

Fundição de turbinas em aluminetos de titânio

João Dias Simas

Relatório do Projeto Final / Dissertação do MIEM

Orientador no INEGI: Eng. Rui Jorge Lemos Neto

Orientador na FEUP: Prof.^a Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2015

Resumo

A presente dissertação aborda a fundição de turbinas, em aluminetos de titânio, pelo processo de “cera perdida” e pretende dar continuação a outros trabalhos já realizados no INEGI dentro do mesmo tema. Tendo como objetivo a melhoria de formulações “*low cost*” para as carapaças cerâmicas, foram realizadas novas composições de barbotinas de *facecoat* e várias combinações entre barbotinas e areias de *backup*. As formulações realizadas foram alvo de estudo, em termos de reatividade e friabilidade, de forma a poder-se definir formulações que permitam obter os melhores resultados para estas duas características.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica relativa às características e propriedades das ligas TiAl, assim como para a fundição por “cera perdida” em geral. De forma cuidada, foi abordado todo o processo, desde a injeção dos modelos em cera e construção das carapaças cerâmicas, até à fusão, vazamento e acabamentos finais. De referir que também foi abordado o problema da reatividade entre os *facecoat*'s e as ligas vazadas, um problema a contornar com o uso de formulações “*low-cost*”.

Posteriormente, iniciou-se o procedimento experimental onde estão descritos todos os trabalhos realizados. Primeiramente foram realizados trabalhos para familiarização com o processo, passando-se seguidamente para elaboração das novas composições de *facecoat*. Foram formuladas duas novas barbotinas, onde a percentagem de farinha de zircão da barbotina “*low-cost*” SAZ15% foi reduzida em 50%, com adição na mesma percentagem de ítria chinesa com diferentes granulometrias, 4-7 μm e 20-100 μm . Para efeitos de estudo, foram também feitas combinações entre barbotinas e areias de *backup*, com objetivo de analisar a sua influência nos níveis de friabilidade.

Foram realizados ensaios de friabilidade para formulações com um e dois *facecoat*'s e a três temperaturas de sinterização – 1450°C, 1300°C e 1200°C. A introdução de temperaturas mais baixas partiu do objetivo de se tentar, não só obter também bons resultados mas também baixar os custos energéticos, face aos 1450°C necessários aquando do uso de ítria. Em relação à reatividade, os novos *facecoat*'s foram alvo de análise, de forma a verificar se com barbotinas “*low-cost*” é possível obter peças sem a presença da camada α -case.

Como trabalho complementar foi realizado o controlo dimensional de uma turbina fundida em TiAl e comparado com a cera que lhe deu origem, obtida por impressão tridimensional, para avaliar as contrações do processo de *investment casting*.

A composição de *facecoat* SAZY4 apresentou, no geral, bons resultados em termos de friabilidade e reatividade.

Abstract

The following dissertation is about turbines foundry made of titanium aluminides (TiAl alloys) by investment casting process and continues other similar projects already elaborated by INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial). Setting as objective the improvement of low-cost formulations for ceramic shells, new *facecoat* slurry compositions and several arrangements with slurries and stucco were made. These formulations were studied reactivity and friability wise so that new optimized formulations could be created.

A systematic review was performed about characteristics and proprieties of TiAl alloys, as well as investment casting foundries in general. The entire process was observed carefully, from the ceramic cast insulation and the ceramic shells building to the melting, leakage and finishing. Also the reactivity problem between the *facecoat*'s and leakage alloys was addressed, which may be solved by the usage of low-cost formulations.

Afterwards, the experimental procedure where all the performed tasks are described was initiated. After initial works aiming the familiarization with the process, new *facecoat* compositions were developed. Two new slurries were designed, the *low-cost* SAZ15% slurry having a 50% reduction of zircon flour (zirconium silicate) and addition of chinese Yttrium with different grain size of 4-7 μm and 20-100 μm in the same 50% amount. For research purposes and aiming to study its influence in friability levels, several arrangements with slurries and backup sands were made.

Friability trial for formulations with both one and two *facecoat*'s were executed in three sintering temperatures – 1450°C, 1300°C and 1200°C. By trying to obtain better results and lower energetic costs, lower temperatures than the 1450°C necessary while using Yttrium were used. Concerning reactivity, new *facecoat*'s were analyzed so that with low-cost slurries usage would be possible to obtain parts without α -case layer.

A dimensional control of TiAl casted turbine was performed as a complementary work, and afterwards compared with the wax used in its production, obtained through three dimensional printing, in order to evaluate the contractions occurred in the *investment casting* process.

The *facecoat* composition SAZY4 showed, in general, good results concerning the friability and reactivity.

Agradecimentos

Ao Eng.º Rui Neto, orientador no INEGI, pela oportunidade que me concedeu em trabalhar consigo e pela disponibilidade que teve sempre comigo ao longo deste trabalho. A sua experiência foi crucial para o desenvolvimento deste trabalho e para mim como futuro engenheiro mecânico.

À Prof.^a Dr.^a Teresa Duarte, orientadora na FEUP, por todo apoio, disponibilidade e amabilidade que foram concedidos durante a realização deste trabalho. A sua ajuda e dedicação foram uma mais-valia, tanto pelas sugestões e conhecimentos transmitidos durante o trabalho.

A toda a equipa do INEGI, por ter disponibilizado os meios necessários à realização desta dissertação. Um especial agradecimento aos elementos do CETECOFF: Armanda Marques, Fernando Seabra e Sertório Lares. Não posso deixar de agradecer ao Eng.º Bártolo Paiva pela disponibilidade e companheirismo que sempre demonstrou durante todo o meu trabalho no INEGI.

À *Zollern & Comandita* por todo o suporte dado durante a realização da dissertação.

Aos companheiros do ISEP, Tiago Silva, Miguel Ferreira, Pedro Santos, João Colaço e Josimar Santos e aos companheiros da FEUP, Inês Esteves, Daniel Ferreira, Ricardo Rocha, João Santos, Daniel Caetano e Sérgio Freitas pela sua camaradagem e apoio nos momentos mais críticos.

Ao companheiro de trabalho durante toda a realização da parte experimental, João Pinto, pela sua disponibilidade, motivação e preciosa ajuda cedida.

A todos os meus amigos que, direta ou indiretamente contribuíram para esta etapa da minha vida académica.

A toda a minha família, especialmente aos meus pais, irmão, cunhada e sobrinho pelo apoio incondicional que sempre me deram.

Índice

1. Introdução	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Apresentação da empresa INEGI	2
1.3 - Enquadramento da dissertação na empresa INEGI	3
1.4 - Organização e temas abordados no presente relatório	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1 - Ligas TiAl	5
2.1.1 - Introdução	5
2.1.2 - Caracterização e comparação com outras ligas	5
2.1.3 - Resumo das propriedades das ligas de TiAl	10
2.1.4 - Aplicações	12
2.2 - Fundição de Precisão	15
2.2.1 - Breve introdução à fundição por “cera perdida”	15
2.2.2 - Descrição do processo de fabrico	16
2.2.3 - Resumo do Processo	18
2.2.4 - Vantagens e desvantagens do processo	22
2.3 - Modelos	23
2.3.1 - Características do modelo em cera e sua composição	24
2.3.2 - Efeito dos parâmetros de injeção	26
2.3.3 - Processo de fabrico	27
2.3.4 - Processo de construção dos cachos e sistemas de gitagem	31
2.4 - Carapaças cerâmicas	34
2.4.1 - Processo de fabrico das carapaças	34
2.4.2 - Materiais refratários	38
2.4.3 - Barbotinas	43
2.4.4 - Descerificação	48
2.4.5 - Sinterização	49
2.4.6 - Ensaio de verificação de qualidade das carapaças cerâmicas	55
2.5 - Fusão e Vazamento	60
2.5.1 - Fusão por indução	60
2.5.2 - Fusão por arco elétrico	63

2.5.3 - Fusão por arco de plasma	65
2.5.4 - Vazamento por gravidade.....	66
2.5.5 - Vazamento por centrifugação.....	67
2.5.6 - Vazamento por baixa pressão.....	70
2.6 - Defeitos de Fundição.....	72
2.6.1 - Abordagem aos principais tipos de defeitos.....	72
2.6.2 - Tipos de defeitos da peça em estudo	73
2.7 - Acabamento e inspeção	74
2.7.1 - Operações de acabamento	74
2.7.2 - Inspeção.....	74
2.8 - Reatividade das ligas.....	76
2.8.1 - Formação da camada α -case.....	76
2.8.2 - Influência do teor de alumínio na formação da camada α -case	80
2.8.3 - Métodos usados na avaliação da reatividade.....	81
2.8.4 - Métodos de remoção da α -case	82
3. Procedimento experimental, resultados e sua discussão	85
3.1 - Matérias-primas.....	87
3.1.1 - Ligantes	87
3.1.2 - Farinhas cerâmicas	87
3.1.3 - Aditivos	88
3.1.4 - Areias cerâmicas	89
3.2 - Formulações para carapaças cerâmicas.....	90
3.2.1 - Formulações para ligas de Ti e TiAl	90
3.2.2 - Novas formulações para barbotinas de <i>facecoat</i>	95
3.2.3 - Resumo das formulações realizadas.....	97
3.2.4 - Primeiros trabalhos realizados	99
3.3 - Processo de fabrico.....	106
3.3.1 - Obtenção dos modelos em cera.....	106
3.3.2 - Preparação do cacho.....	113
3.3.3 - Controlo das barbotinas.....	114
3.3.4 - Deposição das barbotinas e areias cerâmicas.....	115
3.3.5 - Corte das carapaças, descerificação e sinterização	117
3.3.6 - Fusão e Vazamento por “ <i>single shot</i> ”	120

3.4 - Friabilidade	123
3.4.1 - Fabrico dos provetes.....	123
3.4.2 - Ensaio realizados	125
3.4.3 - Resultados e discussão	129
3.5 - Reatividade.....	135
3.5.1 - Microdurezas	136
3.5.2 - Microestruturas	140
3.6 - Breve análise de custos	143
3.7 - Controlo dimensional - Turbina Daimler Ø88mm.....	147
3.7.1 - Objetivos	147
3.7.2 - Descrição da peça em estudo	148
3.7.3 - Metodologia desenvolvida	148
3.7.4 - Medições	150
3.7.5 - Resultados	153
3.7.6 - Conclusões	155
4. Conclusões e trabalhos futuros	157
4.1 - Conclusões	157
4.1.1 - Friabilidade	157
4.1.2 - Reatividade.....	158
4.2 - Trabalhos Futuros.....	159
Referências Bibliográficas.....	161
Anexos.....	165
Anexo A: Granulometria	165
Anexo B: Fichas dos materiais utilizados na composição das barbotinas.....	167

Lista de Figuras

Figura 1 - Comparação de propriedades entre ligas [6].	6
Figura 2 - Secção do diagrama de fases Ti-Al [6]	7
Figura 3 – Evolução da ductilidade à temperatura ambiente em função do teor em alumínio [11]	9
Figura 4 - Funcionamento de um Turbocompressor [16]	13
Figura 5 - Motor Genx – 1B [4]	14
Figura 6 - Exemplos de peças obtidas pelo processo de fundição de precisão [19]	15
Figura 7 - Diagrama do processo de fundição por cera perdida [21]	17
Figura 8 - Tolerâncias dimensionais [22]	21
Figura 9 - Exemplo do modelo em cera	24
Figura 10 - Esquema do processo de fabrico do modelo em cera [2]	27
Figura 11 - Exemplo de duas peças fabricadas pelo método <i>Quick Cast</i> [27]	28
Figura 12 - Equipamento de injeção de cera/moldes do INEGI	29
Figura 13 - Cacho de turbinas utilizado no INEGI	31
Figura 14 - Alguns dos procedimentos efetuados.	35
Figura 15 - Tabuleiros de suporte e ventilação	36
Figura 16 - Diferentes tipos de camadas cerâmicas [2]	37
Figura 17 - Expansão térmica dos refratários [1], [23]	40
Figura 18 - Tinas rotativas	44
Figura 19 - Chuveiros e leitos fluidizados	46
Figura 20 - Comportamento das soluções coloidais a) Solução; b) Coagulação (Gel); c) Floculação e precipitação [2]	47
Figura 21 - 1) Flash Fire [32]; 2) Autoclave [33]	49
Figura 22 - Esquema dos mecanismos de transporte de matéria que podem atuar durante a sinterização: (1) difusão pela superfície; (2) difusão pela rede (superfície); (3) difusão por vapor; (4) difusão por contornos; (5) difusão pela rede (contorno de grão); e (6) difusão pela rede (deslocações) [34]	52
Figura 23 - Esquema do modelo de duas esferas referente ao estágio inicial da sinterização. G é o diâmetro da partícula e X é o diâmetro do pescoço [34]	52
Figura 24 – Análise por microscopia eletrónica de varrimento com eletrões secundários de uma superfície polida onde se verifica a presença de poros abertos interconectados [34]	53
Figura 25 - Geometria dos poros em função da sua localização [34]	54

Figura 26 - Análise por microscopia eletrônica de varrimento com elétrons secundários de uma superfície polida onde se verifica a presença de poros residuais fechados [34].....	54
Figura 27 - Copa <i>Zahn</i> nº4	56
Figura 28 - Equipamento usado na medição de temperatura e pH – teste 230	57
Figura 29 - Carapaça cerâmica e escova utilizada nos testes [36].....	58
Figura 30 - Cadinho cerâmico com <i>facecoat</i> de ítria [3], [12]	61
Figura 31 - Cadinho refrigerado a água [37]	62
Figura 32 - Levitação do metal fundido [1], [2]	63
Figura 33 - Forno de fusão por arco elétrico consumível [3] [38]	64
Figura 34 - Fusão por arco de plasma [3] [40]	65
Figura 35 - Vazamento manual por gravidade [11].....	66
Figura 36 - Vazamento por centrifugação – horizontal [11]	67
Figura 37 - Vazamento por centrifugação – vertical [11]	67
Figura 38 - a) LINN-Supercast; b) Leicomelt 5TP [3].....	68
Figura 39 - Esquema do processo CLV [3], [4]	70
Figura 40 - Processo Levicast desenvolvido pela Daido [3], [4].....	71
Figura 41 - Etapas do processo CLI [3], [40]	71
Figura 42 - Defeitos comuns em turbinas de turbocompressores: a) bolha; b) protuberâncias; c) poro; d) buraco; e) deformação superficial; f) rebarba; g) fissura das alhetas; h) bordo de ataque defeituoso; i) peça mal cheia; j) alhetas partidas; k) inclusão cerâmica; l) penetração de metal na carapaça cerâmica [12]	73
Figura 43 - Diagrama representativo da formação da camada α -case [43]	76
Figura 44 - Variação da energia livre de formação de óxidos com a temperatura [11]	78
Figura 45 - Imagens da interface metal/carapaça para diferentes teores de Al: a) cp Ti, b) Ti-10Al, c) Ti-30Al, d)Ti-40Al, e) Ti-47Al e f) Ti-55Al [48]	80
Figura 46 - Dureza da α -case consoante a profundidade e teor de alumínio [48].....	81
Figura 47 - Esquema da estrutura da seção transversal da amostra após irradiação laser [50] [1]	82
Figura 48 - Morfologia da α -case irradiada a diferentes profundidades a partir do topo [50] [1]	83
Figura 49 - Esquema do procedimento realizado.	95
Figura 50 - Turbina pá curva - Ø43mm.....	99
Figura 51 - Turbina Daimler - Ø88mm	99
Figura 52 - Turbina pá reta - Ø50mm.....	100
Figura 53 - Pá de turbina	100

Figura 54 - Carapaças com contaminação; fissuração; <i>facecoat's</i> excessivamente friáveis. .	105
Figura 55 - Esquema do processo de obtenção do modelo em cera	106
Figura 56 - Molde de turbina do INEGI.....	107
Figura 57 - Fecho do molde e preparação para injeção	107
Figura 58 - Controlo da pressão e temperatura.....	108
Figura 59 - Abertura do molde	108
Figura 60 - a) Cera Argueso – cerita; b) Cera cola Remet – Sticktite; c) Cera Argueso – perfil cilíndrico.....	109
Figura 61 - 1) Molde - Pia de vazamento; 2) e 3) Molde - Sistema de Gitagem	110
Figura 62 - Molde de turbina do INEGI.....	110
Figura 63 - Máquina de injeção e desmoldante.....	111
Figura 64 - Cacho já com a colagem dos diversos componentes	112
Figura 65 - Esquema do processo de preparação do cacho	113
Figura 66 - Tina com <i>Trisol</i>	114
Figura 67 - Gobelé 100ml; Copa <i>Zahn</i> nº4; Testo 230.....	115
Figura 68 - Processo de realização de cada camada.....	115
Figura 69 - Mergulho do cacho na barbotina e sua uniformização	116
Figura 70 - Processo de corte da carapaça cerâmica	117
Figura 71 - Carapaças no forno de descerificação do INEGI.....	118
Figura 72 - Forno de sinterização com carapaça no seu interior	119
Figura 73 - Aspeto geral do forno de fusão e vazamento do INEGI [40]	120
Figura 74 - As duas câmaras, cadinho, fusível e carapaça cerâmica [40].	121
Figura 75 - Molde para injeção do provete.....	123
Figura 76 - Provete	124
Figura 77 - Mergulho dos provetes na barbotina.....	124
Figura 78 - Etapas do ensaio de friabilidade	125
Figura 79 - Balança de precisão utilizada.....	126
Figura 80 - Escova de 30mm da marca <i>Fisher Scientific</i>	126
Figura 81 - Gráfico comparativo dos valores de friabilidade obtidos – <i>facecoat</i> SAZY4	131
Figura 82 - Gráfico comparativo dos valores de friabilidade obtidos – <i>facecoat</i> SAZY20 ...	131
Figura 83 - Comparação dos níveis de friabilidade média obtidos	134
Figura 84 - Amostras utilizadas: 1) Corpo e alheta; 2) Ataque	136
Figura 85 - Gráfico comparativo dos valores de microdureza – alheta da turbina.....	138
Figura 86 - Gráfico comparativo dos valores de microdureza – corpo da turbina	139

Figura 87 - Gráfico comparativo dos valores de microdureza no alimentador da turbina – ataque.....	139
Figura 88 - Microestruturas na alheta para os diferentes <i>facecoat's</i>	140
Figura 89 - Microestruturas no corpo para os diferentes <i>facecoat's</i>	141
Figura 90 - Micrografia TiAl, no ataque, em SAZY4.....	142
Figura 91 - Custo de fabrico, para 6 peças, da carapaça tradicional vs “ <i>low-cost</i> ”	146
Figura 92 - Modelo CAD 3D.....	148
Figura 93 - Modelo durante a fase de medição – levantamento de forma.....	150
Figura 94 - Diferenças entre o CAD e o modelo em cera (Azul – cera; Vermelho – CAD)..	151
Figura 95 - Azul: Cera; Cinzento: Metal	152
Figura 96 - Diferenças entre a cera e o metal (Azul – Cera; Vermelho – Metal).....	152

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das ligas TiAl da fase α_2 e γ [4], [10].....	8
Tabela 2 - Principais ligas TiAl [10]	10
Tabela 3 - Algumas propriedades do titânio, superligas de níquel e aluminetos de titânio [13]	11
Tabela 4 - Percentagens de composição do modelo [23], [25].....	25
Tabela 5 - Resumo das camadas cerâmicas.....	37
Tabela 6 - Características de alguns materiais refratários [23], [25].....	39
Tabela 7 - Temperaturas de fusão e de amolecimento dos refratários [1].....	39
Tabela 8 - Composições típicas das barbotinas [23], [25].....	43
Tabela 9 - Mecanismos de transporte de matéria [34].....	51
Tabela 10 - Caracterização dos ligantes usados	87
Tabela 11 - Caracterização das farinhas utilizadas para <i>facecoat</i>	88
Tabela 12 - Caracterização das farinhas utilizadas para <i>backup</i>	88
Tabela 13 - Aditivos usados nas barbotinas	88
Tabela 14 - Areias usadas para as camadas de <i>facecoat</i>	89
Tabela 15 - Areias usadas para as camadas de <i>backup</i>	89
Tabela 16 - Composição da barbotina AY 1%TiO ₂	91
Tabela 17 - Composição da barbotina AFZrYC.....	91
Tabela 18 - Composição da barbotina AFAL.....	92
Tabela 19 - Composição da barbotina SZ	93
Tabela 20 - Composição da barbotina SAZ15%	94
Tabela 21 - Composição da barbotina SSF	94
Tabela 22 - Composição da barbotina SAZY4.....	96
Tabela 23 - Composição da barbotina SAZY20.....	96
Tabela 24 - Resumo das formulações inicialmente realizadas	97
Tabela 25 - Formulações com barbotina SAZY4	98
Tabela 26 - Formulações com barbotina SAZY20.....	98
Tabela 27 - Demonstração dos trabalhos inicialmente realizados.....	101
Tabela 28 - Demonstração do processo realizado	101
Tabela 29 - Resultados com barbotina SAZY4	103
Tabela 30 - Tipos de cera utilizados.....	109

Tabela 31 - Formulações com <i>facecoat</i> SAZY4	127
Tabela 32 - Formulações com <i>facecoat</i> SAZY20	128
Tabela 33 - Valores de friabilidade obtidos para <i>facecoat</i> SAZY4.....	129
Tabela 34 - Valores de friabilidade obtidos para <i>facecoat</i> SAZY20.....	130
Tabela 35 - Valores de friabilidade para diferentes <i>facecoat</i> 's [2].....	133
Tabela 36 - Carapaças realizadas.....	135
Tabela 37 - Resultados obtidos para <i>facecoat</i> SAZY4.....	137
Tabela 38 - Resultados obtidos para <i>facecoat</i> AY	137
Tabela 39 - Resultados obtidos para <i>facecoat</i> SZ.....	137
Tabela 40 - Resultados obtidos para <i>facecoat</i> SAZ15%	138
Tabela 41 - Pesagens efetuadas	143
Tabela 42 - Pesos de cada constituinte da carapaça cerâmica.....	144
Tabela 43 - Peso e custo detalhado de cada material – carapaça “ <i>low-cost</i> ”	144
Tabela 44 - Peso e custo detalhado de cada material – carapaça tradicional	145

Lista de siglas

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

CETECOFF - Unidade de Fundição e Novas Tecnologias

I & D - Investigação e Desenvolvimento

DEMec - Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

CAD - *Computer Aided Design*

Al - Alumínio

Ti - Titânio

Ni - Níquel

V - Vanádio

Nb - Nióbio

Mo - Molibdênio

Cr - Crômio

Mn - Manganês

B - Boro

at % - Percentagem atômica

T_{amb} - Temperatura ambiente

TiAl - Aluminetos de titânio

NiAl - Aluminetos de níquel

AlSiO₄ - Alumino-silicatos

Y₂O₃ - Ítria (Óxido de ítria)

ZrO₂ - Zircónia (Dióxido de zircónio)

ZrSiO₄ - Zircão (Silicato de Zircónio)

Al₂O₃ - Alumina (Óxido de alumínio)

MgO - Magnésia (Óxido de Magnésio)

CaO - Cálcia (Óxido de cálcio)

YC - Ítria chinesa

TiO₂ - Titânia (Dióxido de titânio)

SiO₂ - Sílica (Dióxido de silício)

AY - *Facecoat* de acrilato + ítria fundida

AAFY - *Facecoat* de acrilato + alumina fumada + ítria fundida

AFZr - *Facecoat* de alumina fumada + zircónia

AFZrYC - *Facecoat* de alumina fumada + zircónia + ítria chinesa

SZ - *Facecoat* de sílica + zircão

SAZ15% - *Facecoat* de sílica + 15% acrilato + zircão

SAZY4 - *Facecoat* de sílica + acrilato + zircão + itria chinesa com granulometria 4-7 µm

SAZY20 - *Facecoat* de sílica + acrilato + zircão + itria chinesa com granulometria 20-100 µm

AFAL - *Backup* de alumina fundida + alumina

SSF - *Backup* de sílica + sílica fundida

CLA - *Countergravity Low-pressure Air melt*

CLI - *Countergravity Low-pressure Inert gas*

CLV - *Countergravity Low-pressure Vacuum*

VAR - *Vacuum Arc Remelting*

PAM - *Plasma Arc Melting*

VIM - *Vacuum Induction Melting*

VISM - *Vacuum Induction Skull Melting*

HV - Dureza Vickers

1. Introdução

1.1 - Introdução

Esta dissertação foi realizada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O estudo e desenvolvimento do projeto foram realizados na empresa de acolhimento INEGI, estando o trabalho desenvolvido ligado à empresa *Zollern & Comandita*, com fábrica sediada no concelho da Maia.

O presente trabalho vem na sequência de uma longa colaboração entre o INEGI e a *Zollern & Comandita* e é a continuação de outros trabalhos realizados dentro do mesmo tema, como o caso do Tiago Barrigana [1], Francisco Torres [2], João Pinto [3], entre outros.

Deste modo, pretende-se apresentar novas formulações “*low-cost*” para as carapaças cerâmicas. A par dos estudos realizados em termos de friabilidade para as formulações realizadas, o objetivo principal é a formulação de carapaças capazes de reduzir o fenómeno α -*case*, provocado pela reação entre as ligas e a parede interior da carapaça cerâmica.

1.2 - Apresentação da empresa INEGI

A empresa de acolhimento onde foi realizada esta dissertação de mestrado, designa-se por INEGI. O INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, é uma instituição sem fins lucrativos que promove a interface entre a Indústria e a Universidade, auxiliando a transferência de tecnologia e de inovação de base tecnológica, orientada para o desenvolvimento económico.

O INEGI nasceu no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI, agora DEMec) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em 1986. Nos últimos 25 anos tem desenvolvido e consolidado uma posição de parceiro da indústria em projetos de ID&I, representando estes projetos, a par da consultoria, cerca de 60% da sua atividade.

Com o estatuto de “Utilidade Pública” e com a figura jurídica de “Associação Privada sem Fins Lucrativos”, o INEGI intitula-se como um agente responsável no desenvolvimento do tecido empresarial nacional, auxiliando o desenvolvimento e consolidação de um modelo competitivo baseado na inovação de base tecnológica, no conhecimento e na densidade tecnológica dos produtos e dos processos.

A sua missão é a de contribuir para o aumento da competitividade da indústria, com recurso à investigação e desenvolvimento, transferência de tecnologia, demonstração e formação nas áreas de conceção e projeto, materiais, ambiente, gestão industrial, produção, energia e manutenção.

1.3 - Enquadramento da dissertação na empresa INEGI

Ao longo dos últimos anos, o INEGI em parceria com a *Zollern & Comandita* têm trabalhado em conjunto no sentido de melhorar a obtenção de peças pelo processo de fundição de precisão (*investment casting*). Atualmente encontra-se completamente estabelecido o processo de obtenção de peças em ligas de titânio e aluminetos de titânio por *investment casting*, tanto a nível das matérias-primas a utilizar, como dos procedimentos para cada passo do processo.

A utilização de carapaças cerâmicas para vazamento de ligas de titânio e aluminetos de titânio com alto ponto de fusão, é comum na empresa. No entanto, a utilização destas mesmas carapaças cerâmicas, acarreta custos de produção elevados. A necessidade de reduzir os custos no que diz respeito à descerificação, sinterização e materiais utilizados, tem sido nos últimos tempos objeto de discussão.

Com a utilização de ligas mais reativas surgiu a necessidade de explorar várias formulações de carapaças de modo a se conseguir diminuir a reação entre a parede interior destas (*facecoat*) e a liga vazada (TiAl).

No seguimento destas necessidades, surgiu esta tese de mestrado que, dando continuidade a temas já estudados em outras dissertações realizadas no INEGI sobre o processo de fundição de precisão e os aluminetos de titânio, sempre em colaboração com a empresa *Zollern & Comandita*, aborda novos estudos sobre reatividade e friabilidade.

1.4 - Organização e temas abordados no presente relatório

O presente documento encontra-se dividido em três partes distintas: revisão bibliográfica; procedimento experimental, resultados e sua discussão; conclusões e trabalhos futuros.

A revisão bibliográfica foi estruturada de acordo com a sequência de obtenção de peças por *investment casting*, sendo primeiro referido o tipo de liga utilizada e de seguida a descrição do processo de *investment casting*, desde a obtenção dos modelos em cera até ao vazamento da liga nas carapaças e acabamento/inspeções realizadas.

Posteriormente é apresentado com maior pormenor o problema da reatividade entre os refratários e os alumínetos de titânio.

No trabalho experimental são expostos não só os procedimentos adotados, mas também as matérias-primas necessárias para a sua realização. Os resultados obtidos nos ensaios realizados, também se encontram aqui presentes.

Nas conclusões e trabalhos futuros, compilaram-se todas as conclusões preliminares e definiram-se trabalhos futuros com base nesta dissertação para maior exploração dos temas aqui tratados.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 - Ligas TiAl

2.1.1 - Introdução

Os aluminetos de titânio (TiAl) são ligas intermetálicas formadas por dois metais com estruturas cristalinas distintas dos elementos que as compõem [2]. Os estudos sobre estas ligas têm sido sustentados na necessidade de desenvolvimento de materiais para trabalho a elevadas temperaturas, mais resistentes e mais leves. A razão pela qual estas ligas têm continuado a ser alvo de estudo e atenção por parte das universidades e indústrias, é a sua combinação única de propriedades [4], [5].

2.1.2 - Caracterização e comparação com outras ligas

Segundo Xinhua Wu [6] tem vindo a ser feito, nos últimos 20 anos, um enorme esforço para introduzir as ligas TiAl em aplicações de engenharia. Estas têm sido aplicadas na indústria automóvel e aeroespacial, tal como apresentado no ponto 2.1.4.

As propriedades que tornam as ligas TiAl interessantes, encontram-se resumidas na Figura 1 a) e b). Na Figura 1 a) é evidente que a tensão de rutura (analisada num tempo de trabalho de 1000 horas) e o módulo de elasticidade são superiores às outras ligas Ti e ligas à base de Ni. A Figura 1 b) ilustra algumas propriedades mecânicas em função de uma gama de temperaturas entre a temperatura ambiente e os 800°C e novamente estas se sobrepõem às restantes. Contudo, apesar da elevada resistência mecânica, apresentam baixa ductilidade. Esta propriedade é o maior problema na aplicação destas ligas, como componentes estruturais. O outro principal problema é a sua dificuldade de processamento para formar os componentes pretendidos [6], [7].

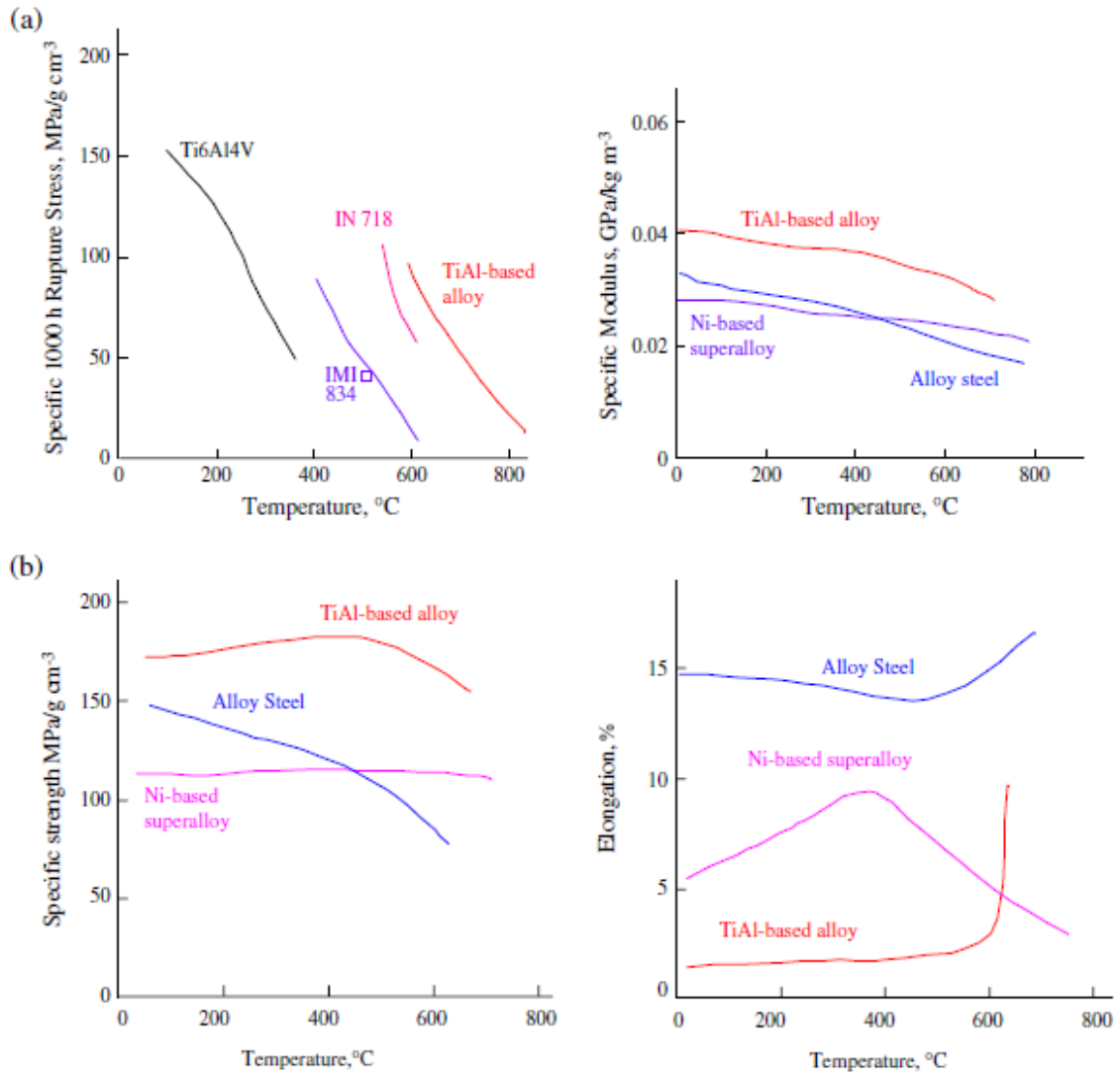


Figura 1 - Comparação de propriedades entre ligas [6].

De uma forma mais completa, apresentam-se seguidamente as suas principais propriedades das ligas TiAl, tais como [4], [8]:

- ✓ Baixo peso;
- ✓ Elevado ponto de fusão;
- ✓ Baixa massa volúmica devido ao alto teor de alumínio;
- ✓ Alta resistência mecânica;
- ✓ Baixa difusibilidade;
- ✓ Boa resistência à corrosão, oxidação e fluência;
- ✓ Alta resistência à ignição (quando comparado com a ligas convencionais de titânio)

Apresentam contudo também alguns inconvenientes, entre os quais [2], [9]:

- ✓ Baixa tenacidade a altas temperaturas;
- ✓ Baixa dureza à temperatura ambiente.

