados do gesso propriedades físicas diferentes, não se observando contudo variação na composição química e mineralógica [31]. Estas diferenças verificam-se na resistência mecânica, resistência ao desgaste, em que o α -HH apresenta valores superiores ao β -HH, e na capacidade de absorção de água, observando-se valores mais elevados para o β -HH [31]. A densidade também é ligeiramente diferente, obtendo-se valores de 2.76 g/cm³ para o α -HH e de 2.63 g/cm³ para o β -HH [31].

Quando é adicionada água ao gesso de Paris (hemihidratado), este torna à forma de bihidratado, tornando-se a mistura sólida em poucos minutos, ou seja, ganha presa. A formação do gesso bihidratado a partir do hemihidratado misturado com a água, faz-se por destruição da estrutura do hemihidratado e crescimento de cristais de bihidratado de hábito acicular e tamanho bem maior do que os do hemihidratado. O crescimento dos cristais de sulfato bihidratado torna a barbotina sucessivamente mais viscosa até se tornar dura [29].

Os cristais de gesso bihidratado ao crescerem ficam cercados por um excesso de água, que ao evaporar-se originam a precipitação de mais cristais bihidratado nos pontos de contacto entre os cristais aciculares previamente formados, reforçando a rigidez da rede tridimensional [29].

Existem actualmente duas teorias que explicam a presa do gesso [29]:

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

O gesso cerâmico absorve facilmente água e rehidrata recristalizando como gesso bihidratado em cristais entrelaçados que depois formam uma massa dura [29]. Este fenómeno faz com que tenha grande aplicação na indústria de moldes. A

quantidade de água necessária para esta combinação química é de 18.6% do peso seco do gesso cerâmico [31]. O gesso cerâmico deve, no entanto, ser misturado com uma quantidade de água superior a esta, afim de distribuir a água adequadamente e formar uma massa plástica que possa moldar-se, na qual estão incluídos numerosos poros que irão aumentar a permeabilidade do gesso [29].

A esta razão, gramas de água /gramas de gesso, chama-se consistência. No processo de moldações em gesso, a consistência é dada pela razão água (gramas)/100 g de mistura [24].

2.2 Descrição do Processo

2.2.1 Processo Convencional

No processo convencional, a mistura é adicionada à água, com o propósito de produzir uma pasta, barbotina, que será posteriormente vazada em cima de um modelo permanente, colocado no interior de uma caixa de moldação. Devido à barbotina começar a ganhar presa logo após a sua preparação, tem que ser imediatamente vazada sobre o modelo (ou na caixa de machos) [3], o que faz com que tenha que estar tudo previamente preparado para o vazamento imediato da barbotina. O tempo de presa depende do tipo de mistura, mas 30 minutos é, de uma maneira geral, o tempo máximo para a barbotina ganhar presa. A barbotina deve ser vazada a uma velocidade constante em cima do modelo, para deslizar suavemente por toda a superfície.

Após presa e desmoldação, o molde é colocado numa estufa ou forno a uma temperatura superior a 160 °C [1,3] podendo variar entre 175 e 870°C durante um ciclo de 45 minutos a 72 horas [23]. O facto dos fornos operarem a altas temperaturas não implica que todas as partes do molde tenham que atingir esta temperatura mas, o interior do molde deve estar a uma temperatura no mínimo de 105°C para assegurar uma remoção completa da água do molde [3,12,23]. Esta temperatura pode ser medida colocando um termopar no interior do molde [3,12,23].

O ciclo térmico (temperatura, tempo) para um molde com determinadas características tem de ser, de uma forma geral, determinado experimentalmente [3].

Uma vez encontrado este ciclo, o tempo e a temperatura de secagem devem ser rigorosamente controlados para melhor reprodutibilidade do processo [3,12,23].

Este ciclo de secagem é necessário para a remoção de toda a água livre e combinada quimicamente. A água combinada (também designada por água de hidratação ou de recristalização) é a água necessária para o processo de hidratação do gesso (e de outros componentes da mistura que possam sofrer um processo de hidratação) o que vai originar a ligação dos componentes da mistura. Água livre é o 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 mistura [33].

Todos os moldes produzidos pelo processo de moldações em gesso têm que perder a água combinada a uma profundidade abaixo da superfície do molde de pelo menos 13 mm [3].

O processo de secagem deve ser iniciado o mais cedo possível após desmoldação do modelo. Moldes (moldações) que secaram parcialmente à temperatura ambiente são mais susceptíveis de fissurar do que aqueles que são secos imediatamente após desmoldação [3]. Se os moldes tiverem que ser armazenados à temperatura ambiente por algum tempo, devem ser cobertos por um pano humedecido ou armazenados num local com uma atmosfera húmida [3].

O metal é, de uma maneira geral, vazado em condições de vácuo ou assistido por pressão para assegurar o enchimento completo da cavidade moldante. Isto deve-se ao facto das moldações em gesso produzidas pelo processo convencional terem baixa permeabilidade – cerca de 1 a 2 unidades AFS, que é um valor baixo quando comparada com os valores obtidos para a areia, que podem atingir 80 unidades AFS [3].

Basicamente, a sequência de produção de moldações em gesso pelo processo convencional pode ser descrita através dos seguintes passos [3]:

- Revestir com desmoldante os modelos (ou caixa de machos),
- Mistura dos ingredientes,
- Adicionar a mistura seca à água,
- Deixar “empapar” durante 2 a 4 minutos,
- Misturar durante 2 a 5 minutos,
- Vazar a barbotina no molde,
- Deixar ganhar presa (à temperatura ambiente) – o tempo de presa vai depender do tipo de mistura
- Desmoldar (retirar o molde em gesso do negativo),
- Secagem do molde (fornos ou muflas),
- Montagem dos componentes da moldação.

Após a montagem de todos os componentes da moldação (se existirem), o molde deve ser pré-aquecido antes do metal ser vazado. A temperatura mais utilizada neste processo é de 120°C [3]. Este pré-aquecimento pode ajudar a minimizar defeitos nas moldações provocadas pelo choque térmico e uma melhor reprodução de detalhes no fundido [3].

O processo em duas meias caixas de moldação é uma adaptação do processo convencional, pelo que foi dito anteriormente é também válido neste caso. As alterações de detalhe neste processo são apenas utilizadas para assegurar melhor acabamento superficial e precisão dimensional.

Os requisitos dimensionais para este tipo de moldações em gesso são [3]:

- Desfasamento entre a moldação superior e inferior não pode ser superior a 0.25 mm,
- A falta de paralelismo entre as duas cavidades moldante não pode ser superior a 0.51 mm.

A temperatura de secagem situa-se entre 120°C e 205°C, com ciclos de 12 a 72 horas [3].

2.2.2 Processo “Antioch”

O processo “Antioch” foi desenvolvido para ultrapassar as principais limitações do processo convencional, baixa permeabilidade das moldações e longas taxas de arrefecimento do metal no interior das moldações, sem com isso sacrificar as vantagens do processo de moldações em gesso.

Se os moldes em gesso, ainda no estado “verde”, forem parcialmente desidratados e em seguida rehidratados, os cristais de gesso recristalizam lentamente, sob a forma de grânulos, até atingirem dimensões equivalentes às de grãos de areia. Os moldes adquirem assim uma estrutura porosa, de permeabilidade relativamente elevada [3].

O processo “Antioch” aplica este fenómeno para a produção de moldes. Antes desmoldação, as moldações repousam à temperatura ambiente cerca de 15 a 20 minutos [3]. Após este estágio, são introduzidas num autoclave para ficarem sob vapor à pressão de 2 atmosferas. Em seguida são deixados à temperatura ambiente, durante 12 ou 14 horas, e finalmente são secos num forno a 175-230°C durante 1 a 70 horas. Este tratamento produz uma estrutura granular na massa da moldação o que lhe confere permeabilidade adequada [3,23].

A permeabilidade obtida por este processo é maior do que a obtida pelo processo convencional, situando-se entre 15 e 30 unidades AFS [3], embora também seja referido que se possam encontrar valores compreendidos entre 25 e 50 unidades AFS [23].

As moldações deste processo são um pouco menos resistentes do que as produzidas pelo processo convencional, mas mais resistentes do que as produzidas pelo processo de moldações em gesso poroso [3].

Devido ao facto das misturas para este processo terem, de uma forma geral, cerca de 50% de sílica, estes moldes apresentam maior condutividade térmica do que aqueles que são produzidos pelo processo convencional [3,23]. Este facto pode ser comprovado pela análise da figura 2.1, a qual mostra que a taxa de arrefecimento de um provete vazado num molde “Antioch” é apenas 20% mais longa do que a taxa encontrada para igual provete vazado numa moldação em areia e menos de metade do que a obtida com o processo convencional. Com o processo “Antioch” continua-se a ter um arrefecimento lento que, por um lado permite o evitar de problemas de distorções e subsequentes operações finais de maquinagem e desempenamento e, por outro lado, evita o crescimento exagerado do tamanho de grão.

Devido à sua estrutura porosa, os moldes produzidos por este processo têm baixa resistência mecânica após cura [3]. Para evitar o colapso das moldações, principalmente as de dimensões mais elevadas, é frequente utilizar reforços, tais como rede de arame no seu interior.

Antes do processo de desidratação-rehidratação, estes moldes têm uma resistência em “verde” elevada. Esta característica permite uma fácil desmoldação do molde, podendo-se, por isso, produzir moldações com configurações bastante complexas sem se correr o risco de danificar o molde.

Ao contrário dos moldes produzidos pelo método convencional, os moldes “Antioch” não contraem, antes pelo contrário, sofrem uma ligeira expansão, que se situa entre 0.001 a 0.0025 mm/mm, durante o processamento [3].

Como desvantagem deste processo são referidos longos períodos de produção dos moldes e a utilização de equipamentos mais onerosos.

A sequência de operações do processo “Antioch” para a obtenção de moldes é traduzida pelos seguintes passos [3,23]:

- Revestir modelos (ou caixa de machos),
- Mistura dos ingredientes,
- Adição da mistura seca à água,
- Deixar “empapar” durante 1 a 3 minutos,
- Misturar durante 2 a 4 minutos,
- Vazar a barbotina,
- Deixar ganhar presa à temperatura ambiente durante 15 a 20 minutos,
- Remover o modelo,
- Desidratar em autoclave durante 6 a 12 horas,
- Rehidratar ao ar durante 14 horas,
- Secagem dos moldes (ou machos), no forno a 175-230°C durante 1 a 70 horas,
- Montagem da moldação.

2.2.3 Moldações em gesso porosas

O processo de moldações em gesso porosas (ou em espuma), oferece, como principal vantagem, um meio de obter uma maior permeabilidade nos moldes do que aquela que pode ser obtida pelo processo convencional sem recorrer à operação de introdução dos moldes num autoclave como no processo “Antioch” [3]. Este ganho é

conseguido através da introdução de um agente espumante (foaming agent) na mistura seca ou à barbotina [3,23]. Este agente e o processo de mistura faz com que sejam introduzidas muitas bolhas de ar no interior da barbotina, diminuindo a densidade da mesma e aumentando o seu volume.

Os moldes produzidos por este método têm superfícies lisas com células de ar abaixo da superfície. Durante a presa e a subsequente secagem dos moldes, estas células ficam interligadas, produzindo-se, assim, um meio eficaz para o escape de gases aquando do vazamento do metal [3,23].

A permeabilidade destes moldes depende principalmente do aumento de volume da barbotina, provocado pela incorporação de ar durante o processo de mistura. Para a maior parte dos moldes, um aumento de volume entre 50 a 100% é recomendado [3] (ver tabela 2.2).

Tabela 2.2- Relação entre o aumento de volume, o peso e a permeabilidade para moldações em gesso porosas [23].

Aumento de volume (%)	Peso (kg/cm ³)	Permeabilidade, AFS (moldes secos)
0	2.5	1.0
50	1.7	5.0
61	1.6	8.5
68	1.5	11.5
76	1.4	16.5
100	1.3	30.0

A sequência de operações que se apresenta em seguida, é típica da rotina exigida para a produção deste tipo de moldes (adaptado de [3]):

- Revestir os modelos,
- Adicionar à mistura, com o agente espumante já nela incluído, água entre 32 e 43 °C, até se obter um consistência entre 0.8 a 1. O tempo de mistura será o necessário para se obter um aumento de 100% de volume,

- Vazar a barbotina,
- Deixar ganhar presa,
- Desmoldação,
- Secagem dos moldes, entre 175 a 260°C durante 8 a 16 horas dependendo do tamanho do molde. Estes moldes são muito isolantes termicamente podendo gerar gradientes térmicos susceptíveis de provocar alterações dimensionais que podem causar a fissuração do molde. É citado que condições que possam causar choque térmico acima de 120°C cevem ser evitadas,
- Montagem da moldação e vazamento do metal.

2.3 Fabrico das Moldações em Gesso

2.3.1 Preparação da Barbotina (Plaster Slurry)

Diferentes formulações podem ser utilizadas para o processo de moldações em gesso. Contudo, em todas elas o principal componente é o gesso, gesso cerâmico ou gesso de Paris, que é fundamentalmente constituído por sulfato de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$).

Pode-se utilizar neste tipo de fundição, gesso puro [12], mas devido às contracções a que este material está sujeito, é comum a utilização de misturas secas constituídas por gesso cerâmico e outros materiais, com o objectivo de controlar o tempo de presa, resistência em *verde* e após secagem, a permeabilidade e as características de contracção do molde [3,24].

Estes materiais podem ser a sílica e a farinha de sílica, que são dois materiais refractários que conferem resistência e refractariedade às moldações [8] e melhoram a condutividade térmica das mesmas [3], uma vez que a do gesso é muito baixa. Um factor a ter em atenção na utilização de sílica, como constituinte das misturas é que tipo de sílica se deve utilizar: cristalina ou amorfa. De acordo com a figura 2.2 é possível verificar que a sílica cristalina (quartzo), a partir dos 200°C apresenta uma forte expansão linear, enquanto que a sílica vítrea não varia mais do que 0.1% até 1200°C. Sendo assim, é de todo o interesse a não utilização da sílica cristalina em moldações em gesso.

Materiais como o cimento Portland (cimento hidráulico de alta resistência), fibra de vidro e terra alba (gesso de elevada pureza) são também adicionados, por vezes, para aumentar a resistência do molde e melhorar as características de presa das misturas [3]. Por exemplo, no processo “Antioch” o tempo mínimo de presa fica entre 6 a 7 minutos adicionando 3% de terra alba com água a uma temperatura de 32°C [3].

O cimento Portland é o cimento hidráulico mais comum e é composto essencialmente por silicato de cálcio anidro de que é um exemplo é o silicato tricalcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) [34]. O cimento Portland ganha presa através de uma reacção complexa com a água formando uma composição hidratada [34]. Quando endurecido este material pode conter uma porosidade acima de 30%, que resulta numa resistência á flexão entre 4 a 10 MPa [28]. A tabela 2.3 apresenta o teor em óxidos para o cimento Portland normal.

Tabela 2.3: Teor em óxidos no cimento Portland normal [30]

Óxido	Teor (%)
CaO	60 – 65
SiO ₂	19 – 25
Al ₂ O ₃	3 – 8
Fe ₂ O ₃	1 – 5
MgO	0 – 5
SO ₃	1 - 3

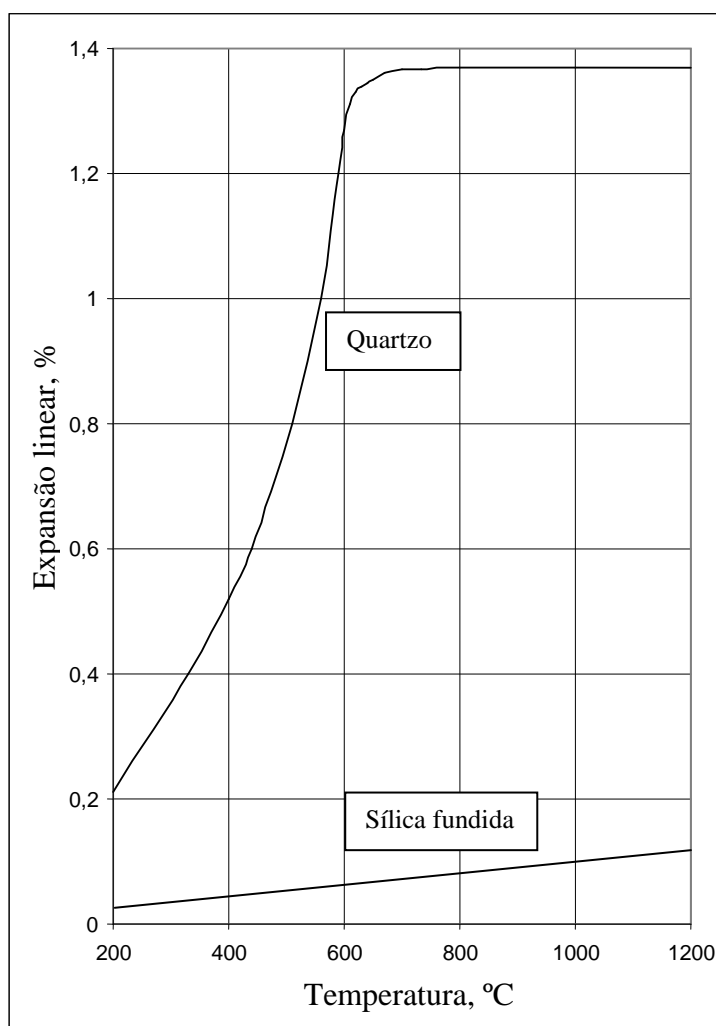


Figura 2.2- Expansão linear da sílica cristalina (quartzo) e da sílica fundida (amorfa) com a temperatura (adaptado de [3]).

Terra diatomácea absorvente também pode ser utilizada para conferir porosidade às moldações [28] e diminuir o tempo de presa [3]. Este material é um mineral com alto teor em sílica que deriva de esqueletos de organismos microscópicos. Uma análise típica deste material revela conter 85,3% de sílica, 5,4% de alumina, 1,1% de Fe_2O_3 , 1,1% de carbonato de cálcio e 5,6% de humidade. Tem uma densidade entre 0,8 a 1,2 g/cm^3 e um ponto de fusão de 1715°C. A sua constituição celular de elevada porosidade conferem-lhe baixa densidade e uma baixa condutividade térmica [31].

Pequenas quantidades de cal ajudam a prevenir a contracção do molde e aumentam o tempo de presa [27].

O talco cerâmico ajuda a prevenir o aparecimento de fissuras nas moldações [31,35], sendo por isso utilizado para controlar as características de expansão e contracção do molde. O talco é um silicato de magnésio hidratado com a fórmula química de $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$, embora alguns tipos de talco possam apresentar $4\text{MgO}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ [31]. Tem uma dureza de 1 na escala de Mohs e uma densidade entre 2.6 a 2.8 g/cm^3 . A tabela 2.4 apresenta a estequiometria teórica e típica do talco cerâmico.

Tabela 2.4: Composição estequiométrica teórica e típica do talco comercial [36].

Composição química	MgO	SiO ₂	H ₂ O
Teórica (%)	32	63	5
Típica (%)	26-33	35-62	5

As vantagens da utilização do talco em componentes cerâmicos são [31]:

- É uma fonte barata de MgO que serve como um fluxo, ou seja, baixa a temperatura de fusão de um outro material (ou misturas de materiais),
- Resistência eléctrica elevada a altas temperaturas,
- Tem um calor específico elevado e grande resistência aos ácidos,
- Diminui a expansão linear de corpos cerâmicos que trabalhem a altas ou baixas temperaturas.

Existem várias composições para as misturas secas, sendo algumas delas patenteadas e conhecidas pelos nomes dos seus inventores ou firmas proprietárias das patentes.

O principal interesse deste trabalho sobre moldações em gesso consiste neste preciso ponto: formular uma composição funcional e a um custo relativamente baixo, quando comparado com os custos das misturas comerciais.

De seguida (tabelas 2.5 a 2.10) dão-se alguns exemplos de misturas para o processo de moldações em gesso.

Tabela 2.5: Processo “Capaco” [37].

Ingredientes	% (em peso)
Gesso	80
Talco fibroso	20
Água	150

Tabela 2.6: Exemplo de mistura [38]

Ingredientes	% (em peso)
Gesso cinzento	48.5
Gesso branco	48.5
Cimento de gesso altamente resistente	2
Amianto	0.5
Terra alba	0.5
Água	150

Tabela 2.7: Exemplo de mistura seca (pode ser utilizada para ligas de Cu) [38]

Ingredientes	% (em peso)
Gesso	33.5
Cristobalite ³	33.5
Farinha de sílica	29
Terra diatomácea absorvente	2
Outras adições	2

³ Forma alotrópica da sílica cristalina formada a 1470°C durante a sinterização dos cerâmicos [31].

Tabela 2.8: Exemplo de mistura para fundição de ligas de Cu [38].

Ingredientes	% (em peso)
Gesso	70
Talco	25
Amianto	5
Terra alba	
Cimento de gesso	
Água	150

Tabela 2.9: Composição típica para o processo em meias-caixas de moldação [38].

Ingredientes	% (em peso)
Gesso branco	70
Talco	28.5
Cal hidratada	1
Cimento Portland	0.5
Água	165

Tabela 2.10: Composição típica para o processo “Antioch” [3].

Ingredientes	% (em peso)
Areia de sílica (AFS 50)	50
Gesso branco	42
Talco	7.5
Cimento Portland	0.5
Água	54

Qualquer que seja o tipo de mistura usada (e o processo de obter as moldações em gesso), é sempre adicionada uma certa quantidade de água para se obter a consistência desejada. A consistência é definida pela razão de peso de água por 100 g de peso de mistura seca [24]. O aumento do peso de água (maior consistência) origina misturas com menor resistência à compressão.

Além deste efeito, verifica-se que à medida que a consistência aumenta [27]:

- A resistência em *verde* diminui,
- A resistência após secagem diminui,
- A densidade diminui,
- A permeabilidade das moldações aumenta,
- Diminui a expansão do molde durante a presa,
- Diminui a contracção do molde durante a calcinação,
- Maior teor de água a remover, exigindo ciclos térmicos mais longos
- Torna-se mais fácil a desmoldação do molde.

Esta consistência tem grande importância nas propriedades finais da moldação como se pode ver na tabela 2.11.

É vantajoso o uso da maior consistência possível sem perder a resistência mínima adequada a cada moldação [27]. Na produção de moldações em gesso, a mistura seca é adicionada a uma quantidade elevada de água, numa relação de 120 a 180 partes em peso de água para 100 partes de mistura [23], sendo consistências representativas do processo valores entre 1.3 e 1.6 [27]. Deve-se ter sempre em atenção que a consistência para cada formulação e processo de moldações em gesso pode variar. Quando o valor adequado da consistência não é conhecido deve-se adoptar para ponto de partida 1.5 [3] ou 1.4 [23].

Tabela 2.11: Variação da resistência à compressão de provetes em gesso (após secagem), com a consistência [35]:

Resistência á compressão (após secagem), MPa	Consistência (g _{água} /100 g mistura)
75.8	30
41.4	37
27.6	47
13.8	68 (comum para o gesso de Paris)
1.4	140-180

Uma vez encontrada a composição e a consistências adequadas, o processamento correcto da barbotina deve incluir [27]:

- Exacta medição do peso da mistura seca,
- Medição cuidadosa da quantidade de água (em peso) a qual deve ser límpida, potável e estar a uma temperatura entre 32 e 38°C [27]. Valores compreendidos entre 23.5 e 43°C são também referidos [31], sendo no entanto importante reter que a água quente ajuda a minimizar as contracções enquanto que a água fria aumenta este efeito [27],
- Controle do tempo que a mistura demora *embeber* a água,
- Controle do tempo de mistura,
- Uso de um moinho e de um recipiente adequados.

Embora a mistura da barbotina possa ser realizada à mão, ela deve ser preparada com o auxílio de processos mecânicos. Estes processos tendem a evitar bolhas de ar e subsequentes poros nas moldações e permitem a obtenção de uma mistura mais

uniforme [27]. Para o efeito utiliza-se uma cuba metálica (de aço inoxidável de preferência) com um agitador de hélice.

As dimensões da cuba devem respeitar os seguintes requisitos [3]:

- O diâmetro da base deve ser aproximadamente igual a $2/3$ do diâmetro superior,
- A altura deve ser igual ou ligeiramente maior do que o diâmetro superior,
- A hélice deve estar orientada, em relação à vertical, de um ângulo que pode variar entre 10 e 15° , de modo a movimentar o líquido até baixo,
- A hélice deve ficar 25 a 50 mm do fundo da cuba.

Uma cuba típica para preparação da barbotina encontra-se representada na figura 2.3.

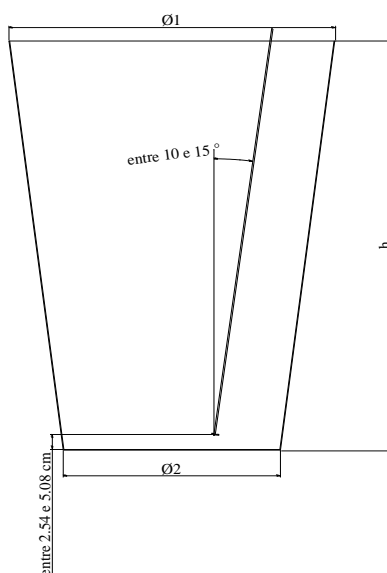


Figura 2.3: Forma recomendada para uma cuba e posição da hélice para a mistura de barbotinas para a produção de moldações em gesso (adaptado de [3]).

Deve-se evitar que o tempo de mistura exceda o tempo necessário para uma adequada homogeneização, já que tempos longos tendem a provocar um aumento da expansão do molde durante a presa e um aumento da incorporação de ar no interior da barbotina [27].

A velocidade de presa também é influenciada pela velocidade e tempos de mistura: velocidades associadas a baixos tempos de mistura provocam uma redução no tempo de presa [27].

O procedimento indicado é comum aos processos convencional e “Antioch”. No processo de moldações em gesso porosas, a misturadora tem de ter a capacidade de introduzir bolhas de ar na mistura, diminuindo assim a densidade e aumentando o volume da barbotina. Após secagem formam-se no interior do molde células de ar com um diâmetro não superior a 0.25 mm [3]. Células com diâmetros superiores correm o risco de entrar em colapso sob a ação da pressão exercida pelo metal vazado. Quanto maior for a potência do misturador, mais pequenas serão as células de ar e melhor será o acabamento superficial [3].

O misturador deve ter duas velocidades: uma elevada (~1750 rpm) para a mistura dos ingredientes da mistura seca com a água, e uma velocidade mais baixa (~800 a 1000 rpm) para introduzir ar na barbotina [3,23].

Após adição da mistura à água deixa-se repousar durante 30 segundos. O processo de mistura inicia-se a velocidade de 2500 rpm durante 15 a 30 segundos [3,17]. Após este tempo de mistura, a hélice é elevada o suficiente até estar a um altura que permita introduzir ar na mistura, criando um vortéx [23]. Aproximadamente metade do disco deve estar visível. O disco tem, então duas posições de trabalho: uma para misturar e outra para misturar e introduzir ar no interior da barbotina (ver figura 2.4).

O tempo de mistura depende do aumento de volume desejado [3]. É referido que par 15 Kg de barbotina, 60 segundos de mistura nesta fase provocam um aumento de volume de 70% [23].

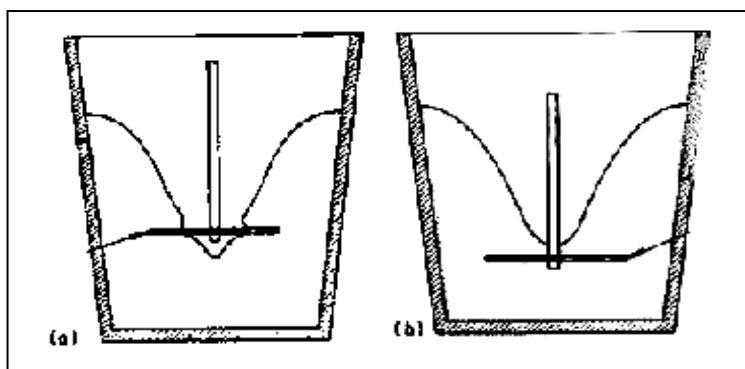


Figura 2.4: Posicionamento do disco no processo de moldações em gesso porosas para a) incorporação de ar no interior da barbotina e b) misturar a mistura seca com a água (adaptado de [23]).

Neste processo não se utiliza uma hélice de pás (como nos processos anteriores), mas sim uma hélice redonda, de borracha e com 3 mm de espessura [3] (ver figura 2.5).

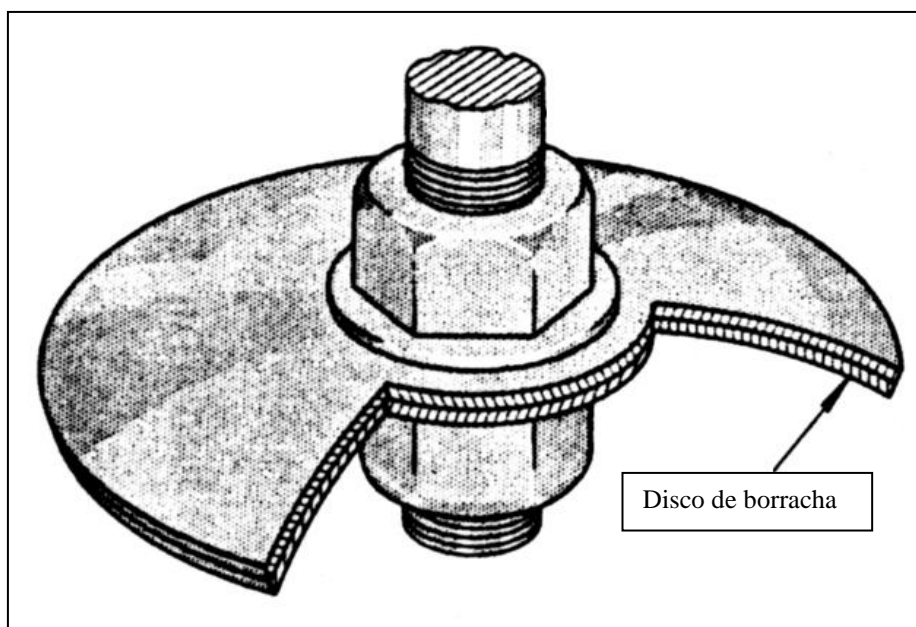


Figura 2.5: Esquema em corte de um disco de borracha para a preparação da barbotina no processo de moldações em gesso porosas (adaptado de [3]).