Diagrama de fases da liga Ti-Al

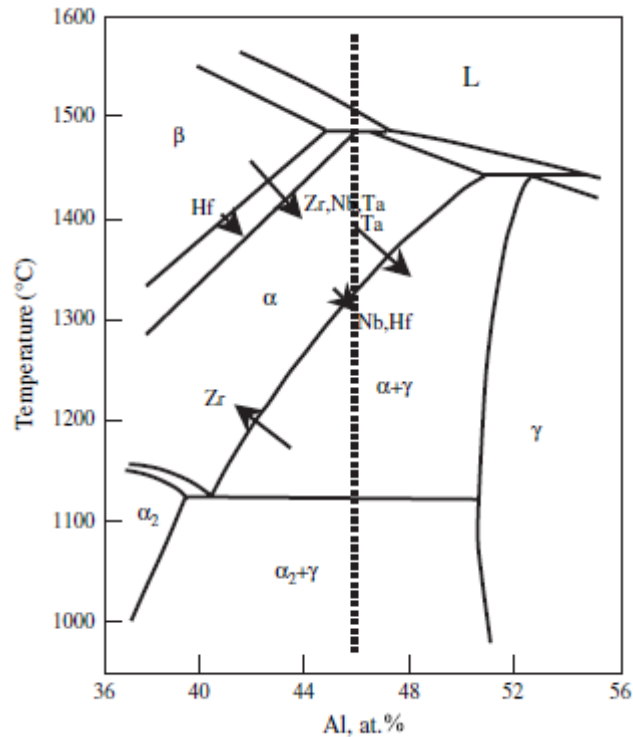


Figura 2 - Secção do diagrama de fases Ti-Al [6]

Nos últimos 10 ou mais anos, as investigações têm-se concentrado em ligas com percentagens de alumínio entre os 44 e os 48 at%, no entanto, para aplicações onde é exigida uma melhoria para trabalho a quente, a percentagem de alumínio investigada tem sido na ordem dos 42 at%. Na Figura 2 é apresentada uma secção do diagrama de fases Ti-Al, onde é claro que para menores teores de alumínio (38 - 44 at%), a fase β de alta temperatura é prolongada tornando mais fácil o trabalho a quente. Se as propriedades a alta temperatura não forem necessárias esta é uma abordagem útil para um processamento da liga com custo mais baixo [6].

A maioria das aplicações com utilização de ligas TiAl requerem elevadas resistências mecânicas a alta temperatura e, neste caso, o teor de alumínio necessário está mais próximo dos 46at%. Das fases anteriormente apresentadas, destacam-se as α_2 e γ , uma vez que são as

fases com mais aplicação em termos de engenharia. A Tabela 1 apresenta as vantagens e desvantagens destas duas fases.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das ligas TiAl da fase α_2 e γ [4], [10]

	Vantagens	Desvantagens
α_2 (20 – 39at % Al)	Boa resistência mecânica a altas temperaturas	Muito baixa ductilidade
		Alta absorção de O e H provocando fragilidade a altas temperaturas
γ (46 – 66at % Al)	Excelente resistência à oxidação	Ductilidade praticamente nula à temperatura ambiente mesmo com adição de elementos de liga.
	Absorção de H muito baixa	

Influência dos elementos de liga

Como é sabido, o grande interesse dos aluminetos de titânio é o de substituir as superligas de níquel, sendo para isso necessário melhorar as suas propriedades mecânicas, principalmente para temperaturas acima dos 750°C.

Os elementos de liga são responsáveis por diversas propriedades mecânicas das ligas TiAl. Segundo a equação seguinte as ligas bifásicas TiAl podem conter os seguintes elementos:

Ti – Al (45 – 48) % at. – X (1 – 3) % at. – Y (2 – 5) % at. – Z (< 1) % at, onde X, Y e Z são elementos de liga.

- ✓ **X:** Crômio; Manganês ou Vanádio – aumento da ductilidade;
- ✓ **Y:** Nióbio, Tântalo, Tungstênio ou Molibdênio – melhora a resistência à oxidação, fluência e resistência a altas temperaturas.
- ✓ **Z:** Silício, Boro ou Carbono – aumento da dureza, resistência à fluência e oxidação.

Na Figura 3 pode-se verificar a evolução da ductilidade consoante os elementos de liga e percentagem de alumínio presente na liga.

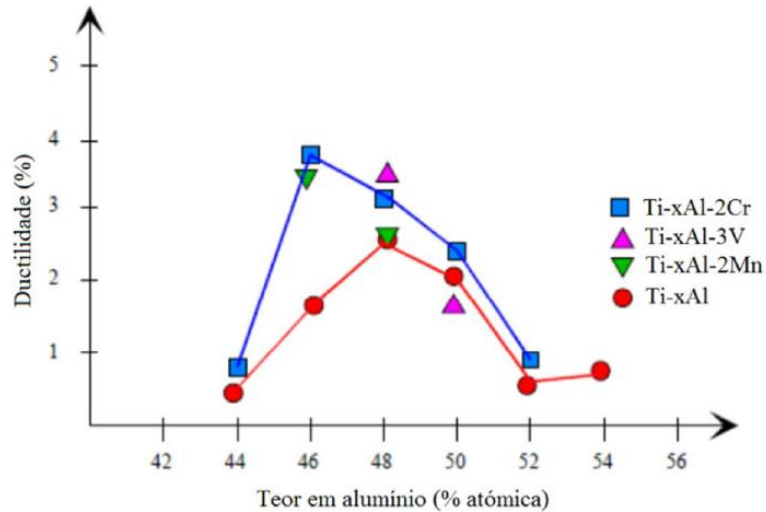


Figura 3 – Evolução da ductilidade à temperatura ambiente em função do teor em alumínio [11]

Apesar da ductilidade das ligas de fase α_2 ser fraca, é possível melhorá-la com adição de grandes teores de Nb ($> 10\%$) [8]. As ligas mais utilizadas são a Ti-24Al-11Nb e Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo. No entanto, não têm sido alvo de interesse uma vez que apresentam densidades próximas das superligas de níquel.

Até hoje não se obteve ainda uma liga TiAl que seja viável para todas as aplicações, sendo necessário realizar uma escolha de elementos de liga em função do que será exigido do componente [12].

2.1.3 - Resumo das propriedades das ligas de TiAl

A investigação na área da formulação de ligas TiAl tem sido muito extensa nos últimos anos, tendo-se criado inúmeras ligas distintas. Porém, destacam-se quatro ligas bifásicas com excelentes propriedades mecânicas a altas temperaturas, presentes na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais ligas TiAl [10]

Fabricante	Nome da liga	Composição química	Vantagens da liga
General Electric (EUA)	48-2-2	Ti-48Al-2Cr-2Nb	Ductilidade, resistência à fratura e oxidação
Plansee (Áustria)	γ -MET	Ti-45Al- (5-10) Nb	Resistência mecânica a altas temperaturas e resistência à oxidação, fadiga e fluência
GKSS (Alemanha)	TNB	Ti – (45 – 47) Al – 10Nb	Resistência mecânica a altas temperaturas e resistência à oxidação e fluência
MartaMarietta Laboratories (EUA)	XDTM TiAl	Ti – 45Al – 2Mn – 2Nb – 0.8B	Resistência mecânica a altas temperaturas, ductilidade, rigidez e resistência à fluência e oxidação

A Tabela 3 apresenta algumas propriedades dos aluminetos de titânio, das ligas de titânio convencionais e das superligas de níquel.

Tabela 3 - Algumas propriedades do titânio, superligas de níquel e aluminetos de titânio [13]

Propriedades	Ti6Al4V	Superligas de Níquel	Ligas TiAl
Densidade (g/cm³)	4,5	8,3	3,7-3,9
Temperatura de fusão (°C)	1600-1660	1400	1460
Modulo de Young à T_{amb}(GPa)	96-117	206	160-176
Tensão de cedência à T_{amb} (MPa)	950	800-1200	400-650
Ductilidade à T_{amb} (%)	14	3-50	1-5
Ductilidade a altas temperaturas (%)	10-50	8-125	10-60
Resistência à oxidação (°C)	536-600	1090-1095	900-1038
Dureza (HV)	250-350	200-600	180-280

2.1.4 - Aplicações

Estas ligas, pelas suas propriedades, têm fascinado tanto a indústria automóvel como a aeroespacial. Na indústria automóvel, têm sido aplicadas em turbinas dos turbocompressores e em válvulas de escape, com o objetivo de aumentar potência dos motores e reduzir o consumo de combustível. Nas válvulas de movimento alternativo a alta velocidade, a poupança de peso é muito importante. Como as temperaturas de serviço se situam na ordem dos 1043°C, o aço convencional pode ser substituído por uma liga de titânio Ti-6Al-4V. Contudo, as propriedades das ligas Ti-Al sobrepõem-se a estas, sendo essenciais para garantir resistência a altas temperaturas e redução de peso [14].

O avanço na tecnologia de motores na indústria aeroespacial e aeronaves tem sido sustentado com o uso de ligas baseadas em Ti_3Al (α_2) e γ -TiAl. A eficácia das turbinas depende da relação pressão/peso. O impulso é obtido a partir da compressão do gás gerada pela rotação dos componentes o que induz sobreaquecimento nestas estruturas. Uma melhor eficiência é possível através da redução do peso dos componentes. Em componentes rotativos, como lâminas, anéis e discos, uma grande parte da carga mecânica é gerada por centrifugação de cargas. A solicitação mecânica envolvida nessas partes está diretamente relacionada com o seu peso e velocidade de rotação. Além desta é também verificada uma solicitação térmica provocada pelas diferenças de temperatura dentro da estrutura, uma vez que alguns componentes são submetidos a temperaturas de 1100°C e outros de 1500°C. Apesar de tudo ainda se verificam algumas dificuldades de trabalho com este tipo de ligas e na produção de partes para determinadas peças [4], [15].

Um turbocompressor é um equipamento adicionado aos motores de combustão interna que aproveita a energia dos gases de escape. Inclui um par de rotores radiais ligados num só eixo, que de um lado funciona como turbina e no outro como compressor. Os gases de escape gerados no motor fazem girar a turbina que está conectada por meio de um eixo comum a um rotor, o qual tem a função de capturar, comprimir e enviar o ar atmosférico para a admissão. A Figura 4 apresenta um esquema do funcionamento de um turbocompressor.

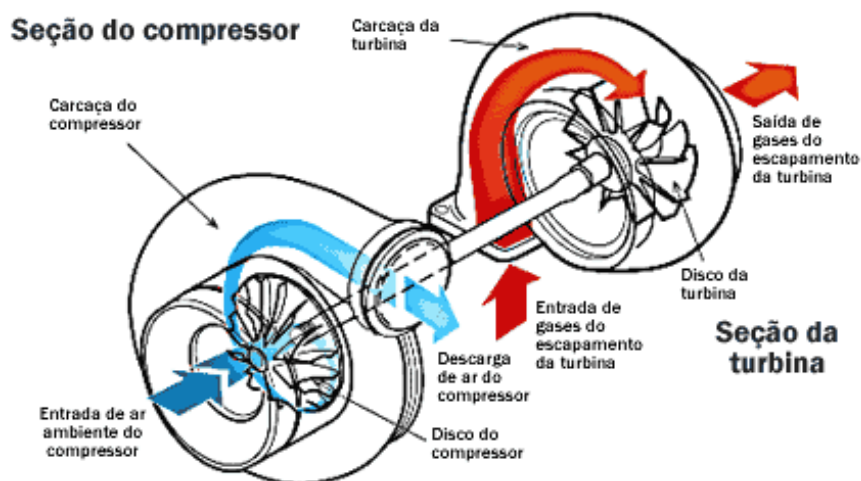


Figura 4 - Funcionamento de um Turbocompressor [16]

Os turbocompressores convencionais apresentam um problema a baixas rotações – o turbo lag. É definido como turbo lag o tempo necessário para transformar uma alteração de posição do acelerador em potência [17].

Com a utilização de aluminetos de titânio nas turbinas, o peso foi reduzido para metade. Verifica-se assim uma menor inércia de rotação das mesmas, tendo como consequência um aumento da rapidez com que estas chegam à velocidade de rotação desejada, de modo a debitar a potência solicitada. Só assim é possível melhorar a resposta à solicitação de potência por parte do turbocompressor.

Estas ligas também apresentam vantagens no que diz respeito à capacidade de resistirem a altas temperaturas. A turbina de escape está constantemente sujeita a temperaturas na ordem dos 850°C, sendo por isso um pré-requisito essencial aquando da escolha do material para a conceção da mesma [16].

Materiais cerâmicos têm vindo a ser testados para esta aplicação, uma vez que também apresentam baixo peso e boa resistência a altas temperaturas. Contudo, a sua utilização é

limitada devido aos elevados custos, baixas propriedades mecânicas e ao facto de a forma final da turbina ainda não ser suficientemente otimizada para introdução no mercado automóvel [18].

No campo aeroespacial estas ligas intermetálicas têm vindo a ser consideradas como potenciais substitutas das ligas de Ni. Um enorme esforço tem vindo a ser feito durante os últimos trinta anos no desenvolvimento de ligas em NiAl e TiAl para este tipo de indústria. Contudo, mesmo já havendo resultados experimentais bem-sucedidos ainda se verificam poucas aplicações deste tipo de materiais. A Figura 5 apresenta uma das suas aplicações, um motor Genx 1-B produzido pela General Electric, onde as pás da turbina nos andares de baixa pressão são fabricadas em ligas TiAl [2].

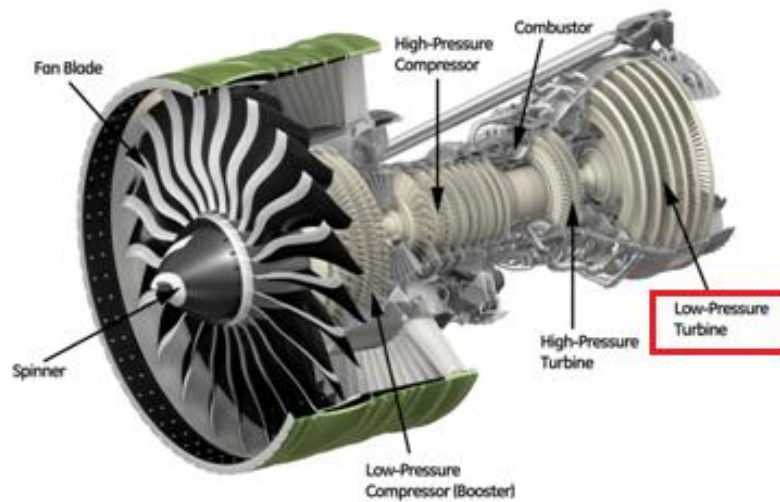


Figura 5 - Motor Genx – 1B [4]

2.2 - Fundição de Precisão

2.2.1 - Breve introdução à fundição por “cera perdida”

A fundição de precisão, também conhecida como fundição por cera perdida ou, em inglês, como *investment casting*, é um processo de fabrico que permite a obtenção de peças complexas e de difícil maquinagem. Este processo de fundição proporciona elevados padrões de precisão dimensional, excelente acabamento final, elevada flexibilidade no desenho da peça e é aplicável a ligas de qualquer composição.

Este processo foi utilizado para a fabricação de armas, jóias e peças fundidas de arte durante muitos anos por antigas civilizações. Hoje, as suas aplicações incluem jóias, peças de arte, pás de turbinas e muitos mais componentes, industriais ou científicos [19]. A Figura 6 apresenta exemplos de diferentes aplicações.



Figura 6 - Exemplos de peças obtidas pelo processo de fundição de precisão [19]

Ao longo dos anos foram feitas várias investigações sobre as diferentes fases do processo, sobre propriedades padrão da cera, os efeitos da mistura, aditivos e cargas. Diferentes maneiras através das quais estas propriedades (como o acabamento da superfície, precisão dimensional, etc.) podem ser reforçadas e formas de controlar corretamente os parâmetros do processo de injeção foram também exaustivamente estudadas. Realizaram-se estudos para aumentar a resistência da carapaça cerâmica e o acabamento de superfície da peça, para ligas ferrosas e não ferrosas, bem como para superligas de fundição de precisão. As investigações feitas sobre a incorporação de fibras de nylon e as adições de polímero, confirmaram que a carapaça cerâmica reforçada com fibras de nylon apresenta uma melhor permeabilidade, quando comparada a uma somente com adições de polímero [19]. Diferentes estudos

efetuados na descerificação em autoclave e em fornos micro-ondas concluíram que as propriedades da cera são menos alteradas nestes últimos [19].

2.2.2 - Descrição do processo de fabrico

O processo de fundição de precisão pode ser realizado segundo o método direto ou indireto. O método direto consiste na utilização direta do modelo sem recurso a uma moldação prévia. Este modelo pode ser em cera, madeira ou qualquer material que tenha baixo ponto de fusão e fácil remoção. O método indireto apresenta as seguintes fases, apresentadas na Figura 7 [2], [20]:

1. Criação de um modelo para a obtenção do molde mestre principal. Este modelo pode ser metálico ou mesmo em madeira. Pode também ser de silicone, se este for para pré-séries ou séries muito pequenas, ou por fabrico aditivo. No fabrico do modelo já está assegurada a contração da cera e do metal;
2. Obtenção do molde para injeção da cera com a forma final da peça juntamente com a zona de ataque, com a devida compensação da contração tanto da cera como a do metal. O molde é normalmente em alumínio porque é leve, fácil de maquinar, fácil de manusear, e bom condutor térmico (dispensa canais de arrefecimento). Os pratos das máquinas são também em alumínio e refrigerados para aumentar o fluxo de calor no molde. Aços ferramenta podem ser utilizados para séries de produção muito elevadas. O silicone pode também ser utilizado para a produção de protótipos ou pré-séries;
3. A cera é injetada nos moldes sendo assim obtidos os modelos da peça, sistemas de gitagem e alimentação. A injeção é feita a altas pressões, permitindo que a cera possa ser injetada a temperaturas inferiores às temperaturas de fusão. O molde deve estar suficientemente quente para que se obtenha uma boa qualidade superficial do modelo. Um aumento do tempo de injeção reduz a probabilidade da existência de bolhas de ar no modelo e diminui a contração da cera.
4. De seguida, os modelos são soldados ao canal de descida – forma-se o que chama de “cacho”;
5. Cobre-se o cacho com um revestimento constituído por várias camadas de barbotina e pós refratários, obtendo-se assim uma carapaça que envolve todo o cacho. O processo consiste na imersão do cacho num banho de barbotina e na posterior pulverização com partículas

cerâmicas. Este processo repete-se até se obter uma espessura que seja capaz de suportar as pressões de expansão da cera e mais tarde, as pressões metaloestáticas do vazamento;

6. A carapaça é aquecida a temperaturas que causam liquidação da cera, permitindo que esta saia da carapaça, deixando uma espécie de “negativo” no interior da carapaça;

7. A carapaça é sinterizada para que esta apresente melhores propriedades para o vazamento do metal, servindo este processo também para queimar cera residual presente no interior da carapaça;

8. A carapaça é pré-aquecida a uma temperatura suficientemente alta para prevenir o choque térmico da interface carapaça/metal fundido;

9. O metal é vazado na carapaça de maneira a preencher todo o seu interior;

10. Depois da solidificação do metal é feita a destruição da carapaça. É normalmente feita através de um martelo vibratório (*Knock Out*). Em peças de forma mais complexa é difícil retirar completamente a carapaça, como tal procede-se também a uma operação de granalhagem;

11. Corte dos gitos e sistema de alimentação;

12. Se necessário as peças são submetidas a operações de maquinagem, podendo ser maquinagem convencional ou química [2].

De referir que os pontos 11 e 12 correspondem a cerca de 30% dos custos finais de fabrico.

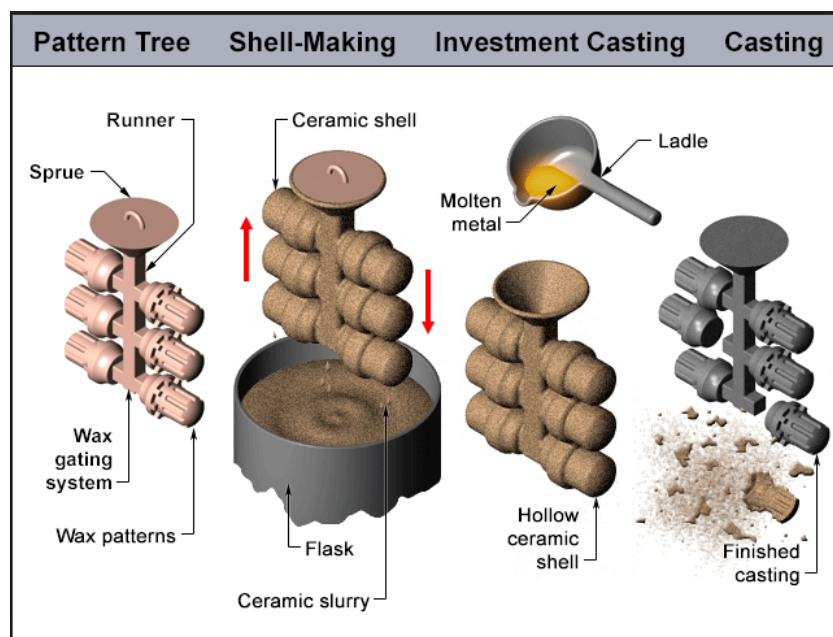


Figura 7 - Diagrama do processo de fundição por cera perdida [21]

2.2.3 - Resumo do Processo

Materiais

- ✓ Todos os metais, incluindo ligas reativas e refratárias.

Modelos

- ✓ Misturas de resina, materiais de enchimento e cera;
- ✓ Resina termoplástica;
- ✓ Núcleos cerâmicos e ceras solúveis em água podem ser utilizados.

Considerações Gerais/ Económicas

- ✓ Prazos de entrega de várias semanas, podendo ser mais curtos;
- ✓ Processo muito “lento” devido a muitos passos na produção e tempo de cura na ordem das 48 horas;
- ✓ Modelos de cera ou de plástico podem ser moldados por injeção, para altos volumes de produção;
- ✓ Mais adequado para os metais com altas temperaturas de fusão e/ou que são difíceis de maquinar ou caros;
- ✓ Possibilidade de existência de alguma automação;
- ✓ Custo dos modelos pode ser elevado para pequenas quantidades;
- ✓ A “árvore” de modelos de cera permite que muitas peças sejam manuseadas/fabricadas juntas;
- ✓ Custos dos equipamentos baixos a moderados (altos quando se efetua o processamento de materiais reativos);
- ✓ Custos de acabamento baixos. Alimentadores e canais de ataque são removidos por maquinagem;
- ✓ Peças finais são geralmente limpas por granalhagem.

Aplicações

- ✓ Pás de turbinas;
- ✓ Componentes de máquinas-ferramenta;
- ✓ Componentes aeroespaciais;
- ✓ Carcaças de válvulas e bombas;
- ✓ Componentes de motores dos automóveis;
- ✓ Trabalho decorativo (Ex: estatuetas);
- ✓ Partes de instrumentos óticos;
- ✓ Joalheria;
- ✓ Alavancas [22].

Este processo também é muitas vezes usado como auxílio no desenvolvimento de peças que normalmente podem ser realizadas noutro tipo de fundição, mas devido ao alto custo dos moldes, é realizado pelo processo de fundição de precisão, isto se as séries a produzir forem reduzidas [2].

Aspetos de *design*

- ✓ É possível realizar peças complexas com configurações internas invulgares;
- ✓ O modelo de cera deve ser facilmente removível do seu molde;
- ✓ Formas complexas podem ser montadas a partir de várias formas mais simples;
- ✓ São preferidas seções uniformes;
- ✓ Evitar cantos afiados;
- ✓ “*Fillets*” devem ser o mais simples quanto possível;
- ✓ Possibilidade de detalhes finos, seja em relevo ou baixo-relevo;
- ✓ Comprimento em relação ao diâmetro para furos cegos é tipicamente 4:1;
- ✓ Diâmetro mínimo buraco igual a 0,5 mm;
- ✓ Tolerâncias de maquinagem normalmente entre 0,25 e 0,75 mm, de acordo com o tamanho;

- ✓ Ângulos de inclinação são normalmente zero, mas são desejáveis 0,5-1 graus em superfícies longas, ou se a cavidade do molde é profunda;
- ✓ Seção mínima varia de 1 mm para ligas de alumínio e aço, 2 mm para ligas de cobre mas pode ser tão baixa como 0,6 milímetros para algumas aplicações;
- ✓ Seção igual a 75 mm, no máximo;
- ✓ Dimensão máxima igual a 1 m;
- ✓ Pesos variam de 0,5 g a 100 kg de peso [20], [23].

Qualidade Obtida

- ✓ Peças de alta resistência mecânica podem ser produzidas;
- ✓ Crescimento de grão mais pronunciado nas secções mais massivas, o que pode limitar a dureza e o tempo de vida útil da peça;
- ✓ Muito boa/excelente qualidade da superfície obtida;
- ✓ A rugosidade superficial está no intervalo 0,4-6,3 μm ;
- ✓ Tolerâncias de planeza $\pm 0,13$ mm por 25 mm, dependendo da área de superfície;
- ✓ Tolerância mínima angular igual a $\pm 0,5^\circ$ [20], [23].

A Figura 8 ilustra o gráfico de capacidade do processo que mostra as tolerâncias dimensionais realizáveis é abaixo apresentado:

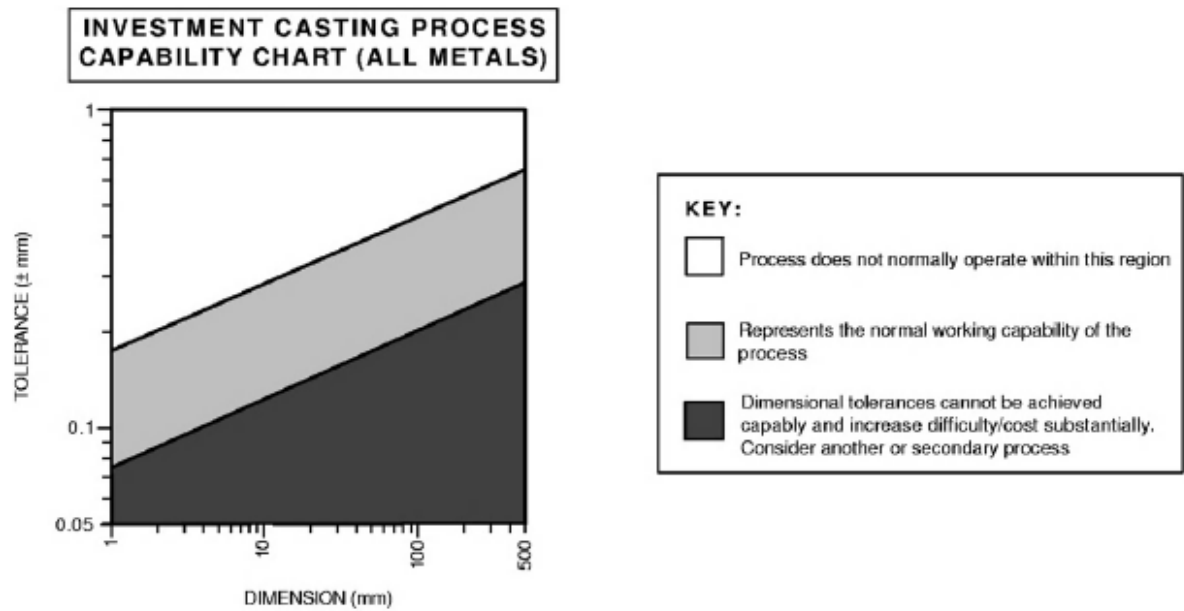


Figura 8 - Tolerâncias dimensionais [22]

2.2.4 - Vantagens e desvantagens do processo

As principais vantagens são [2]:

- ✓ Larga gama de ligas metálicas passíveis de se utilizar no vazamento;
- ✓ Complexidade elevada da peça, sendo o único fator limitativo do processo a produção do macho cerâmico. Assim, evita-se a produção de peças em partes separadas, fazendo-se a produção integral da peça a um custo mais baixo, com precisões dimensionais mais elevadas e com uma funcionalidade melhorada;
- ✓ Capacidade de obter formas *near net-shape* ou *net-shape*, o que permite a eliminação e/ou diminuição de operações de acabamento;
- ✓ Possibilidade de recurso ao fabrico aditivo de ceras permitindo uma avaliação rápida dos modelos produzidos em pré-série;
- ✓ Excelentes propriedades mecânicas das peças obtidas.

As principais desvantagens são [2]:

- ✓ Processo que demora vários dias desde a criação do modelo até à obtenção da peça final;
- ✓ Impossibilidade de reutilizar as carapaças num segundo vazamento;
- ✓ Processo dispendioso devido à mão-de-obra necessária na criação dos modelos e carapaças;
- ✓ O tamanho das peças é limitado;
- ✓ Custo das matérias-primas.

2.3 - Modelos

A cera é o material-base mais preferido para o fabrico de modelos no processo de fundição de precisão, no entanto, existem misturas que contêm parafina de modo a elevar o ponto de amolecimento da cera. Contudo esta tem vindo a tornar-se um material escasso e com elevada flutuação de preços [19], [23].

As ceras apresentam um preço/qualidade razoável, fornecendo um equilíbrio difícil de obter noutros materiais. São facilmente misturadas para atender às diferentes necessidades e são compatíveis com outros materiais capazes de melhorar ainda mais as suas propriedades. As baixas viscosidades e baixos pontos de fusão, permitem que sejam fáceis de moldar, injetar, de trabalhar durante a execução dos cachos e de derreter para fora da carapaça cerâmica sem a danificar. Estas propriedades permitem que as ceras sejam injetadas a baixas pressões e temperaturas e, em paralelo com a falta de abrasividade, estejam associados menores custos de ferramentas [24].

Depois das ceras, fazendo uma rápida análise aos plásticos, importa referir que as principais vantagens de utilização de poliésteres e outros plásticos prendem-se pela sua capacidade de serem moldados em taxas de produção elevadas em equipamentos automáticos e pela sua boa resistência a danos causados por manuseamento dos modelos. São materiais muito económicos e estáveis, sendo por isso, os modelos armazenados sem deterioração. A maioria dos modelos em cera deterioram-se com a idade e geralmente deixam de poder ser utilizados. Uma desvantagem que limita o uso do poliestireno é que as ferramentas e equipamentos de injeção são mais caros do que para a cera. Outros plásticos como polietileno, nylon, acetato de celulose apresentam características idênticas. Talvez a aplicação mais importante para poliestireno seja para pequenas pás de turbinas. Estas são extremamente finas e delicadas, e seriam demasiado frágeis se moldadas em cera [23].

2.3.1 - Características do modelo em cera e sua composição

O modelo em cera tem exatamente a mesma geometria da peça final. Apresenta no entanto diferentes tolerâncias dimensionais, de forma a compensar a contração volumétrica da cera dentro do molde bem como a do metal durante a sua solidificação dentro da carapaça cerâmica. Cera, plástico, poliestireno e mercúrio congelado são tipos de materiais utilizados. A cera é o material mais utilizado seguindo-se, o plástico [23].

A Figura 9 ilustra o modelo, que deve apresentar como características:

- ✓ Um baixo coeficiente de expansão térmica com o objetivo de se obter uma elevada precisão dimensional;
- ✓ O ponto fusão não deve ser muito mais elevado do que a temperatura ambiente para se evitar defeitos nas secções espessas e à superfície;
- ✓ Deve ser resistente à rutura e duro o suficiente à temperatura ambiente para que possa ser manuseado sem danos;
- ✓ Deve apresentar uma superfície suave para que se obtenha uma superfície lisa na peça final;
- ✓ Deve ter baixa viscosidade quando derretido para as secções mais finas;
- ✓ Permitir uma fácil remoção do molde;

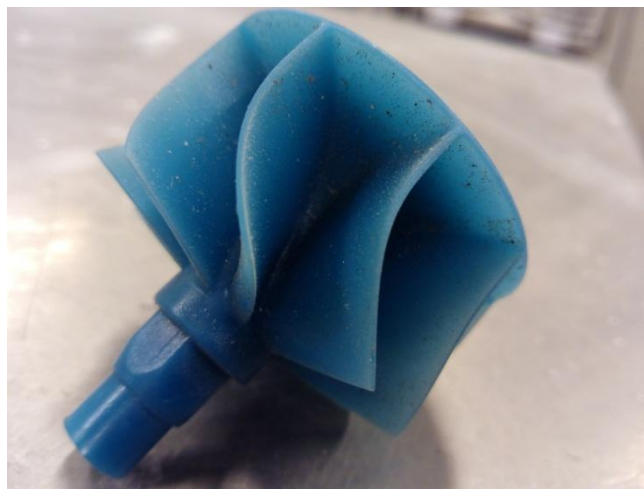


Figura 9 - Exemplo do modelo em cera

A composição típica de um modelo em cera sem material de enchimento, é apresentada na Tabela 4:

Tabela 4 - Percentagens de composição do modelo [23], [25]

Ingredientes	Composição (%)
Cera (mais do que um tipo)	30-70
Resinas (um ou dois tipos)	20-60
Plástico (um tipo)	0-20
Outros	0-5

Misturas que contêm material de enchimento possuem o mesmo tipo de materiais de base, apresentando 15 a 45% do mesmo.

Na formulação dos modelos em cera, existem uma série de áreas de processamento e outras preocupações que devem ser abordadas. Assim:

- ✓ **Injeção** - Ponto de amolecimento, propriedades reológicas, tempo de processamento;
- ✓ **Remoção, manuseamento e montagem** - lubrificação, força, dureza, resistência ao impacto, estabilidade e soldabilidade;
- ✓ **Controlo dimensional** - expansão térmica, contrações durante a solidificação, cavitação, distorção;
- ✓ **Fabrico dos moldes** - força, resistência aos solventes e aglutinantes, impermeável;
- ✓ **Desmoldação** - ponto de amolecimento, viscosidade, expansão térmica, difusibilidade térmica;
- ✓ **Outros** - custos, viabilidade, fácil de reciclar, toxicidade, e fatores ambientais.

2.3.2 - Efeito dos parâmetros de injeção

Em 2002 Shen et al fez algumas investigações sobre a influência de vários parâmetros tais como o material do molde, o tipo de cera e os parâmetros do processo de injeção. Além disso a qualidade final foi essencialmente atribuída a parâmetros de injeção, temperatura da cera, velocidade de injeção, tempo de injeção, pressão de injeção e temperatura do molde. É de destacar que todos estes parâmetros controlam a qualidade dos modelos obtidos, no entanto é muito difícil controlá-los simultaneamente. Por esta razão, mais tarde, Singh et al. (2006) fazendo uma análise mais cuidada parâmetro a parâmetro, descobriu que a percentagem de desvio-padrão da dimensão do modelo, aumentava à medida que se aumentava a temperatura de injeção [19].