2.3.2 Tempo de Presa (Cura)

O tempo de presa é o tempo que se deve aguardar entre o vazamento da barbotina e o momento em que o endurecimento desta torna possível efectuar a desmoldação. Pode variar entre 5 e 20 minutos [3], e depende basicamente da consistência da mistura

Esta reacção de presa pode ser detectada através do aumento de temperatura que se verifica no início da presa [29], aumento esse que continua até ao fim da presa. Este aumento da temperatura deve-se à libertação de calor à medida que o hemihidratado se combina com a água [29].

Durante a presa ocorre um a dilatação de aproximadamente 0.1% a 0.2%, sendo esta magnitude inversamente proporcional ao conteúdo de água, e dependendo também da pressão exercida sobre o molde [29].

Pequenas quantidades de aceleradores e retardadores podem ser adicionados para controlar o tempo de presa e expansão térmica. Cloreto de sódio, sulfato de potássio e sulfato de cálcio desidratado em pó são aceleradores da presa muito utilizados [38]. Ácido cítrico e citrato de sódio são usados como retardadores de presa [38].

2.3.3 Secagem e Calcinação

Após presa os moldes em gesso são secos em fornos (ver ciclos térmicos para cada processo nos capítulos 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3). Devem ser colocados em tabuleiros metálicos perfurados e colocados, então, no forno de preferência eléctrico, com circulação de ar no interior [12].

Esta é uma etapa muito importante na produção de moldações em gesso, já que é necessária para retirar toda a água que se encontra no interior da mesma.

A prática demonstra que melhores resultados são obtidos quando a secagem dos moldes é efectuada no mesmo dia da cura e desmoldação [3,8,16]. Quanto maior for o tempo entre a cura e a secagem, maior será a contracção do molde [3,12,23].

As moldações que ficam a secar à temperatura ambiente durante muito tempo, tornam-se frágeis e não conseguem aguentar a secagem [3,12,23].

O estágio inicial de secagem é muito importante, visto que, se aquecermos rapidamente a moldação grande quantidade de água livre ainda existente no interior do molde vai formar bolsas de vapor que podem levar á desagregação da moldação [3,8,16].

Os factores que determinam o tempo necessário da secagem são [29]:

- Temperatura,
- Peso e espessura da moldação,
- Área de superfície,
- Nível de eficiência de circulação de ar no forno.

Enquanto houver água na moldação, é impossível que a temperatura no centro da secção mais espessa da moldação exceda os 105°C [3,12,23]. Pode-se colocar um termopar no centro dessa secção e quando a leitura do termopar exceder os 105°C a moldação encontra-se seca.

Pode-se também calcular o tempo de secagem, para uma determinada temperatura, através da técnica de peso perdido de água [3,12,23]. Esta técnica consiste em introduzir o molde num forno, a uma temperatura de secagem preestabelecida, e medir ao longo do tempo a perda de peso do molde durante a secagem. Considera-se que o molde está seco quando perdeu um peso equivalente ao peso de água inicial que ele continha.

Algumas fundições preferem calcinar, após secagem, as moldações. Este processo tem duas vantagens [3,24,32]:

- Garante de uma forma mais eficaz a eliminação total da água,
- Promove a formação de anidrite insolúvel γ -CaSO₄,

Evita a necessidade de pré-aquecimento do molde se o vazamento de metal tiver lugar logo de seguida ao ciclo térmico de secagem-calcinação.

3. Moldações Cerâmicas

O processo de moldações cerâmicas é semelhante ao de moldações em gesso excepto no facto dos materiais refractários utilizados na construção das moldações poderem ser aplicados a altas temperaturas.

De uma forma genérica pode-se dizer que as moldações cerâmicas são produzidas misturando um agregado refractário ligado por sílica proveniente de um ligante líquido (geralmente à base de silicato de etilo), numa proporção variável consoante os cerâmicos utilizados, resistências pretendidas, etc., ao qual é adicionado um catalisador para desencadear uma reacção de endurecimento [22]. Esta barbotina constituída pelo agregado cerâmico, pelo ligante e catalisador, é vazada numa caixa onde se encontra o modelo a reproduzir [14,18,22].

A resistência a altas temperaturas destes materiais permite que este processo possa ser aplicado na produção de peças e ferramentas em materiais ferrosos [3].

Na tabela 3.1 encontram-se as características de alguns dos materiais refractários utilizados nestas moldações

Tabela 3.1: Características de alguns materiais refractários (adaptado de [1])

Material	Ponto de fusão °C	Densidade (g/cm ³)	Coef. Expansão térmica / °C
Alumina (Al ₂ O ₃)	2050	3.90	9.5×10 ⁻⁶
Cromite (CrO)	1400	4.00	7.0×10 ⁻⁶
Chamote	Indeterminado	2.0 a 2.5	6.0×10 ⁻⁶
Mulite(3Al ₂ O ₃ ·SiO ₂)	1810	3.14	6.0×10 ⁻⁶
Sílica fundida (SiO ₂)	1710	2.21	0.5×10 ⁻⁶

Uma barbotina típica contém uma mistura de 75% de zircónia, 25% de mulite calcinada à qual é adicionada silicato de etilo hidrolizado numa proporção de 100 ml para 0.91 kg de mistura refractária [1]. A esta mistura é adicionado um agente gelificante o que faz com que a barbotina ganhe presa num período de tempo predeterminado, geralmente 3 a 4 minutos [1].

O vazamento da barbotina é sempre um processo gravítico, ou seja, não há qualquer sistema de vazamento sob pressão.

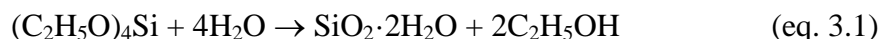
Antes do vazamento, o modelo deve ser revestido com uma mistura de cera-silicone para facilitar a desmoldação [1].

Existem dois tipos de moldações cerâmicas: as integralmente constituídas pela mesma barbotina cerâmica e as *compósitas*, constituídas por uma película cerâmica (barbotina cerâmica idêntica ao caso anterior), na zona que define a superfície da peça, e um enchimento de um material cerâmico grosseiro (chamote) agregado por um ligante do tipo silicato de sódio endurecido por CO₂ [18].

As diferenças entre estes dois tipos de moldações cerâmicas traduzem-se essencialmente no custo, pois o facto de se utilizar chamote no segundo caso, torna o processo bastante mais económico quando se pretendem obter ferramentas metálicas de grandes dimensões [18].

O silicato de etilo puro é uma substância estável e sem poder de ligação. Para obter uma solução com poder ligante torna-se necessário hidrolizá-lo. A hidrólise é obtida promovendo a reacção do silicato de etilo com a água. Contudo, como este não se mistura facilmente com a água é necessária ajuda de um solvente à base de álcool e de um catalisador [39]. Os produtos finais desta reacção são a sílica hidratada

(SiO₂·2H₂O) e álcool etílico (C₂H₅OH). Genericamente o processo de hidrólise pode ser descrito da seguinte forma [39]:



Após um curto espaço de tempo controlado pela quantidade de catalisador adicionado à barbotina, esta gelifica, atingindo uma consistência parecida com a da borracha [39].

Há várias maneiras de promover a gelificação do silicato de etilo hidrolizado. No fabrico de moldações cerâmicas usa-se o princípio de variação de pH. As soluções de silicato de etilo hidrolizado são estáveis para valores de pH entre 1.5 e 3 e superiores a 7 e muito instáveis para valores de pH entre 5 e 7. Adicionando uma quantidade adequada de um catalisador alcalino (por exemplo, hidróxido de amónia ou carbonato de amónia) a uma solução de silicato de etilo hidrolizado, o seu pH é alterado para 5, tornando-se a solução instável. Esta instabilidade faz com que a sílica hidratada se transforme em sílica gel com libertação de água [39].

A moldação é então separada do modelo, sendo a reacção de gelificação interrompida por ignição e queima do álcool do ligante [22]. O controlo adequado desta fase é bastante crítico, uma vez que uma gelificação excessiva pode tornar muito difícil a separação entre a moldação e o modelo [1,22].

O processo de queima produz um acabamento superficial fino, uma superfície microfissurada e uma estrutura interior também com fissuras, o que não afecta a qualidade final da peça metálica obtida, pois não há penetrações de metal através das finas fissuras, e por outro lado, aumenta a permeabilidade para deixar escapar o ar que exista dentro da moldação e gases que se podem formar durante o vazamento [1,22].

As microfissuras são também importantes para conseguir acomodar a expansão térmica das partículas cerâmicas quando em contacto com o metal fundido, promovendo a estabilidade dimensional e o acabamento superficial da peça a obter [1,3,22].

Após estabilização e queima é feito um tratamento térmico de sinterização a temperatura elevada, o qual vai produzir uma moldação inerte e mais resistente na qual a maior parte das ligas comerciais ferrosas e não ferrosas podem ser vazadas [3,22].

A sinterização é o estágio final do processamento das moldações cerâmicas. Todos os voláteis restantes são removidos nesta fase.

Após sinterização, a coesão entre as partículas cerâmicas é assegurada pelas pequenas partículas de sílica provenientes do silicato de etilo hidrolizado [3]. Esta ligação estável até perto do ponto de fusão da sílica, 1710°C [3]. Este facto fornece ao molde a resistência mecânica necessária para resistir à pressão do metal durante o vazamento.

Como principais vantagens deste processo pode-se citar [3]:

- Tempos de produção rápidos,
- Necessidade de pouco equipamento,
- Os custos de produção são menores do que os de maquinagem ou processo de produção alternativos,
- Os modelos, de uma forma geral, são baratos e fáceis de produzir,
- Possibilidade de produção de ferramentas obtidas por fundição sem haver necessidade de maquinagem,
- Possibilidade de produzir peças de diferentes tamanhos e formas.

Por outro lado há ainda a salientar a precisão dimensional que se consegue obter com este processo, como está exemplificado na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Dimensões e respectivas tolerâncias representativas do processo de moldações cerâmicas [3].

Dimensão (mm)	Tolerância (mm)
< 25	±0.08
25 a 75	±0.13
75 a 203	±0.38
> 381	±1.14

Para dimensões ao longo da linha de apartação, uma tolerância adicional de ± 0.25 a ± 0.51 deve ser adicionada [3].

4. Características das Moldações

As duas propriedades aqui descritas serão utilizadas na parte experimental para a caracterização das formulações elaboradas. Outras poderiam aqui ser colocadas, grau de compatibilidade, resistência ao choque térmico e outras. Além de ser importantes numa moldação destinada a receber metal líquido, é descrito que variam de forma substancial com a consistência. Neste trabalho vai-se tentar verificar este facto.

4.1 Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade de um material poroso que quantifica a maior ou menor facilidade com que um fluído o pode atravessar [40]. O conhecimento da permeabilidade de determinado material tem interesse por dois motivos em particular: o primeiro tem a ver com o conhecimento da quantidade de fluído que se pode esperar que o possa atravessar (ou sair dele), o segundo motivo está relacionado com o conhecimento que podemos saber sobre determinado material através da quantificação da sua permeabilidade, já que a permeabilidade de um material poroso está relacionada, de uma forma geral, com a sua porosidade [34,40].

A permeabilidade é definida pela lei de Darcy [41]. Darcy formulou que o caudal de fluído, que atravesse um corpo, por unidade de área é directamente proporcional ao gradiente de pressão ao longo desse corpo e inversamente proporcional á viscosidade do fluído [39]. A constante que transforma esta proporcionalidade em uma igualdade é definida como a permeabilidade. A fórmula de Darcy é traduzida pela seguinte equação [41]:

$$Q/A = k \frac{\Delta P}{\nu \cdot L} \quad (\text{eq. 4.1})$$

Em que: Q = caudal do fluído (volume/unidade de tempo, V/t)

A = área do material poroso

ΔP = variação de pressão ao longo do corpo

L = comprimento do material na direcção do caudal

ν = viscosidade do fluído

k = permeabilidade

Em fundição, a permeabilidade é a propriedade física de uma moldação que permite que os gases que se encontram no seu interior passem da cavidade moldante para o exterior [1].

A permeabilidade é uma característica muito importante, pois sendo adequada permite uma fácil libertação dos gases provenientes do metal fundido e dos gases que podem existir dentro da moldação, o que evita o aparecimento de defeitos do tipo inclusões gasosas [1]. Uma permeabilidade demasiado elevada pode significar falta de resistência mecânica das moldações já que ela é uma medida indirecta da porosidade das mesmas, e a uma permeabilidade elevada pode estar associada uma porosidade elevada, ou seja, a uma menor resistência mecânica. Por outro lado, se a porosidade da moldação for muito elevada pode existir o risco de haver penetração de metal no interior da moldação, podendo provocar o colapso desta [1,3].

Um aumento em permeabilidade significa mais espaços entre os constituintes granulares que compõem a moldação. Isto implica que a granulometria dos constituintes da moldação seja fundamental para a permeabilidade final do molde e que é a porosidade da moldação que controla a permeabilidade da mesma [3].

A porosidade mais elevada (e devido a isso a maior permeabilidade) resulta de materiais granulares do mesmo tamanho [3]. Com uma distribuição granulométrica mais variada, os espaços entre os grãos maiores podem ser preenchidos diminuindo assim a porosidade e com isso a permeabilidade [3].

4.2 Resistência Mecânica

A resistência mecânica é também uma característica que importa controlar com rigor, já que a moldação tem que ter a resistência necessária para permitir o manuseamento das moldações e suportar o efeito erosivo do metal líquido [1,3]. Por outro lado não pode ser excessiva pois isso dificultaria a operação de *shake-out* e limpeza da peça metálica vazada [1,3].

No momento do vazamento, a cavidade moldante é sujeita a solicitações mecânicas, cuja principal possível consequência é a deformação da mesma. As solicitações mecânicas são consequência de diversos factores, destacando-se [11]:

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

O grau de deformação e distorção que se verificará numa moldação, perante estas solicitações, depende sobretudo da sua rigidez e robustez [11].

A resistência dos materiais cerâmicos é, de uma forma geral caracterizada pela resistência à flexão [40]. Uma variante deste tipo de ensaios está representada na figura 4.1.

Como se pode ver pela figura 4.1 o provete é suportado nas suas extremidades e a carga é aplicada no centro do mesmo (flexão em três pontos).

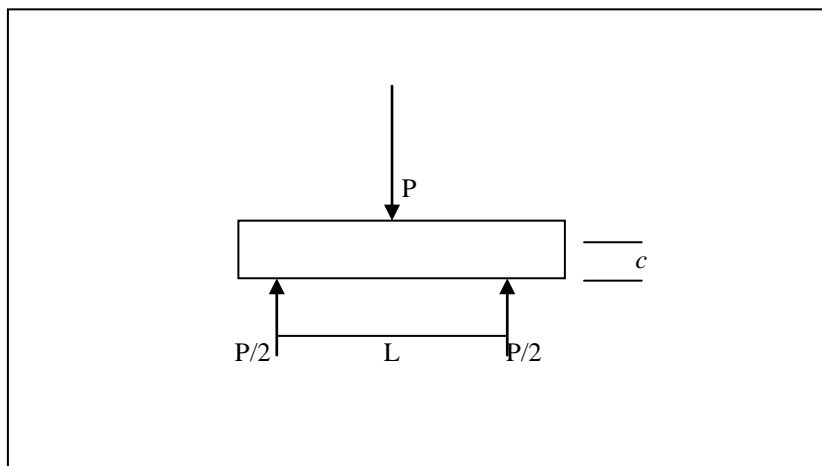


Figura.4.1: Teste de flexão em três pontos para provetes cerâmicos
(adaptado de [40])

A resistência à flexão é dada pela fórmula $S = \frac{Mc}{I}$ em que M é o momento, c a distância ao eixo neutro desde a superfície do provete e I é o momento de inércia.