Uma alta temperatura de injeção resultou num aumento dos gradientes de temperatura, na evaporação do conteúdo volátil, em alguma perda de material a partir da mistura de cera e, como consequência, provocou um aumento da contração da cera. Pelo contrário, um aumento do tempo de injeção e retenção provocou uma diminuição da contração da cera. A percentagem de desvio padrão da dimensão do modelo, diminuiu com o aumento da temperatura do molde e com a diminuição da temperatura de injeção. O aumento da temperatura do molde, provocou uma diminuição da rugosidade da superfície do modelo [19].

Na superfície do modelo formaram-se minúsculos espaços de ar oriundos do molde de alumínio, devido a um tempo curto de injeção. Contrariamente, num longo tempo de injeção, não foram identificados espaços de ar, uma vez que estava envolvido mais tempo de fluxo do material para remover o ar retido. Isto resultou numa melhoria da qualidade do modelo obtido, no entanto uma velocidade de arrefecimento maior e consequentemente um tempo de retenção menor induziram a um aumento da contração dos modelos.

Estas investigações vieram enriquecer o conhecimento acerca do ajuste e importância dos parâmetros de injeção, trazendo conclusões importantes capazes de aperfeiçoar a qualidade das peças obtidas [19].

2.3.3 - Processo de fabrico

Os modelos em cera são geralmente injetados a temperaturas e pressões relativamente baixas em duas meias moldações especialmente desenhadas para o efeito.

A cera pode ser injetada líquida, pastosa ou sólida. As temperaturas de injeção encontram-se entre os 43°C e os 77°C e as pressões na ordem dos 0,275MPa a 10.3 MPa. De acordo com esta gama de valores, em condições de injeção da cera no estado líquido, verificam-se elevadas temperaturas e baixas pressões, ao contrário de injeção no estado sólido, onde se verificam baixas temperaturas e elevadas pressões. A cera pode ser injetada em todas as condições acima descritas, no entanto é sempre benéfico adaptar para cada tipo de cera, uma determinada condição de injeção [23]. É apresentado na Figura 10 um esquema do processo de fabrico do modelo em cera.

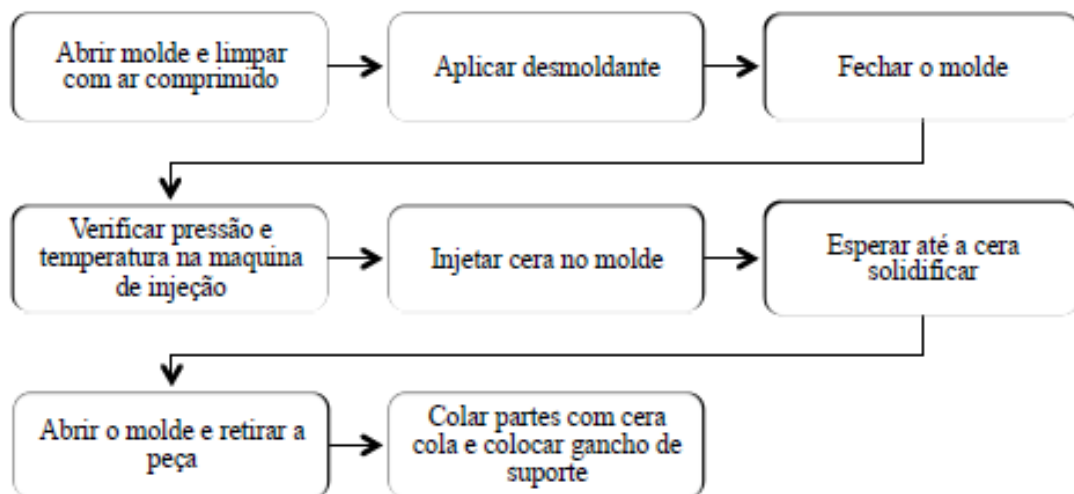


Figura 10 - Esquema do processo de fabrico do modelo em cera [2]

O processo tradicional de fundição de precisão sofre de elevados custos de ferramentas associados ao processo de fabrico dos modelos em cera. É um processo caro para um baixo volume de produção. O tempo de produção das peças pode variar de semanas a meses, obrigando os fabricantes a avaliar antes da sua produção, diferentes projetos de moldes e detetar erros no projeto que geralmente demoram tempo para alterar [2], [19]. Assim, o fabrico aditivo, mesmo sendo também um processo caro para um baixo volume de produção, é a alternativa ideal para fases iniciais de projeto (protótipo) e/ou também na fase de mudança do *design* da peça [2], [26].

Uma alternativa viável e mais económica à utilização dos processos de fabrico aditivo é a utilização de uma variante do processo de Estereolitografia denominado de *Quick Cast*. O modelo fabricado é preciso, consistente, resistente e 10% a 35% mais leve do que os construídos com outros polímeros e com outros processos, pois é parcialmente oco. A maior vantagem na utilização destes modelos ocos é a de servirem como modelos no processo de fundição por cera perdida, permitindo assim uma mais fácil eliminação do modelo dentro da carapaça, devido à menor quantidade de material [2], [27].

O modelo é fabricado de forma mais rápida comparativamente ao modelo tradicional, e a quantidade de resina consumida é substancialmente menor. Na Figura 11 podemos ver dois exemplos de peças fabricadas pelo presente método [27].



Figura 11 - Exemplo de duas peças fabricadas pelo método *Quick Cast* [27]

Equipamentos

Os equipamentos utilizados no processo de injeção da cera variam de simples e baratos a sofisticados e bastante caros. Pode ser um equipamento simples, como o utilizado no INEGI, caracterizado por uma unidade pneumática com um reservatório fechado aquecido, equipado com um termostato, um regulador de pressão, bico de injeção e conectado a uma rede de ar comprimido. A Figura 12 faz referência ao equipamento de injeção de cera e dois dos vários moldes do INEGI.

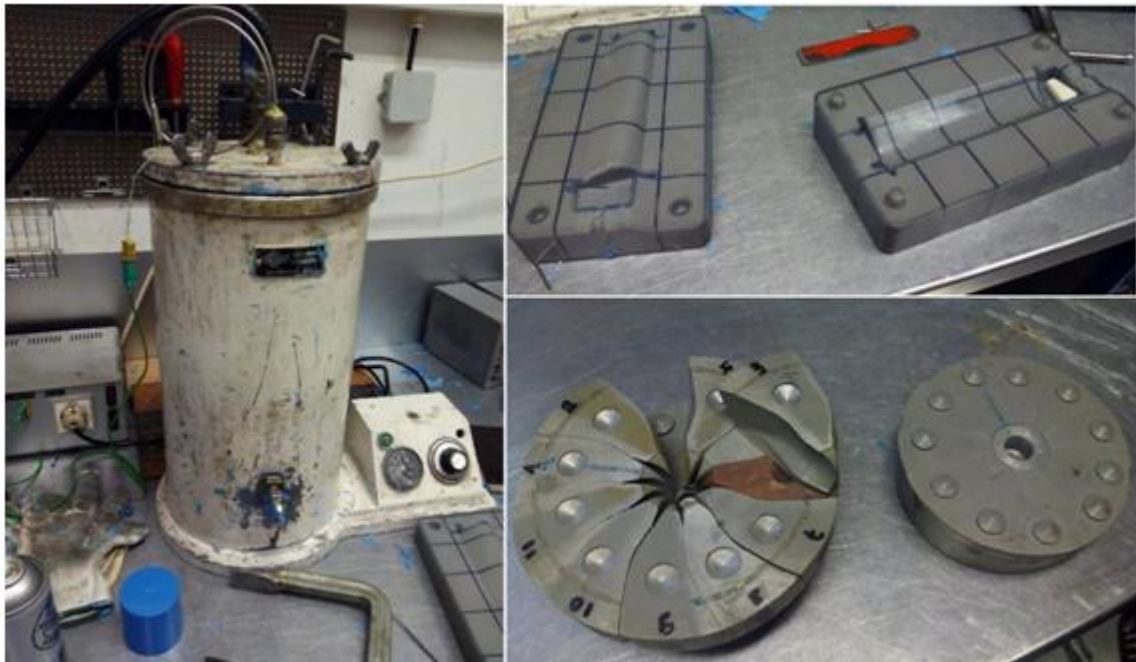


Figura 12 - Equipamento de injeção de cera/moldes do INEGI

Alguns equipamentos estão limitados a uma pressão do ar na ordem dos 6 bar e são geralmente usados para injetar cera líquida. Peças que são mais exigentes em termos de tamanho, são feitas em máquinas hidráulicas, podendo estas fornecer pressões mais elevadas de forma a melhorar as injeções. Estão assim associadas pressões superiores de aperto do molde e moldes maiores. Também podem ser operadas, se necessário, a baixas pressões, para injeção de pequenas peças [23].

Estas máquinas hidráulicas de injeção são dimensionadas de acordo com a sua capacidade de fecho, com modelos que variam entre as 10 a 400 toneladas força de fecho com pressões de injeção até 50 bar. As máquinas para operação manual ou semiautomática têm geralmente placas horizontais (uma estacionária e outra móvel), que apertam o molde fechado. A injeção é sobre o plano de separação ou, em alguns casos, é efetuada verticalmente.

As máquinas de injeção automática têm as placas montadas verticalmente com injeção através da placa fixa e a meio do molde, ou através do plano de apartação. Um reservatório é geralmente usado para armazenamento da cera, com uma ligeira rotação constante de modo a manter a cera uniforme e o material sólido em suspensão. Este tipo de reservatórios pode ser também substituído por ligação direta das máquinas a tanques centrais de fornecimento da cera [23].

Os parâmetros habitualmente controlados incluem:

- ✓ Temperatura da cera e do bico de injeção;
- ✓ Pressão;
- ✓ Caudal;
- ✓ Ajuste de posição e purga do bico antes de cada injeção;
- ✓ Tempo de secagem da cera.

Relativamente à injeção de plástico (poliestireno) é de referir que estes são geralmente injetados a temperaturas entre os 177°C e os 260°C e pressões de 27 a 138 MPa em máquinas de injeção apropriadas. São máquinas hidráulicas com placas verticais refrigeradas a água que carregam as duas metades do molde e a injeção ocorre de forma horizontal através da placa fixa. Grânulos de poliestireno são deitados dentro de uma tremonha, a partir da qual são enviados para uma câmara plastificante.

As máquinas mais modernas já apresentam um parafuso rotativo que dentro de um cano aquecido prepara a cera para a consistência pretendida antes de a injetar no molde. Tal como na injeção de cera, os mesmos parâmetros são controlados. O desenvolvimento de diferentes composições de cera que se comportam bem em máquinas de injeção de plástico permitiu aliar as vantagens de utilização dos modelos em cera com as vantagens de injeção de plástico em determinadas aplicações [23].

2.3.4 - Processo de construção dos cachos e sistemas de gitagem

No processo de fundição de precisão, grandes modelos são processados individualmente. Nos de pequena e média dimensão, surgiu a necessidade de os juntar em cachos de multi-peças, de forma a rentabilizar e economizar o processo. O cacho não é mais do que uma ligação de vários modelos a uma estrutura que constitui o sistema de gitagem.

A título de exemplo, os cachos de turbinas de escape para a indústria automóvel, podem ser constituídos desde seis a trinta peças. Já para pequenas peças, por exemplo as de *hardware*, o número pode chegar às dezenas ou mesmo às centenas. É apresentado na Figura 13 um exemplo de cacho utilizado no INEGI.



Figura 13 - Cacho de turbinas utilizado no INEGI

A maioria dos modelos são injetados já com os respetivos canais de enchimento. Contudo, peças maiores ou mais complexas, podem ser injetadas por partes e depois montadas de forma a obter a forma final.

A capacidade das máquinas de injeção e os custos de ferramentas associados, são importantes fatores a ter em conta. Os componentes do sistema de alimentação, são produzidos separadamente, sendo posteriormente agrupados para a conceção do cacho completo.

Os modelos em cera são facilmente agrupados por solda de cera com auxílio de um ferro de soldar. Na interface dos dois componentes, esta é rapidamente fundida para posterior junção dos componentes. Ao processo acima descrito pode ser também adicionada cera cola. O processo de solda manual dos componentes requer um grau razoável de habilidade e considerável atenção aos detalhes. É necessário garantir um alinhamento preciso na montagem dos modelos, com juntas resistentes e completamente seladas. Dever-se-á evitar a contaminação dos modelos com gotículas de cera fundida [23].

O sistema genérico de gitagem, *em investment casting*, utiliza geralmente vazamento por gravidade. No entanto, existem dois métodos distintos para realizar o enchimento da moldação por gravidade: pelo topo ou pela base. A Universidade de Birmingham concluiu que os sistemas de gitagem e alimentação, têm grande influência na criação de defeitos em peças obtidas por *investment casting*. O primeiro método é largamente usado na indústria pela facilidade de construção e obtenção de um modelo robusto, capaz de suportar os esforços inerentes ao fabrico da carapaça cerâmica. Porém, apresenta grandes desvantagens devido às altas velocidades de vazamento atingidas, gerando elevadas turbulências, isto porque a velocidade de enchimento é função da gravidade, neste caso, da altura de enchimento [2], [12]

Também existe propensão para a formação de filmes de óxidos e inclusões não metálicas devido à degradação da carapaça, em parte provocada pela excessiva velocidade causada pela tipologia da carapaça e do vazamento. Estes fatores podem levar a que o processo se torne pouco repetível, pois valores na ordem dos 30% a 40% de peças defeituosas, são frequentes.

Os defeitos típicos do enchimento pelo topo são:

- ✓ Inclusões;
- ✓ Porosidades;
- ✓ Fraturas a quente;
- ✓ Peças mal cheias.

Quando as moldações são cheias pela base, a turbulência gerada é praticamente eliminada, conseguindo-se atingir velocidades inferiores às velocidades críticas das ligas metálicas a vaziar. Nestes tipos de enchimento é necessário um canal de distribuição que encaminha o metal líquido para a base da moldação. Todas as ligas metálicas possuem uma velocidade crítica acima da qual se irá gerar turbulência e provável formação de óxidos[2], [12].

Design do cacho

O projeto de um cacho é um trabalho crítico pois afeta quase todos os aspectos do processo de fabrico. Os fatores a serem considerados incluem [23]:

- ✓ Facilidade de montagem;
- ✓ Número de peças processadas;
- ✓ Resistência ao seu manuseamento;
- ✓ Remoção da cera;
- ✓ Fluxo de metal;
- ✓ Canais de alimentação;
- ✓ Remoção da carapaça;
- ✓ Fácil corte e acabamento.

2.4 - Carapaças cerâmicas

As moldações usadas no processo de fundição de precisão, tanto podem ser produzidas sob a forma de moldação em bloco cerâmico, como sob a forma de moldação em carapaça cerâmica. O processo foi inicialmente desenvolvido recorrendo à moldação em bloco, mas foi largamente ultrapassado pelo processo de construção em carapaça cerâmica [25].

No caso de ligas com baixos pontos de fusão, pode-se usar areias de grão muito fino (vulgarmente designadas “farinhas”) de quartzo, muito duras, aglomeradas com gesso. Para metais ou ligas com temperaturas de fusão mais elevadas, costuma usar-se uma mistura de “farinha” de quartzo ou de zircónia, com alumina e aglomerada normalmente com o silicato de Etilo [25].

2.4.1 - Processo de fabrico das carapaças

1. O cacho de cera é limpo de maneira a que o desmoldante usado na injeção da cera seja removido. A limpeza do cacho é realizada através de uma lavagem do mesmo num agente molhante (Trisol), para que a barbotina consiga aderir ao cacho e permanecer no mesmo.
2. O cacho de cera é mergulhado em barbotina, a qual se encontra normalmente dentro duma tina rotativa.
3. O cacho é retirado da tina e manipulado de forma a remover o excesso de barbotina, deixando-a escorrer, produzindo assim uma superfície uniforme que cubra por completo todos os detalhes das peças.
4. De seguida o cacho é revestido com pós cerâmicos. Esta etapa pode ser auxiliada por um mecanismo de chuveiro para as areias cerâmicas.
5. É necessário esperar cerca de 3 horas para que o revestimento cerâmico possa secar e endurecer.
6. A operação de mergulho, pulverização e secagem é repetida até se atingir a espessura pretendida para a carapaça [2].

Na Figura 14 pode ver-se partes do processo acima descrito:



Figura 14 - Alguns dos procedimentos efetuados.

As carapaças cerâmicas são produzidas por uma série de sucessivas imersões num banho fluidizado de pasta cerâmica, com fases de secagem intermédias. Cada revestimento é constituído por uma camada fina de barbotina cerâmica, com posterior projeção de partículas de pó refratário (“*stucco*”) na sua superfície exterior, para formação de uma camada de espessura suficiente que garanta a resistência necessária para o processamento da moldação nas fases seguintes do processo [25]. As finas camadas vão formando a face interna do molde e reproduzindo todos os detalhes da peça [23]. A primeira camada refratária é designada de *facecoat* e será a que vai estar em contato com o metal vazado, por isso, é a que vai ditar a qualidade superficial da peça obtida. Tem de resistir também aos processos de descerificação e, em alguns casos, à sinterização. Desta forma é necessário que a granulometria dos pós refratários seja reduzida e que estes sejam inertes para não reagirem com o metal [2], [19]. As camadas seguintes designadas de *backup's* servem apenas para garantir resistência mecânica à carapaça, com o objetivo de esta suportar o peso e pressões exercidas pelo metal vazado. A granulometria das partículas refratárias vai sendo cada vez maior à medida que a espessura da carapaça aumenta.

A última operação é o banho de selagem e consiste apenas no mergulho do cacho em barbotina. Este permite que a carapaça possa ser manuseada sem que partículas cerâmicas se desprendam do exterior da mesma.

Entre todas as camadas aplicadas são cumpridos tempos de secagem. Esta secagem é realizada em ambiente e humidade controlados, estando os cachos suspensos em tabuleiros sujeitos a correntes de ar provenientes do equipamento de ventilação. É importante que a secagem seja bem efetuada, de forma a garantir que carapaça não seque em demasia nem fique com elevada humidade. A permeabilidade da mesma deve ser suficiente para que o ar, durante o vazamento, possa ser expulso com o intuito de impedir a formação de porosidades nas peças vazadas devido ao ar presente dentro da carapaça.

A Figura 15 mostra os tabuleiros utilizados e o sistema de ventilação.



Figura 15 - Tabuleiros de suporte e ventilação

Na Tabela 5 apresenta-se um resumo das camadas cerâmicas:

Tabela 5 - Resumo das camadas cerâmicas

Camada	Nº de camadas	Tempo secagem (h)	Granulometria dos refratários	Tempo de imersão (s)
<i>Facecoat</i>	1-2	3h	Baixa	30
<i>Backup</i>	6	2h	De moderada a elevada	60
Banho selagem	1	12h	—————	60

Na Figura 16 também se apresenta um esquema da constituição da carapaça cerâmica, detalhando as diferentes camadas cerâmicas:

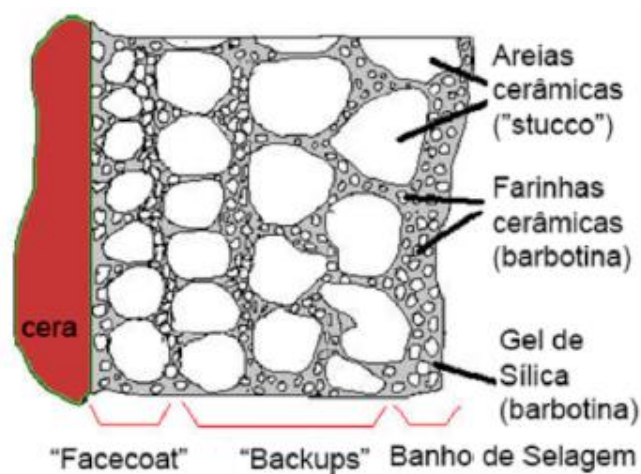


Figura 16 - Diferentes tipos de camadas cerâmicas [2]

A manipulação dos cachos durante as operações de imersão e projeção das camadas refratárias é realizada no INEGI de forma manual. Na indústria já se utilizam manipuladores mecânicos e braços robotizados. Como a dimensão e peso das carapaças tem aumentado, torna-se essencial a utilização destes meios, com a vantagem associada de terem capacidade para repetição de ações programadas no tempo, as quais aumentam a consistência e a qualidade das carapaças cerâmicas [25].

2.4.2 - Materiais refratários

No processo de fundição de precisão, os materiais refratários mais comuns para construção das moldações em carapaça cerâmica são a sílica, o zircão e vários alumino-silicatos compostos por mulite e sílica livre [23], [25].

Estes três tipos de materiais, são usados em várias combinações para a maioria das aplicações. A utilização da alumina tem sido verificada em fundição de superligas e o seu uso tem vindo a aumentar significativamente. É considerado um refratário muito caro e desnecessário em aplicação de fundição de peças em ligas convencionais. Outros refratários como a grafite, zirconia (ZrO_2) e ítria (Y_2O_3) têm vindo a ser usados aquando do vazamento de ligas bastante reativas [23], [28].

Para ligas TiAl os refratários usados são normalmente zircão ($ZrSiO_4$, silicato de zircónio), a alumina (Al_2O_3 , óxido de alumínio), a cálcia (CaO , óxido de cálcio), a magnésia (MgO , óxido de magnésio), a zircónia estabilizada (ZrO_2-X , sendo X outro composto) e a ítria (Y_2O_3 , óxido de ítrio) [1].

Os materiais cerâmicos utilizados para o revestimento das carapaças, são escolhidos de acordo com [2]:

- ✓ Pureza;
- ✓ Refratariedade;
- ✓ Estabilidade química;
- ✓ Expansão térmica;
- ✓ Forma das partículas e sua distribuição granulométrica;
- ✓ Disponibilidade;
- ✓ Custo.

As Tabelas 6 e 7 apresentam de forma geral, as propriedades dos refratários mais utilizados. A Figura 17 demonstra as diferentes curvas de expansão térmica em função da temperatura dos diferentes materiais.

Tabela 6 - Características de alguns materiais refratários [23], [25]

Material	Composição química	Massa específica (g/cm³)	Coefficiente de expansão térmica (*10⁻⁶ K⁻¹) 20-1000°C	Condutividade térmica (Wm⁻¹ K⁻¹) 20-26°C
Alumina	Al ₂ O ₃	4	9,5	28-35
Sílica Fundida	SiO ₂	2,2	0,5-0,8	1.2-1.4
Zircónia	ZrO ₂	4,2-4,6	10	2.5
Zircão	ZrSiO ₄	4,5	4,5	8
Alumino-silicatos	Al ₂ O ₃ - SiO ₂	2,4-2,9	5,3	4
Ítria	Y ₂ O ₃	5,01	8,1	8-12

Tabela 7 - Temperaturas de fusão e de amolecimento dos refratários [1]

Material	Composição química	Ponto de fusão (°C)	Ponto de amolecimento (°C)
Alumina	Al ₂ O ₃	2050	1540
Sílica Fundida	SiO ₂	1710	1280
Zircónia	ZrO ₂	2677	2010
Zircão	ZrSiO ₄	2420	1815
Alumino-silicatos	Al ₂ O ₃ - SiO ₂	1850	1500
Ítria	Y ₂ O ₃	2475	1855

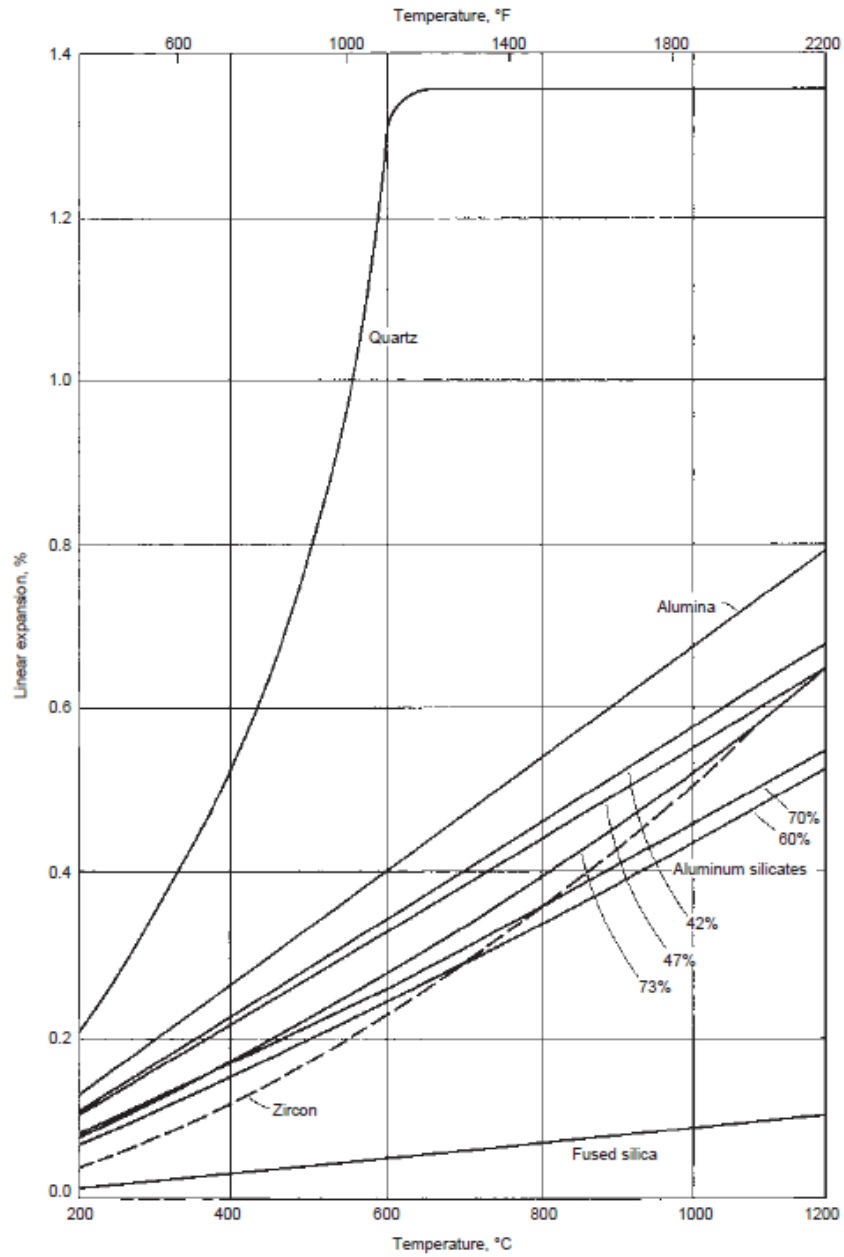


Figura 17 - Expansão térmica dos refratários [1], [23]

No presente trabalho, os refratários em destaque são:

- ✓ **Óxido de alumínio** – Al_2O_3
- ✓ **Zircão** – ZrSiO_4
- ✓ **Ítria chinesa** – Y_2O_3

A justificação para a escolha destes refratários será apresentada no ponto 2.8 – Reatividade das ligas.

Alumina, ou óxido de alumínio – A alumina é o item de maior custo na produção de alumínio. É preciso ter alumina de excelente qualidade para produzir um metal de qualidade de baixo impacto ambiental. A produção mundial de quase 100 milhões de toneladas é feita principalmente com bauxita empregando o processo “Bayer”.

Para transformar bauxita em alumina, mói-se e mistura-se o minério com cal e soda cáustica. Em seguida, essa mistura é bombeada para recipientes de alta pressão, onde o minério é aquecido. O óxido de alumínio é dissolvido pela soda cáustica e depois precipitado para fora dessa solução, lavado e aquecido, para eliminar água. O que sobra é um pó branco parecido com açúcar chamado alumina ou óxido de alumínio.

São necessárias aproximadamente duas toneladas deste “pó branco” para produzir uma tonelada de alumínio através dum processo de redução eletrolítica. Como principais características é de destacar a sua dureza, resistência e elevado ponto de fusão. De referir também que, é habitualmente utilizado nas camadas de *backup* das carapaças cerâmicas [29], [30].

Zircão – O zircão é um mineral pertencente ao grupo dos nesossilicatos. É um produto natural que pode ser calcinado ou não. É um cerâmico com elevada refratariedade, baixa expansão térmica, baixa condutividade térmica e quimicamente inerte com a maior parte dos metais, escórias e vidros. Permite o vazamento de aços, ligas de níquel e de materiais não ferrosos (ligas com ponto de fusão mais baixos - latão, bronze, prata, alumínio) e superligas. Apresenta consistência de composições químicas e de pH, sendo assim pouco sujeito à existência de impurezas.

É talvez dos refratários mais utilizados em fundição de precisão devido à sua grande disponibilidade, fácil manuseamento e estabilidade. No entanto, para o vazamento de ligas reativas, é dos que apresenta piores resultados a nível de reatividade [1].

Ítria – A ítria é o material mais indicado de utilização nas carapaças cerâmicas para o vazamento de ligas reativas. Vários estudos já comprovaram a qualidade deste produto como constituinte de camadas de *facecoat* e é geralmente aplicada em conjunto com a alumina como componente de *backup* [31]. Normalmente a ítria usada em fundição é fundida, triturada e peneirada. A ítria chinesa é resultante de um processo químico de produção, sendo por isso, muito fina, porosa e portanto não é fundida.

Resumo dos aspetos a ter em conta sobre os materiais refratários [1], [2], [23]:

- ✓ A temperatura máxima atingida no processo não se pode aproximar nem ultrapassar a temperatura de fusão do refratário, de modo a ser mantida a sanidade da carapaça e suas características mecânicas;
- ✓ A temperatura de amolecimento correspondente a $\frac{3}{4}$ da temperatura de fusão do refratário, estabelece um limite acima do qual ocorrem mecanismos que podem alterar a estrutura do mesmo;
- ✓ A condutividade térmica e o coeficiente de expansão térmica são importantes propriedades a ter em conta. Estas definem se a carapaça cerâmica na altura da fusão e vazamento vai garantir boas precisões dimensionais e se vai ter capacidade para transferir energia sob a forma de calor;
- ✓ Devido ao *facecoat* ser a camada mais crítica em termos de estabilidade química, os materiais mais indicados devem ser o mais inertes possível. Devem ser estáveis e não devem hidratar nem reagir com o metal a vazar.

2.4.3 - Barbotinas

Formulação da barbotina

Atualmente a composição das barbotinas depende essencialmente da percentagem de pó refratário, tipo e concentração do ligante, veículo líquido e da viscosidade requerida. As composições variam normalmente entre os valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Composições típicas das barbotinas [23], [25]

Ingredientes	Composição (%)
Aglomerantes sólidos	5-10
Líquido (aglomerante ou adicionado)	15-30
Partículas refratárias	60-80

As barbotinas são preparadas por adição de pó refratário ao líquido aglutinante (ligantes), com agitação do líquido, de modo a quebrar aglomerados formados para se verificar uma mistura homogénea dos componentes e essencialmente impedir que a farinha em rotação se deposite no fundo da tina.

A viscosidade inicialmente medida, geralmente encontra-se muito elevada devido ao ar ainda existente e à mistura ainda estar incompleta. Após algum tempo de mistura a viscosidade cai para o nível correto, ou pelo menos, para perto dele. É por vezes necessário um ajuste com adição de líquido e só depois é possível iniciar o uso da mesma.

De forma a assegurar o acima mencionado, as barbotinas encontram-se armazenadas em tinas rotativas com pás misturadoras. São geralmente colocadas a girar com velocidades inferiores às utilizadas aquando da sua formulação. A Figura 18 apresenta um exemplo de uma tina rotativa onde se encontram as barbotinas nas quais se mergulham os cachos para fabrico das carapaças.



Figura 18 - Tinas rotativas

Ligantes

As carapaças cerâmicas são constituídas em grande parte, por materiais refratários ligados por uma solução aglutinante. O papel do ligante passa por proporcionar não só uma ligação entre as partículas refratárias, mas também por conferir resistência suficiente à carapaça de modo a resistir às tensões que podem surgir durante a sua preparação [19].

Os ligantes habitualmente usados são a sílica coloidal, o silicato de etilo e o silicato de sódio. Também têm sido desenvolvidos alguns ligantes híbridos como a alumina, ou os ligantes de zircónia [23].

O ligante mais amplamente utilizado é a sílica coloidal, no entanto, no caso de vazamento de ligas reativas a sua utilização não é recomendada, como pode ser comprovado no ponto 2.8 desta dissertação. É fabricado por eliminação dos iões de sódio, por troca iónica a partir do silicato de sódio. Consiste numa dispersão coloidal de partículas esféricas em água tendo as partículas, um tamanho que varia entre 6 a 100 nm [2], [23].

Aditivos

Outros componentes, como diversos aditivos, são também adicionados às barbotinas sendo eles [2], [23]:

- ✓ **Agentes molhantes** – baixam a tensão superficial da barbotina e induzem uma melhor adesão da mesma à superfície do modelo em cera;
- ✓ **Anti espumantes** – elevam à superfície as bolhas de ar existentes, diminuindo assim a sua quantidade no seio da barbotina;
- ✓ **Espessante** – melhora as propriedades reológicas da barbotina;
- ✓ **Fundentes** – têm como objetivo baixar a temperatura de sinterização das carapaças;
- ✓ **Dispersante desfloculante** – previne a sedimentação das partículas cerâmicas da barbotina.

Aplicação das areias

Depois de mergulhadas nas barbotinas, as carapaças são imersas em chuveiros ou leitos fluidizados de areias cerâmicas. O seu uso é importante uma vez que sendo aplicadas em sucessivas camadas, vão conferindo resistência mecânica suficiente à carapaça, de modo a resistir aos esforços provocados pelo metal durante o vazamento e para permitir o fabrico de peças com alta qualidade superficial.

A Figura 19 apresenta os equipamentos geralmente utilizados:



Figura 19 - Chuveiros e leitos fluidizados

Propriedades reológicas das barbotinas

As propriedades reológicas das barbotinas cerâmicas têm grande importância no fabrico das carapaças; como tal, é necessário compreender os fundamentos e teoria das barbotinas. Por definição, pequenas partículas dispersas num líquido formam uma suspensão ou solução coloidal. As suspensões contêm partículas maiores que $1\ \mu\text{m}$ e os líquidos coloidais possuem partículas entre $1\ \text{nm}$ e $1\ \mu\text{m}$. Quando as partículas são inferiores a $100\ \mu\text{m}$, existem ligações superficiais que dominam o seu comportamento. Estas ligações (ou forças), em oposição às forças gravitacionais, permitem que as partículas se mantenham em conjunto.

A estabilidade de uma barbotina é um dos fatores mais importantes na sua produção. A existência de forças de atração (ligações de *Van der Waals*) faz com que haja uma aglomeração das partículas, o que para as barbotinas é indesejável, sendo assim necessário inserir forças repulsivas de maneira a garantir a estabilidade desejada.