5. Método Experimental e Análise de Resultados

Nesta fase do trabalho serão estudados com maior pormenor os materiais para o fabrico de moldações para o processo de moldações em gesso.

A primeira fase do estudo terá como base dois produtos comerciais com provas já demonstradas no mercado de materiais cerâmicos para a indústria da fundição de precisão. A necessidade do estudo destas amostras comerciais assenta em dois aspectos essenciais a este trabalho: obter um conhecimento mais profundo dos materiais utilizados neste processo, e, ter uma base de comparação, ou seja, uma referência para posterior criação de outras formulações.

O estudo dos produtos comerciais será baseado na sua composição química, distribuição granulométrica, densidade e resistência mecânica em verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação, permeabilidade e rugosidade.

Este estudo e a pesquisa bibliográfica efectuada serão as bases para a elaboração de uma mistura para o fabrico de moldes para o processo de fundição de moldações em gesso.

5.1 Composições Comerciais

Para um estudo mais aprofundado das misturas empregues no fabrico de moldes para o processo de moldações em gesso foram estudadas duas misturas comerciais que estavam disponíveis no INEGI/CETECOFF.

Estas misturas estão disponíveis no mercado com o nome comercial de HYDRACAST SC1 e HYDRACST P+. São produzidas pela UCPI, Soci  t   Pour Utilisation des Ceramiques et des Pl  tres Dan's L' Industrie, Fran  a.

A UCPI    uma organiza  o que se dedica desde 1969    fundi  o de precis  o no campo dos materiais cer  micos e de misturas    base de gesso, centrando-se o seu trabalho nos m  todos de fabrico de moldes de precis  o e, particularmente, nos materiais constituintes das molda  es destinadas a este tipo de fundi  o.

Estes dois produtos s  o misturas constitu  das    base de gesso para a produ  o de moldes (molda  es) para a ind  stria de fundi  o. Podem ser utilizados para fundi  o pelo processo de cera perdida ou para o fabrico de molda  es bloco atrav  s do vazamento de uma barbotina sob um modelo permanente.

S  o produtos especialmente concebidos para a ind  stria de fundi  o de ligas de alum  nio e de cobre.

Na tabela 5.1 encontram-se enunciadas as caracter  sticas fornecidas pela UCPI para estes dois produtos.

Para o fabrico das molda  es em gesso a UCPI recomenda as seguintes etapas:

Adi  o da mistura seca      gua (ambos os constituintes devem ser cuidadosamente pesados).

Misturar durante 2 a 3 minutos mecanicamente (de prefer  ncia em condi  es de v  cuo).

Vazar a barbotina (pode ser realizado em v  cuo sendo recomendado). A desmolda  o para o SC1 d  -se 1 hora ap  s vazamento e para o P+ a desmolda  o ocorre 1.5 hora ap  s vazamento,

Ap  s desmolda  o esperar entre 4 a 24 horas antes de iniciar o ciclo de secagem.

Tabela. 5.1: Características das misturas HYDRACAST fornecidas pela UCPI.

	HYDRACAST SC1	HYDRACAST P+
Teor em água necessário(%)	34	44
Mistura /água (g/l)	2940	2275
Quantidades necessárias para um molde de 1 litro (g)	1450 mistura seca 500 de água	1250 de mistura seca 550 de água
Tempo de gel (min.)	13 – 15	12
Tempo até desmoldar (h)	1	1.5
Resistência à flexão em verde (MPa)		2.6
Dilatação em verde (%)	0.3 – 0.4	0.20 – 0.25
Temperatura de secagem (°C)	200 – 250	200 – 250
Densidade após secagem (g/cm ³)	1.4 – 1.5	1.20 – 1.25
Temperatura do molde para receber alumínio (°C)	150 – 500	150 – 250

Pela tabela 5.1 podemos verificar que o SC1 usa uma consistência de 0.34 e o P+ de 0.44. Estes valores de consistência são inferiores aos de muitas formulações referenciadas (ver tabelas 2.5 a 2.10, capítulo 2). De acordo com a bibliografia com estes valores de consistência prevê-se então obter moldes densos, com boa resistência em verde e após secagem mas, com uma permeabilidade baixa [3,23,24,27].

Um dos ciclos térmicos indicado para a secagem e calcinação destes dois materiais, encontra-se representado na figura 5.1.

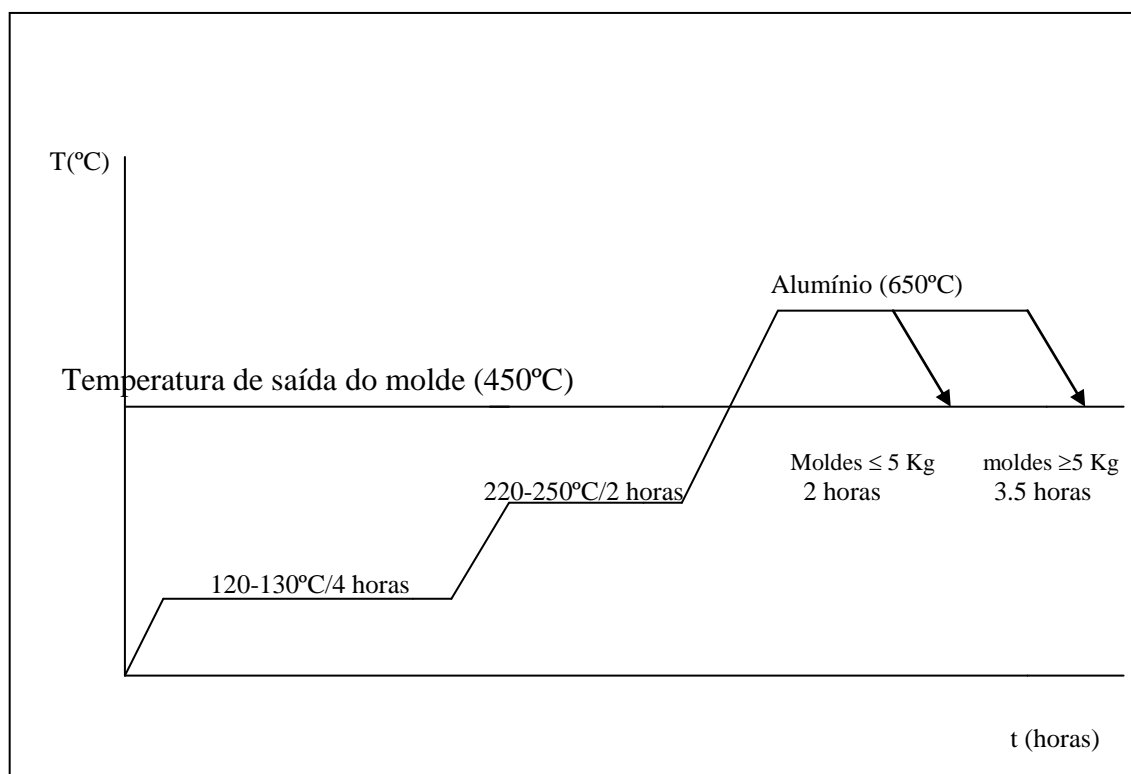


Figura 5.1- Exemplo de um ciclo de secagem e calcinação para moldes, produzidos com o HYDRACAST SC1 e HYDRACAST P+, para a fundição de ligas de alumínio (fonte: UCPI).

Este ciclo destina-se a moldes pequenos, até 10 Kg. Em caso de moldes maiores, entre 10-30 Kg, dever-se-á recorrer a métodos experimentais para encontrar o ciclo mais adequado.

5.1.1 Caracterização das Misturas SC1 e P+

Para a caracterização dos dois produtos, realizaram-se ensaios para determinação da sua composição química e fases presentes, distribuição granulométrica, densidade, resistência mecânica em verde e após secagem-calcinação, permeabilidade e rugosidade.

5.1.1.1 Análise química e de fases

A análise química aos dois produtos foi efectuada por fluorescência de raios X no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. Os resultados encontram-se expressos na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Análise química das amostras de SC1 e P+ obtidas por fluorescência de raios X

	Fe ₂ O ₃ %	MnO ppm	TiO ₂ %	CaO %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	MgO ppm	Na ₂ O %	L.O.I %	SO ₃ %
P+	0.06	<200	0.01	21.95	0.25	0.02	54.07	0.33	<200	0.08	1.46	21.13
SC1	0.31	<200	0.23	12.26	.134	0.03	65.66	6.74	<200	0.06	1.45	12.04

Por análise do difractograma, ver Anexo 1, constatou-se que ambas as misturas apresentam, como seria de esperar, sulfato de cálcio hemihidratado (CaSO₄·1/2H₂O) em quantidades apreciáveis sendo o teor deste maior na amostra SC1. As outras fases que se detectaram foram a sílica, sob a forma de quartzo e em menor quantidade a cristobalite e bassamite.

Pela bibliografia podemos verificar que a razão CaO/SO₃ no CaSO₄· $\frac{1}{2}$ H₂O é de, sensivelmente, 0.70. Nesta análise a relação determinada para ambas é de 1.0. Verifica-

se pela análise dos resultados das análises químicas aos dois materiais haver um excesso de CaO. Este excesso resulta , provavelmente, da adição de outros elementos que contenham CaO.

A presença de alumina em SC1 poderá indicar a adição de cimento aluminoso ao qual estão também associadas pequenas quantidades de Fe_2O_3 e TiO [23].

5.1.1.2 Caracterização Granulométrica

A análise granulometria das misturas SC1 e P+ foi determinada com amostras de 50 g em crivos de diferentes aberturas durante 20 minutos.

Na tabela 5.3 apresenta-se a distribuição granulométrica para o material P+.

Tabela 5.3: Distribuição granulométrica do P+.

	Diâmetro das partículas (μm)	Teor (g)	% parcial	% parcial acumulada
180	>180	0,54	1,11%	100,00%
150	]180,150]	2,67	5,57%	98,88%
125	]150,125]	4,00	8,34%	93,31%
106	]125,106]	5,00	10,45%	84,97%
90	]106,90]	5,31	11,08%	74,52%
75	]90,75]	10,16	21,21%	63,44%
63	]75,63]	14,31	29,87%	42,24%
53	]63,53]	4,54	9,48%	12,37%
Resto	< 53	1,38	2,89%	2,89%

Pela tabela 5.3 pode-se verificar que a percentagem parcial modal apresenta partículas com diâmetros entre os 75 e 63 μm que representam 29.87% da mistura total. 63% das partículas constituintes do P+ têm um diâmetro inferior a 90 μm . Temos, assim, uma mistura constituída essencialmente por partículas finas.

A distribuição granulométrica do P+ está representada graficamente no gráfico da figura 5.2.

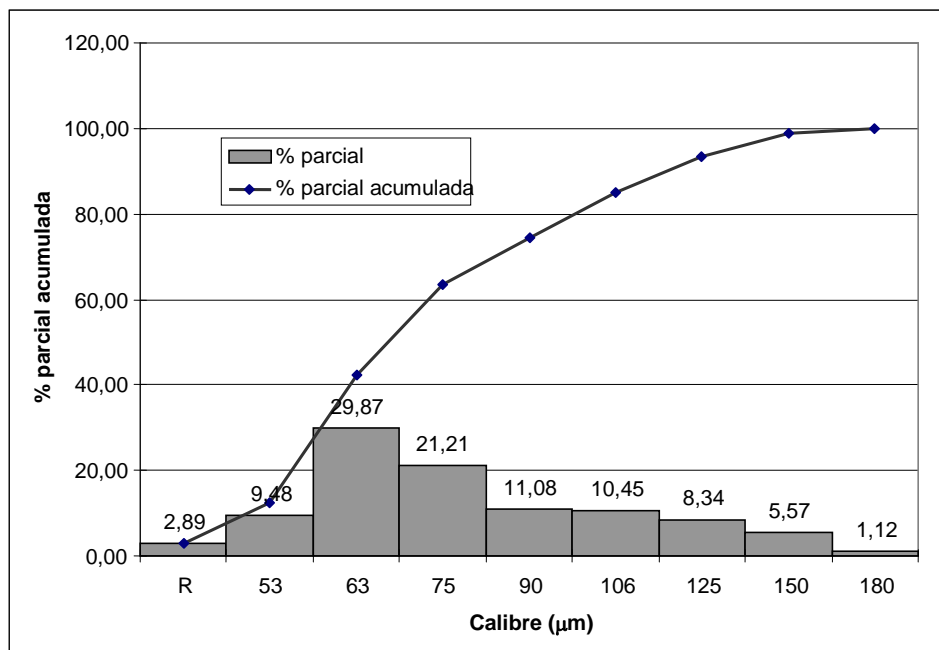


Figura 5.2: Análise granulométrica da amostra P+, apresentando a distribuição parcial e parcial acumulada em %.

A distribuição granulométrica do SC1 está representada na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Distribuição granulométrica do SC1

Abertura do crivo (µm)	Díâmetro da partícula (µm)	Teor (g)	% parcial	% parcial acumulada
180	>180	6,74	13,59%	100,00%
106	]180,106]	25,75	51,89%	86,41%
90	]106,90]	9,99	20,13%	34,52%
75	]90,75]	4,49	9,06%	14,39%
63	]75,63]	2,02	4,06%	5,33%
53	]63,53]	0,56	1,14%	1,27%
Resto	< 53	0,07	0,13%	0,13%

Ao contrário do P+, o SC1 apresenta uma distribuição modal no intervalo granulométrico [180,106]. As partículas neste intervalo representam cerca de 52% da mistura total.

Verifica-se por análise das tabelas 5.3 e 5.4, que o SC1 apresenta uma distribuição mais grosseira que o P+. De notar que as partículas com diâmetro superior 180 µm representam quase 14% da mistura total, enquanto que no P+ representam apenas 1.12%.

A distribuição do SC1 está representada graficamente no gráfico da figura 5.3.

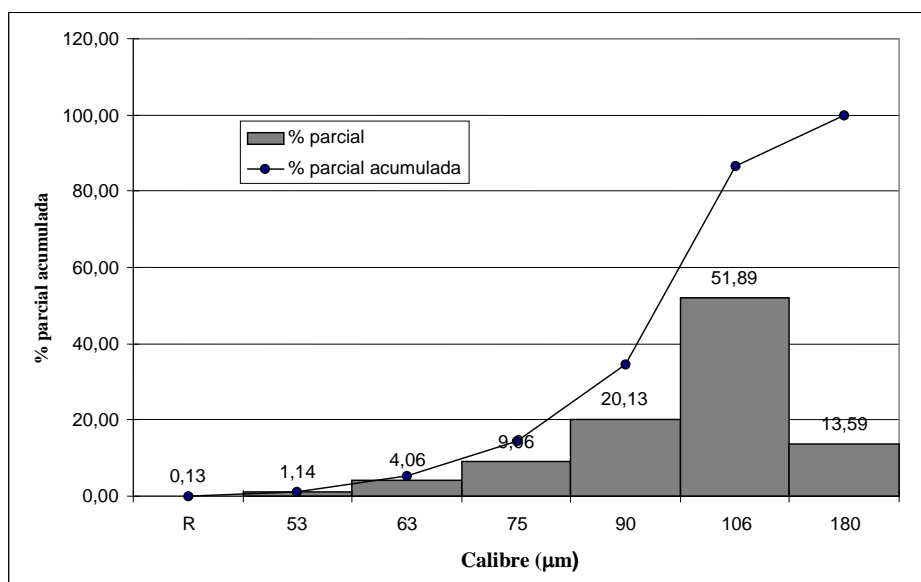


Figura 5.3: Análise granulométrica da amostra SC1, apresentando a distribuição parcial e parcial acumulada em %.

O gráfico da figura 5.4 dá uma ideia da diferença entre a distribuição granulométrica do P+ e do SC1 em que se verifica que o P+ é constituído por maior percentagem de partículas mais finas que o SC1. O gráfico apresenta a %parcial para cada um dos materiais podendo-se verificar que o SC1 apresenta uma distribuição granulométrica mais grosseira que o P+.

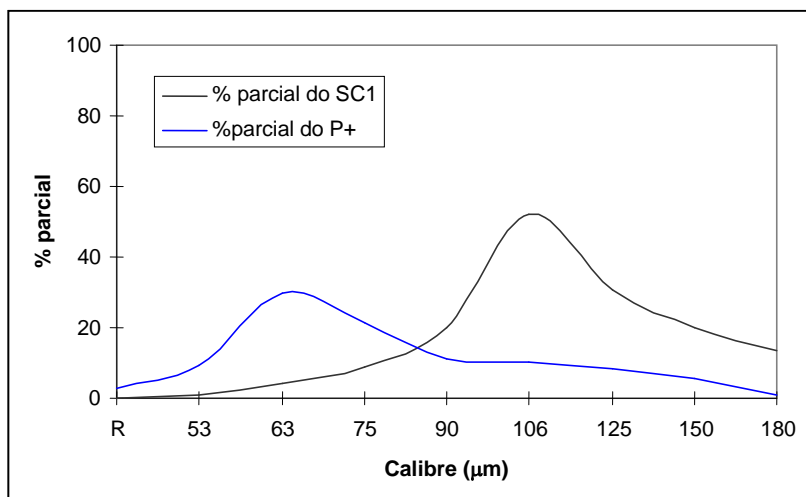


Figura 5.4: Variação da % parcial do P+ e SC1 em função do diâmetro das partículas.

5.1.1.3 Densidade

No cálculo da densidade dos dois materiais determinou-se a densidade absoluta, ou seja, a densidade da mistura seca e a densidade real que foi determinada em provetes de dimensões 100×40×20 mm vazados em moldes de silicone.

Nestes provetes mediu-se a densidade em verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação.

As etapas de produção dos provetes foram:

- Pesagem da água e mistura nas proporções recomendadas
- Adição da mistura à água. Todas as amostras foram adicionadas à água à temperatura ambiente. A temperatura da água durante os ensaios variou entre os 18 e os 22°C.

- Repousar durante 30 segundos e mistura mecânica durante 2.5 minutos a 1750 rpm. A mistura mecânica foi realizada com um aparelho de velocidade regulável com uma hélice de pás. A cuba utilizada tinha as seguintes dimensões:
 - Diâmetro superior=116.11 mm
 - Altura =136 mm
 - Diâmetro inferior = 86.13 mm
- Vazamento em moldes de silicone,
- 1 hora até desmoldar os provetes
- Secar num forno a 200°C durante 6 horas sendo em seguida calcinados a 650° durante 2.5 horas. O arrefecimento foi realizado dentro do forno.

5.1.1.3.1 Densidade Teórica do SC1 e P+

Por definição, densidade teórica é aquela que é conseguida com um empacotamento perfeito, isto é, sem espaços vazios entre as partículas.

A densidade teórica foi determinada recorrendo ao método do picnómetro. Para tal utilizou-se o procedimento seguinte traduzido pela equação 5.1:

$$\text{densidade} = \frac{B - V}{B - C + A - V} \cdot \rho_{\text{água}} \quad (\text{eq.5.1})$$

Em que : V = peso do picnómetro vazio (g)

A= peso do picnómetro com água destilada (g)

B = peso picnómetro com mistura (g)

C = peso do picnómetro com mistura e água destilada (g)

ρ = densidade da água (g/cm³)

Na tabela 5.5 estão representados os valores obtidos para a densidade absoluta e os respectivos desvios-padrão do SC1 e P+. Estes valores são a média de 3 medidas da densidade em 3 diferentes picnómetros (procedimento que se irá aplicar em todas as determinações da densidade absoluta).

Tabela 5.5: Densidade teórica obtida para o SC1 e P+

Material	Densidade teórica (g/cm ³)
SC1	2.74 ± 0.12
P+	2.77 ± 0.13

Os resultados obtidos mostram que os dois materiais apresentam valores para a densidade muito próximos.

5.1.1.3.2 Determinação da densidade real

A densidade real dos dois materiais foi determinada em provetes 100x40x20 mm. Este valor é obtido através da medição e pesagem dos provetes. Permite avaliar a porosidade.

Na tabela 5.6 estão representadas as densidades reais, em verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação, encontradas para o SC1 e P+.

Tabela 5.6: Densidade real em verde e após ciclo térmico do SC1 e P+.

Material	Densidade em verde (g/cm ³)	Densidade seca (g/cm ³)	Variação (%)
SC1	1.75 ± 0.02	1.29 ± 0.02	27.7
P+	1.72 ± 0.05	1.17 ± 0.02	29.4

Pela análise dos valores verifica-se uma redução apreciável na densidade quando se passa do estado em verde para o estado em seco. Este facto deve-se à perda de água ocorrida quando da secagem dos provetes. A evaporação da água deixa atrás de si poros que vão contribuir para a redução da densidade.

A densidade após ciclo térmico para o P+ é cerca de 5% inferior à apresentada na tabela 5.1.

O valor obtido para o SC1 é cerca de 11% mais baixa do que a que é apresentada na tabela 5.1.

Este facto pode ser o resultado de inclusão de ar na barbotina durante o processo de mistura, facto que origina pequenas bolhas de ar na estrutura, aumentando assim o numero de poros na estrutura. Aumenta-se assim, a densidade de poros no material, facto que acarreta uma diminuição da densidade.

Esta incorporação de ar durante o processo de mistura foi evidenciado ao longo de todo o trabalho por pequenas bolhas que apareciam na superfície dos corpos de prova. É de notar que o processo de misturas das barbotinas e o vazamento das mesmas não foi efectuado em condições de vácuo.

Através da diferença entre as duas densidades, absoluta e real, pode-se determinar a percentagem de poros nos materiais.

Esses resultados encontram-se na tabela 5.7.

Tabela 5.7: Percentagem de poros nas amostras de SC1 e P+ após ciclo térmico.

Material	Porosidade em verde (%)	Porosidade após ciclo térmico (%)	Aumento da porosidade (%)
SC1	36.1	52.5	16.4
P+	37.9	56.7	18.8

Verifica-se que a porosidade, após ciclo térmico, para ambos os materiais é elevada. Do estado em verde para o estado em seco verifica-se um aumento, como seria

de esperar, da porosidade. Este facto é relevante para a redução de densidade em ambos os materiais.

5.1.1.4 Resistência mecânica

A resistência mecânica dos dois materiais foi determinada através de ensaios à flexão em três pontos realizado em provetes com 100x40x20 mm.

Foi utilizada uma célula de carga de 1KN, uma distância entre apoios de 60 mm e uma velocidade de avanço da máquina de 1m/min.

Os resultados da resistência à flexão em verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação, para o P+ e SC1, estão expressos na tabela 5.8.

Tabela 5.8: Resistência à flexão de provetes de SC1 e P+ no estado verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação.

Material	Resistência à flexão em verde (MPa)	Resistência à flexão após ciclo térmico (MPa)
SC1	0.38 ±0.04	0.18 ± 0.02
P+	0.26 (valor comercial)	0.35 ± 0.04

Verifica-se uma redução bastante acentuada da resistência quando se passa do estado em verde para o estado em seco.

Cruzando estes dados com os dados fornecidos pelas tabelas 5.6 e 5.7, verifica-se que esta redução da resistência está aliada à redução da densidade e ao aumento da porosidade.

5.1.1.5 Permeabilidade

A permeabilidade dos dois materiais foi medida em provetes com $\varnothing 50 \times 50$ mm. Estes provetes foram vazados em moldes em aço inoxidável. Após desmoldação foram secos e calcinados num forno com um ciclo igual ao descrito na página 87.

A permeabilidade foi determinada recorrendo a um permeâmetro. Este aparelho mede o índice de permeabilidade. Este índice é medido pelo volume de ar, em cm^3 , que num minuto e à pressão de 1 cm de água atravessa um provete ideal com dimensões de 1 cm^2 e 1 cm de altura.

Estes ensaios foram realizados no CINFU- Centro de Formação Para a Indústria da Fundição.

Os resultados obtidos com os ensaios estão expressos na tabela 5.9.

Tabela 5.9: Resultados da permeabilidade para o SC1 e P+ após ciclo térmico.

Material	Permeabilidade (cm/minuto)
SC1	20-30
P+	20-30

Ensaio realizado na mesma altura em provetes em areia verde nova, estado em que a areia apresenta os valores para a permeabilidade mais elevados, os valores obtidos para a permeabilidade situaram-se entre 180 e 200 cm/minuto, valor muito acima dos valores determinados para o SC1 e P+.

Os valores obtidos para o SC1 e P+ demonstram que ambos têm uma permeabilidade muito baixa, facto que está de acordo com as várias referências bibliográficas [3,23,24] que indicam valores de permeabilidade baixas para o processo convencional de moldações em gesso.

Refira-se que o processo produtivo adoptado nesta tese pode ser considerado estando dentro do processo convencional de moldações em gesso. Este processo é

descrito como o processo, de moldações em gesso, que apresenta os valores mais baixos para a permeabilidade

Foram obtidos valores semelhantes de permeabilidade em provetes que após vazamento estiveram sob a acção de vácuo, a pressão de -1 bar, durante três minutos, e em provetes que não estiveram sob a acção de vácuo.

5.1.1.6 Rugosidade

A rugosidade foi medida em provetes de dimensões de $100 \times 40 \times 20$ mm, após ciclo térmico de secagem-calcinação.

Os valores obtidos encontram-se expressos na tabela 5.10 e são o resultado de uma média de 3 medidas.

Tabela 5.10: Rugosidade superficial de provetes SC1 e P+ após ciclo térmico.

Material	Rugosidade (μm)	
	Ra	Rmáx.
SC1	5.01 ± 0.62	48.6
P+	4.01 ± 0.30	38.4

Ra: Rugosidade média aritmética dos valores absolutos obtidos.

Rmáx.: Diferença entre o valor de rugosidade mais elevado e o mais baixo, medidos ao longo do perfil de rugosidade.

Os resultados obtidos estão acima dos valores de rugosidade descritos para este processo (ver tabela 1.8).

Verifica-se também, que o desvio-padrão para os dois ensaios é relativamente elevado, facto que demonstra uma superfície irregular.

Outro facto que é de salientar é a rugosidade do P+ ser inferior á do SC1. Demonstra-se que distribuições granulométricas mais finas resultam em melhores acabamentos superficiais.

A mistura P+ apresenta um melhor conjunto de resultados, do que a mistura SC1, em relação à densidade, resistência mecânica e rugosidade após ciclo térmico. As duas misturas são apenas semelhantes nos valores encontrados para a permeabilidade.

Se aliarmos estes resultados ao preço destes dois materiais, o preço do SC1 é de 195\$00/Kg enquanto o P+ custa 180\$00/Kg, verifica-se que há toda a vantagem em utilizar esta mistura em detrimento do SC1.

5.2 Elaboração de Composições

A elaboração de misturas tem por base o interesse do INEGI/CETECOFF em explorar e desenvolver tecnologia neste campo da fundição de precisão.

Apesar do processo de moldações em gesso, no campo da fundição de precisão, já existir à várias décadas, é ainda pouco conhecido e explorado no nosso país.

Como foi demonstrado anteriormente, existem disponíveis no mercado misturas prontas a utilizar. É no entanto de todo o interesse, para uma melhor implementação e desenvolvimento de um processo próprio do INEGI/CETECOFF, a formulação de composições adequadas a este processo.

O interesse principal deste trabalho reside na elaboração de uma composição para o processo de moldações em gesso a preços mais baixos do que as misturas comerciais. A partir dos dados obtidos com os materiais SC1 e P+, e dos conhecimentos adquiridos durante a pesquisa bibliográfica pretende-se elaborar uma mistura seca e determinar a melhor consistência para a mesma.

Na elaboração de misturas teve-se a escolha dos materiais como principais critérios os seguintes pontos:

- Custo dos materiais a utilizar para a formulação das misturas,
- Facilidade de aquisição dos materiais,

- Facilidade de execução das misturas.

De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada [3,23,24] que refere como princípio geral a adição de cerca de 50% de gesso cerâmico para 50% de material refractário, decidiu-se numa primeira fase estudar uma formulação com 50% de areia de fundição (quartzo), granulometria AFS 55/60, com 50% de gesso cerâmico, e variar as consistências.

As misturas foram elaboradas na mesma cuba em que foram preparadas as misturas de SC1 e P+, tendo-se utilizado água corrente cuja temperatura variou entre 17 e 20°C.

O processo utilizado para a elaboração das misturas designa-se processo convencional de produção de moldações em gesso.

As etapas do processo foram:

- Pesagem dos ingredientes e da água,
- Adição dos ingredientes à água,
- Deixar empapar durante 1 minuto – este minuto é contado a partir do momento em que se iniciou a adição da mistura seca à água,
- Mistura mecânica durante 5 minutos a uma velocidade média de 1750 rpm,
- Vazar a barbotina,
- Desmoldar.

Por análise de algumas misturas encontradas na bibliografia e pelas duas comerciais estudadas que têm consistências de 0.34 e 0.44, a consistência desta mistura deve-se situar em valores inferiores a 1. No entanto para um melhor entendimento do

processo decidiu-se estudar consistências mais elevadas. entre 0.5 e 0.6. No entanto, estudaram-se consistências superiores para uma melhor compreensão do processo.

Como foi referido atrás, a primeira mistura que se estudou, foi um a mistura com 50% de areia de sílica AFS 50/60 com 50% de gesso cerâmico. No entanto com o decorrer do estudo e na sequência da primeira, duas outras misturas foram estudadas.

Estas três misturas foram catalogadas como misturas A, B e C.

A composição destas misturas secas está expressa na tabela 5.11.

Tabela 5.11 : Composição em percentagem das misturas secas A, B e C.

Mistura	Areia de sílica AFS 50/60 (%)	Gesso Cerâmico (%)	Talco (%)	Cimento de alta resistência (%)
A	50	50	—	—
B	50	42	8	—
C	50	42	7	1

O gesso cerâmico e o talco foram fornecidos pela COMITAL.

O cimento utilizado é um cimento rico em alumina e tem a designação comercial Calcium Aluminate Cement CA-14. É produzido pela ALCOA. Este cimento estava disponível no INEGI/CETECOFF, tendo sido já utilizado em experiências anteriores.