No entanto, as soluções coloidais podem sofrer efeitos de coagulação e floculação. A coagulação consiste na adesão das partículas entre si devido às ligações de *Van der Waals*. Este fenómeno também é conhecido por *Gel* (ver Figura 20 b)), quando este fenómeno é demasiado forte e irreversível o fenómeno de floculação ocorre. Este consiste na junção das partículas e sua precipitação (ver Figura 20 c)) [2].

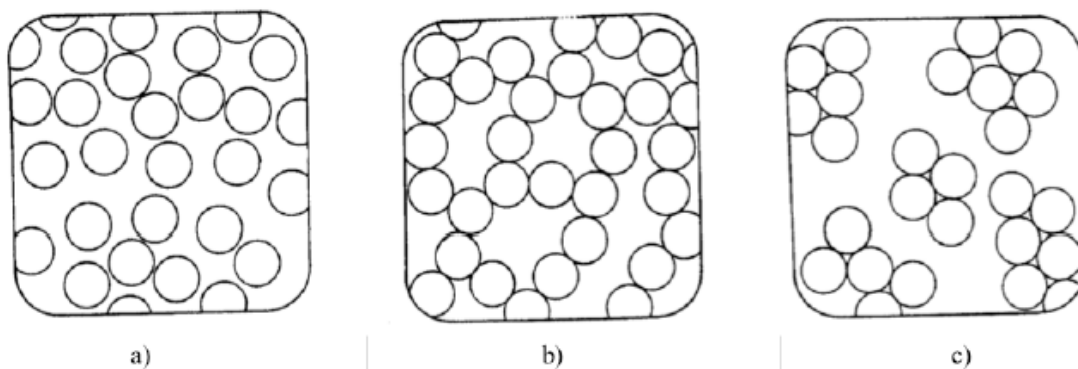


Figura 20 - Comportamento das soluções coloidais a) Solução; b) Coagulação (Gel); c) Floculação e precipitação [2]

2.4.4 - Descerificação

Nesta etapa é realizada a remoção do modelo em cera do interior da carapaça. É a operação que, na maioria das vezes, sujeita a carapaça a fortes tensões mecânicas e é geralmente uma fonte frequente de problemas. Quando o molde é aquecido para liquefazer o modelo, a expansão da cera gera uma enorme pressão capaz de fissurar ou até mesmo quebrar a carapaça. Na prática este problema pode ser contornado aquecendo a carapaça de forma extremamente rápida. Isto faz com que a camada superficial do modelo derreta muito rapidamente, antes do resto do modelo, e saia do interior permitindo assim acomodar a dilatação da cera ainda existente. Se a carapaça for aquecida lentamente, a rápida expansão da cera vai fazer com que esta quebre. São também geralmente realizados furos na carapaça em sítios estratégicos com o objetivo de aliviar as tensões internas provocadas pela expansão da cera, que é muito superior à dos refratários, e para facilitar a saída da mesma do interior da carapaça. Depois do modelo derreter, fica então o molde da peça, pronto para mais tarde receber o metal fundido [19], [23].

Dentro dos processos de descerificação, seguem-se [23]:

- ✓ Descerificação em Autoclave;
- ✓ Descerificação em Flash Fire;

A descerificação em autoclave é o método amplamente mais usado. É utilizado vapor saturado para transferir o calor para as carapaças. Os autoclaves estão equipados com um tabuleiro capaz de acomodar várias carapaças, uma porta de ação rápida e um dreno de cera. As pressões de operação encontram-se normalmente nos 550 a 620 KPa e são atingidas em 4 a 7 segundos. As temperaturas rondam os 150 a 200°C e os modelos demoram geralmente 15 minutos a derreter [2], [23]. Inicialmente considerava-se que a recuperação da cera era boa, contudo estudos posteriores realizados por Bleier e Kukla (2002) revelaram que o vapor se misturava com a cera, tornando assim a sua recuperação cara para reutilização [19].

A descerificação em *flash fire* é o método em que a carapaça é introduzida num forno a temperaturas na ordem dos 870 a 1100°C. O forno apresenta normalmente um fundo aberto que permite o escoamento da cera para fora do mesmo, logo que derreta. As carapaças estão 2h no forno de descerificação e a recuperação da cera é boa.

A Figura 21 seguinte apresenta um exemplo dos equipamentos:

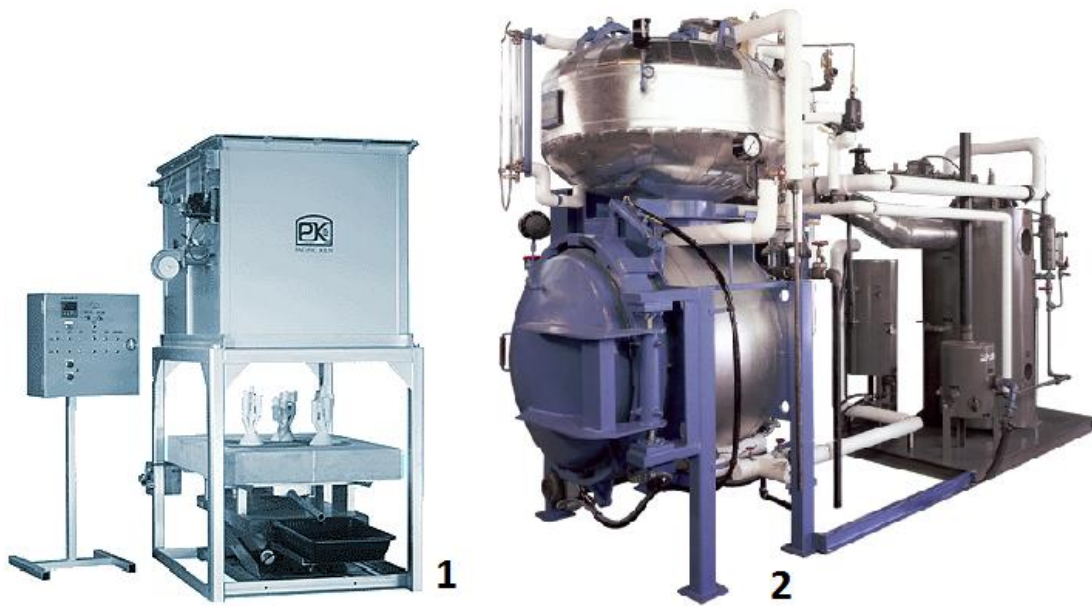


Figura 21 - 1) Flash Fire [32]; 2) Autoclave [33]

2.4.5 - Sinterização

Sinterização é o processo em que, por tratamento térmico, um compactado de pós, cristalinos ou não, é transformado num corpo rígido devido a mecanismo de transporte de matéria, que frequentemente ocorre em escala atômica. Em geral, existem três tipos de processos de sinterização, que são importantes para a produção de cerâmicas [34]: i) sinterização no estado sólido; ii) sinterização com fase líquida e iii) sinterização viscosa.

As carapaças cerâmicas são submetidas ao processo de sinterização com o objetivo de:

- ✓ Eliminar possível humidade;
- ✓ Eliminar resíduos de cera;
- ✓ Queimar os materiais orgânicos das barbotinas;
- ✓ Pré-aquecer a carapaça para a temperatura necessária para o vazamento.

A queima de materiais orgânicos ocorre entre os 200 e os 300°C, podendo alguns resíduos de hidrocarbonetos só serem removidos a temperaturas entre 870 e os 1100°C, por vezes com 10% de excesso de ar para garantir a combustão completa destes. As temperaturas de pré

aquecimento dependem da peça e liga a vazar. Para aços e superligas encontram-se geralmente entre os 870 e 1095°C ou mais. Por norma o pré aquecimento de carapaças para solidificação direcional é feito acima da temperatura “liquidus” da liga a ser vazada [1], [23].

Nesta fase de pré aquecimento, as carapaças podem ser envolvidas num cobertor de fibra cerâmica para minimizar a queda de temperatura que acontece no transporte das carapaças do forno de pré-aquecimento para o de vazamento. Os fornos a gás são usados para a sinterização e aquecimento, exceto nos casos que se pretende obter processos de solidificação direcional do metal, como nas ligas de titânio, onde o pré aquecimento é feito em fornos de indução ou resistências [1], [23].

Sinterização no estado sólido

O potencial termodinâmico que opera durante a sinterização é a redução de energia em excesso associada com a superfície. Esta redução de energia pode ocorrer por:

- i) Redução da área superficial total por um aumento no tamanho médio das partículas, causando crescimento microestrutural;
- ii) Criação de áreas de contornos de grãos, que promove a eliminação de interfaces sólido – vapor, promovendo densificação.

Os mecanismos de densificação e crescimento microestrutural competem entre si durante a sinterização, levando a complexas mudanças no tamanho de grão e no tamanho, forma e quantidade de poros [34].

Mecanismo de transporte de matéria no estado sólido

Os mecanismos de transporte de matéria propostos para atuar na sinterização no estado sólido são apresentados na Tabela 9. Estes mecanismos contribuem para o crescimento de pescoço, porém, apenas os mecanismos 4 a 6 causam aproximação entre os centros dos grãos, promovendo a densificação. A Figura 22 mostra de forma esquemática os caminhos de transporte de matéria dos mecanismos que podem atuar durante a sinterização. De uma forma geral, o processo de sinterização é controlado por um conjunto de mecanismos de transporte de matéria, os quais atuam de forma cooperativa entre si, levando a que o corpo consolidado a uma condição mais estável por meio de mudanças estruturais [34].

Tabela 9 - Mecanismos de transporte de matéria [34]

Mecanismo	Caminho de transporte	Fonte	Absorção
1	Difusão pela superfície	Superfície	Pescoço
2	Difusão pela rede	Superfície	Pescoço
3	Difusão por vapor	Superfície	Pescoço
4	Difusão por contornos	Contornos de grão	Pescoço
5	Difusão pela rede	Contornos de grão	Pescoço
6	Difusão pela rede	Discordâncias	Pescoço

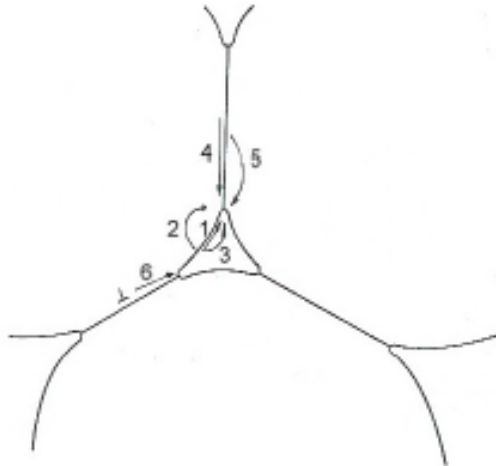


Figura 22 - Esquema dos mecanismos de transporte de matéria que podem atuar durante a sinterização: (1) difusão pela superfície; (2) difusão pela rede (superfície); (3) difusão por vapor; (4) difusão por contornos; (5) difusão pela rede (contorno de grão); e (6) difusão pela rede (deslocações) [34]

Estágios da sinterização no estado sólido

1. Estágio inicial – é caracterizado pelo crescimento de um pescoço no ponto de contato entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, pela formação de um contorno de grão na interface entre as partículas. A Figura 23 ilustra o esquema do modelo de duas esferas referente ao estágio inicial.

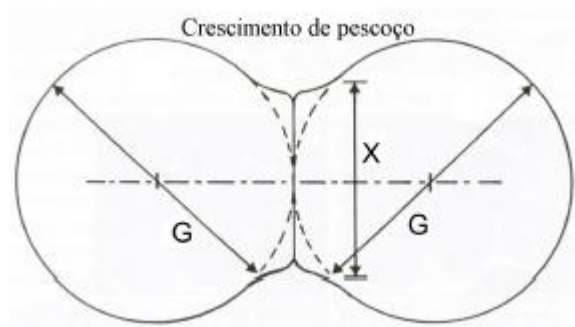


Figura 23 - Esquema do modelo de duas esferas referente ao estágio inicial da sinterização. G é o diâmetro da partícula e X é o diâmetro do pescoço [34]

2. Estágio intermediário

Neste estágio, os grãos apresentam-se na forma de tetradecaedros regulares de tamanho uniforme, formados por octaedros com seis vértices truncados, com poros cilíndricos situados ao longo da junção de três arestas. Estes poros são resultado do processo de densificação, o qual provoca uma diminuição da distância entre os centros das partículas. A Figura 24 demonstra um exemplo do sucedido, onde se observa poros abertos e interconectados.

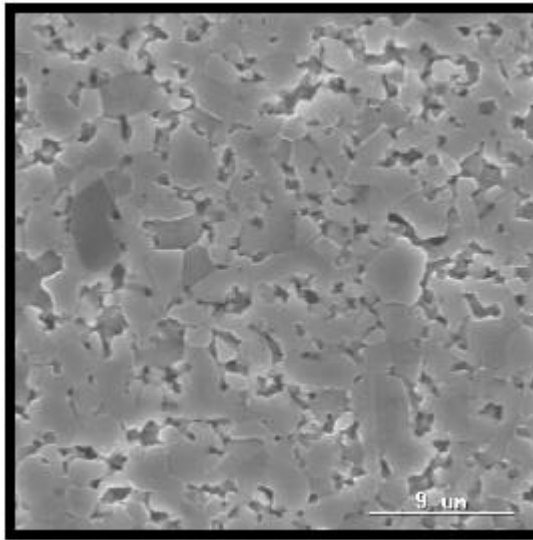


Figura 24 – Análise por microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários de uma superfície polida onde se verifica a presença de poros abertos interconectados [34]

3. Estágio final

No estágio final verifica-se a eliminação dos poros, devida ao crescimento do tamanho de grão. Neste estágio a geometria dos poros varia em função da sua localização, ou seja, poros situados no interior dos grãos tendem à forma esférica, enquanto os poros situados nas faces e arestas dos grãos tendem a forma lenticular e, finalmente, poros situados nos cantos dos grãos tendem a forma de tetraedros arredondados. As Figura 25 e Figura 26 apresentam, respectivamente, a geometria dos poros em função da sua localização e a presença de poros residuais fechados.

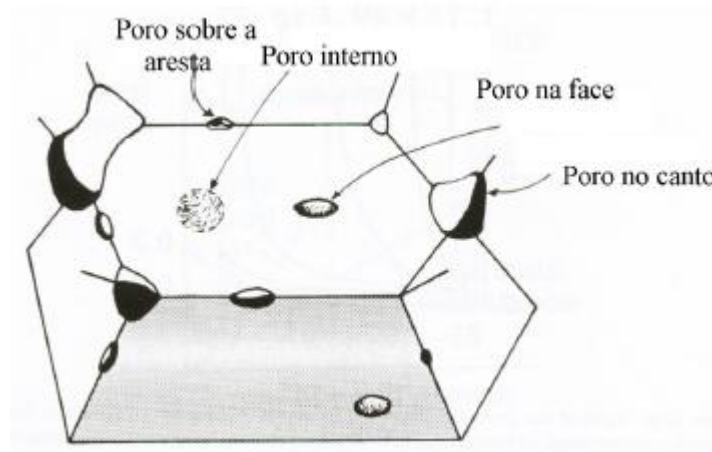


Figura 25 - Geometria dos poros em função da sua localização [34]

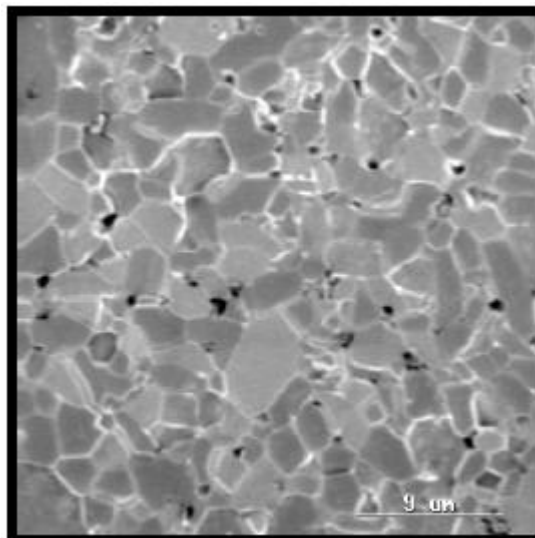


Figura 26 - Análise por microscopia eletrônica de varrimento com elétrons secundários de uma superfície polida onde se verifica a presença de poros residuais fechados [34]

É importante referir que este tipo de sinterização é o que se verifica nas carapaças cerâmicas, uma vez que as temperaturas de sinterização praticadas nunca ultrapassam a temperatura de fusão dos refratários utilizados. A sinterização também não poderá ser total, pois a presença de poros é essencial para conferir à carapaça uma boa permeabilidade.

2.4.6 - Ensaios de verificação de qualidade das carapaças cerâmicas

De forma geral os tipos de ensaios de verificação da qualidade realizados são:

- ✓ Viscosidade;
- ✓ pH;
- ✓ Temperatura da barbotina;
- ✓ Friabilidade;
- ✓ Permeabilidade;
- ✓ Propriedades térmicas;
- ✓ Resistência mecânica.

Neste trabalho foram realizados ensaios de friabilidade, medição da viscosidade, temperatura e pH das barbotinas, sendo por isso seguidamente apenas abordados esses ensaios.

Medição da viscosidade

O comportamento reológico de uma barbotina é de extrema importância pois é este que vai definir a capacidade da barbotina para reproduzir detalhes mais finos. A reologia de uma barbotina é quantificada através da medição da viscosidade. As formulações de barbotinas são feitas de forma a obter a viscosidade desejada após um tempo de mistura adequado, para que estas possuam características uniformes de fluxo e molhagem.

No INEGI, a medição da viscosidade é realizada usando o método da copa *Zahn* nº 4. Este método é usado para determinar a viscosidade de diversos líquidos e fluídos newtonianos. Os copos de viscosidade *Zahn* estão disponíveis em 5 tamanhos diferentes, sendo estes correspondentes à viscosidade que conseguem medir. A Figura 27 exemplifica um modelo do copo de Zahn [35]

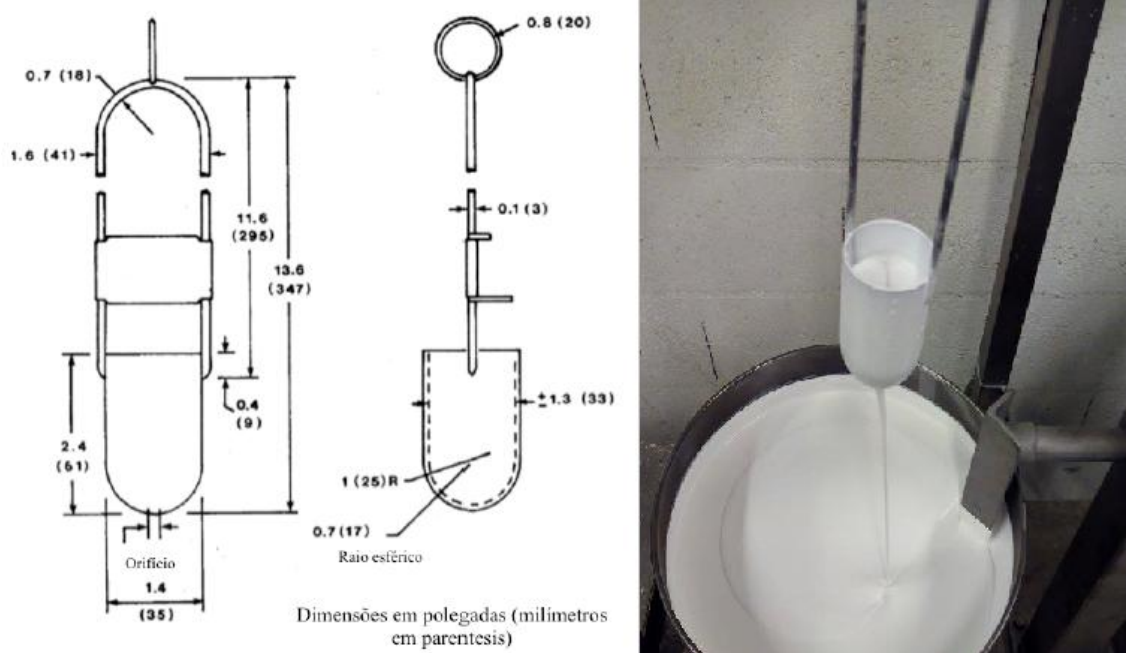


Figura 27 - Copa Zahn nº4

A medição da viscosidade usando a copa Zahn é um processo simples. Este consiste em mergulhar o copo de Zahn na barbotina e, com o auxílio de um cronómetro, mede-se o tempo que o caudal de barbotina que está a escorrer pelo buraco do copo demora a ser interrompido. Quando este é interrompido, a cerca de 5-6 cm do furo, pára-se o cronómetro e regista-se o tempo em segundos. Esta operação deve ser repetida até obter resultados consistentes.

Temperatura e pH

De forma a controlar a temperatura e pH das barbotinas, realizam-se diariamente ensaios com recurso a um aparelho usado para efetuar a medição simultânea destes dois parâmetros (**testo 230**).

A Figura 28 apresenta o equipamento geralmente usado:



Figura 28 - Equipamento usado na medição de temperatura e pH – testo 230

Friabilidade

A friabilidade consiste basicamente na facilidade com que o material se consegue desagregar em pedaços mais pequenos com a fricção. No caso das carapaças, esta consiste na libertação das partículas cerâmicas. Tendo a carapaça uma friabilidade elevada, as partículas cerâmicas libertadas durante o vazamento - devido à interface metal/carapaça - podem contaminar o metal e provocar acabamentos superficiais de má qualidade.

Até agora praticamente não existem estudos nem ensaios que quantifiquem o nível de friabilidade de uma carapaça cerâmica. A friabilidade é apenas qualificada pelas partículas que ficam agarradas ao dedo do operador. No entanto, existe um estudo de Yuan *et al.* que relata um método possível de utilizar para quantificar a friabilidade.

Segundo Yuan *et al.*, pode ser realizado um teste que quantifique com uma maior precisão o nível de friabilidade. Este teste consiste na realização de uma peça padrão em cera, sendo esta posteriormente utilizada para a construção da carapaça cerâmica [36]. A Figura 29 ilustra o modelo do provete cerâmico e escova utilizada nos testes.

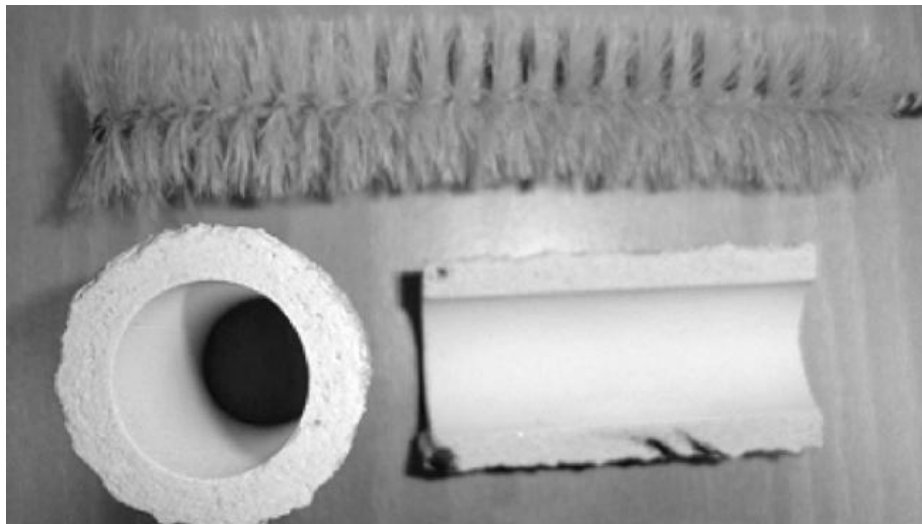


Figura 29 - Carapaça cerâmica e escova utilizada nos testes [36]

A carapaça é pesada e de seguida realizada uma passagem no interior do tubo cilíndrico com uma espécie de escova de maneira a provocar a libertação de partículas com o recurso à fricção. No final, a carapaça é de novo pesada, sendo então calculada a diferença entre massas. A seguinte equação quantifica então a friabilidade:

$$F = \frac{G}{\pi DL}$$

Sendo que:

- G – Diferença entre peso final e peso inicial da carapaça cerâmica (g)
- D – Diâmetro interno da carapaça (m)
- L – Comprimento da carapaça (m)

Porém, este teste pode estar sujeito a erros experimentais, pois é necessário que a balança tenha uma precisão bastante elevada (na ordem dos 1×10^{-4} g) e que no transporte das peças entre pesagens não se libertem partículas das carapaças. Um operador diferente pode também provocar diferenças nos resultados esperados [36], [2].

2.5 - Fusão e Vazamento

A fusão dos aluminetos de titânio deve ser realizada em atmosfera inerte ou em vácuo devido à alta reatividade do metal no estado líquido, independentemente dos fornos usados. Estes fornos podem ser por indução, por arco elétrico ou por plasma.

2.5.1 - Fusão por indução

A fusão do metal é feita dentro do cadinho através da introdução de uma corrente alternada nas bobinas exteriores ao cadinho. Assim o metal é sujeito a um fluxo de corrente alternada induzida suficientemente grande para provocar a fusão do metal por efeito de Joule. O processo é realizado sem a adição de quaisquer aditivos e numa atmosfera controlada ou em vácuo.

Na fusão por indução para aluminetos de titânio são usadas geralmente duas soluções:

- ✓ Fusão em cadinho cerâmico (VIM) – *Vacuum Induction Melting*
- ✓ Fusão em cadinhos frios (VISM) – *Vacuum Induction Skull Melting*

Fusão por indução em cadinho cerâmico (VIM)

O processo VIM é descrito pela fusão do metal por indução electromagnética em cadinhos cerâmicos em vácuo ou atmosfera controlada. A utilização deste tipo de cadinhos traz vantagens no que diz respeito às temperaturas usadas, permitindo atingir temperaturas de sobreaquecimento bastante superiores aos outros processos. No entanto como desvantagem apresenta a captação de oxigénio dos refratários para o titânio fundido. Dos vários cerâmicos possíveis de utilização, e como já neste trabalho foi referido, aquele que apresenta menores níveis de contaminação é a itria. Na Figura 30 encontra-se um exemplo de um cadinho cerâmico com *facecoat* de ítria [3], [12].



Figura 30 - Cadinho cerâmico com *facecoat* de ítria [3], [12]

Fusão em cadinhos frios (VISM)

Um forno VISM é um cadinho de fusão dentro de uma estrutura de aço que está ligada a um sistema de vácuo com admissão de gás inerte, nomeadamente argon. O “coração” do forno é o cadinho com aquecimento e bobinas e revestimento refratário de arrefecimento. O aquecimento é realizado por corrente elétrica que passa através de uma bobina de indução. A bobina é feita a partir de tubo de cobre que é arrefecido por água que flui pelo interior do tubo. A passagem de corrente através da bobina gera um campo magnético que induz uma corrente no material, no cadinho de cobre e no seu interior, suficiente para fundir a carga [23].

Como o titânio é um metal muito reativo, quando este é fundido tem problemas de contaminação com o cadinho. Desta forma, e para solucionar o problema, são utilizados cadinhos refrigerados a água. O cobre é o material de eleição para o cadinho visto ter boa condutibilidade elétrica e térmica e grande resistência ao choque térmico. Ao utilizar este tipo de cadinho é criada entre este e o metal fundido uma camada solidificada de TiAl. Esta deve-se ao diferencial de temperaturas entre a liga e o cadinho. Esta camada permite que o resto do metal fundido não seja contaminado pelo cadinho. A Figura 31 apresenta um cadinho refrigerado a água.

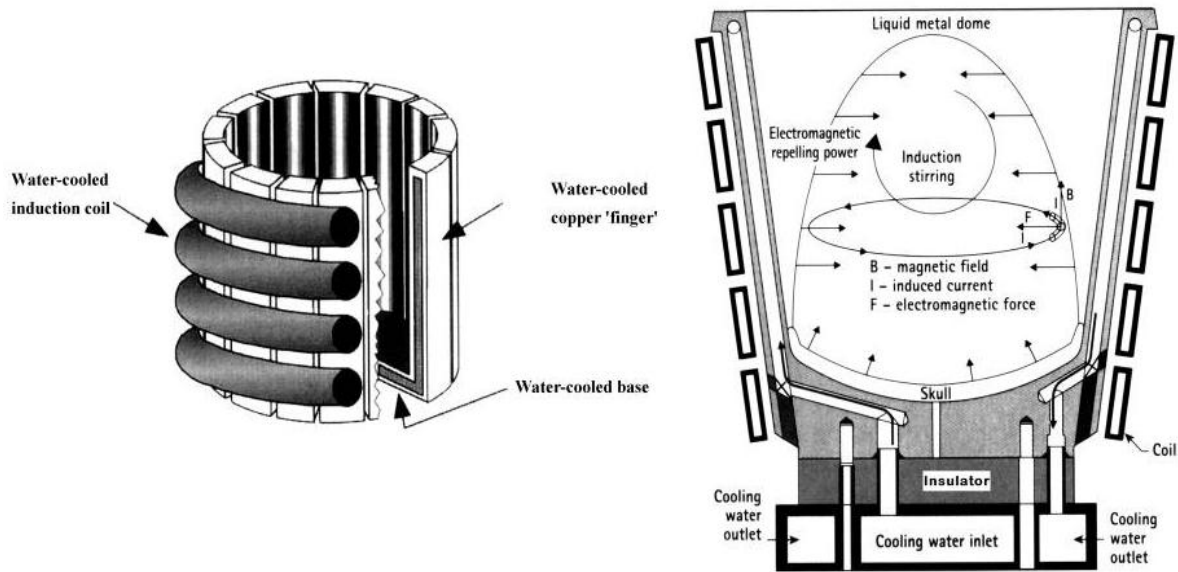


Figura 31 - Cadinho refrigerado a água [37]

No entanto este processo causa grandes perdas de calor no metal fundido, o que pode levar a falhas no processo de fusão e vazamento do metal. A empresa Daido verificou que se diminuísse a área de contacto do metal fundido com o cadinho de cobre arrefecido a água, os resultados obtidos seriam melhores. A este processo atribui o nome de *Levitation Melting Casting*. O objetivo era a criação de um campo magnético, através da indução nas bobinas de uma corrente alternada, capaz de levantar totalmente o metal fundido como se pode ver na Figura 32. Esta levitação é devida às forças repulsivas de *Lorentz*. Este fenómeno de levitação total do metal na prática não é aplicado uma vez que apenas é possível levantar metal até um peso máximo igual às forças de levitação. Verifica-se assim na prática uma “semi-levitação” do metal. São assim conseguidas menores perdas de calor devido a menor área de contacto com o cadinho [4].

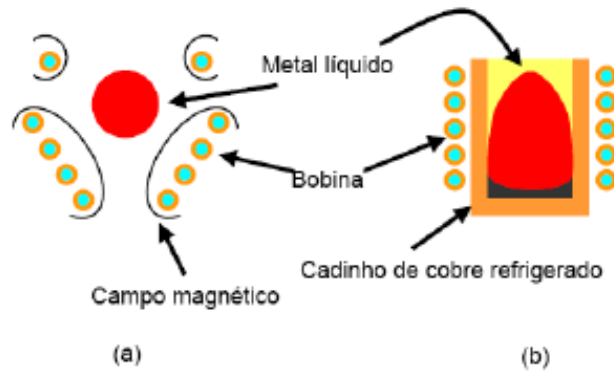


Figura 32 - Levitação do metal fundido [1], [2]

2.5.2 - Fusão por arco elétrico

O processo denominado por fusão por arco elétrico (*Vacuum Arc Remelting*), utiliza um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo consumível e um cadinho de cobre arrefecido, para proceder à fusão do metal. Os vários constituintes da liga a fundir são colocados no cadinho nas proporções pretendidas. É feita a aplicação de vácuo na câmara do forno e induzida uma corrente elétrica de corrente contínua, responsável pelo estabelecimento do arco elétrico. Este aquece tanto os materiais a fundir como o eletrodo, levando-os a fundir e a depositarem-se no cadinho, formando o “banho de fusão”[23]. A Figura 33 apresenta o exemplo de um destes tipos de fornos de fusão.

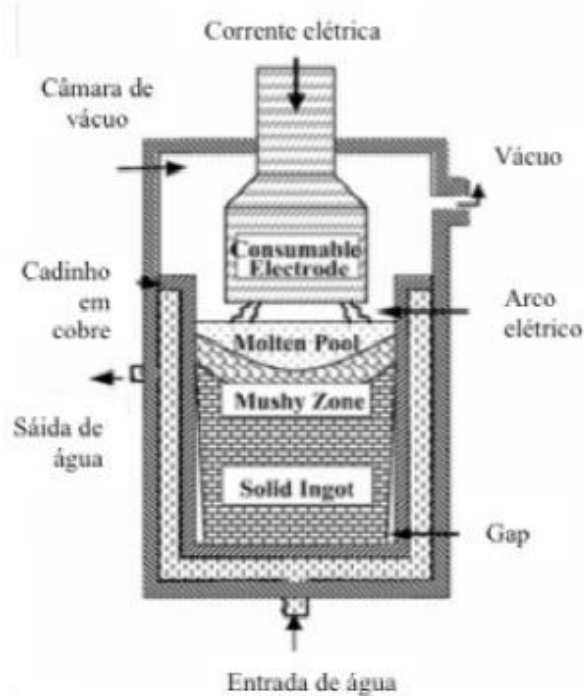


Figura 33 - Forno de fusão por arco elétrico consumível [3] [38]

Apesar de ser um dos processos mais utilizados atualmente para fundidos em titânio, ainda apresenta algumas desvantagens como [3]:

- ✓ Custo bastante elevado;
- ✓ Não é possível sobreaquecer o metal líquido devido ao contacto constante com o cadinho refrigerado;
- ✓ Dificuldade no controlo da potência;
- ✓ Necessidade de aplicar tratamento por *Hot Isostatic Pressing* de modo a minimizar porosidades nas peças;
- ✓ Obter a homogeneidade da liga com apenas uma fusão é complicado, sendo normal proceder-se várias vezes à refusão do metal;
- ✓ Processo perigoso devido à possibilidade de descontrolo do arco elétrico e perfuração do cadinho.

2.5.3 - Fusão por arco de plasma

O surgimento do processo PAM (*Plasma Arc Melting*) deve-se à necessidade de uma alternativa ao processo VAR para a produção de ligas de titânio. Este tipo de fusão é caracterizado pela utilização de uma tocha de plasma para fundir a liga em causa. O metal ao atingir o estado líquido realiza um movimento horizontal em direção a um recipiente em cobre refrigerado a água [39]. Este recipiente é alimentado de forma contínua, até atingir um nível que leva ao escoamento de metal líquido para um cadinho também em cobre refrigerado a água, como se pode visualizar na Figura 34.

A perda de elementos voláteis, como o alumínio, durante o processo é inferior à que ocorre no processo VAR, devido ao PAM ser realizado totalmente em atmosfera controlada de modo a criar o plasma de hélio. Assim sendo, o processo PAM é o mais indicado para a fusão de ligas TiAl.