5.2.1 Caracterização dos Materiais Utilizados nas Misturas A, B e C

5.2.1.1 Densidade

As densidades teóricas dos diferentes materiais utilizados foram determinadas pelo método do picnómetro (ver método pág. 72).

Os resultados estão expressos na tabela 5.12.

Tabela 5.12: Densidades teóricas para os vários materiais utilizados nas misturas A, B e C.

Material	Densidade (g/cm ³)
Areia de sílica AFS 50/60	2.69 ± 0.25
Gesso	2.37 ± 0.30
Talco	0.31 ± 0.02
Cimento	3.60 ± 0.02

5.2.1.2 Distribuição Granulométrica

5.2.1.2.1 Distribuição Granulométrica da Areia AFS 50/60

Tabela 5.13: Distribuição granulométrica da areia AFS 50/60

Abertura do crivo (µm)	Diâmetro das partículas (µm)	Teor (g)	% parcial	% parcial acumulada
425	>425	1.00	1,01	100,00
300	]425,300]	33.12	32,97	98,99
250	]300,250]	31.46	31,80	66,02
212	]250,212]	20.92	21,15	34,22
180	]212,180]	7.12	7,20	13,07
150	]180,150]	3.92	3,96	5,87
Resto	< 150	1.89	1,91	1,91

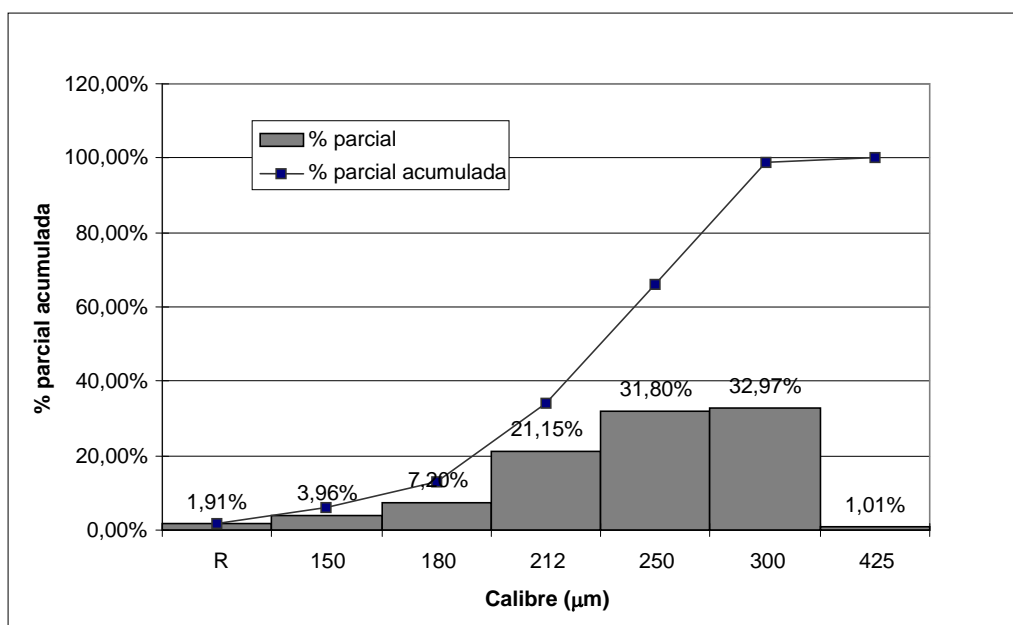


Figura 5.5: Representação gráfica da distribuição granulométrica da areia

Como se pode verificar a areia utilizada apresenta uma percentagem parcial modal com diâmetros para as partículas entre os 425 e os 300 μm . cerca de 85% das partículas têm um diâmetro superior a 212 μm .

5.2.1.2.2 Distribuição Granulométrica do Gesso Cerâmico

As distribuições granulométricas encontram-se na tabela 5.14 e na figura 5.6.

Tabela 5.14: Distribuição granulométrica do gesso cerâmico.

Abertura do crivo (μm)	Diâmetro das partículas (μm)	Teor (g)	% parcial	% parcial acumulada
90	> 90	28,19%	28,19%	100,00
75	]90,75]	29,00%	29,00%	71,81%
63	]75,63]	27,21%	27,21%	42,81%
53	]63,53]	9,23%	9,23%	15,60%
37	]53,37]	5,61%	5,61%	6,37%
R	< 37	0,76%	0,76%	0,76%

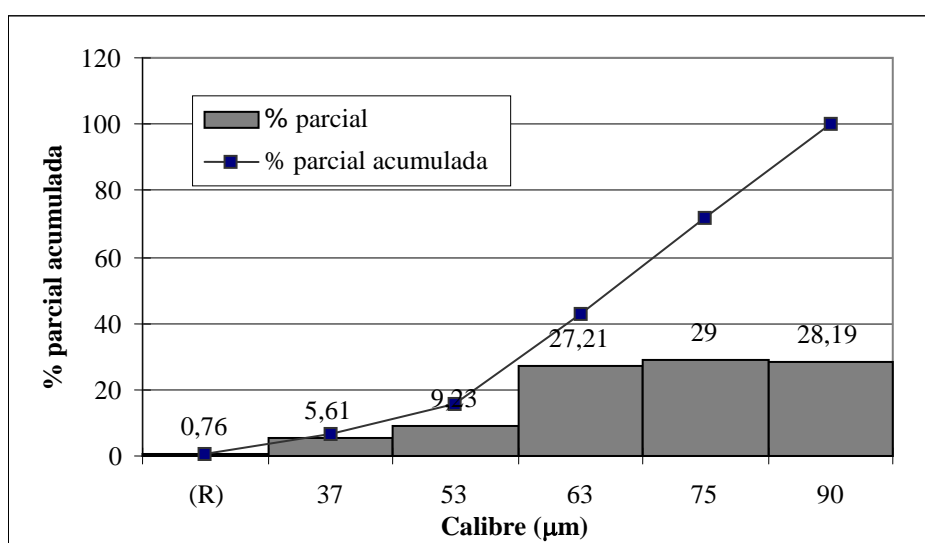


Figura 5.6: Curvas de distribuição granulométrica do gesso cerâmico

No gesso cerâmico verifica-se que cerca de 72% partículas com diâmetro inferior 90 µm. a distribuição parcial modal encontra-se para partículas com diâmetros entre 90 e 75 µm.

5.2.1.2.2. Distribuição Granulométrica do Talco

As distribuições granulométricas encontram-se na tabela 5.15 e na figura 5.7.

Tabela 5.15: Distribuição granulométrica do talco.

Abertura do crivo (µm)	Diâmetro das partículas (µm)	Teor (g)	% parcial	% parcial acumulada
53	> 53	4,13	8,37%	100,00
37	]53,37]	7,13	14,45%	91,63%
Resto	< 37	38,07	77,17%	77,17%

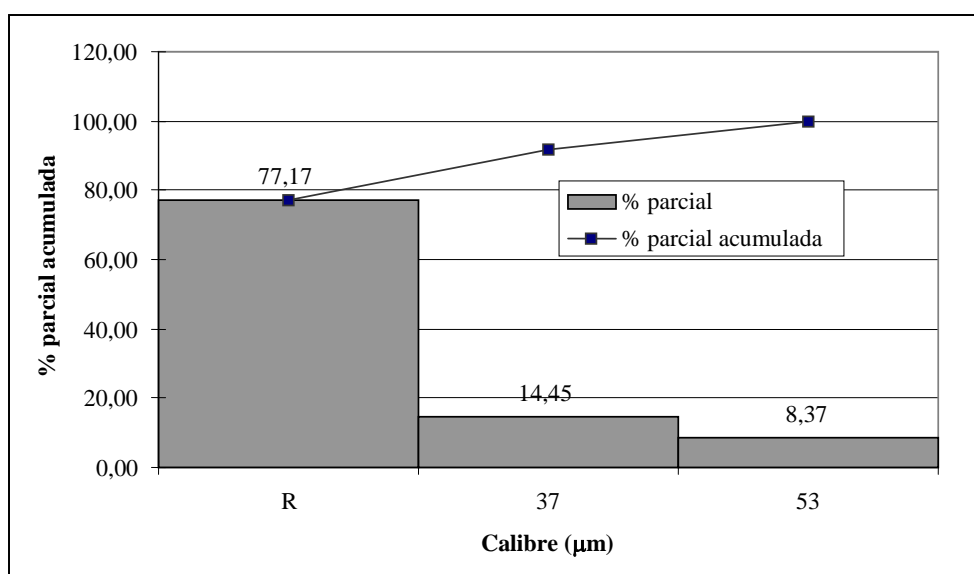


Figura 5.7: Curvas de distribuição granulométricas do talco.

É constituído quase exclusivamente por partículas muito finas . 77% das partículas têm diâmetros inferiores 37 μm .

5.2.1.2.4 Distribuição Granulométrica do Cimento CA-14

As distribuições granulométricas estão representadas na tabela 5.16 e figura 5.8.

Tabela 5.16: Distribuição da granulométrica do cimento utilizado

Abertura do crivo (μm)	Diâmetro das partículas (μm)	Teor (g)	% parcial	% parcial acumulada
90	> 90	1,78	3,59	100,00
75	]90,75]	6,32	12,76	96,41
63	]75,63]	9,20	18,56	83,65
53	]63,53]	4,83	9,75	65,09
37	]53,37]	6,32	12,75	55,34
Resto	< 37	21,11	42,60	42,60

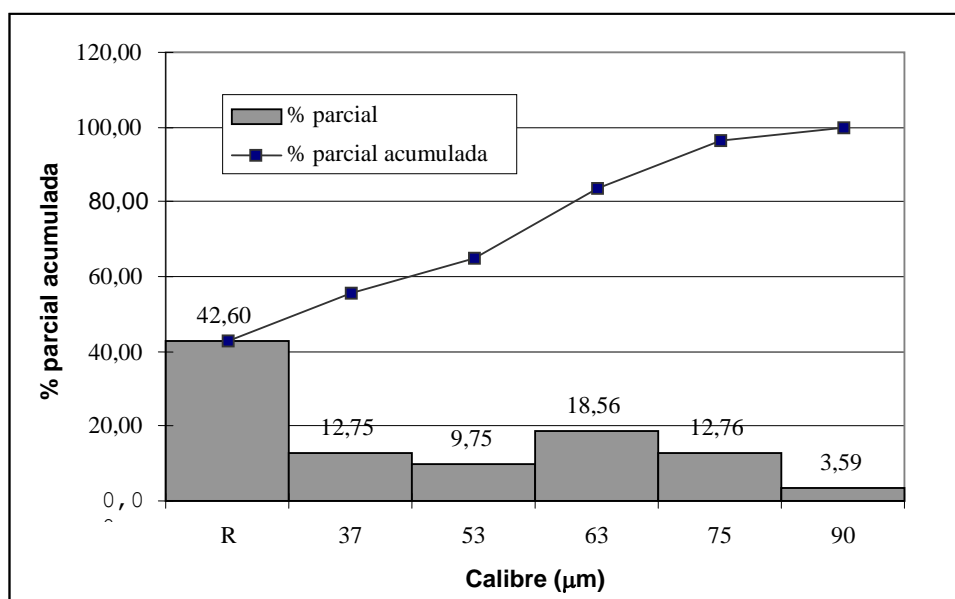


Figura 5.8: Curvas de distribuição granulométricas do cimento CA-14

A distribuição modal tem um diâmetro inferior a 37 μm e representa um total de 42.6% do material. Apenas 3.59% apresenta um diâmetro superior a 90 μm .

5.2.2 Mistura A

A mistura é obtida pesando cuidadosamente cada constituinte. Após pesagem, os constituintes vão para um recipiente. Este processo permite que os constituintes da mistura sejam adicionados ao mesmo tempo à água.

De acordo com o que foi dito atrás (pág. 94-95), escolheu-se para ponto de partida a consistência de 1.4, que de acordo com a bibliografia [23,24] pode ser considerado como um ponto de partida quando não se conhecer o valor da consistência mais adequado para determinada mistura.

Os constituintes da mistura foram adicionados à água (com a temperatura de 19°C) e obtiveram-se os seguintes resultados:

Ao adicionar a mistura à água houve uma reação violenta,

Misturou-se durante cinco minutos para tentar obter uma barbotina consistente e homogênea. Durante a mistura verificou-se a formação de grandes quantidades de espuma na superfície da barbotina,

Durante o vazamento da barbotina ela era muito fluída e apresentou a acumulação de resíduo (neste caso de sílica) no fundo da cuba, o que significa que o tempo de mistura não foi o suficiente,

As amostras vazadas (provetes com 100x40x20 mm) apresentavam uma sedimentação elevada na parte inferior do molde em que foram vazados, sinal de um tempo de presa demasiado longo.

Ao fim de 1 hora procedeu-se à desmoldação a qual foi difícil já que os provetes se desagregavam facilmente evidenciando uma resistência muito baixa.

Estes indicam que se deveria diminuir o valor da consistência. Foram então produzidas novas misturas com consistências de 1.3, 1.2, 1.1 e 1.0, tendo-se obtido os seguintes resultados:

1. Ao fim de 5 minutos de mistura, obteve-se resíduo na cuba, embora a quantidade de resíduo, diminuísse com a diminuição da consistência,
2. Durante o vazamento as barbotinas apresentavam uma grande fluidez
3. As amostras vazadas apresentavam sinais de sedimentação, que diminui com a consistência.

Os resultados obtidos demonstraram que a consistência correcta para esta mistura seria inferior a 1.

Preparam-se novas barbotinas com 0.90, 0.80, 0.70, 0.60, .055 e 0.50.

A mistura com uma consistência de 0.90, misturada mecanicamente durante 5 minutos, a uma velocidade média de 1750 rpm, apresentou um comportamento semelhante ao da misturas anteriores, embora com sinais de sedimentação muito menores.

As misturas com consistências inferiores a 0.90 (0.80, 0.70, 0.60 e 0.55) apresentaram um comportamento bastante diferente das anteriores.

A mistura com 0.80 de consistência com 5 minutos de mistura mecânica não apresentou sinais de resíduo no fundo da cuba. Apresentou no entanto alguma sedimentação final.

A amostra com 0.50 de consistência ganhou presa antes do fim dos 5 minutos de mistura. Reduziu-se, então, o tempo de mistura para 4, 3 e 2 minutos.

Não foi possível com 4 e 3 minutos vaziar a barbotina antes do início da presa.

Com 2 minutos de mistura mecânica foi possível vaziar a barbotina, no entanto não foi possível com esse tempo de mistura, obter uma mistura eficiente como foi evidenciado pelo resíduo final que ficou no final da cuba.

Este parâmetro, tempo de mistura foi também estudado com as consistências de 0.55, 0.60 e 0.70.

Com o tempo de mistura quer-se obter uma correcta distribuição dos componentes da mistura seca com a água.

Desde logo havia um problema inicial: não se partiu de misturas comerciais como o SC1 e P+ que são já fornecidos, homogeneamente misturados.

A eficiência do processo de mistura, no caso de elaborações próprias vai depender também de se dar o tempo necessário para que a mistura compense essa falta de homogeneização inicial.

Estudaram-se tempos de mistura de 4, 3 e 2 minutos. Os resultados estão enunciados na tabela 5.17 em termos de resíduo final.

Tabela.5.17: Verificação da existência de resíduo no final do tempo de mistura para três tempos de mistura diferentes.

	2 minutos de mistura	3 minutos de mistura	4 minutos de mistura
Consistência	Resíduo	Resíduo	Resíduo
0.55	Sim	Não	Não
0.60	Sim	Não	Não
0.70	Sim	Algum	Não

Determinou-se deste modo o tempo de mistura mecânica para três diferentes consistências da mesma formulação.

Para cada tempo escolhido foi então verificado a existência ou não de sedimentação.

Os resultados estão na seguinte tabela 5.18.

Tabela 5.18: Verificação da existência ou não de sedimentação nas amostras vazadas.

Consistência	Sedimentação
0.55	Não
0.60	Não
0.70	Não

5.2.2.1 Determinação do ciclo térmico

O ciclo térmico foi determinado através do processo de perda de peso em provetes. Este processo consistiu em retirar provetes de um forno a 200°C, ao longo do tempo e determinar a perda de peso dos provetes. Quando o peso perdido for equivalente ao peso de água inicial considera-se que o ciclo de secagem está concluído.

O ciclo térmico determinado foi:

- Secagem dos provetes 14 horas a 200°C
- Com calcinação: secagem durante 10 horas a 200°C com calcinação a 650°C (para o caso de ligas de alumínio) durante 2.5 horas. a velocidade de aquecimento de 200 para 650°C é de 15°/min.

5.2.2.2 Densidade

A densidade teórica foi calculada através das densidades teóricas dos elementos que constituem a mistura A.

O procedimento de cálculo foi baseado na seguinte fórmula:

$$d_M = \frac{1}{\sum \frac{w}{\rho}} \quad (\text{eq.5.2})$$

Em que: w = fracção ponderal de um componente da mistura

ρ = densidade desse componente (g/cm^3)

d_M = densidade da mistura final (g/cm^3)

O valor calculado para a densidade teórica da mistura A foi de 2.52 g/cm^3 .

A tabela 5.19 apresenta os valores para a densidade real em *verde* e após ciclo térmico para a mistura A .

Tabela 5.19: Densidade real para amostras, da mistura A, em verde e após ciclo térmico para quatro diferentes consistências.

Consistência	Densidade em verde (g/cm^3)	Densidade seca (g/cm^3)
0.55	1.62 ± 0.01	1.61 ± 0.02
0.60	1.59 ± 0.01	1.03 ± 0.01
0.70	1.53 ± 0.01	0.93 ± 0.01

No gráfico da figura 5.9 mostra-se a evolução da densidade em verde e após ciclo de secagem e calcinação com a consistência.

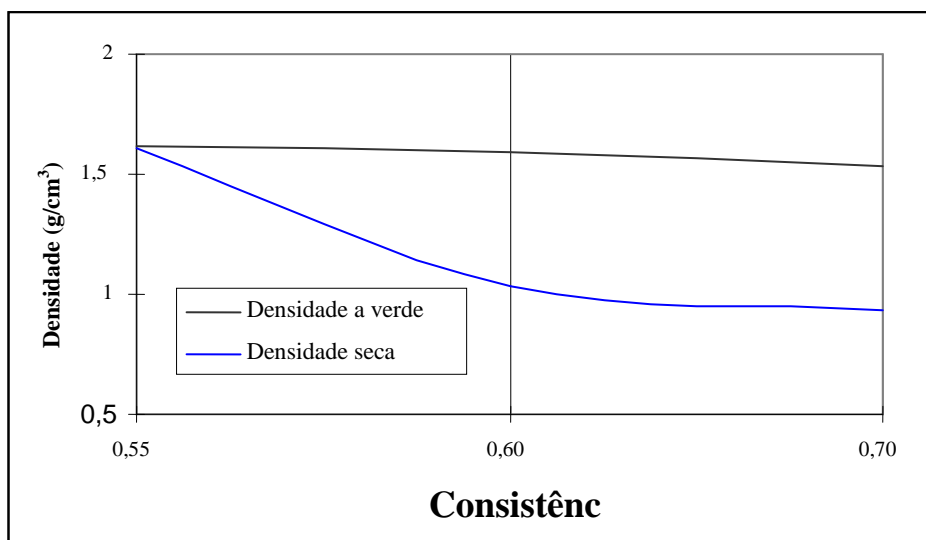


Gráfico 5.9: Variação da densidade em verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação com a consistência.

Por análise do gráfico verifica-se que a densidade diminui com o aumento da consistência. A redução de densidade do estado em verde e após ciclo térmico é mais pronunciada para valores maiores da consistência. Maiores valores de consistência implicam maiores quantidades de água removidos o que faz aumentar a porosidade.

Verifica-se assim que a densidade obtida, em verde e após ciclo térmico, está directamente ligada à consistência, sendo menor quanto maior for a consistência da mistura.

A tabela 5.20 apresenta a porosidade, após ciclo térmico, em função da consistência

Tabela 5.20: Porosidade, após ciclo térmico da mistura A em função da consistência

Consistência	Porosidade (%)
0.55	36
0.60	59
0.70	63
0.80	67

5.2.2.3 Resistência mecânica

Na tabela 5.21 estão representados os resultados da variação da resistência à flexão após ciclo térmico com a consistência.

Tabela 5.21: Resistência à flexão de provetes secos para várias consistências.

Consistência	Resistência à flexão (MPa)
0.55	0.20 ± 0.02
0.60	0.16 ± 0.01
0.70	0.11 ± 0.01
0.80	0.07 ± 0.01

O gráfico 5.9 mostra a variação da resistência à flexão em função da consistência.

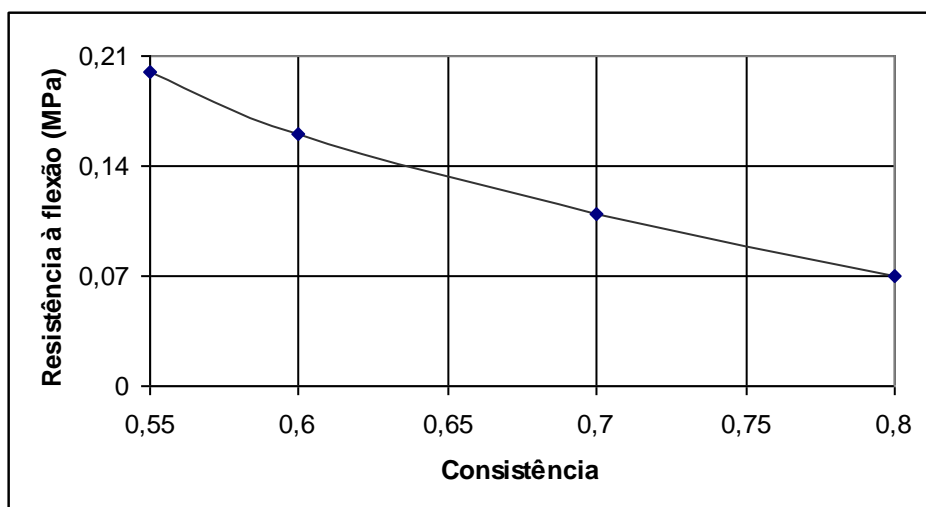


Gráfico 5.9: Variação da resistência à flexão para provetes secos com a consistência.

Como se pode verificar e de acordo com os dados bibliográficos, aumentando a consistência a resistência mecânica diminui. Neste caso a redução em resistência entre as amostras com consistência de 0.55 e 0.80 é de 65%, o que é uma redução significativa.

Comparando estes valores verifica-se que eles são inferiores aos obtidos para o SC1 e P+, que têm menores consistências.

5.2.2.4 Ciclo Térmico sem Calcinação

Realizaram-se estudos de determinação da densidade e resistência mecânica à mistura B para uma consistência de 0.55 para verificar o efeito da calcinação nas suas propriedades.

Os provetes sofreram um ciclo térmico de 14 horas 200°C

Na tabela seguinte estão representados esses resultados.

Tabela 5.22: Densidade e resistência mecânica para a mistura A, com uma consistência de 0.55 só com secagem

Consistência	Densidade após secagem (g/cm ³)	Resistência á flexão (MPa)
0.55	1.06 ± 0.01	0.31 ± 0.02

Como se pode verificar os provetes apresentam um aumento de resistência em de 50% em relação aos provetes calcinados.

O valor da densidade, em comparação com amostra igual que foi calcinada, não se pode dizer que tenha sofrido alteração.

Estes resultados evidenciam que à partida a calcinação reduz as propriedades mecânicas destes materiais.

5.2.2.5 Permeabilidade

Os valores obtidos para a permeabilidade, em função da consistência , encontram-se representados na tabela 5.23.

Tabela 5.23: Permeabilidade em função da consistência para a mistura A.

Consistência	Permeabilidade (cm/minuto)
0.55	20-30
0.60	20-30
0.70	25-30
0.80	30

Uma análise da tabela demonstra que nesta mistura e para estes valores de consistência a permeabilidade mantém-se praticamente constante. Estes resultados são concordantes com os obtidos com o SC1 e P+.

5.2.2.6 Observações

Na elaboração da mistura A com diferentes consistências verificaram-se dois fenómenos:

1. Misturas com consistência de 0.55 nem sempre se conseguiam vaziar, ao contrário das outras misturas com consistências diferentes. Por causas que não se conseguiram determinar, misturas com esta consistência ganharam presa antes do final do tempo de mistura,
2. Após calcinação e mesmo com um arrefecimento lento dentro do forno, havia provetes apresentavam pequenas fissuras nas zonas de ângulos rectos. Este facto revela que os provetes apresentavam sinais de que o arrefecimento não tinha sido o mais lento possível.

O ultimo facto deve-se ao comportamento da sílica durante ciclos de aquecimento arrefecimento (ver fig.3, pág.41).

Pela bibliografia (e por análise do processo “Antioch”) sabe-se que o talco é adicionado a componentes cerâmicos para eliminar este efeito. Devido a este facto decidiu-se adicionar 8% de talco (teor análogo ao processo “Antioch”) para tentar evitar este fenómeno.

5.2.3 Mistura B

O processo produtivo utilizado foi o mesmo que se utilizou para a mistura A:

- Misturar com a água e deixar repousar 1 minuto,
- Misturar mecanicamente durante 3 minutos,
- Vazar,
- Desmoldar ao fim de 1 hora,

A temperatura da água utilizada situou-se entre 18 e 20°C.

5.2.3.1 Densidade

A densidade teórica foi calculada utilizando a equação 5.2. O resultado obtido foi de 1.61 g/cm³.

Na tabela 5.24 estão as densidades reais para a mistura B em função da consistência

Tabela 5.24: Densidade real em verde e após ciclo térmico em função da consistência para a mistura B.

Consistência	Densidade a verde (g/cm ³)	Densidade seca (g/cm ³)
0.55	1.59 ± 0.01	1.05 ± 0.01
0.60	1.56 ± 0.01	0.99 ± 0.02
0.70	1.51 ± 0.02	0.91 ± 0.01

Verifica-se que os valores para a densidade diminuíram em relação á composição A. Isto deve-se, provavelmente á introdução de talco, que é um elemento com uma densidade muito baixa.

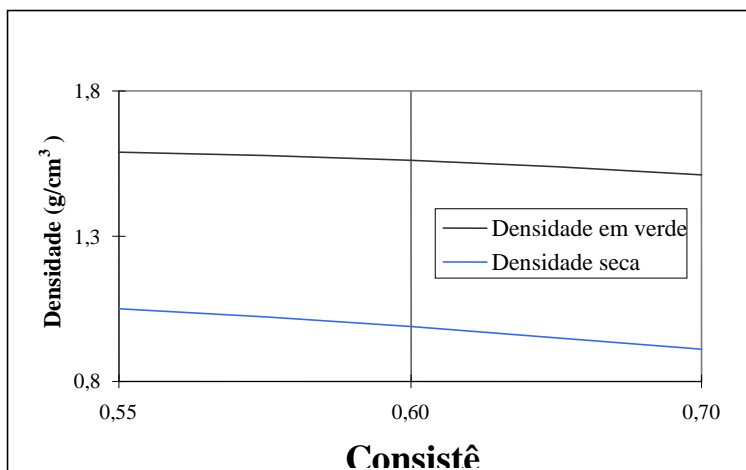


Gráfico 5.11: Variação da densidade em verde e após ciclo térmico com a consistência

Na tabela 5.25 apresenta o nível de porosidade para a mistura B após ciclo térmico com a consistência.

Tabela 5.25: Porosidade da mistura B após ciclo térmico para 3 consistências diferentes.

Consistência	Porosidade (%)
0.55	34.7
0.60	38.5
0.70	43.4

Como em outros casos verifica-se um aumento de porosidade associados ao aumento de consistência.

5.2.3.2 Resistência mecânica

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados dos ensaios de flexão, após ciclo térmico, realizados com a mistura B para diferentes consistências.

Tabela.5.26: Variação da resistência à flexão com a consistência para a mistura B.

Consistência	Resistência à flexão (MPa)
0.55	0.12 ± 0.01
0.60	0.10 ± 0.01
0.70	0.07 ± 0.01

A variação está representada graficamente no gráfico 5.12.

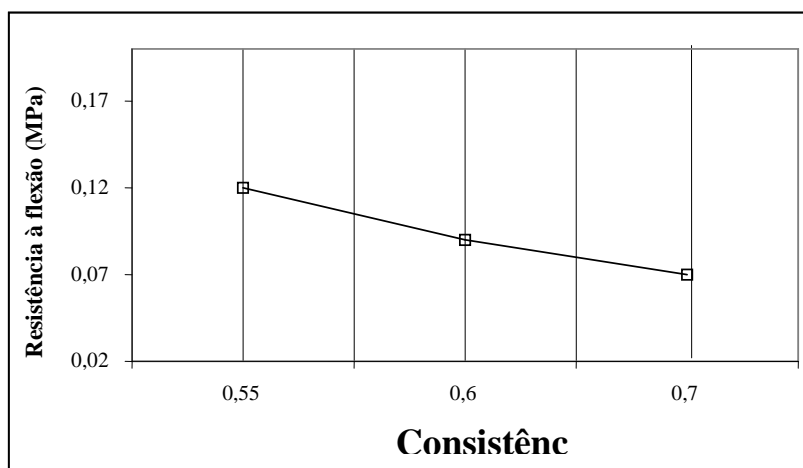


Figura 5.12: Variação da resistência à flexão em função da consistência para a mistura B

Os factores que variaram neste caso foram a introdução de talco na mistura e diminuição do teor em gesso. O talco usado aqui é um material pouco denso (ver tabela

5.13) o que pode contribuir para a cada de resistência. A redução em gesso pode também ter contribuído para a redução de resistência mecânica já que é o elemento que prove a ligação entre as partículas.

5.2.3.3 Permeabilidade

Os resultados obtidos para a permeabilidade encontram-se na tabela 5.27.

Tabela 5.27: Permeabilidade da mistura B para três consistências diferentes.

Consistência	Permeabilidade
0.55	20-30
0.60	20-30
0.70	20-30

Em analogia com o que se verificou para as amostras comerciais e para a mistura A os valores para a permeabilidade mantêm-se.

5.2.4 Mistura C

Para compensar as baixas resistências mecânicas obtidas com a mistura B, foi decidido adicionar um cimento aluminoso de alta resistência que estava disponível no INEGI/CETECOFF.

Este procedimento tem como base o processo “Antioch” que com uma composição semelhante à da mistura B, adiciona 0.5% de cimento Portland.