Tal como nos processos referidos anteriormente, também neste se dá a formação da camada solidificada, Skull, entre o metal líquido e o forno de cobre refrigerado a água. A formação desta camada, evita assim a contaminação do metal fundido [3], [4].

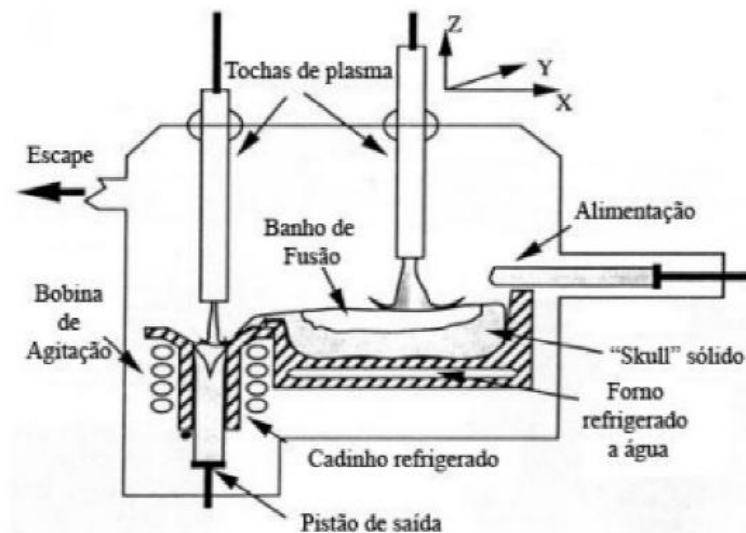


Figura 34 - Fusão por arco de plasma [3] [40]

Vazamento

Existem diversos tipos de vazamento, entre eles:

- ✓ Vazamento por gravidade;
- ✓ Vazamento por centrifugação;
- ✓ Vazamento por baixa pressão.

2.5.4 - Vazamento por gravidade

O processo de vazamento por gravidade consiste em preencher e solidificar as peças metálicas apenas com a utilização da força da gravidade sem a utilização de força externa. É considerado um dos processos mais simples e barato. Contudo é um método que é suscetível à turbulência, que se deve à elevada velocidade do metal devido a uma altura excessiva de vazamento. Isto origina a ocorrência de defeitos, como bolhas de ar e óxidos. A Figura 35 ilustra um exemplo de vazamento por gravidade.

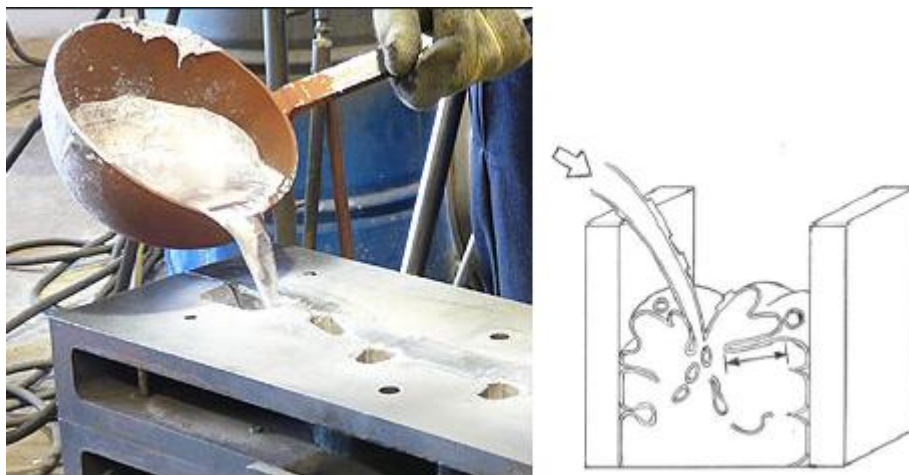


Figura 35 - Vazamento manual por gravidade [11]

2.5.5 - Vazamento por centrifugação

As figuras 36 e 37 ilustram dois tipos de vazamento por centrifugação.

- ✓ **Horizontal** – para obtenção de peças de revolução;

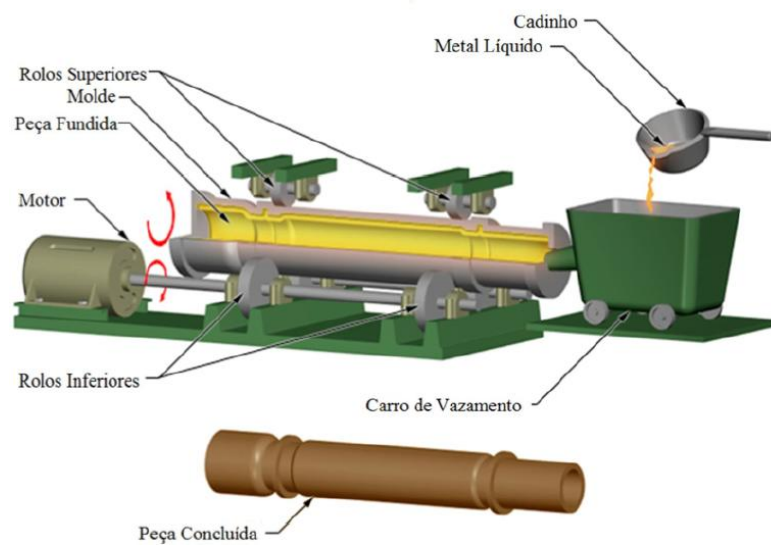


Figura 36 - Vazamento por centrifugação – horizontal [11]

- ✓ **Vertical** – fundidos que não sejam cilíndricos nem simétricos.

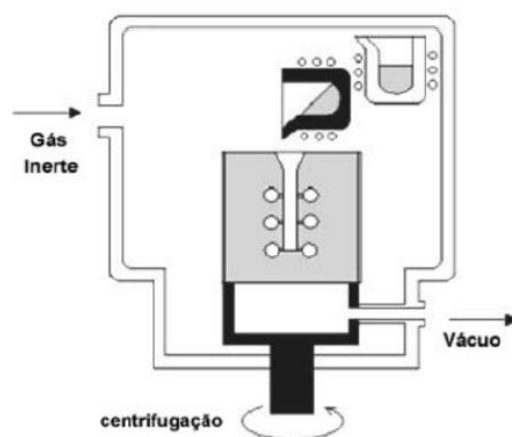
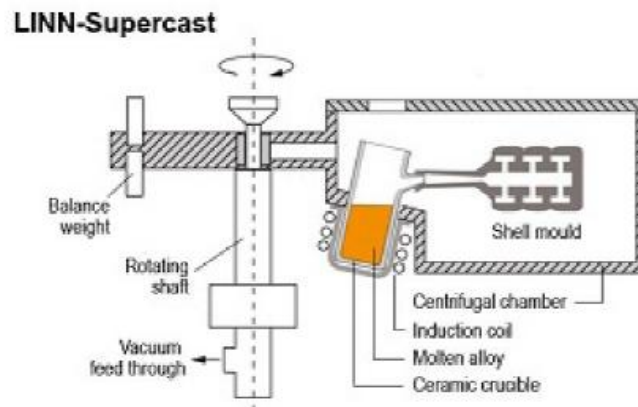
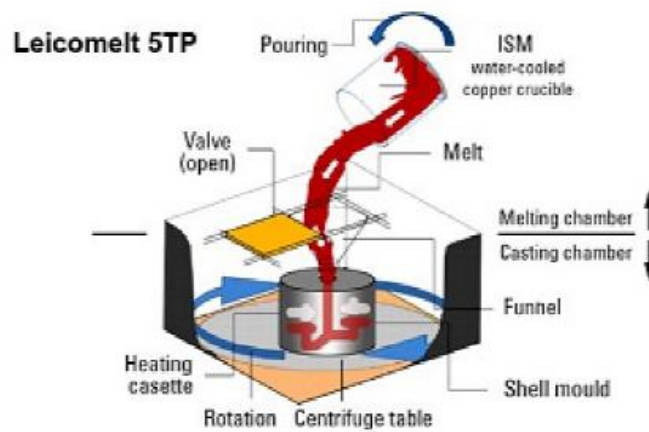


Figura 37 - Vazamento por centrifugação – vertical [11]

Atualmente no processo de fundição de precisão os principais equipamentos de centrifugação são o LINN-supercast e o Leicomelt 5 TP, apresentados na Figura 38. O primeiro recorre ao VIM e o segundo ao VISM, temas abordados no capítulo de fusão.



(a)



(b)

Figura 38 - a) LINN-Supercast; b) Leicomelt 5TP [3]

No **processo a)** utiliza-se um cadinho cerâmico no qual é colocado o metal a fundir. O cadinho é inserido num braço que irá rodar em concordância com o veio rotativo. Com a rotação e a elevada aceleração do braço geram-se forças centrífugas que transportam o metal para a carapaça cerâmica. A rotação mantém-se até o metal solidificar sob efeito da pressão gerada pela solidificação.

O efeito da centrifugação combinado com o sobreaquecimento do titânio, promove o enchimento de paredes finas até 0,5mm e no caso de se vazarem uma liga reativa como o TiAl, o processo deve ser realizado em atmosfera de gás inerte, com recurso ao argon.

O **processo b)** é composto por um forno de indução com cadinho de cobre refrigerado a água e molde com mecanismo de rotação axial associado. Este processo é caracterizado por apresentar duas câmaras, uma para fusão e outra para vazamento. Um grande desafio do processo é o de manter a temperatura de sobreaquecimento gerado na fusão, durante o vazamento do metal líquido.

Apesar de as elevadas pressões reduzirem a incidência de poros e rechupes, as altas velocidades atingidas pelo metal durante a centrifugação, originam turbulência no vazamento, não sendo por isso este processo, uma das melhores técnicas de vazamento [2],[4].

2.5.6 - Vazamento por baixa pressão

Este tipo de vazamento, também apelidado de vazamento por contragravidade, é caracterizado pela baixa turbulência durante o enchimento e pelo fluxo de metal ser promovido na direção do enchimento das peças, levando a que se fabriquem peças de elevada qualidade e com menos defeitos, essencialmente, inclusões [2],[4].

O processo pode ser dividido em 3 diferentes variantes:

- ✓ **CLA – Vazamento do metal ao ar por baixa pressão** – é realizado ao ar, não sendo assim um meio de vazamento para ligas reativas como o TiAl, devido às reações metal/atmosfera;
- ✓ **CLV – Vazamento do metal em vácuo por baixa pressão** – é constituído por duas câmaras, uma em cima da outra. Uma câmara suporta a carapaça cerâmica e por baixo situa-se outra onde está o metal fundido dentro do cadinho. A ligação entre as câmaras é feita por intermédio de uma válvula e ambas encontram-se em vácuo aquando da fusão da liga. Desta forma enquanto a válvula se abre e se eleva o cadinho, é aplicado vácuo na câmara superior obrigando o metal a seguir na direção da carapaça. Após a solidificação do metal, o cadinho desce, regressando à sua posição inicial. A Figura 39 ilustra o diagrama do processo [3], [4], [12].

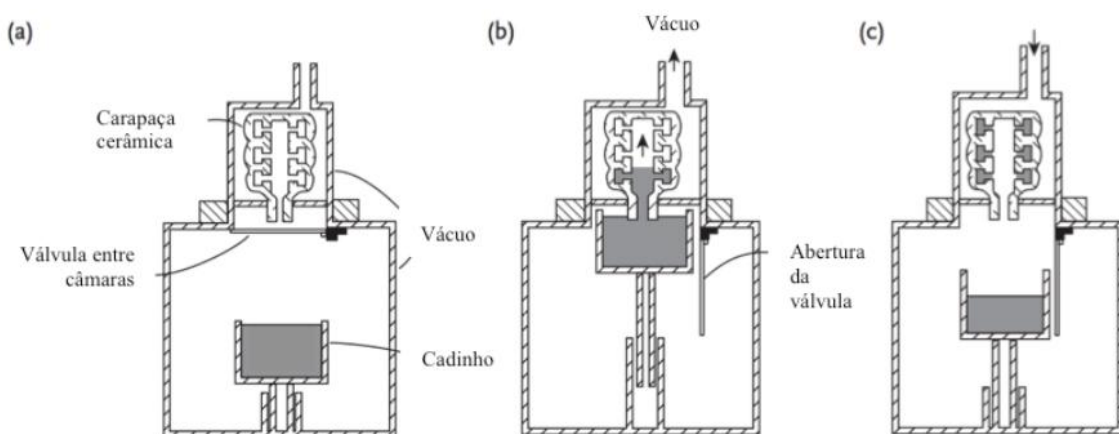


Figura 39 - Esquema do processo CLV [3], [4]

O processo *Levicast* apenas diferente deste, no tipo de cadinho utilizado. Neste, o tipo de cadinho é um cadinho de cobre refrigerado a água. O processo CLV combina também a tecnologia *Levitation Melting Casting*, antes descrita, desenvolvida pela Daido. A Figura 40 ilustra o processo *Levicast*.

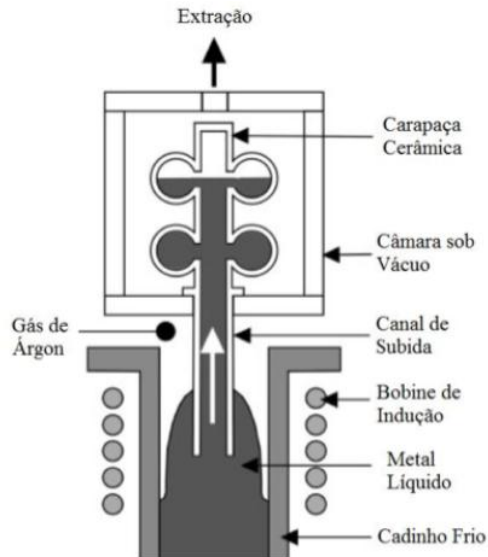


Figura 40 - Processo *Levicast* desenvolvido pela Daido [3], [4]

✓ **CLI – Vazamento do metal em atmosfera de gás inerte por baixa pressão** – este processo segue o mesmo tipo de funcionamento do processo CLV, contudo, só difere no facto de ser apenas na câmara de fusão que se realiza vácuo seguido de uma injeção de árgon. Quando a câmara da carapaça se junta à câmara de fusão, a primeira aspira o gás existente na câmara de fusão e só depois é que o tubo aspira o metal fundido. A Figura 41 apresenta um esquema do processo descrito.

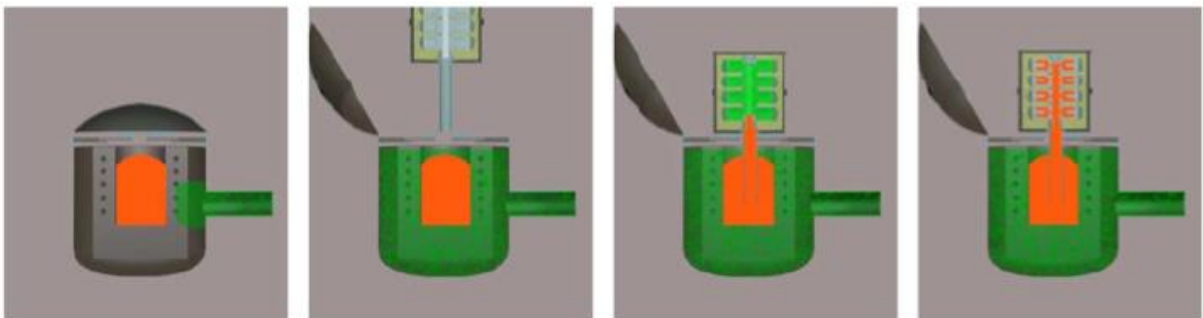


Figura 41 - Etapas do processo CLI [3], [40]

2.6 - Defeitos de Fundição

2.6.1 - Abordagem aos principais tipos de defeitos

Na maior parte das vezes, todos os produtos metalúrgicos apresentam imperfeições que contribuem para uma variação de qualidade das peças obtidas. Estas imperfeições consideradas como defeitos de fundição devem ser levadas em consideração de forma mais exigente [41].

De uma forma geral, os defeitos em fundição são provocados por diferentes aspetos [41]:

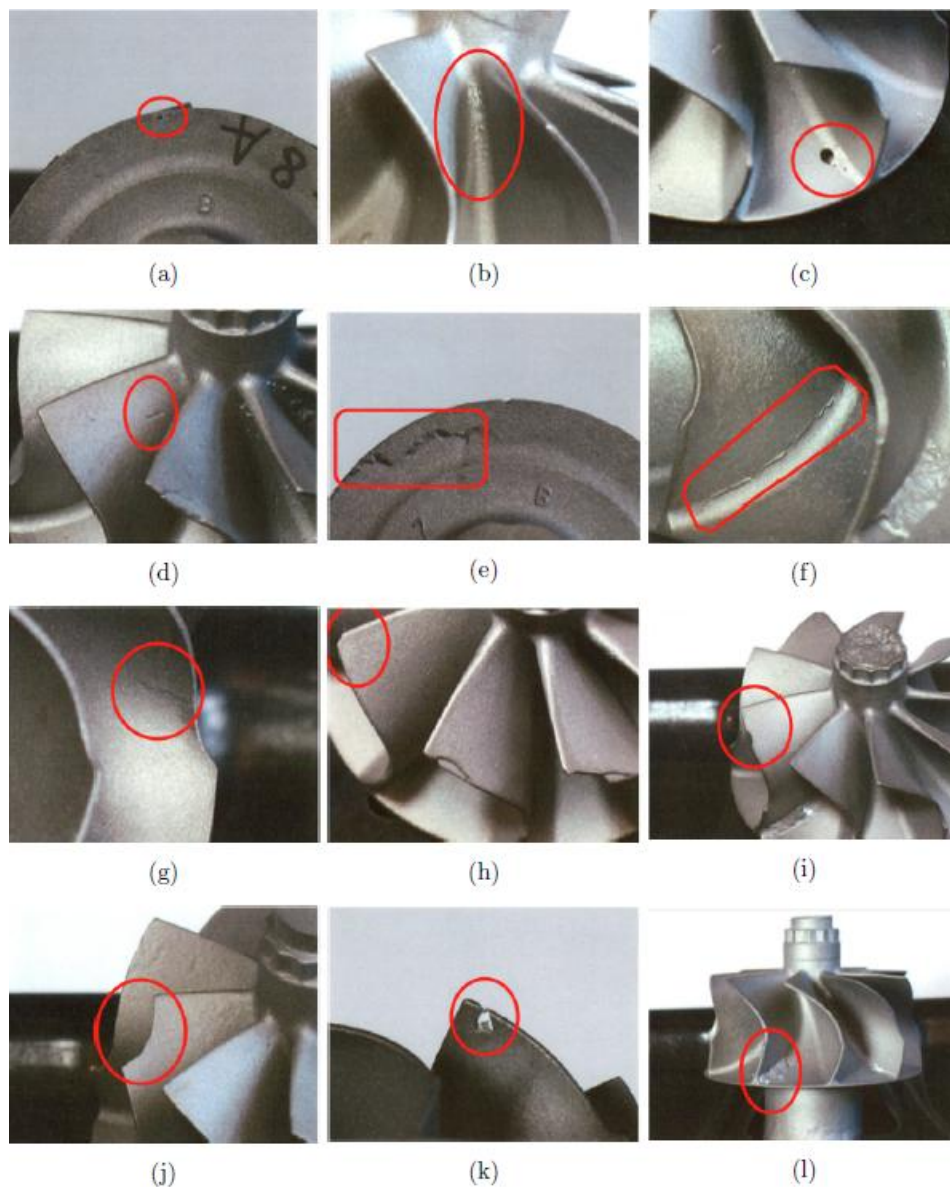
- ✓ Projeto da peça;
- ✓ O processo de fabrico;
- ✓ Erros humanos provenientes da aplicação do processo.

Na fundição de precisão, os principais defeitos verificados são: [2], [41]:

1. **Rechupes e microrechupes** – originados por falta de compensação da contração na solidificação com alimentadores;
2. **Porosidades** - este defeito pode ser resultado de uma fraca permeabilidade das carapaças ou turbulência no enchimento;
3. **Inclusões** - podem ser originadas devido à existência de partículas cerâmicas no interior das carapaças ou de um sistema de gitagem deficiente que provoca erosão nas moldações;
4. **Enchimentos incompletos** - podem ser motivados por uma falta de fluidez do metal, temperaturas do metal baixas ou vazamentos com uma velocidade de enchimento demasiado baixa.

2.6.2 - Tipos de defeitos da peça em estudo

Existem diversos tipos de defeitos encontrados nas turbinas, sendo estes, apresentados na Figura 42:



2.7 - Acabamento e inspeção

2.7.1 - Operações de acabamento

- ✓ Granalhagem;
- ✓ Corte dos cachos;
- ✓ Remoção dos cachos;
- ✓ Tratamentos térmicos;
- ✓ Maquinagem química.

2.7.2 - Inspeção

- ✓ Composição química da liga;
- ✓ Análise visual;
- ✓ Raios-x;
- ✓ Outros métodos.

Composição química da liga – a primeira operação de inspeção a realizar é um teste de verificação da liga. O teste é realizado ao conjunto antes do corte das peças. Um espectrómetro de emissão é usado para verificar se foi vazada a liga correta [23].

Análise visual – uma inspeção visual precoce é essencial para que peças já com defeitos não sejam passadas para as secções de corte, inspeção e acabamento. Algumas peças comerciais estão apenas sujeitas a inspeção visual [23].

Radiografia raio x – processo usado cada vez mais na indústria aeronáutica. É utilizado para detectar diferenças na densidade do material ou na espessura do material e para revelar defeitos internos como escória, rechupes, bolsas de ar e inclusões. Muitas peças são inspecionadas a 100%, no entanto, outras são inspecionadas de acordo com um plano previamente definido.

Mesmo quando este tipo de inspeção não é necessária, pode ser usada como uma ferramenta de controlo do processo de fundição. Auxilia na operação de construção dos sistemas de gitagem para determinar o efeito provocado por mudanças no processo, monitoriza a eficiência do processo e soluciona possíveis problemas surgidos.

É também um processo muitas vezes usado para a inspeção de moldes que contêm frágeis machos cerâmicos que necessitam de ser avaliados no sentido de garantir que estes não estão partidos aquando do processo de injeção do modelo.

Geralmente os defeitos detetados por radiografia raio-x, nas peças metálicas, são reparados por maquinagem direta ou aplicação de solda direta à área afetada no entanto nem sempre é rentável e não pode ser aplicado a todas as ligas. Atualmente, muitas peças fundidas, incluindo as que não podem ser soldadas, estão a ser reparadas por *hot isostatic pressing*.

Outros métodos

- ✓ **Testes de dureza** são amplamente usados para verificar a resposta dos fundidos a tratamentos térmicos;
- ✓ **Análises químicas;**
- ✓ **Testes mecânicos** – as propriedades mecânicas são geralmente determinadas em separado em peças de teste;
- ✓ **Testes de verificação do tamanho do grão** – o tamanho do grão é verificado regularmente por técnicas metalográficas. Mesmo quando este tipo de inspeção não é utilizado, é usado como parte de novos processos de investigação. Decapagem eletrolítica também é utilizada para análise e deteção de defeitos dos grãos em solidificação direcionada e em solidificação monocristalina;
- ✓ **Testes de estanquidade;**

- ✓ **Controlo dimensional** – desde verificações manuais com micrómetro até estações de controlo com máquinas automáticas de geração de coordenadas tridimensionais capazes de analisar vários tipos de superfícies;

2.8 - Reatividade das ligas

Um dos principais problemas e um dos mais estudados nos últimos tempos é o problema da reatividade no vazamento de ligas Ti e TiAl. Uma vez que estas apresentam elevadas temperaturas de fusão, surgem problemas de reatividade com a envolvente do metal, como a atmosfera local ou a carapaça cerâmica. Estas reações provocam problemas nas peças, que obrigam a maquinagem final, encarecendo assim os custos de produção. Apesar de o processo de fundição de precisão ser considerado um processo *net shape*, nestes casos deve ser designado por *near net shape*, uma vez que a forma final da peça não é, desde logo, conseguida [42], [43], [44].

2.8.1 - Formação da camada α -case

A explicação mais coerente para existência deste fenómeno, passa pela dissolução de hidrogénio, azoto e essencialmente oxigénio dos materiais cerâmicos que constituem a carapaça cerâmica. A reação entre o metal e a carapaça leva à formação de TiO_2 e, em seguida, à solução sólida de oxigénio na superfície do titânio. Ao solidificar, o oxigénio difunde-se a alta temperatura pelo interior da liga [1], [45], [46].

A Figura 43 apresenta um diagrama de formação da camada α -case:

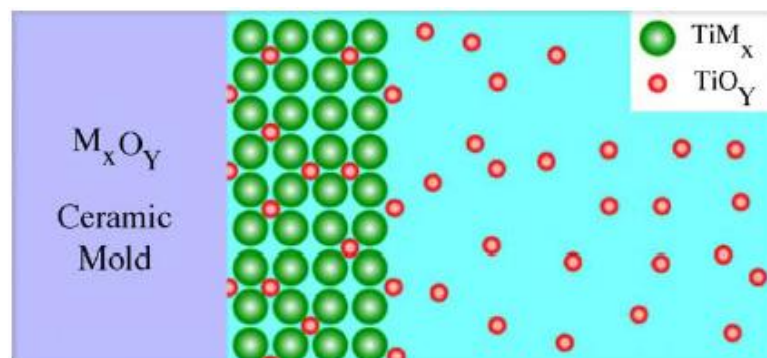


Figura 43 - Diagrama representativo da formação da camada α -case [43]

A espessura da camada está diretamente relacionada com diversos fatores sendo eles [42]:

- ✓ Atmosfera de fusão e vazamento;
- ✓ Velocidade de arrefecimento;
- ✓ Geometria da peça;
- ✓ Tempo de contato entre o metal fundido e a carapaça cerâmica;
- ✓ Turbulência no vazamento;
- ✓ Temperatura de pré-aquecimento.

A formação da camada leva a que se verifique nas peças fenômenos indesejados como [1], [42], [47]:

- ✓ Iniciação de fendas e sua propagação;
- ✓ Fragilização da liga, devido à alteração da microestrutura na superfície do fundido;
- ✓ Redução da resistência à fadiga e ductilidade.

De acordo com os estudos que têm vindo a ser realizados, possíveis soluções para minimizar o problema passam pela escolha do refratário e pelo modo de fusão e vazamento. O refratário deverá ser pouco reativo e a fusão e vazamento devem ser realizados em atmosfera de gás inerte de forma a se evitarem problemas de contaminação metal/atmosfera. A escolha mais correta do refratário deve levar em conta a energia livre de formação dos óxidos, tendo como referência o TiO_2 . O refratário a escolher deve apresentar energia mais negativa que a formação do dióxido de titânio.

Entende-se por energia livre de Gibbs (ΔG) como sendo uma medida de potencial termodinâmico que faz com que a reação aconteça. Quando um valor de ΔG é negativo significa que a reação ocorre no sentido direto, enquanto que um valor positivo representa o contrário. O sistema encontra-se em equilíbrio quando $\Delta G=0$. Sendo assim a equação que define a energia livre de formação de um elemento a temperatura constante é a seguinte:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Sendo o ΔH a variação de entalpia do sistema, T a temperatura absoluta e ΔS a variação de entropia. A Figura 44 representa um diagrama de Ellingham que demonstra a variação padrão da energia livre de formação de óxidos com a temperatura.

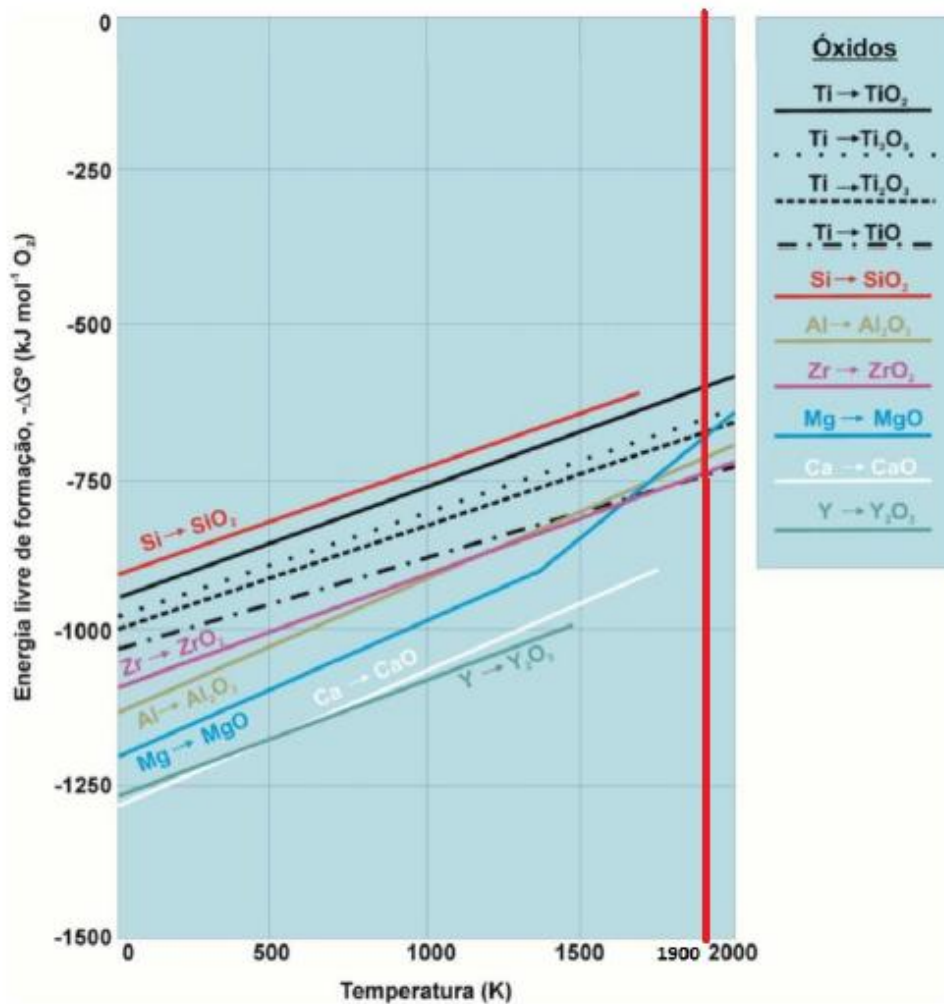


Figura 44 - Variação da energia livre de formação de óxidos com a temperatura [11]

Fazendo a análise à figura, o único óxido que se situa acima do TiO_2 é o SiO_2 . Sendo assim, para vaziar TiAl, os materiais cerâmicos mais adequados para fabricar carapaças são os que se situam abaixo deste:

- ✓ Al_2O_3
- ✓ ZrO_2 ;
- ✓ MgO
- ✓ CaO ;
- ✓ Y_2O_3 ;

Segundo estudos efetuados por Barrigana [1], a classificação da reatividade dos diferentes *facecoat's*, do menos reativo para o mais reativo, no vazamento de ligas TiAl e Ti6Al4V é:

1. AY (acrilato + ítria);
2. AAFY (acrilato + alumina fumada + ítria);
3. AFZr (alumina fumada+ zircónia);
4. SZ (zircão+ sílica coloidal).

De uma forma geral o TiAl é o metal menos reativo, com profundidades de α -case menores. Para o vazamento de cada tipo de liga o material que teve melhor comportamento em termos de reatividade foi a ítria (Y_2O_3), sendo este o melhor cerâmico para vazamento de ligas reativas.

Uma vez que a ítria apresenta um custo de produção bastante elevado e necessita de uma temperatura de sinterização elevada, Barrigana [1] achou relevante testar uma formulação para a camada de *facecoat* diferente das formulações geralmente usadas para estes tipos de ligas, de forma a ser possível baixar a temperatura de sinterização e os custos associados. Para tal, a barbotina que foi alvo de estudo foi a SZ, geralmente usada para vazamento de ligas de baixos pontos de fusão, como alumínio e cobre. Esta, como ainda apresenta níveis de reatividade consideráveis, é um objetivo, tentar que estes baixem.

2.8.2 - Influência do teor de alumínio na formação da camada α -case

Estudos conduzidos por Sung et al. [48] e Guilin et al. [45] examinaram a influência do teor de alumínio na formação de α -case. O estudo consistiu em teores que rondaram entre os 0 e 55% de Al com carapaças em Al_2O_3 . Concluíram que quando o teor de Al é inferior a 30 % são formadas camadas de reação bem distintas de α -case e quando é superior a 30 % não é perceptível a camada de reação α -case, podendo assim concluir que quanto maior a percentagem de alumínio menor é a camada de reação α -case. A Figura 45 apresenta imagens da região da interface metal/carapaça para diferentes teores de Al.

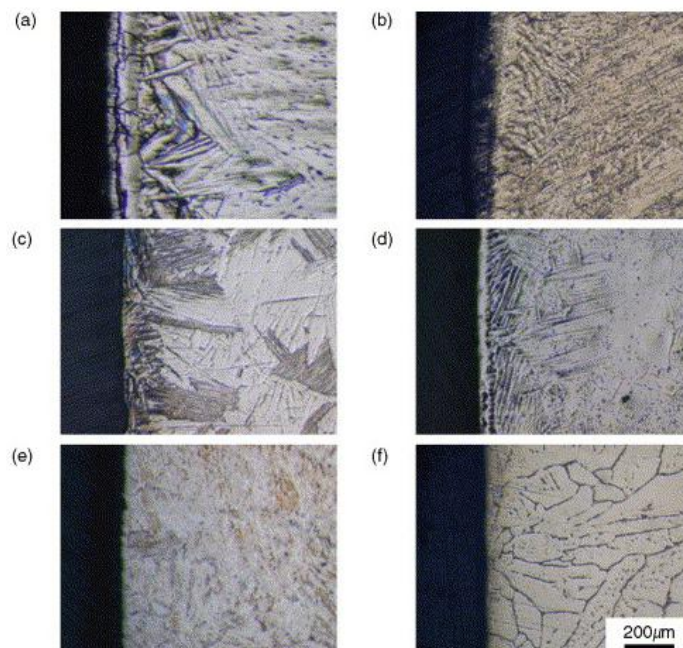


Figura 45 - Imagens da interface metal/carapaça para diferentes teores de Al: a) cp Ti, b) Ti-10Al, c) Ti-30Al, d)Ti-40Al, e) Ti-47Al e f) Ti-55Al [48]

Com a Figura 46 é possível verificar que a partir dos 30% de Al a dureza da camada α -case não sofre grandes alterações.