A consistência final escolhida foi de 0.60 por apresentar um conjunto de propriedades que a tornavam interessante:

- Facilidade de preparação
- Bom tempo de vazamento. As misturas com consistências de 0.55 apresentaram mais do que uma vez dificuldades de produção, dificuldades essas que consistem em ganhar presa na fase de mistura e perderem rapidamente a fluidez necessárias durante a fase do vazamento
- Boa fluidez.

Apesar da mistura B com a consistência de 0.60 apresentar uma resistência mecânica baixa, em comparação com as amostras comerciais, esperava-se que com a adição de cimento ela fosse melhorada.

5.2.4.1 Densidade

A densidade teórica para a mistura C foi determinada utilizando a equação 5.2. O valor obtido é 1.69g/cm^3 .

Na tabela 5.28 apresentam-se as densidades, a verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação, obtidas para a mistura C.

Tabela 5.28: Densidades real em verde e após ciclo térmico para a mistura C

Consistência	Densidade a verde (g/cm^3)	Densidade após ciclo térmico (g/cm^3)
0.60	1.57 ± 0.02	1.01 ± 0.02

Verifica-se que há um há um acréscimo da densidade seca em relação á mistura B, para uma consistência de 0.60, em cerca de 2 %.

5.2.4.2 Resistência Mecânica

Na tabela 5.29 apresentam-se os resultados para a resistência mecânica obtidos para a mistura C.

Tabela 5.29: Resistência á flexão em verde e após ciclo térmico de secagem-calcinação.

Consistência	Resistência á flexão a verde (MPa)	Resistência á flexão seca (MPa)
0.60	0.73 ± 0.02	0.16 ± 0.01

Em relação à consistência anterior (mistura B com 0.6 de consistência) há um incremento em 44% na resistência mecânica. Esta subida tem que ser atribuída à adição de cimento à mistura.

No entanto este valor continua a ser inferior aos valores obtidos pelos produtos comerciais, 11% inferior ao obtido pelo SC1 e 58% inferior ao valor obtido com o P+.

Pelos valores obtidos para a densidade e resistência mecânica pode-se concluir que o aumento de resistência se deve à adição de cimento e não ao ligeiro acréscimo da densidade.

5.2.4.3 Permeabilidade

O valor obtido para a permeabilidade está na tabela 5.30

Tabela 5.30: Valor obtido para a permeabilidade da mistura C.

Consistência	Permeabilidade (cm ³ /cm ³)
0.60	20-30

É um valor que se enquadra nos obtidos para todas as misturas elaboradas e misturas comerciais.

5.2.5 Rugosidade das Misturas A, B e C

A tabela 5.31 apresenta a rugosidade obtida para as diferentes misturas A, B e C.

Tabela 5.31: valores de rugosidade obtidos para as misturas A, B e C.

Mistura	Rugosidade (μm)	
	Ra	Rmáx
A	5.67 ± 0.35	42.5
B	3.94 ± 0.50	47.8
C	5.53 ± 0.72	64.9

Os valores obtidos estão acima dos avançados pela bibliografia. É de notar ao mesmo tempo a grande dispersão de resultados obtidos para cada valor.

A mistura B é a que apresenta melhor rugosidade.

5.4 Moldações cerâmicas

O processo de fabrico de moldes de precisão pelo método das moldações cerâmicas tem vindo a ser um dos principais pontos de investigação do INEGI/CETECOFF.

Uma das composições que tem vindo a produzir bons resultados no fabrico de peças metálicas encontra-se representada na tabela 5.32.

Tabela 5.32: Componentes para uma mistura destinada ao fabrico de uma moldação cerâmica

Material	Silicato de zircónia -325 mesh	Silicato de zircónia -200 mesh	Areia de zircónia	Molochite 50-80	Molochite 30-80	Molochite 16-30	Rútilo -200 mesh
Teor (%)	15	30	15	10	10	10	10

Nota: Molochite- 55% mullite($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e 45% de sílica amorfa

Silicato de zircónia- ZrSiO_4

O rútilo é adicionado à mistura para evitar a sedimentação. O ligante utilizado é o silicato de etilo hidrolizado.

A mistura é preparada com o ligante incluído, com um tempo de mistura de 5 minutos. Um catalizador é adicionado (hidróxido de amónia na proporção de 2%) à

mistura para produzir a reacção de gelificação. Esta mistura foi de 30 segundos. Após este tempo a mistura é vazada no molde.

A barbotina foi vazada num molde de dimensões 257x210x100 mm.

A quantidade necessária de material seco foi de 5Kg.

Quando atingiu uma consistência parecida com a da borracha, a moldação foi desmoldada e a reacção de gelificação foi interrompida por ignição e queima de álcool.

Após este estágio de estabilização foi feito um tratamento térmico de sinterização. Este ciclo consistiu em:

- Aquecimento até 1050°C durante 1 hora,
- Estágio de 2 horas a essa temperatura,
- Arrefecimento lento dentro do forno.

5.4 Análise de custos

A análise de custos feita é uma análise comparativa entre a mistura C e os materiais da UCPI, HIDRACAST SC1 e HYDRACAST P+.

Os custos dos materiais envolvidos encontram-se expressos na tabela 5.33.

Nesta análise não são contabilizados os custos da água utilizada para cada tipo de mistura.

Tabela 5.33 :Custos dos materiais utilizados nas moldações

Materiais	Custo (esc./Kg)
HYDRACAST SC1	195
HYDRACAST P+	180
Areia de fundição AFS 50/60	15
Gesso cerâmico	27
Talco	25
Cimento CA-14	150

O método de cálculo utilizado tem por base a quantidade necessária para a produção de um 1 litro de barbotina. Este cálculo tem por base a densidade das composições após ciclo térmico.

Como a densidade da mistura C é $1.01 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$, optou-se por utilizar o valor de 1.03 g/cm^3 para valor de cálculo por ser a situação mais desfavorável.

A tabela 5.35 apresenta os valores necessários de mistura seca para se produzir um molde de 1 litro.

Tabela 5.35: Quantidades necessárias para produzir um molde de 1 litro para três diferentes misturas.

Mistura	Mistura seca necessária para produzir um molde de 1 litro (g)
HYDRACAST SC1	1450
HYDRACAST P+	1250
C	1030

Os custos obtidos para o SC1 e P+ são obtidos multiplicando as quantidades necessárias pelo custo por Kg.

No caso da mistura C o custo é obtido multiplicando a percentagem de cada componente da mistura pelo seu preço/Kg. O custo final é a soma destas multiplicações parciais.

O custos obtidos estão expressos na tabela 5.36 .

Tabela 5.36: Custos de produção de um molde de 1 litro para três diferentes misturas.

Mistura	Custo de um molde de 1 litro (esc.)
HYDRACAST SC1	282.75
HYDRACAST P+	225.00
C	22.75

Como se pode verificar pela tabela há uma redução considerável nos custos, em termos de materiais utilizados, entre a mistura C e as misturas comerciais SC1 e P+. Esta redução é de 92% quando comparado com o SC1 e de 89.9% quando se compara com o P+.

Uma outra comparação pode ser feita com as moldações cerâmicas.

Na tabela 5.36 estão representados os custos das matérias primas envolvidas na produção da moldação do ponto 5.3.

Tabela 5.36: Custos e teores de matérias-primas utilizadas na produção da moldação cerâmica do ponto 5.3.

Material	Silicato de zircónia -325 mesh	Silicato de zircónia -200 mesh	Areia de zircónia	Molochite 50-80	Molochite 30-80	Molochite 16-30	Rútilo -200 mesh
Teor (%)	15	30	15	10	10	10	10
Custo (esc./kg)	128	100	150	120	121	92	266

Para esta análise tomamos como referência a moldação anterior.

A moldação tem um volume de 5.46 dm³.

Na tabela 5.37 apresenta-se o custo obtido utilizando a mistura C, a mistura cerâmica da tabela 5.36 e os materiais P+ e SC1.

Tabela 5.37: Custos envolvidos na produção de uma moldação de 5.46 dm³ para 4 tipos de materiais diferentes.

Material	Custo (esc.)
Mistura C	125.46
SC1	1543
P+	1228.5
Mistura cerâmica	1258

Nesta análise não foram incluídos os custos com o ligante e o catalizador no caso das moldações cerâmicas.

Verifica-se mais uma vez, e isto em termos de custos , que o estudo de formulações para o processo de moldações em gesso traz consigo grandes vantagens em termos económicos.

Bibliografia

1. José M. G. Carvalho Ferreira; **Tecnologia da Fundição**, Fundação Calouste Gulbenkian – Serviço de Educação, Lisboa 1999.
2. John E. Neely; **Practical Metallurgy and Materials of Industry**; 4th Edition, Prentice Hall, 1994.
3. **ASM Handbook, Volume 15 – Casting**, ASM – The Materials Information Society, 1999.
4. Kenneth G. Boudinski; **Engineering Materials – Properties and Selection**, 5th Edition, Prentice Hall, 1996.
5. Norris B. Luther; **Metal Casting and Moulding Processes**, Casting Buyer Guide, American Foundrymen’s Society, 1998.
6. M. Conserva, G. Donzelli, R. Trippodo; **Aluminium and It’s Applications**, EDIMET, 1^a Edição, 1999.
7. Edited by P. R. Beeley and R. F. Smart; **Investment Casting**; The Institute of Materials, 1995.
8. G. Richards; *Precision Casting*, Foundry Technology Source Book, American Society for Metals, 1980.
9. Robert J. FitzGerald; *Precision Casting Plastic Tooling by the Unicast Process*; Engineering Conferences, Casting Moulding and Metallurgical Processing, April 1971.

10. R. E. Greenwood; *Precision Casting of Die Castings Dies and Components in Ceramic Molds*, Technical paper n.º 134, Presented at the 5th National Die Casting Congress, Detroit, Michigan, November, pg. 4-7, 1968.
11. Joaquim Barbosa, M. Santos Pais; *Análise dos Factores de Precisão dos Fundidos com Referência às Matérias-Primas e Materiais Auxiliares de Fundição*, 9º Encontro da Sociedade Portuguesa de Materiais, vol.1, pág. 109-114, Universidade do Minho, Guimarães, Junho de 1999.
12. Hermínio de Almeida Martins; **Estudo e Desenvolvimento da Fabricação de Moldações Bloco de Precisão**, Projecto de Fim de Curso – Engenharia Mecânica, FEUP, 1996/1997.
13. Rui Neto; Barbedo Magalhães; *Moldes Cu-Be*; Porto, CETECOFF – INEGI, 1996.
14. A. J. Clegg; *The Shaw Process-A Review*, Foundry Trade Journal, pg. 429-438, September, 1980.
15. Adolfo Recusani Filho; *O Processo Shaw Para Fundição de Precisão- Sua Aplicação Para Matrizes de Forja e de Prensa*; Contribuição Técnica n.º743 apresentada a XXII Congresso Anual da ABM, Vitória, ES, Julho de 1967.
16. Werner Dittrich; *Precision Casting Processes With Ceramic Moulds – A Review of the Present Situation and Possible Future Developments*; Communication from the Dynamit Aktiengesellschaft, Troisdorf,; Giesserei 59,n.º 8, 20 April, 1972.
17. João Rocha e Silva; **Moldações Cerâmicas Compósitas**, Dissertação Apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, FEUP, 1999.
18. Teresa P. Duarte, F. Jorge Lino Alves, Rui J. Neto; *Utilização de Moldações Cerâmicas no Fabrico de Moldes Metálicos*; INEGI, “O Molde”, pág.32-41, 1999.

19. Rui J. Neto, A. Barbedo de Magalhães, Mário J. Pinto, Bártolo C. Paiva; *A Prototipagem Rápida e a Produção de Protótipos Funcionais e Pré-séries em Fundição*, Tecnometal, , n.º112, pág. 5-8, Setembro-Outubro, 1997.
20. Rui J. Neto, Teresa M. P. Duarte, A. P. Barbedo de Magalhães, F. Jorge Lino Alves; *A Prototipagem Rápida e a Fabricação Rápida de Ferramentas Para Forjamento na Industria de Ferragens*; Tecnometal, 1997.
21. T. P. Duarte, F. Jorge Lino, R. L. Neto; *Ceramic Materials for Casting Metallic Moulds*, , Struers Journal Of Materialography, Struers 34, 1999.
22. Jorge Lino, Teresa Duarte, Rui Neto; *Fabrico Rápido de Ferramentas (“Rapid Tooling”) Por Fundição de Precisão*; DEMEGI/INEGI (CETECOFF).
23. Ezra L. Kotzin, Compiled and Edited; **Metal Casting and Moulding Processes**, American Foundrymen’s Society, 1981.
24. **The Plaster Mold Casting Handbook**; P.M.C.A. – The Plaster Mold Casting Association, 1983.
25. Richard W. Heine, Carl R. Loper Jr., Philip C Rosenthal; **Principles of Metalcasting**; McGraw-Hill Book Company.
26. J. Gervin Sylvia; **Cast Metals Technology**; AFS Training Research Institute, 1972.
27. **Aluminium Casting Technology**; AFS – American Foundrymen’s Society, Inc., 2th edition, 1984.
28. Serope Karl Pakjan; **Manufacturing Processes for Engineering Materials**, 3th edition, Prentice Hall, 1996.

29. Maria Carlos M. Sousa Figueiredo; **Estudo e Recuperação de Moldes de Gesso Cerâmico Saturados**, Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Minerais e Rochas Industriais, Aveiro 1999.
30. R. C. Smith, C. K. Andres; **Materials of Construction**, McGraw-Hill International Editions, 1985.
31. **Materials Handbook for Refractories, Traditional and Advanced Materials, Ceramic Industry**, Ceramic Industry, Janeiro 1991.
32. C. Fonseca, J. F. Coroado; *Análise Comparativa de Gessos Cerâmicos e suas Aplicações*, 9º Encontro da Sociedade Portuguesa de Materiais, vol.1, pág. 53-58, Universidade do Minho, Guimarães, Junho de 1999.
33. Frederick M. Lea; **The Chemistry of Cement and Concrete**, 3th edition, Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1970.
34. James A. Jacobs, Thomas F. Kilduff; **Engineering Materials Technology – Structures, Processing, Properties and Selection**, 3th edition, Prentice Hall, Inc., 1997.
35. K. L. Mountain; *The Antioch Process for Making Intricate Plaster Mold Castings*, Foundry, vol.83, pag. 101, November, 1955
36. Michael B. Bever; **Encyclopedia of Materials Science and Engineering**, Pergamon Press, 1986.
37. Mesquita, Adolfo Pinto; *Tecnologia da Fundição em Ligas de Cobre*, I.N.I.I., Metalúrgica, 1978.
38. ASM Comitee – **Forging and Casting, Metals Handbook**, ASM, 8th edition.

39. Teresa P. Duarte, F. Jorge Lino Alves, Rui J. L. Neto, Manuel S. Simão; *Fabrico de Moldações Cerâmicas Para Obtenção de Moldes Para Injecção de Plásticos por Fundição de Precisão*; INEGI/CETECOFF, 1999.

40. David W. Richerson; **Modern Ceramics Engineering-Properties, Processing and Use in Design**, Marcell Dekker Inc, 1997.

41. Douglas Winslow; **Experiments With Construction Materials – A Laboratory Manual**; McGraw-Hill Publishing Company, 1990.