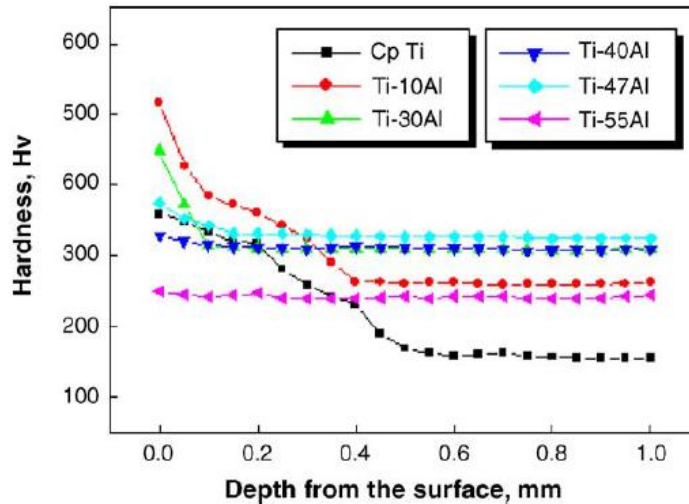


Figura 46 - Dureza da α -case consoante a profundidade e teor de alumínio [48]

2.8.3 - Métodos usados na avaliação da reatividade

As análises mais simples aos fundidos vazados, com resultados plausíveis para avaliar a reatividade são:

- ✓ **Análises das microdurezas** – medição das microdurezas na superfície polida e atacada de uma amostra desde a sua periferia até uma determinada profundidade;
- ✓ **Análises de microestrutura**

Embora nem sempre o perfil de contaminação de oxigénio seja semelhante ao de microdurezas, estas são uma excelente aproximação.

Análises das microestruturas de várias ligas, reconhecimento de fases, tamanho de grão, comportamento da liga quanto à solidificação, microporosidades e orientações de grão, são estudos a reter aquando da avaliação da profundidade da camada α -case.

2.8.4 - Métodos de remoção da α -case

Devido à impossibilidade de remoção da camada α -case com a recurso à maquinagem tradicional, uma vez que esta pode provocar fendas e sua propagação nas peças, outros métodos são utilizados no processo sendo designados por:

✓ **Maquinagem química** – dissolução química de uma certa quantidade de metal. A peça é submersa numa solução ácida até que uma nova camada surja à superfície, assegurando assim uma remoção uniforme do material. A solução ácida patenteada para ligas TiAl é a combinação de ácido fluorídrico, sulfúrico, cloreto de sódio e água, nas respetivas proporções, 2%,4%, 3,5% e 90,5% [49] [3];

✓ **Remoção por laser** – já se efetuaram estudos, realizados por Yue, Wang e Li [50], de forma a avaliar a viabilidade da utilização de laser de luz pulsada para remover a α -case de Ti6Al4V. No entanto, ainda muitos mais estudos devem ser feitos para aperfeiçoar o método para diferentes ligas e composições de α -case.

As figuras 47 e 48 mostram como foi utilizado o laser e as superfícies da amostra após irradiação.

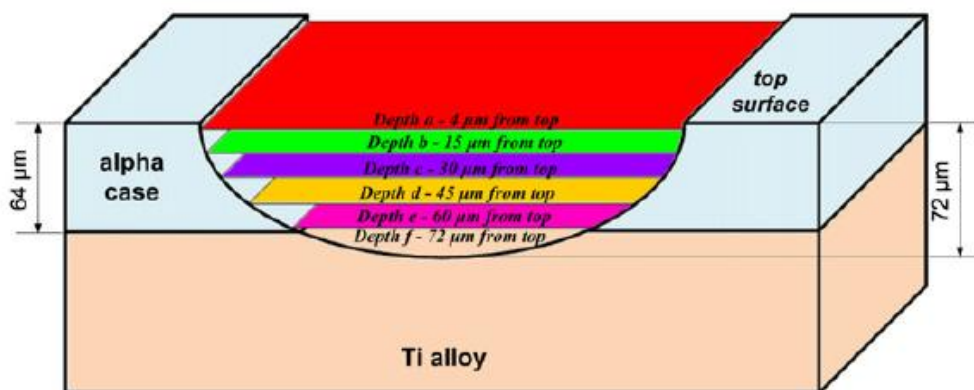


Figura 47 - Esquema da estrutura da seção transversal da amostra após irradiação laser [50] [1]

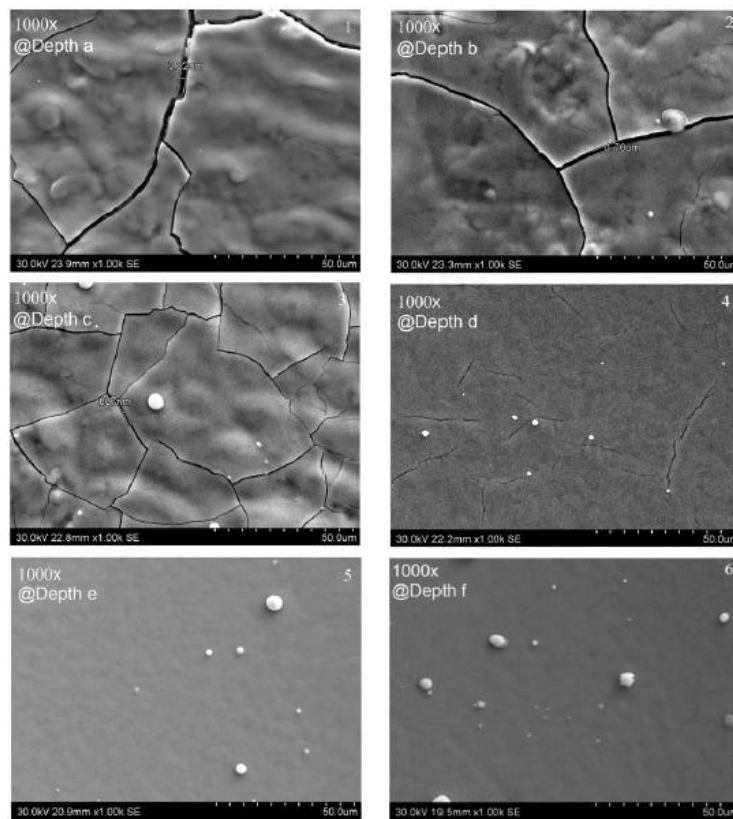


Figura 48 - Morfologia da α -case irradiada a diferentes profundidades a partir do topo [50] [1]

3. Procedimento experimental, resultados e sua discussão

Os trabalhos mais recentes realizados no INEGI em colaboração com a empresa *Zollern & Comandita* sobre fundição de precisão para vazamento de ligas TiAl, intitulam-se de “Estudo da reatividade de ligas de titânio e aluminetos de titânio fundidos com os refratários de carapaças cerâmicas” por Tiago Barrigana [1] e “Otimização do processo de obtenção de peças em aluminetos de titânio por fundição de precisão” por Francisco Torres [2].

Tiago Barrigana estudou o comportamento de diferentes *facecoat's*, em termos de reatividade com a liga vazada. Das formulações estudadas, a barbotina SZ (sílica + zircão), uma barbotina geralmente utilizada para o vazamento de ligas com pontos de fusão mais baixos, foi testada no vazamento de ligas TiAl. Esta barbotina de *facecoat* foi a que apresentou piores resultados a nível de reatividade.

Francisco Torres estudou os fenómenos de friabilidade e permeabilidade nas carapaças cerâmicas. Para além de estudos realizados em vários *facecoat's*, à barbotina SZ adicionou polímero, em diferentes quantidades e verificou que com esta adição a permeabilidade da carapaça aumentava, o que representa um efeito positivo na mesma. Por outro lado, o aumento observado nos níveis de friabilidade provoca um efeito negativo na carapaça cerâmica.

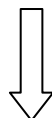
Visto que esta dissertação tem como objetivo dar seguimento aos temas de tese enunciados, sendo ainda uma prioridade, a melhoria de formulações “*low-cost*” para carapaças cerâmicas, a presente parte experimental incide sobre novas formulações de carapaças, com novas composições de barbotinas de *facecoat* capazes de baixarem os níveis de reatividade ainda presentes, entre a liga vazada e a primeira camada da carapaça cerâmica – *facecoat* e também diminuição dos custos. Os resultados obtidos serão comparados com os da dissertação do Tiago Barrigana.

A par destes estudos, também se realizaram outros em termos de friabilidade, com intuito de averiguar se com estas novas formulações, a friabilidade das carapaças melhorou relativamente aos ensaios realizados por Francisco Torres [2].

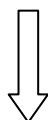
Acresce a estes trabalhos a determinação dos valores de contração da turbina na cadeia CAD-fabrico aditivo (cera) – liga (TiAl), tendo como objetivo determinar o erro do fabrico aditivo e os valores de contração da liga (TiAl), segundo os diferentes eixos.

Esquema resumo de estudos recentes relacionados com formulações de carapaças “low-cost” para vazamento de ligas reativas

Tiago Barrigana			
Estudo	Reatividade no vazamento de ligas TiAl		
Barbotina de facecoat	SZ	Sílica + Zircão	<i>Facecoat</i> de baixo custo face ao tradicional, utilizado no vazamento de ligas com baixo ponto de fusão
Resultados	Elevada reatividade entre os refratários e a liga vazada Frac permeabilidade da carapaça cerâmica		



Francisco Torres		
Estudo	Friabilidade e Permeabilidade das carapaças cerâmicas para vazamento de ligas TiAl	
Barbotina de facecoat	SAZ15%	Sílica + Polímero (15%) + Zircão
Resultados	Friabilidade - aumentou com a adição do polímero - negativo Permeabilidade - também aumentou com a adição do polímero - positivo	



O presente procedimento experimental		
Estudo	Novas composições “low-cost” de <i>facecoat</i> capazes de reduzirem a reatividade	
Barbotina de facecoat	SAZY4 / SAZY20	Sílica + Polímero (15%) + Zircão + Ítria chinesa

3.1 - Matérias-primas

Seguidamente serão apresentadas todas as matérias-primas utilizadas na atividade experimental: ligantes, farinhas cerâmicas, aditivos e areias cerâmicas.

3.1.1 - Ligantes

Na Tabela 10 estão representados os tipos de ligantes utilizados.

Tabela 10 - Caracterização dos ligantes usados

	Orgânico	Alumina fumada	Sílica Coloidal
Teor de sólidos, %	47+- 0,5	40 (Al ₂ O ₃)	30 (SiO ₂)
pH	9,3 – 10,2	6,0 – 9,0	-----
Viscosidade	10 – 60 (cPs)	≤ 2000(mPas)	-----
Densidade (g/cm³)	1,059	1,39	1,21
Preço (€/Kg)	3,15	13,5	5,0

3.1.2 - Farinhas cerâmicas

As farinhas cerâmicas utilizadas no procedimento experimental foram as usadas normalmente pelo INEGI para o fabrico das carapaças cerâmicas, específicas para o vazamento de ligas de Ti e TiAl em fundição de precisão. A Tabela 11 apresenta as farinhas utilizadas nas barbotinas de *facecoat* e a Tabela 12 apresenta as farinhas utilizadas nas barbotinas de *backup*.

Tabela 11 - Caracterização das farinhas utilizadas para *facecoat*

	Ítria fundida		Ítria chinesa		Silicato de Zircônio (Zircão)
Referência	-200 mesh	-325 mesh	4-7 μm	20-100 μm	-250 mesh
Temperatura de fusão (°C)	2500				2420
Preço (€/Kg)	83		6		4,5

Tabela 12 - Caracterização das farinhas utilizadas para *backup*

	Alumina fundida branca		Sílica Fundida
Referência	-200 mesh	0-30 μm	-200 mesh
Temperatura de fusão (°C)	2072		1720
Preço (€/Kg)	19		3,15

3.1.3 - Aditivos

Os aditivos utilizados para a mistura das barbotinas estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Aditivos usados nas barbotinas

	Composição	Estado
Aditivo sinterização	TiO ₂	Sólido
Dispersante desfloculante	Ácido carboxílico	Líquido
Espessante	Emulsão ácida com polímero de acrílico	Líquido
Molhante	Álcool alcóxilato	Líquido
	Éter poliglicol de álcool graxo	Líquido
Anti-espumante	Polidimetilsiloxano	Líquido
	Óleo mineral	Líquido

3.1.4 - Areias cerâmicas

As areias usadas como *stucco* para as camadas de *facecoat* e *backup* estão apresentadas nas Tabelas 14 e 15, respectivamente.

Tabela 14 - Areias usadas para as camadas de *facecoat*

	Ítria fundida	Zircão
Referência	125-250 µm	100-250 µm
Temperatura de fusão (°C)	2500	2420
Custo (€/Kg)	85	2,2

Tabela 15 - Areias usadas para as camadas de *backup* (ver anexo A: Granulometria)

	Alumina fundida branca		Aluminosilicatos (chamotte)	
Referência	<i>60 FEPA</i>	<i>36 FEPA</i>	0,2-0,5 mm	0,5-1 mm
Temperatura de fusão (°C)	2072		1870	
Custo (€/Kg)	1,435		0,90	0,80

3.2 - Formulações para carapaças cerâmicas

No presente capítulo, primeiramente serão apresentadas as formulações de *facecoat* e *backup* utilizadas para vazamento de ligas Ti e TiAl, seguindo-se as formulações das novas barbotinas de *facecoat* desenvolvidas ao longo deste trabalho.

3.2.1 - Formulações para ligas de Ti e TiAl

Formulações para camadas de *facecoat*

Segundo Tiago Barrigana, as formulações existentes no INEGI com menores níveis de reatividade para ligas Ti e TiAl são:

- ✓ AY 1% TiO₂ (ligante: orgânico / farinha: ítria);
- ✓ AFZrYC (ligante: alumina fumada / farinhas: zircónia e ítria chinesa)

A barbotina AY 1% TiO₂ é normalmente utilizada como camada de *facecoat* em carapaças para o vazamento de ligas Ti e TiAl e é a existente no INEGI que apresenta os melhores resultados em termos de reatividade. A Tabela 16 apresenta a sua composição.

Tabela 16 - Composição da barbotina AY 1%TiO₂

Composição / Proporções		
Constituintes	Composição	Peso (%)
Ligante	Orgânico	10
Água	H ₂ O	6,7
Farinha	Ítria -200 mesh	41,7
Farinha	Ítria -325 mesh.	41.7
Fundente	TiO ₂ 100 mesh	1 da farinha total
Dispersante Desfloculante		0,1 do ligante
Espessante		0,5 do ligante
Molhante		1 do ligante
Anti – espumante		1 do ligante

A barbotina AFZrYC é usada também nas camadas de *facecoat* para ligas reativas e é constituída por um ligante de alumina fumada juntamente com farinha de zircónia e ítria chinesa. Apresenta um custo mais baixo do que a barbotina AY 1% TiO₂ no entanto, no que diz respeito à reatividade apresenta piores resultados. A Tabela 17 apresenta a sua composição.

Tabela 17 - Composição da barbotina AFZrYC

Composição / Proporções		
Constituintes	Composição	Peso (%)
Ligante	Alumina Fumada	16
Água	H ₂ O	4
Farinha	Zircónia estabilizada com 6% ítria -200 mesh	64
Farinha	Ítria chinesa 20-100 µm	16
Molhante		0,05 do ligante
Anti-espumante		0,05 do ligante

Formulação para camadas de *backup*

A barbotina AFAL é usada para as camadas de *backup* nas carapaças cerâmicas com camadas de *facecoat* de AY 1% TiO₂. Esta é constituída por um ligante de alumina fumada com farinha de alumina. Usa-se quando se necessita de maior resistência ao choque térmico, ou seja, uma maior condutividade térmica e um menor coeficiente de expansão térmica. A sua composição está presente na Tabela 18.

Tabela 18 - Composição da barbotina AFAL

Composição / Proporções		
Constituintes	Composição	Peso (%)
Ligante	Alumina Fumada	32,55
Água desionizada	H ₂ O	2,45
Farinha	Alumina fundida branca -200 mesh	32,5
Farinha	Alumina fundida branca 0-30 µm	32,5
Anti-espumante		0,1 do ligante

Formulações de Zircão

O elevado custo da ítria (83€/Kg) e também o facto de esta necessitar de elevadas temperaturas de sinterização (1450°C), fizeram com que fossem testadas formulações de zircão (formulações “*low-cost*” comparativamente ao tradicional), para *facecoat*. Assim, Francisco Torres e Tiago Barrigana, analisaram-nas em termos de friabilidade/permeabilidade e reatividade, respetivamente. Estas formulações são normalmente utilizadas para ligas com ponto de fusão mais baixo, no entanto, foram neste caso utilizadas para o vazamento de ligas reativas. O objetivo é reduzir as temperaturas de sinterização e utilizar materiais mais económicos, para redução dos custos totais. A composição da barbotina SZ é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Composição da barbotina SZ

Composição / Proporções		
Constituintes	Composição	Peso (%)
Ligante	Sílica coloidal com látex	18,5
Farinha	Silicato de zircônio ou zircão -250 mesh	81,5
Molhante		0,05 do ligante
Anti-espumante		0,05 do ligante

A composição da formulação SAZ com adição de polímero, para os estudos de friabilidade e permeabilidade efetuados por Francisco Torres, é apresentada na Tabela 20.

De referir, que estas duas barbotinas SZ e SAZ15%, eram as barbotinas de *facecoat* existentes no INEGI, no início desta dissertação.

Tabela 20 - Composição da barbotina SAZ15%

Composição / Proporções		
Constituintes	Composição	Peso (%)
Ligante	Sílica coloidal com látex	13
Polímero	Orgânico	6
Farinha	Silicato de zircônio ou zircão -250 mesh	80
Água	H ₂ O	1
Molhante		0,05 do ligante
Anti-espumante		0,05 do ligante

A barbotina utilizada para as camadas de *backup* foi a barbotina SFF, cuja composição é apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 - Composição da barbotina SFF

Composição / Proporções		
Constituintes	Composição	Peso (%)
Ligante	Sílica coloidal com látex	16,5
Farinha	Sílica Fundida	81,5

De referir ainda que as barbotinas cujo ligante é a sílica coloidal não necessitaram de adição de água inicialmente, pois este ligante, sendo uma solução aquosa de 30% de sílica coloidal e 70% de água, permite obter misturas uniformes sem adição de água.

3.2.2 - Novas formulações para barbotinas de *facecoat*

Inicialmente, para realização dos primeiros testes, a barbotina SAZ15% existente no INEGI foi repartida em duas tinas. De acordo com as duas granulometrias de ítria chinesa existente no INEGI foram formuladas as novas barbotinas. Uma com adição de ítria chinesa 4-7 μm e outra com 20-100 μm , nas devidas proporções. A Figura 49 apresenta um esquema do procedimento realizado.

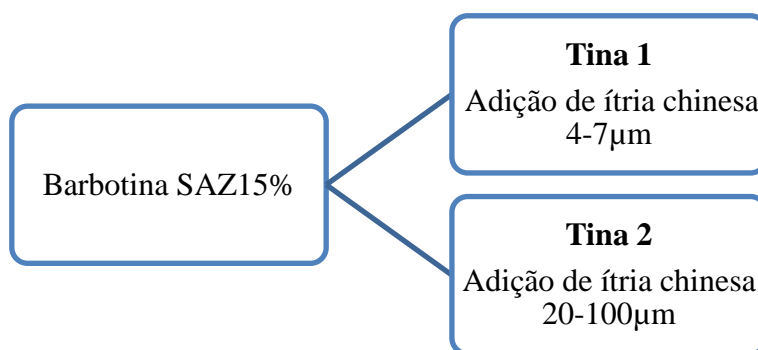


Figura 49 - Esquema do procedimento realizado.

Mais tarde, sendo necessária a realização de novas barbotinas de raiz, as formulações foram ajustadas para uma relação farinha/líquido de 3 para 1.

A percentagem de farinha de zircão da formulação SAZ15% foi reduzida em 50%, com posterior adição, na mesma percentagem, de ítria chinesa. Para cada formulação de barbotina foi adicionada ítria 4-7 μm e 20-100 μm .

A composição das duas barbotinas é apresentada nas Tabelas 22 e 23.

Tabela 22 - Composição da barbotina SAZY4

Composição / Proporções			
Constituintes	Composição	Relação	Peso (%)
Ligante	Sílica coloidal com látex	1,7 Kg	17
Polímero	Orgânico	0,8 Kg	8
Farinha	Silicato de zircônio ou zircão -250 mesh	3,75 Kg	37,5
Farinha	Ítria chinesa 4-7 µm	3,75 Kg	37,5
Molhante			0,05 do ligante
Anti-espumante			0,05 do ligante
Propriedades reológicas			
Viscosidade (s)			16-20
pH			9-10
Densidade média (g/cm³)			2,45
Temperatura (°C)			22-24

Tabela 23 - Composição da barbotina SAZY20

Composição / Proporções			
Constituintes	Composição	Relação	Peso (%)
Ligante	Sílica coloidal com látex	1,7 Kg	17
Polímero	Orgânico	0,8 Kg	8
Farinha	Silicato de zircônio ou zircão -250 mesh	3,75 Kg	37,5
Farinha	Ítria chinesa 20-100 µm	3,75 Kg	37,5
Molhante			0,05 do ligante
Anti-espumante			0,05 do ligante

3.2.3 - Resumo das formulações realizadas

Nas Tabelas 24, 25 e 26 são apresentadas as várias formulações realizadas durante a atividade experimental.

Tabela 24 - Resumo das formulações inicialmente realizadas

	Camadas	Barbotina	Areia	Barbotina	Areia
Facecoat	1	AY 1% TiO ₂	Ítria 125-250 µm	SZ	Zircão 100-250 µm
	2	AY 1% TiO ₂	Ítria 125-250µm		
Backup	3	AFAL	Al ₂ O ₃ 60 FEPA	SSF	AlSiO ₄ 0,2-0,5mm
	4	AFAL	Al ₂ O ₃ 60 FEPA	SSF	AlSiO ₄ 0,2-0,5mm
	5	AFAL	Al ₂ O ₃ 36 FEPA	SSF	AlSiO ₄ 0,5-1mm
	6	AFAL	Al ₂ O ₃ 36 FEPA	SSF	AlSiO ₄ 0,5-1mm
	7	AFAL	Al ₂ O ₃ 36 FEPA	SSF	AlSiO ₄ 0,5-1mm
	8	AFAL	Al ₂ O ₃ 36 FEPA	SSF	AlSiO ₄ 0,5-1mm
Banho de selagem	9	AFAL		SSF	

Tabela 25 - Formulações com barbotina SAZY4

Nº formulação	Facecoat	Areia de Facecoat	Nº facecoat's	Backup	Areia de Backup
1	SAZY4	Zircão 100-250 µm	1	SSF	AlSiO ₄
2	SAZY4	Zircão 100-250 µm	2	AFAL	Al ₂ O ₃
3	SAZY4	Zircão 100-250 µm	1	AFAL	AlSiO ₄

Tabela 26 - Formulações com barbotina SAZY20

Nº formulação	Facecoat	Areia de Facecoat	Nº facecoat's	Backup	Areia de Backup
1	SAZY20	Zircão 100-250 µm	1	SSF	AlSiO ₄
2	SAZY20	Zircão 100-250 µm	2	AFAL	Al ₂ O ₃
3	SAZY20	Zircão 100-250 µm	1	AFAL	AlSiO ₄

3.2.4 - Primeiros trabalhos realizados

No início do procedimento experimental foram realizadas várias carapaças com as barbotinas já existentes - formulação tradicional de ítria – **AY 1%TiO₂** e formulações “*low-cost*” de zircão – **SZ e SAZ15%**. Os trabalhos realizados estão documentados na Tabela 27.

Peças

Para a realização dos primeiros testes e para se averiguar a qualidade das carapaças com as diferentes formulações realizadas foram utilizadas várias peças, sendo elas, turbina de pá curva, turbina Daimler, turbina de pá reta e pá de turbina. No entanto, foi dada atenção redobrada, à principal peça em estudo: turbina do turbocompressor. Estas encontram-se ilustradas nas Figuras 50, 51, 52 e 53.

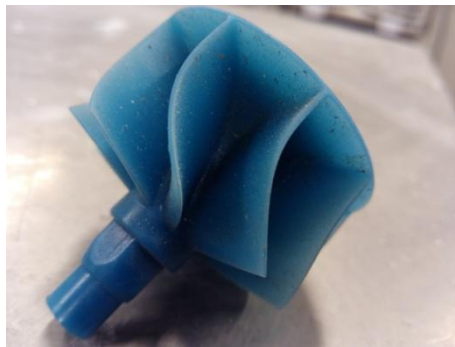


Figura 50 - Turbina pá curva - Ø43mm

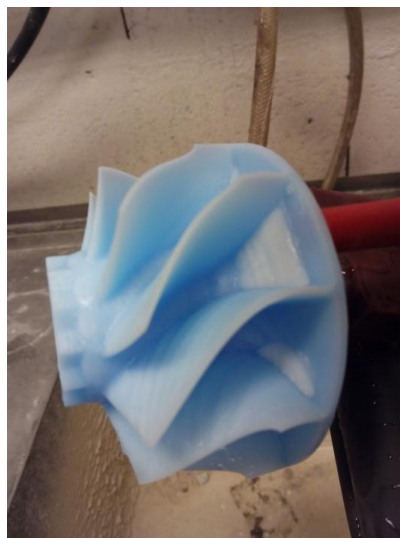


Figura 51 - Turbina Daimler - Ø88mm



Figura 52 - Turbina pá reta - Ø50mm



Figura 53 - Pá de turbina

Tabela 27 - Demonstração dos trabalhos inicialmente realizados

Peça	Barbotina de <i>facecoat</i>	Areia de <i>facecoat</i>	Nº de cachos	Barbotina de <i>backup</i>	Areia de <i>backup</i>
Turbina Zollern Ø43	SAZ15%	Zircão 100-250 µm	2	SSF	Aluminossilicatos 0,2-0,5/0,5-1mm
			2		Al ₂ O ₃ 60/36 FEPA
			4	AFAL	Aluminossilicatos 0,2-0,5/0,5-1mm
	AY 1%TiO ₂	Ítria 125-250 µm	2	AFAL	Al ₂ O ₃ 60/36 FEPA
Turbina Daimler Ø88	AY 1%TiO ₂	Ítria 125-250 µm	4	AFAL	Al ₂ O ₃ 60/36 FEPA
Haste femoral			4		
Prótese Joelho			4		
Pino Joelho			4		

Relativamente ao trabalho realizado nas peças para o ramo da saúde, foram realizadas experiências na alteração da viscosidade da barbotina, para aplicação da segunda camada de *facecoat*, de modo a tirar conclusões quanto à sua influência na friabilidade da camada. Para tal as peças foram divididas em 2 grupos como apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 - Demonstração do processo realizado

Grupo	Primeira camada de <i>facecoat</i>	Viscosidade (s)	Segunda camada de <i>facecoat</i>	Viscosidade (s)
1	AY 1%TiO ₂	22-24	AY 1%TiO ₂	22-24
2				12-14

Em relação aos trabalhos realizados já com as novas barbotinas de *facecoat* (SAZY4 e SAZY20), foram realizadas várias formulações de carapaças, com um e dois *facecoat's*, e com várias combinações entre barbotinas e areias de *backup*. Estes primeiros ensaios foram realizados de forma a determinar a viabilidade de utilização destas formulações para obtenção de carapaças cerâmicas. A composição das novas barbotinas e das diferentes formulações foi apresentada nos pontos 3.1.3 e 3.1.4 (Tabela 25 e 26), respetivamente.

Conclusões:

Relativamente aos trabalhos realizados com as barbotinas existentes, concluiu-se que:

A) Após descerificação de 2h a 1000°C:

- ✓ O grupo 1 apresentou muito boa friabilidade e superfície lisa.
- ✓ O grupo 2 apresentou boa friabilidade e superfície rugosa.

B) Após programa de sinterização a 1400°C:

- ✓ O grupo 1 apresentou muito boa friabilidade e superfície lisa.
- ✓ O grupo 2 apresentou boa friabilidade e superfície ainda um pouco rugosa.

Concluiu-se assim que a viscosidade das primeiras camadas de *facecoat* tem um papel determinante na friabilidade. Com valores mais altos de viscosidade há uma melhoria da friabilidade da camada, pois uma menor percentagem de água na barbotina permite uma melhor ligação entre as partículas cerâmicas e, conseqüentemente, superfícies mais lisas.

Relativamente aos trabalhos realizados com as novas barbotinas, analisaram-se as carapaças e foram tiradas conclusões quanto às fissurações existentes e à friabilidade. Nesta fase a análise dos resultados de friabilidade foi quantificada com o “dedo do operador”. Posteriormente foram realizados ensaios mais precisos que serão apresentados no ponto 3.4 – Friabilidade.

A Tabela 29 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 29 - Resultados com barbotina SAZY4

Nº da formulação	Peças	Temperatura de Sinterização (°C)	Friabilidade	Fissuração	Observações
1	Turbina - pá curva	1450	Boa	Não apresentou	Empeno na pia de vazamento; acentuada contaminação.
	Turbina pá reta	1300	Boa	Não apresentou	Ligeira contaminação
	Pá de turbina	1200	Boa	Não apresentou	-----
2	Turbina - pá curva	1450	Muito boa	Não apresentou	Acentuada contaminação
	Turbina pá reta	1300	Muito boa	Não apresentou	Ligeira contaminação
	Pá de turbina	1200	Boa	Não apresentou	Estrutura frágil
3	Turbina - pá curva	1450	Muito boa	Apresentou	Pia fissurada nos dois lados; moderada contaminação
	Turbina pá reta	1300	Muito boa	Apresentou	Pia fissurada num só lado, ligeira contaminação
	Pá de turbina	1200	Muito boa	Apresentou	Bordo lateral fissurado; bordo da pia partido

Relativamente às formulações realizadas com barbotina de *facecoat* SAZY4, os resultados obtidos pode-se dizer que foram bastante satisfatórios. A friabilidade foi, de um modo geral, boa e a contaminação que se verificou pode ser proveniente de possíveis resíduos existentes no forno de sinterização, todavia, é necessária uma análise microscópica de forma a aferir a validade da proposição anteriormente referida. Analisando a tabela, a formulação que à primeira vista pareceu apresentar melhores resultados é a número dois. Não se verificaram fissurações e apresentou boa friabilidade.

As mesmas formulações foram também realizadas com barbotina de *facecoat* SAZY20, no entanto, após descerificação de 2h das carapaças a 1000°C, os resultados obtidos não foram os melhores. A camada de *facecoat* desagregou-se, empulou e descolou da segunda camada, tornando a carapaça excessivamente friável. Por se pensar que estes resultados tenham sido devidos a vários problemas de ajuste desta barbotina, como relações farinha/liquido, viscosidade e tamanho das partículas da farinha (20-100µm), os testes foram repetidos.

A barbotina foi formulada novamente e mesmo assim, sucedeu-se o mesmo. A camada já não empulou nem se desintegrou, no entanto, devido à fraca ligação entre as partículas, manteve-se muito friável. Como forma de quantificar precisa e corretamente os níveis de friabilidade, foram feitos testes, que podem ser consultados no ponto 3.4.2.

A Figura 54 ilustra as contaminações, fissurações e o estado da camada de *facecoat*.

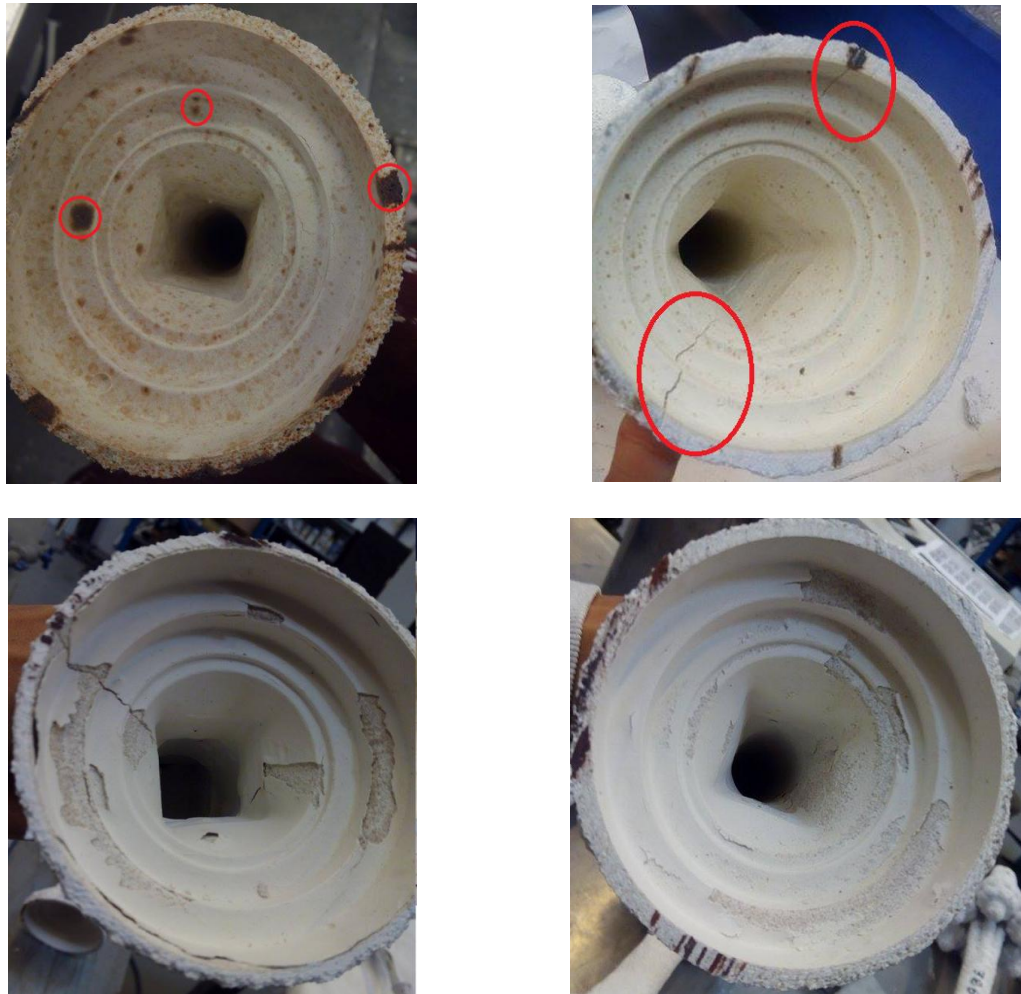


Figura 54 - Carapaças com contaminação; fissuração; *facecoat's* excessivamente friáveis.

3.3 - Processo de fabrico

3.3.1 - Obtenção dos modelos em cera

O organigrama apresentado na Figura 55 representa a sequência de fabrico do modelo, em cera, desde a preparação do molde, até ao modelo final em cera.

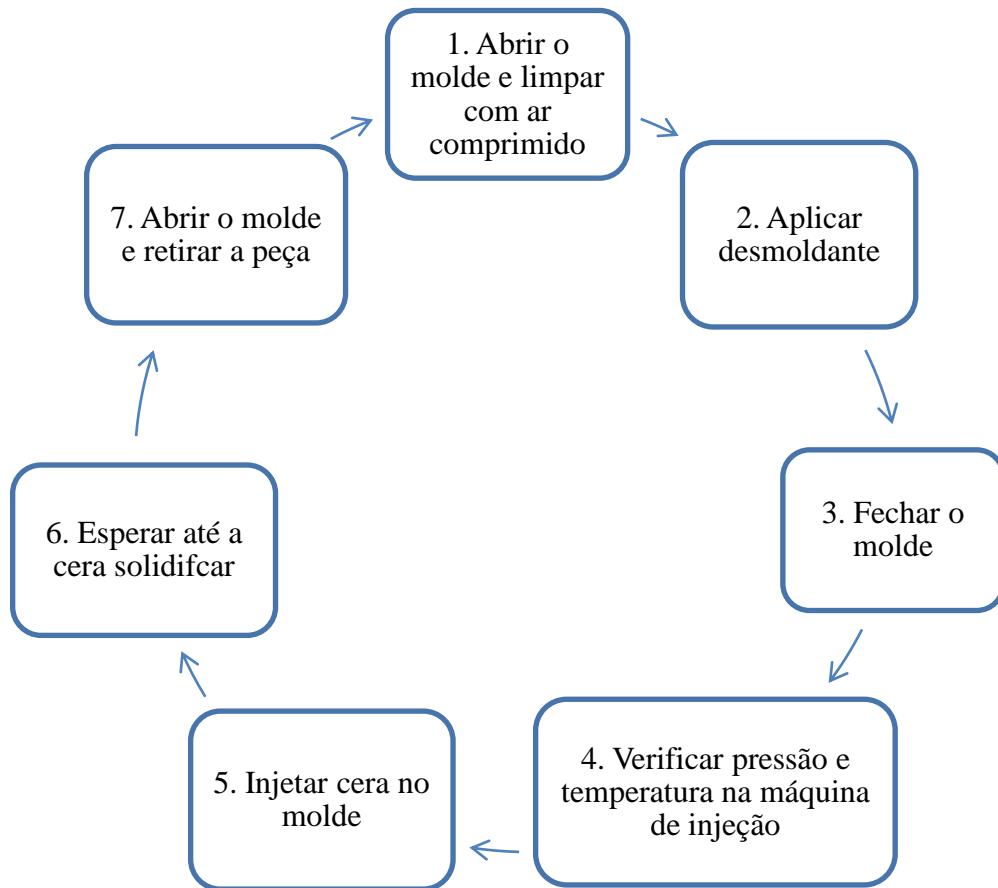


Figura 55 - Esquema do processo de obtenção do modelo em cera

1. Figura 56 - Molde aberto para limpeza com ar comprimido e aplicação do desmoldante.



Figura 56 - Molde de turbina do INEGI

2. Figura 57 - Fecho do molde e preparação para injeção.



Figura 57 - Fecho do molde e preparação para injeção

3. Figura 58 - Controlo da pressão e temperatura

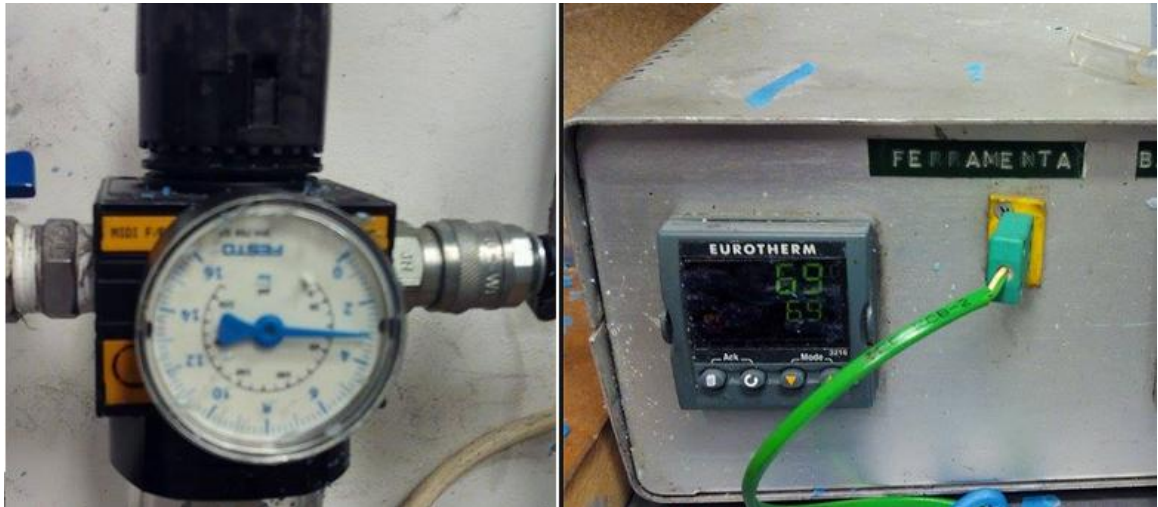


Figura 58 - Controlo da pressão e temperatura

4. Figura 59 - Abertura do molde e posterior remoção da peça do seu interior.



Figura 59 - Abertura do molde

Na Tabela 30 são apresentados os tipos de cera utilizados na construção dos modelos e na colagem dos cachos.

Tabela 30 - Tipos de cera utilizados

Fabricante	Material	Processamento	Constituinte do cacho	Cor
<i>Argueso - Cerita</i>	F27-74	Partículas semi-esféricas Ø6 mm	Modelo	Azul
<i>Freeman</i>	Ferris File-A-Wax	Perfil cilíndrico de Ø18 mm de diâmetro	Canais de alimentação	Vermelha
<i>Remet</i>	Stickite	Partículas esféricas Ø6 mm	Colagem dos componentes	Amarela

A Figura 60 apresenta os diferentes tipos de cera.



Figura 60 - a) Cera Argueso – cerita; b) Cera cola Remet – Sticktite; c) Cera Argueso – perfil cilíndrico

Os diferentes moldes utilizados para injeção dos vários constituintes do cacho são apresentados nas Figuras 61 e 62.

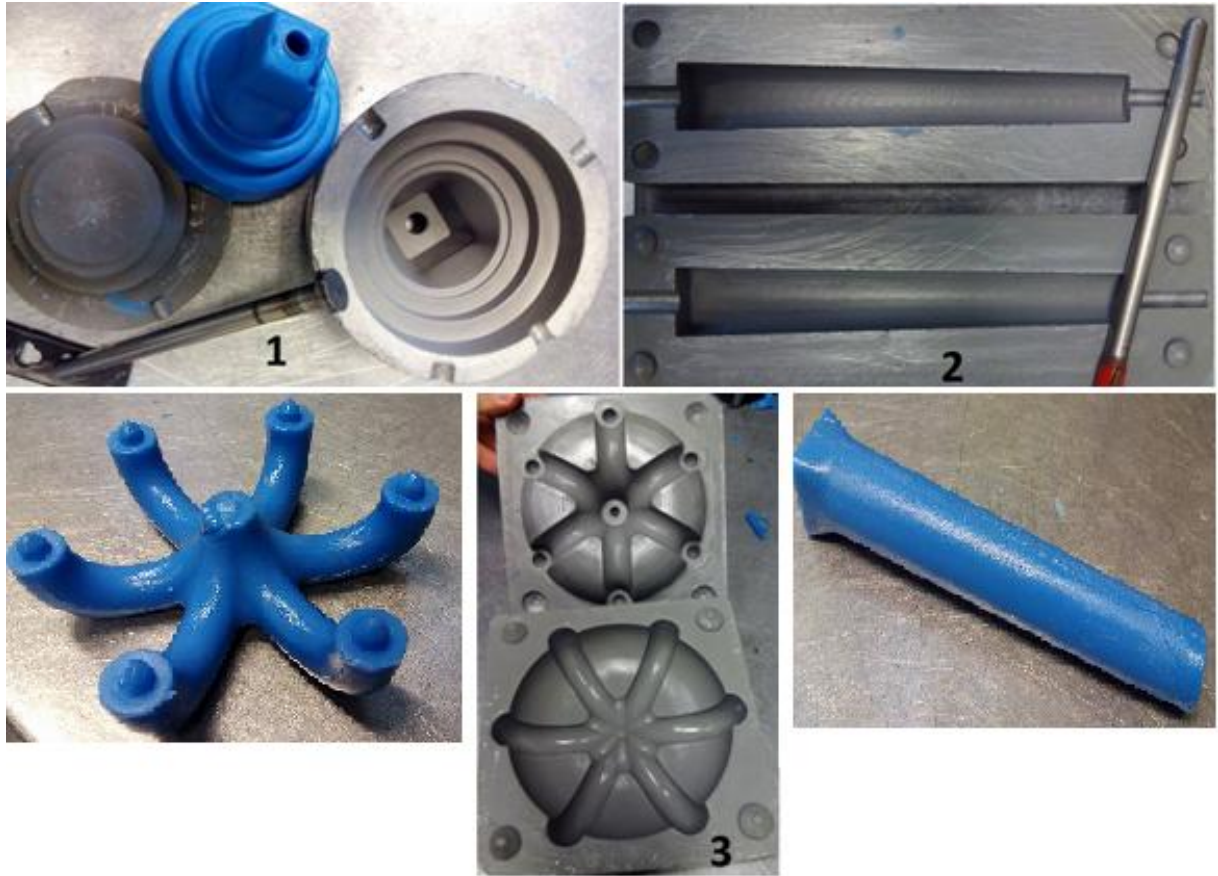


Figura 61 - 1) Molde - Pia de vazamento; 2) e 3) Molde - Sistema de Gitagem



Figura 62 - Molde de turbina do INEGI

A injeção da cera foi feita de forma manual. Durante a injeção os parâmetros usados foram os seguintes:

- ✓ **Pressão de injeção:** 2,5 bar
- ✓ **Temperatura da cera:** 69°C

A Figura 63 apresenta a máquina de injeção do INEGI e o desmoldante – DOMAX Silicone – aplicado no molde antes de todas as injeções. É importante referir que o bico de injeção da máquina deve ser frequentemente limpo, de forma a não ficar entupido e a não prejudicar a injeção. Também na altura de enchimento da cuba, deve-se proceder a uma homogeneização da cera existente, com a cera introduzida, de forma a promover uma maior fluidez da mesma durante a injeção.



Figura 63 - Máquina de injeção e desmoldante

A Figura 64 apresenta o cacho final, já com todos os componentes colados, pronto para ser preparado para iniciação da carapaça cerâmica.



Figura 64 - Cacho já com a colagem dos diversos componentes

3.3.2 - Preparação do cacho

O organigrama apresentado na Figura 65 representa o processo de preparação do cacho para aplicação das camadas cerâmicas.

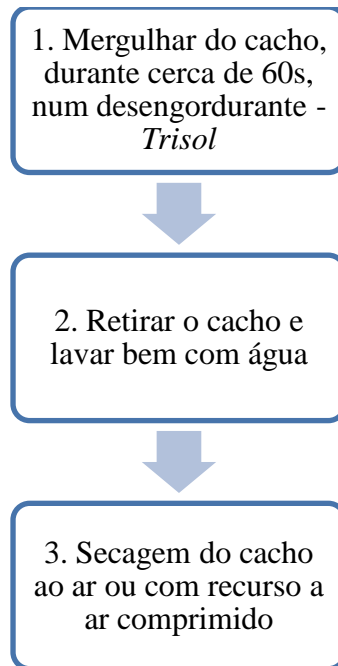


Figura 65 - Esquema do processo de preparação do cacho

O desengordurante utilizado foi o Trisol da marca *AutoKlene* sendo o seu ponto de inflamação na ordem dos 24°C. No presente trabalho, depois da passagem dos cachos por água, estes foram secos com recurso ao ar comprimido. A Figura 66 apresenta a tina com o desengordurante *trisol* e o mergulho de um cacho.



Figura 66 - Tina com *Trisol*

3.3.3 - Controlo das barbotinas

O controlo de qualidade das barbotinas, consiste na verificação diária dos parâmetros de pH, temperatura, densidade e viscosidade. Também é diariamente registada a humidade da sala. O controlo da viscosidade foi feito com recurso a uma copa *Zahn* nº4. O procedimento passa por mergulhar a copa na barbotina e, com recurso a um cronómetro, mediu-se o tempo que demorou o “fio” a quebrar sensivelmente a 5/6cm da superfície do medidor. Obteve-se assim o valor da viscosidade em segundos.

Quanto às medições do pH e temperatura, estas foram feitas com recurso a um medidor eletrónico *Testo 230*. Relativamente à densidade, foi sempre medida com um gobelé graduado de 100ml. A Figura 67 apresenta os procedimentos antes descritos.



Figura 67 - Gobelé 100ml; Copa Zahn nº4; Testo 230

3.3.4 - Deposição das barbotinas e areias cerâmicas

As carapaças cerâmicas são compostas por sucessivas camadas de barbotina e areia cerâmica. Foram realizadas formulações com uma e com duas camadas de *facecoat*, seguindo-se seis camadas de *backup* e por fim o banho de selagem. O esquema da Figura 68 representa o processo de realização de cada camada.

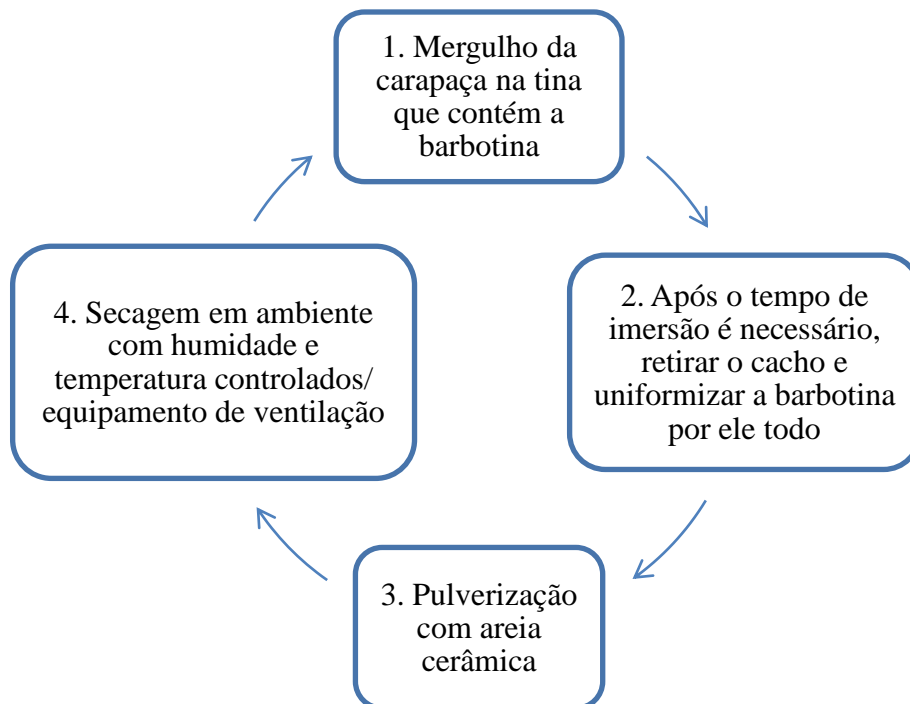


Figura 68 - Processo de realização de cada camada

É importante referir, que a última operação, é a realização de um banho de selagem com o objetivo de minimizar a libertação de partículas do exterior da carapaça, provocadas pelo seu manuseamento. Estas podem entrar para o interior e provocar defeitos nas peças a produzir.

Quanto aos tempos de imersão do cacho na barbotina, variam de acordo com o facto de se tratar de uma camada de *facecoat* ou *backup*. Para deposição das camadas de *facecoat*, situam-se na ordem dos 30 segundos e para as de *backup*, na ordem dos 60 segundos. Relativamente ao tempo de secagem entre aplicação de cada camada, para *facecoat* é de 3 horas, *backup* 2 horas e banho de selagem 12 horas. A Figura 69 apresenta o mergulho do cacho na barbotina e sua uniformização.



Figura 69 - Mergulho do cacho na barbotina e sua uniformização

3.3.5 - Corte das carapaças, descerificação e sinterização

Depois de terminado o processo de concepção da carapaça cerâmica, esta é submetida a um corte na zona da pia de vazamento. São realizados também diversos furos em sítios estratégicos de forma a facilitar a saída da cera e aliviar a pressão dentro da carapaça proveniente da expansão da cera, durante o processo de descerificação. A Figura 70 apresenta o processo de corte das carapaças.



Figura 70 - Processo de corte da carapaça cerâmica

Descrição das carapaças

Uma vez terminado o processo de corte, as carapaças seguem para o forno de descrição – forno *flash fire* existente no INEGI. Durante o processo, que é realizado durante 2 horas a 1000°C, a cera que se encontra no interior da carapaça derrete e, já líquida, sai do seu interior. É assim criada a moldação que servirá para vazamento e criação da peça final. A Figura 71 apresenta o forno com as carapaças cerâmicas.



Figura 71 - Carapaças no forno de descrição do INEGI

Sinterização das carapaças

Nesta fase as carapaças foram colocadas no forno de sinterização do INEGI e sujeitas a programas, cuja variável em causa foi a temperatura. Para as diferentes formulações foram feitos ciclos a diferentes temperaturas, sendo elas: 1200°C, 1300°C e 1450°C. A escolha destas temperaturas partiu de estudos anteriormente realizados [2], que justificam não ser necessária a realização de sinterizações acima dos 1450°C. É importante nunca menosprezar o interesse em baixar os custos de tecnologia principalmente os energéticos que lhe estão associados.

Com a realização do processo de sinterização, a ligação entre os grãos melhora, melhorando assim as propriedades da carapaça necessárias ao processo de vazamento. Uma vez que as temperaturas utilizadas não ultrapassaram as temperaturas de fusão dos refratários utilizados, pode-se considerar que se tratou de sinterização no estado sólido.

A Figura 72 apresenta um dos fornos de sinterização do INEGI.

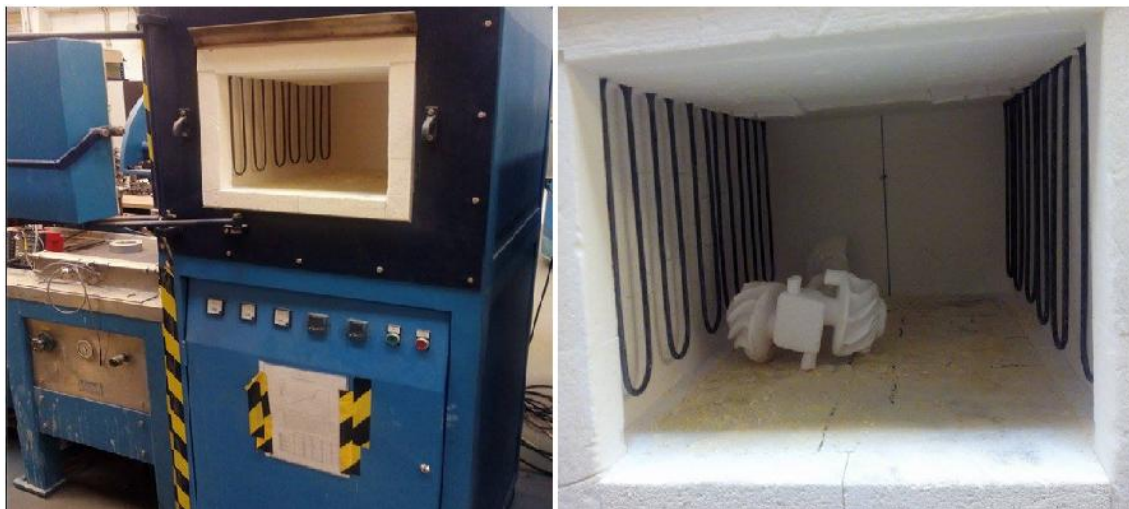


Figura 72 - Forno de sinterização com carapaça no seu interior

3.3.6 - Fusão e Vazamento por “single shot”

O processo de fusão e vazamento das ligas TiAl foi realizado no INEGI. É apresentado na Figura 73 um esquema do forno utilizado, e seguidamente o seu processo de funcionamento.

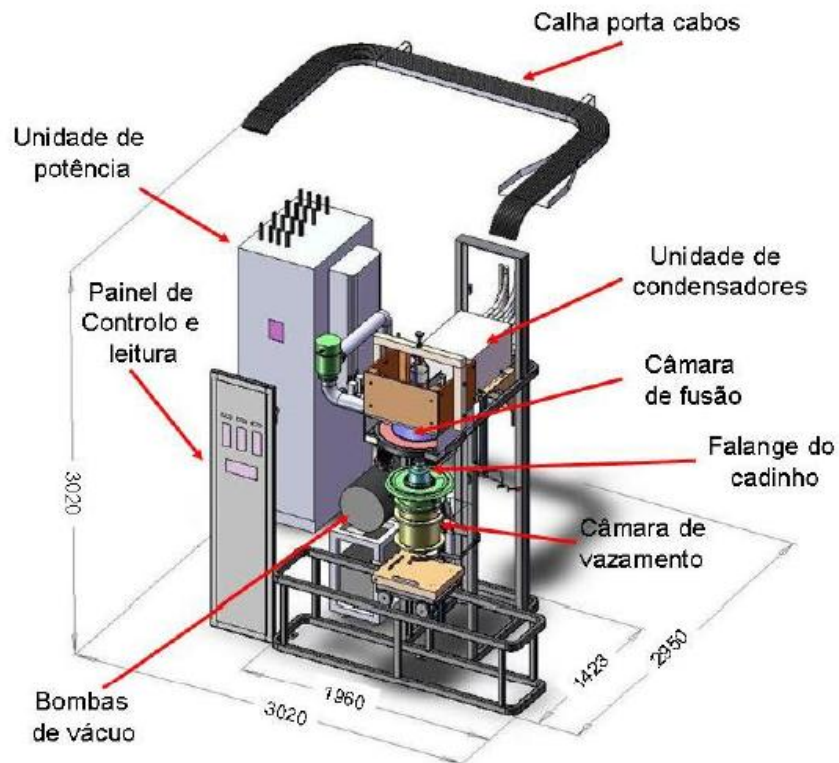


Figura 73 - Aspetto geral do forno de fusão e vazamento do INEGI [40]

O processo de fusão e vazamento por “single shot” com ou sem diferencial de pressões entre duas câmaras, é um processo comum dos fornos utilizados na produção de peças em Ti e TiAl. Estes processos utilizam duas câmaras posicionadas, uma sobre a outra, na vertical e ligadas entre si por um pequeno orifício central, Figura 74. Neste trabalho não foram usadas pressões diferenciais.

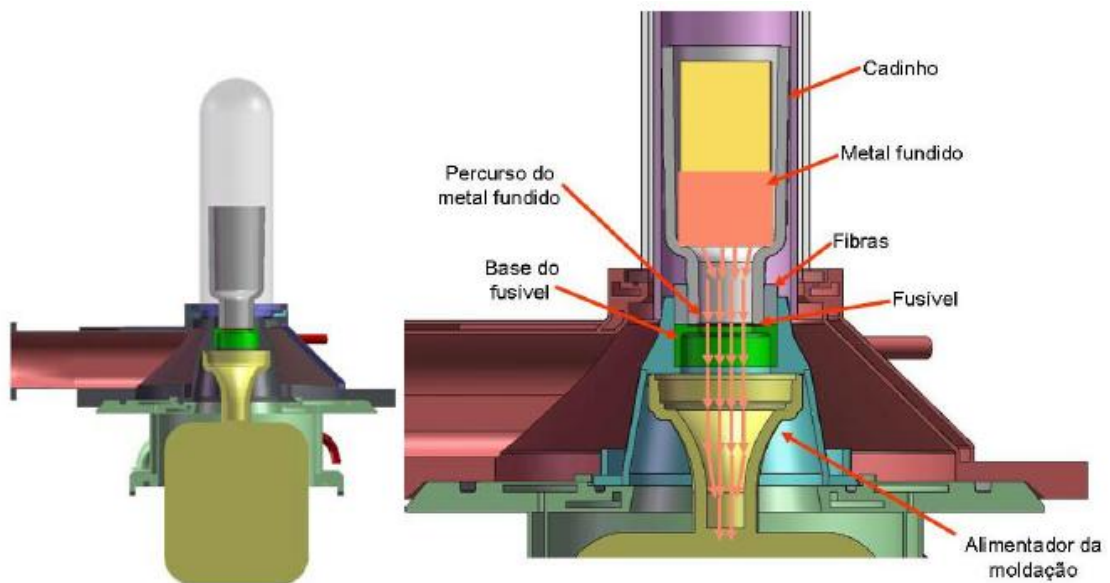


Figura 74 - As duas câmaras, cadinho, fusível e carapaça cerâmica [40].

A câmara superior é utilizada para a fusão do metal por indução, num cadinho de cobre refrigerado. A fusão do metal pode ser realizada através da utilização de cadinhos frios ou cadinhos cerâmicos. No caso do vazamento da liga em estudo TiAl, são utilizados cadinhos cerâmicos. A câmara inferior para o vazamento, serve para colocar a carapaça que vai receber o metal [40]:

- ✓ Válvula construída para o efeito;
- ✓ Disco metálico com a mesma liga a fundir;
- ✓ Próprio metal a fundir.

Esta técnica de “*single shot*” oferece um processo muito flexível e de baixo custo para a fusão de ligas reativas, com cadências de produção bastante elevadas.

Algumas vantagens deste processo são [40]:

- ✓ A velocidade de vazamento diminui o tempo de arrefecimento do metal entre a fusão e o vazamento, com benefícios do ponto de vista metalúrgico e do enchimento;
- ✓ Processo flexível porque permite alterar as bobinas de indução com grande facilidade e sem alterações ao sistema e ajustar a quantidade de metal a fundir;
- ✓ Redução dos espaços de instalação destes sistemas – sistemas de pequena dimensão;
- ✓ Grandes cadências de produção;
- ✓ Processo económico do ponto de vista do material usado. Pode usar qualquer tipo de carga metálica, desde chapa, barra cilíndrica ou quadrada, tornando-se assim interessante no uso de retornos de chapa ou outros retornos derivados de trabalho a frio, por estarem menos contaminados e serem uma fonte de matéria-prima de qualidade, a baixo custo.

3.4 - Friabilidade

Com o objetivo de quantificar a friabilidade das diferentes formulações de carapaças realizadas, foram realizados ensaios baseados no método desenvolvido por Yuan et al [36], o qual está descrito no ponto 2.4.6 - Ensaios de verificação de qualidade.

3.4.1 - Fabrico dos provetes

O processo de injeção dos provetes é similar ao processo de injeção das diferentes peças constituintes do cacho. O processo de obtenção do modelo está descrito no ponto 3.3.1 - Obtenção dos modelos em cera.

O molde utilizado para a injeção do provete em cera, foi fabricado no INEGI, e é apresentado na Figura 75.



Figura 75 - Molde para injeção do provete

A Figura 76 apresenta o provete depois de injetado.

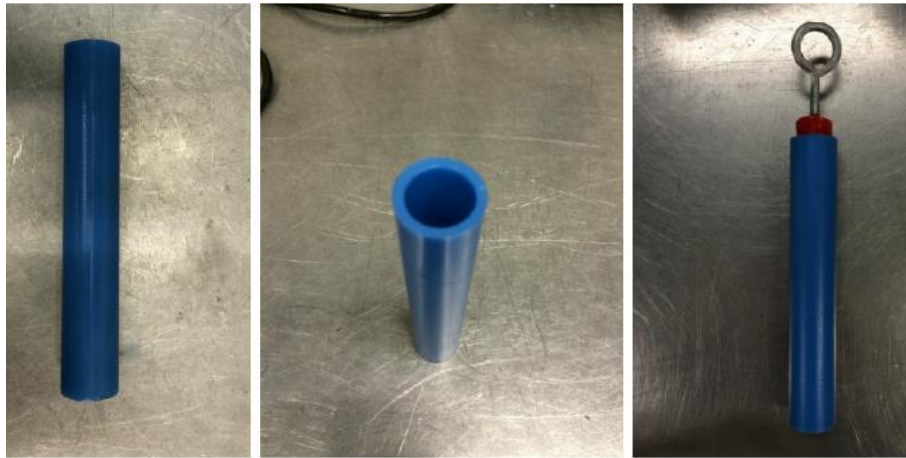


Figura 76 - Provet

Depois da injeção de todos os provetes necessários, realizou-se todo o processo de construção das carapaças, de acordo com as diferentes formulações realizadas. A Figura 77 ilustra o mergulho dos provetes em barbotina, durante a concepção da carapaça.



Figura 77 - Mergulho dos provetes na barbotina

3.4.2 - Ensaio realizados

Depois de finalizado o processo de construção das carapaças dos provetes, posterior descerificação e sinterização, foi realizada a quantificação dos níveis de friabilidade. A Figura 78 apresenta um organograma com o processo.

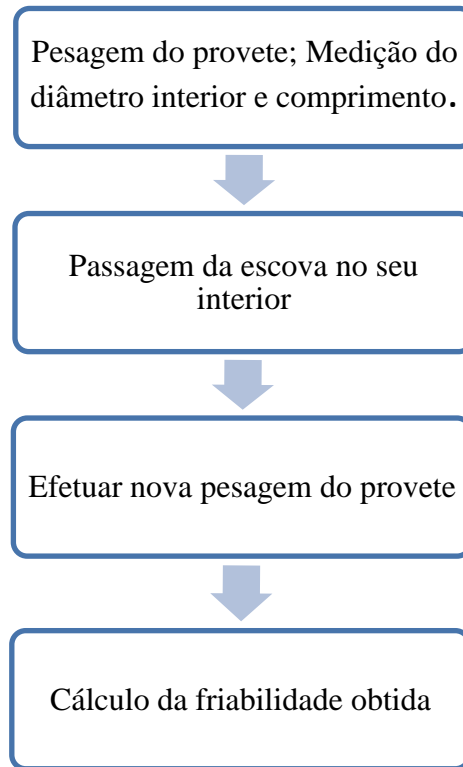


Figura 78 - Etapas do ensaio de friabilidade

Nota: Durante a realização dos ensaios teve-se como cuidados:

- ✓ Utilização sempre da mesma escova;
- ✓ Velocidade de escovagem sensivelmente igual;
- ✓ Pesagem sempre na mesma balança;
- ✓ Realização dos ensaios no mesmo dia.

A pesagem dos provetes foi realizada numa balança de precisão, sendo a sua designação *AND FR-200 MKII*. A Figura 79 mostra a balança utilizada.



Figura 79 - Balança de precisão utilizada

A Figura 80 apresenta o tipo de escova utilizado nos ensaios.



Figura 80 - Escova de 30mm da marca *Fisher Scientific*.

Os ensaios de friabilidade foram realizados de acordo com as várias formulações e, para cada formulação, diferentes temperaturas de sinterização. Foram também realizadas formulações com uma e duas camadas de *facecoat* de forma a estudar a sua influência nos níveis de friabilidade. Para cada formulação foram realizados 9 provetes, 3 para cada temperatura, de forma a quantificar uma friabilidade média. As Tabelas 31 e 32 apresentam cada formulação bem como as diferentes temperaturas de sinterização.

Tabela 31 - Formulações com *facecoat* SAZY4

<i>Nº da formulação</i>	<i>Facecoat+areia</i>	<i>Nº facecoat's aplicados</i>	<i>Backup+areia</i>	<i>Temperatura de Sinterização (°C)</i>
1	SAZY4 + Zircão 100-250 µm	1	SSF + AlSiO ₄	1450
				1300
				1200
2	SAZY4 + Zircão 100-250 µm	2	AFAL + Al ₂ O ₃	1450
				1300
				1200
3	SAZY4 + Zircão 100-250 µm	1	AFAL + AlSiO ₄	1450
				1300
				1200

Tabela 32 - Formulações com *facecoat* SAZY20

<i>Nº da formulação</i>	<i>Facecoat+areia</i>	<i>Nº facecoat's aplicados</i>	<i>Backup+areia</i>	<i>Temperatura de Sinterização (°C)</i>
1	SAZY20 + Zircão 100-250 µm	1	SSF + AlSiO ₄	1450
				1300
				1200
2	SAZY20 + Zircão 100-250 µm	2	AFAL + Al ₂ O ₃	1450
				1300
				1200
3	SAZY20 + Zircão 100-250 µm	1	AFAL + AlSiO ₄	1450
				1300
				1200

3.4.3 - Resultados e discussão

Estão apresentados nas Tabelas 33 e 34 os valores de friabilidade obtidos.

Tabela 33 - Valores de friabilidade obtidos para *facecoat* SAZY4

Nº da formulação	Temperatura de Sinterização (°C)	Friabilidade (g/m ²)	Friabilidade média (g/m ²)
1	1450	0,1848	0,3887
		0,4063	
		0,5750	
	1300	0,6934	0,7175
		0,5404	
		0,9186	
	1200	1,0454	1,7547
		2,6746	
		1,5442	
2	1450	0,6432	0,4418
		0,3180	
		0,3641	
	1300	2,3759	1,6731
		1,4728	
		1,1705	
	1200	2,4795	2,6814
		2,3374	
		3,2273	
3	1450	0,1951	0,3355
		0,4168	
		0,3947	
	1300	0,3428	0,7614
		1,0009	
		0,9406	
	1200	0,7821	1,4206
		1,4954	
		1,9844	

Tabela 34 - Valores de friabilidade obtidos para *facecoat* SAZY20

Nº da formulação	Temperatura de Sinterização (°C)	Friabilidade (g/m ²)	Friabilidade média (g/m ²)
1	1450	96,2101	87,8077
		77,0295	
		90,1834	
	1300	109,2574	119,3799
		110,6489	
		138,2333	
	1200	123,7516	109,6297
		123,5401	
		81,5975	
2	1450	48,7815	62,8323
		69,3924	
		70,3229	
	1300	246,2361	256,5176
		279,9739	
		243,3429	
	1200	144,7716	203,2818
		186,6425	
		278,4312	
3	1450	17,3474	17,0489
		14,3611	
		19,4382	
	1300	60,6063	70,7819
		50,4622	
		101,2771	
	1200	90,2173	68,6853
		63,4963	
		52,3422	

Discussão dos resultados:

As Figuras 81 e 82 comparam os valores de friabilidade média obtidos para cada formulação e para cada temperatura de sinterização.

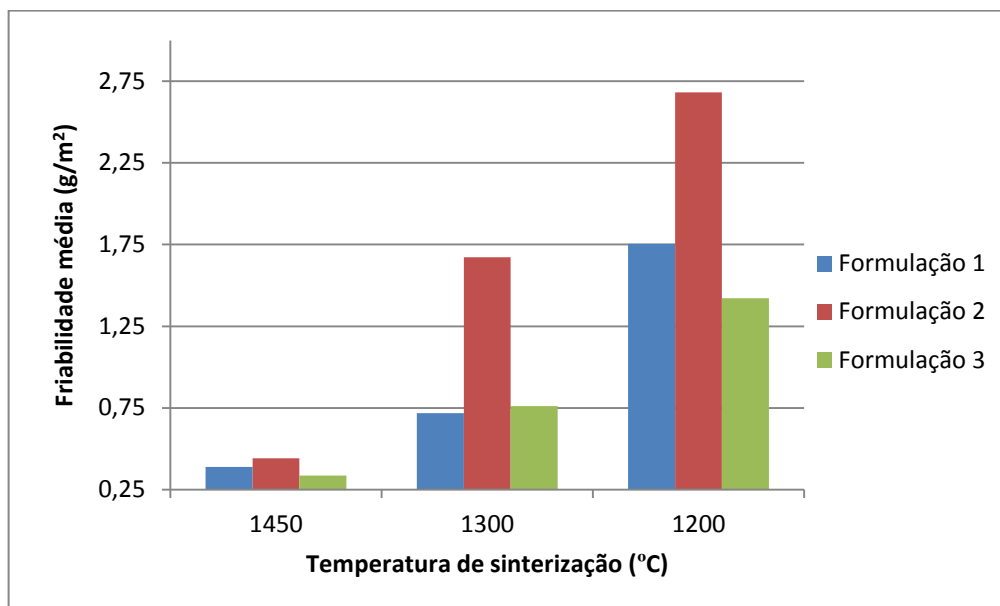


Figura 81 - Gráfico comparativo dos valores de friabilidade obtidos – *facecoat* SAZY4
(ver detalhes nas tabelas 19 e 20)

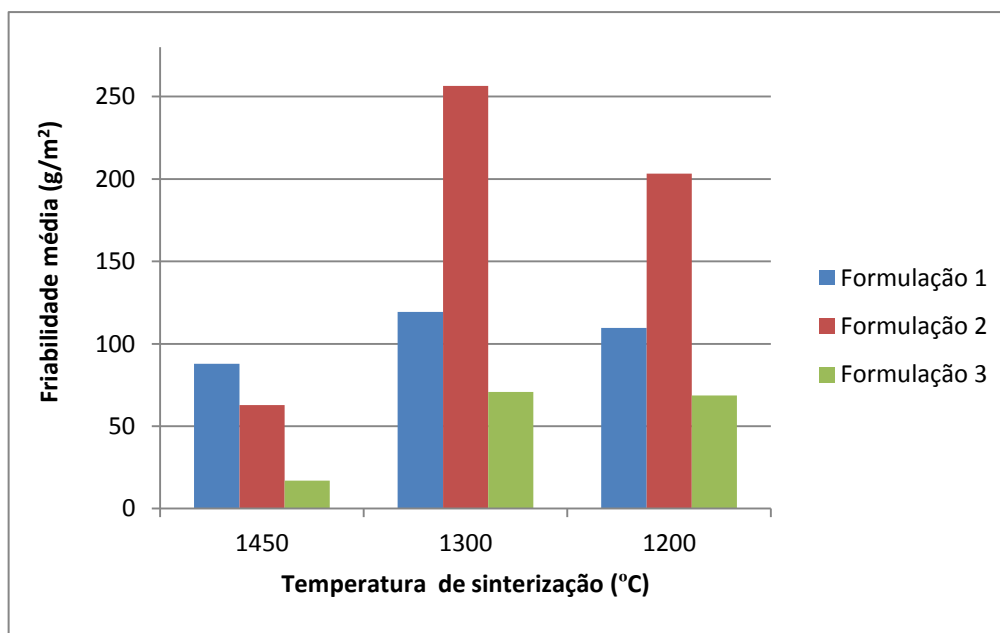


Figura 82 - Gráfico comparativo dos valores de friabilidade obtidos – *facecoat* SAZY20
(ver detalhes nas tabelas 19 e 20)

- ✓ Para as formulações realizadas com *facecoat* SAZY20, como previsto inicialmente, os níveis de friabilidade foram excessivamente elevados, sendo por isso uma composição de barbotina a descartar, principalmente devido ao tamanho das partículas de ítria chinesa usado. Verificou-se uma ligeira melhoria dos níveis de friabilidade com a redução da temperatura de 1300°C para 1200°C, contudo, como é uma composição a descartar, não foi necessário uma análise mais precisa;
- ✓ A hipótese de utilização de 1 ou 2 camadas de *facecoat*, foi esclarecida com os resultados obtidos. As formulações com duas camadas apresentaram níveis de friabilidade mais elevados, sendo por isso a solução a adotar, a utilização de apenas uma camada;
- ✓ As formulações com barbotina de *facecoat* SAZY4, apresentaram níveis de friabilidade bastante satisfatórios. A formulação que apresentou no geral melhores resultados, foi a número 3;
- ✓ Tal como era esperado, para cada formulação com barbotina de *facecoat* SAZY4, à medida que as temperaturas de sinterização diminuía, os níveis de friabilidade aumentavam.

A Tabela 35 apresenta os valores obtidos por Francisco Torres [2], para os *facecoat's* AY 1% TiO₂ e AFZrYC, e os melhores resultados obtidos com a nova barbotina SAZY4. Para além de 1450°C e 1300°C, também foram realizados ensaios para 1200°C, com objetivo de reduzir ainda mais as temperaturas de sinterização e verificar se os níveis de friabilidade obtidos eram também bons.

Tabela 35 - Valores de friabilidade para diferentes *facecoat's* [2]

<i>Facecoat</i>	Temperatura de sinterização (°C)	Friabilidade
AY 1% TiO ₂	1450	0,7299
	1300	2,0600
AY Zollern	1450	1,0592
	1300	2,4017
AFZrYC	1450	0,9255
	1300	2,8711
SAZY4	1450	0,3355
	1300	0,7614
	1200	1,4206

A Figura 83 apresenta um gráfico que faz a comparação dos níveis de friabilidade para os *facecoat*'s na tabela anteriormente apresentados.

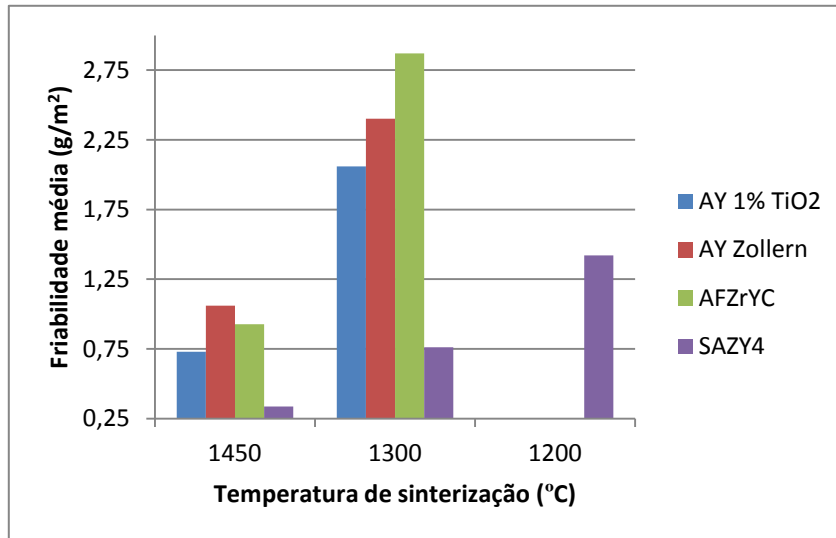


Figura 83 - Comparação dos níveis de friabilidade média obtidos

- ✓ Comparando os resultados obtidos com as barbotinas de *facecoat* (AY 1% TiO₂ e AFZrYC) a nova barbotina sobrepôs-se, apresentando níveis de friabilidade mais baixos;
- ✓ Para temperaturas de sinterização mais baixas, como os 1200°C, a barbotina apresentou níveis de friabilidade média inferiores, face à temperatura de 1300°C utilizada para os *facecoat*'s AY 1% TiO₂ e AFZrYC. Relativamente aos 1450°C, para uma diferença de temperaturas de 250°C e comparando com o melhor valor conseguido para esta temperatura (*facecoat* AY 1% TiO₂), a friabilidade obtida foi sensivelmente duas vezes superior;
- ✓ É assim possível, com uma barbotina de baixo custo face ao tradicional, obter melhores resultados de friabilidade.

3.5 - Reatividade

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios das microdurezas e microestruturas realizados.

De estudos anteriores [1] foram recolhidos dados dos seguintes *facecoat*'s:

- ✓ AY 1% TiO₂;
- ✓ SZ;
- ✓ SAZ15%;

A barbotina SAZY20 foi descartada, devido aos elevados níveis de friabilidade que apresentou - Tabela 34.

A nova composição de barbotina de *facecoat* SAZY4, foi analisada, apresentando-se no presente capítulo os ensaios de microdurezas e microestruturas realizados. Foram realizadas novas carapaças com uma e duas camadas de *facecoat* e praticadas temperaturas de sinterização mais baixas, tal como apresentado na Tabela 36.

Tabela 36 - Carapaças realizadas

Nº cachos	Nº <i>facecoat</i> 's	Temperatura de Sinterização (°C)
2	1	1200
2	2	1300
1	1	
1	2	

Nota: As peças analisadas surgiram de um vazamento efetuado com carapaça cerâmica com apenas uma camada de *facecoat* e sinterizada a 1200°C.

3.5.1 - Microdurezas

Para analisar o aumento de dureza que se espera na periferia das amostras, utiliza-se o ensaio de dureza Vickers, fazendo impressões sequenciais com a ponta piramidal da máquina de medição desde a periferia da peça até ao seu interior. Para estes ensaios utilizou-se uma carga de 0,05 Kgf e as impressões foram feitas nas seguintes profundidades a partir da superfície:

- 0,02 – 0,07 – 0,12 – 0,20 – 0,50 – 1 (mm)

Estes espaçamentos entre medições foram escolhidos com base em ensaios realizados em trabalhos anteriores e segue o procedimento já existente de análise de microdurezas no INEGI.

Foram efetuadas medições em diferentes zonas da seguinte forma:

- ✓ Corte 1 – turbina transversal – medição na alheta e corpo;
- ✓ Corte 2 – Ataque (alimentador da turbina) – medição no ataque.

A Figura 84 ilustra as duas amostras utilizadas.

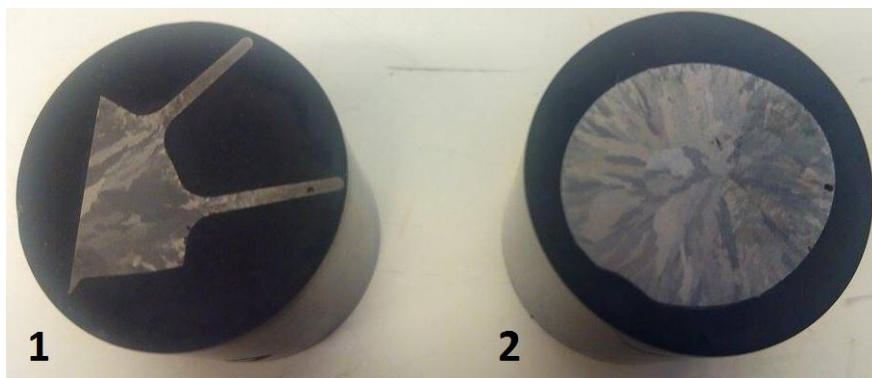


Figura 84 - Amostras utilizadas: 1) Corpo e alheta; 2) Ataque

A Tabela 37 representa os resultados obtidos:

Tabela 37 - Resultados obtidos para *facecoat* SAZY4

Profundidade (mm)	Microdureza (HV)		
	Alheta	Corpo	Ataque
0,02	420	414	440
0,07	364	340	410
0,12	315	359	353
0,2	304	338	311
0,5	273	275	254
1	-----	236	274

Os resultados anteriormente realizados [1], [2] para os *facecoat's* AY, SZ e SAZ15% encontram-se apresentados nas Tabelas 38, 39 e 40.

Tabela 38 - Resultados obtidos para *facecoat* AY

Profundidade (mm)	Microdureza (HV)		
	Alheta	Corpo	Ataque
0,02	388	382	480
0,07	339	357	298
0,12	287	283	254
0,2	278	276	244
0,5	275	268	261
1	-----	274	254

Tabela 39 - Resultados obtidos para *facecoat* SZ

Profundidade (mm)	Microdureza (HV)		
	Alheta	Corpo	Ataque
0,02	671	766	402
0,07	479	466	396
0,12	269	476	371
0,2	291	417	299
0,5	213	205	211
1	-----	234	221

Para o *facecoat* seguidamente apresentado, não foram realizados ensaios para o ataque, não sendo por isso documentado.

Tabela 40 - Resultados obtidos para *facecoat* SAZ15%

Profundidade (mm)	Microdureza (HV)	
	Alheta	Corpo
0,02	570	466
0,07	344	423
0,12	326	398
0,2	345	348
0,5	288	322
1	-----	285

De forma a comparar os resultados obtidos com os já existentes, realizaram-se gráficos que comparam os valores de microdureza obtidos, para cada *facecoat*, nas diferentes zonas estudadas da turbina. As Figuras 85, 86 e 87 apresentam os gráficos comparativos.

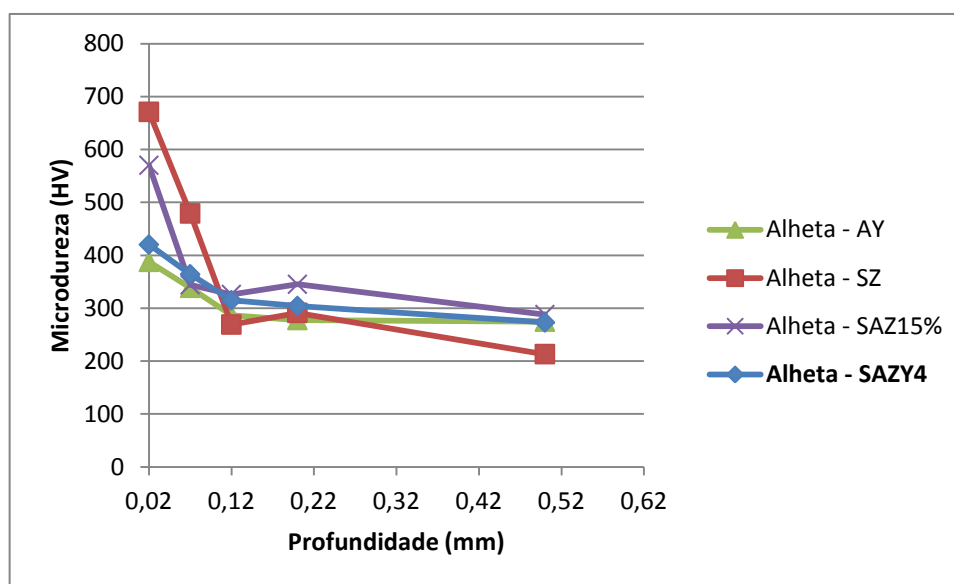


Figura 85 - Gráfico comparativo dos valores de microdureza – alheta da turbina

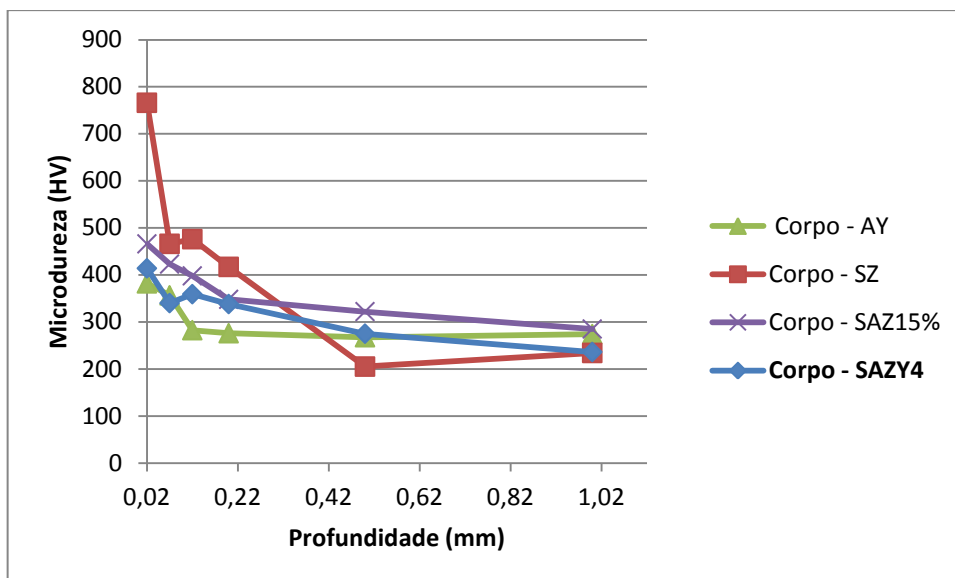


Figura 86 - Gráfico comparativo dos valores de microdureza – corpo da turbina

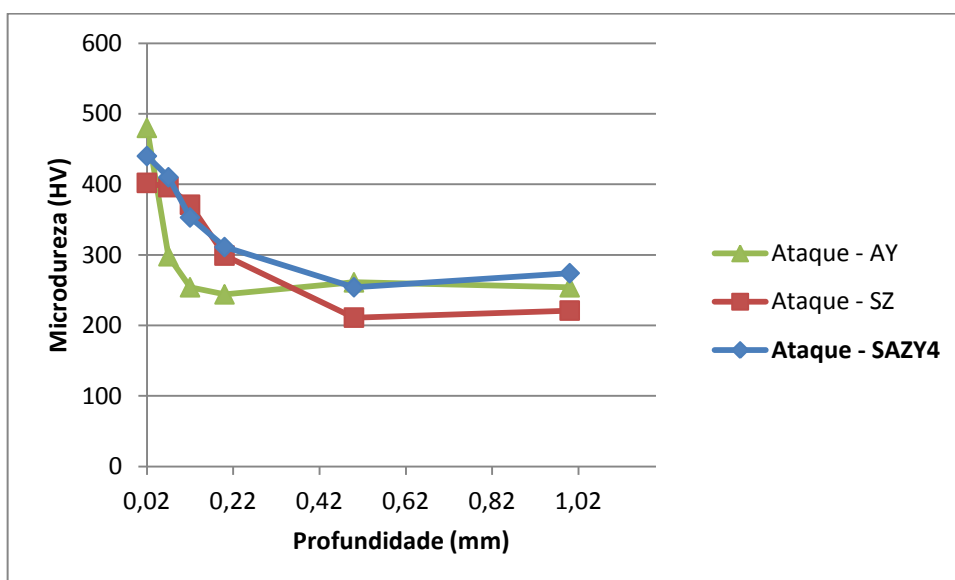
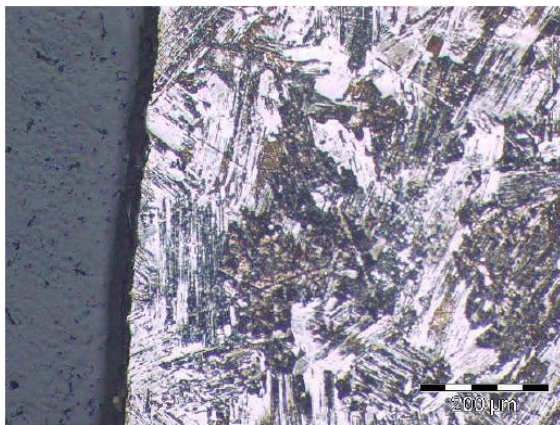


Figura 87 - Gráfico comparativo dos valores de microdureza no alimentador da turbina – ataque

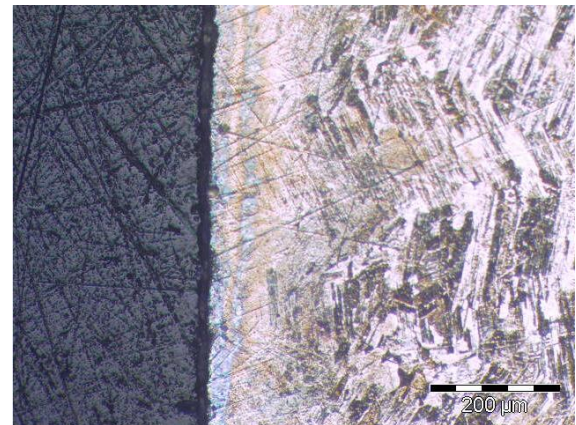
Da análise dos gráficos anteriormente apresentados é possível constatar que os valores de microdureza agora obtidos para o *facecoat* SAZY4, em cada zona estudada da turbina, são inferiores relativamente aos valores dos *facecoat's* SZ e SAZ15% (valores anteriormente estudados com *facecoat's* económicos). Os valores de microdureza do *facecoat* AY continuam a ser inferiores aos obtidos com o *facecoat* SAZY4, no entanto, como se está na presença de um *facecoat* “low-cost” a sua diferença não é significativa.

3.5.2 - Microestruturas

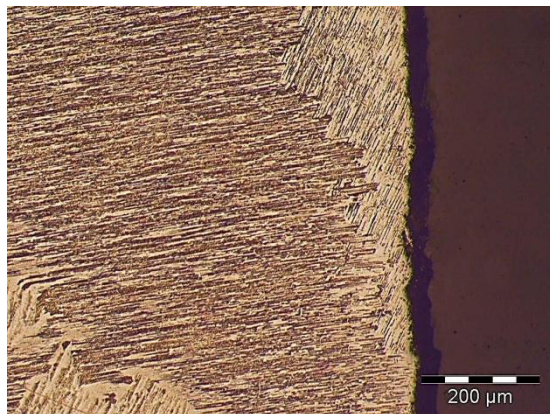
Depois de efetuadas as medições de microdurezas tiraram-se as fotografias às microestruturas de cada amostra. Não são apresentadas todas as microestruturas de todas as zonas, mas apenas algumas com relevância para análise da reatividade. A Figura 88 apresenta as microestruturas na periferia da alheta da turbina.



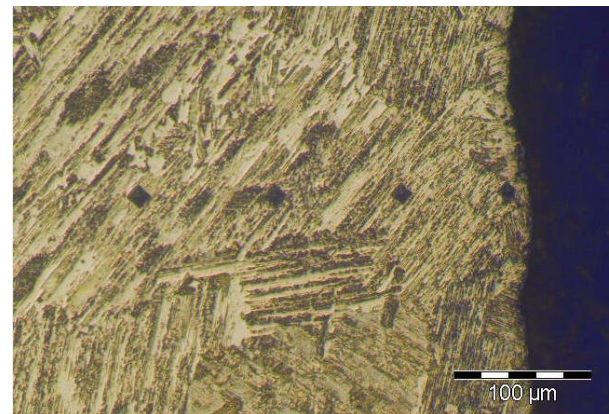
Micrografia TiAl em AY



Micrografia TiAl em SZ



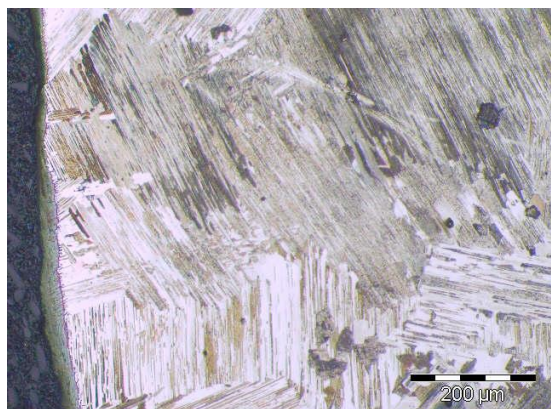
Micrografia TiAl em SAZ15%



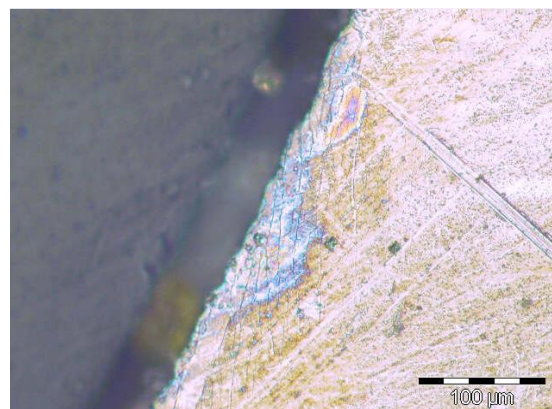
Micrografia TiAl em SAZY4

Figura 88 - Microestruturas na alheta para os diferentes *facecoat's*

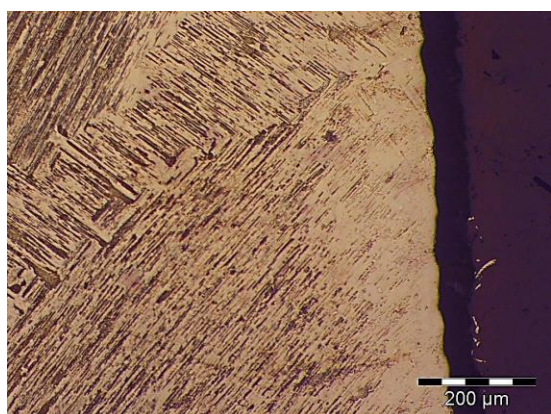
A Figura 89 apresenta as microestruturas na periferia do corpo da turbina.



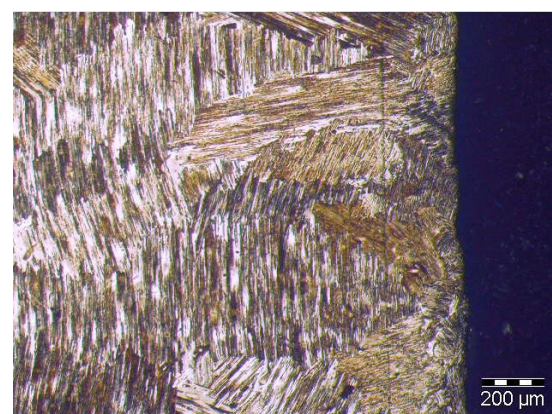
Micrografia TiAl em AY



Micrografia TiAl em SZ



Micrografia TiAl em SAZ15%



Micrografia TiAl em SAZY4

Figura 89 - Microestruturas no corpo para os diferentes *facecoat's*

Uma vez que nos estudos anteriores não foram tiradas fotos à microestrutura no ataque, é seguidamente apresentada, apenas a microestrutura para o ataque em SAZY4. A Figura 90 apresenta a microestrutura no ataque – alimentador da turbina.

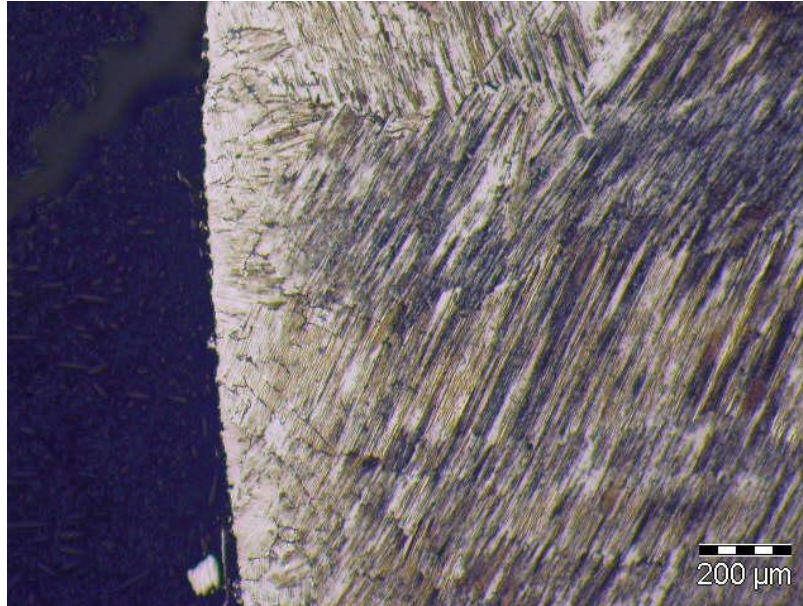


Figura 90 - Micrografia TiAl, no ataque, em SAZY4

- ✓ Analisando as microestruturas na periferia da alheta é possível concluir que, para os *facecoat's* AY e SAZY4 não se verificam alterações na sua microestrutura, ao contrário dos *facecoat's* SZ e SAZ15% onde, na periferia, se verificam algumas alterações sugestivas de formação da camada α -case;
- ✓ No corpo da turbina sucede o mesmo, verificando-se apenas alterações microestruturais na periferia do mesmo, para os *facecoat's* SZ e SAZ15%;
- ✓ No ataque, para o *facecoat* SAZY4, verifica-se uma ligeira alteração na periferia, sugestiva de formação da camada α -case.

3.6 - Breve análise de custos

Com o objetivo de comparar o custo de fabrico, em material, de uma carapaça cerâmica “*low-cost*” vs carapaças cerâmicas anteriormente desenvolvidas no INEGI, foram realizadas várias pesagens a dois cachos aquando do processo de construção da carapaça, de forma a averiguar a quantidade de cada um dos seus constituintes. A Tabela 41 apresenta o procedimento realizado.

Tabela 41 - Pesagens efetuadas

	Pesagens (g)		
	Cacho 1	Cacho 2	Média
Cacho em cera	458,86	457,01	457,94
Cacho em cera + <i>facecoat</i>	513,86	512,935	513,40
Cacho em cera + <i>facecoat</i> + areia de <i>facecoat</i>	613,11	612,19	612,65
Cacho em cera + <i>facecoat</i> + areia de <i>facecoat</i> + <i>backup</i>	722,98	722,06	722,52
Cacho em cera + <i>facecoat</i> + areia de <i>facecoat</i> + <i>backup</i> + areia de <i>backup</i>	805,59	804,67	805,13

Seguidamente, com base nos valores médios, calculou-se a diferença entre as diversas pesagens, de forma a apurar corretamente a quantidade de cada constituinte. A Tabela 42 apresenta os valores apurados.

Tabela 42 - Pesos de cada constituinte da carapaça cerâmica

Constituintes	Peso por camada (g)	Nº de camadas
<i>Facecoat</i>	55,46	1 a 2
<i>Areia de facecoat</i>	99,25	1 a 2
<i>Backup</i>	109,88	7
<i>Areia de backup</i>	82,61	6

Posteriormente, recorrendo aos preços/kg das matérias-primas que foram apresentados no ponto 3.1 – Matérias-primas, foi calculado o custo de cada constituinte da carapaça. A Tabela 43 apresenta o peso e o custo detalhado de cada material da carapaça “low-cost”.

Tabela 43 - Peso e custo detalhado de cada material – carapaça “low-cost”

“LOW-COST”				
Constituintes	Materiais	Pesos (g)	Preço €/Kg	
<i>Facecoat SAZY4</i>	Zircão -250 mesh	55,46	20,80	4,5
	Ítria chinesa 4-7 µm		20,80	6
	Orgânico		4,44	3,15
	Sílica Coloidal com látex		9,43	5
<i>Areia de facecoat</i>	Zircão 100-250 µm	99,25	2,2	
<i>Backup AFAL</i>	Alumina fumada	109,88	35,71	13,5
	Alumina fundida branca -200 mesh		35,71	19
	Alumina fundida branca 0-30 µm		35,71	19
<i>Areia de backup</i>	Alumino-silicatos 0,2-0,5/0,5-1 mm	82,61	0,85	

Uma vez que esta análise de custos foi realizada já numa fase final da dissertação e com tempo reduzido, optou-se por utilizar os mesmos valores de pesos das camadas da carapaça “*low-cost*”, para calcular um custo de fabrico da carapaça tradicional. A Tabela 44 apresenta o peso e o custo detalhado de cada material da mesma.

Tabela 44 - Peso e custo detalhado de cada material – carapaça tradicional

“TRADICIONAL”				
Constituintes	Materiais	Pesos (g)		Preço/Kg
<i>Facecoat AY</i>	Ítria -200 mesh	55,46	23,13	83
	Ítria -300 mesh		23,13	83
	Orgânico		5,55	3,15
<i>Areia de facecoat</i>	Ítria fundida 125-250 µm	99,25		85
<i>Backup AFAL</i>	Alumina fumada	109,88	35,71	13,5
	Alumina fundida branca -200 mesh		35,71	19
	Alumina fundida branca 0-30 µm		35,71	19
<i>Areia de backup</i>	Alumina fundida branca (60/36 FEPA)	82,61		1,435

Analisando as tabelas anteriormente apresentadas é facilmente perceptível que o custo da carapaça pode ser facilmente calculado, multiplicando o peso de cada constituinte pelo respetivo custo do material e pelo número de camadas necessárias. Chega-se assim a um valor aproximado de fabrico da carapaça. A Figura 91 mostra um esquema que apresenta o custo detalhado de cada constituinte, quer para a carapaça “*low-cost*”, quer para a carapaça tradicional.

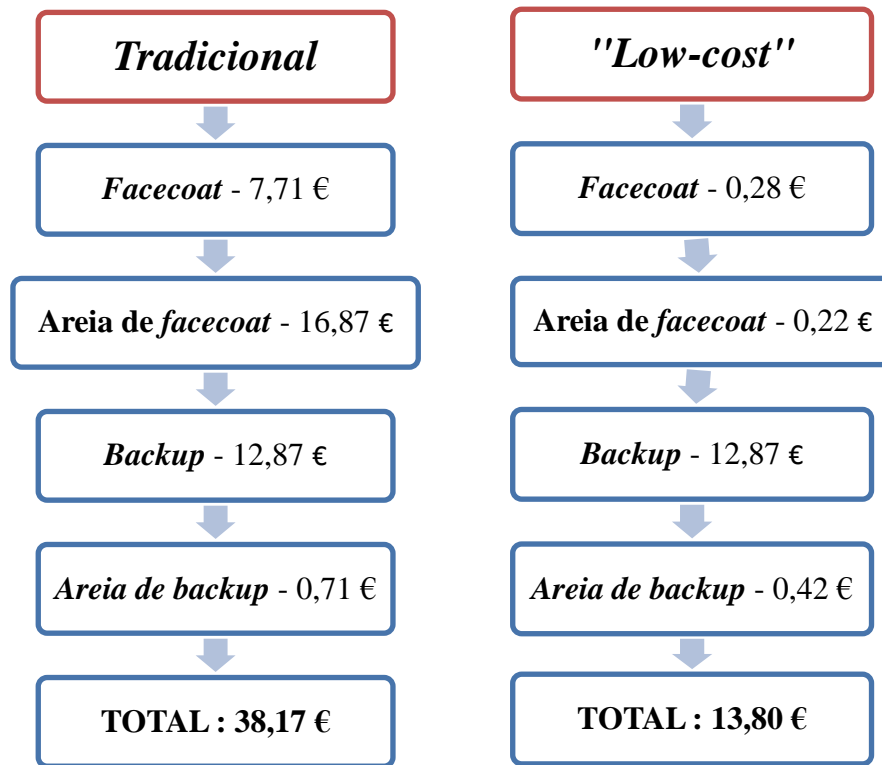


Figura 91 - Custo de fabrico, para 6 peças, da carapaça tradicional vs "low-cost"

Depois de efetuado o cálculo dos custos constata-se que a redução do custo de fabrico, em material, da carapaça "low-cost" face ao tradicional é substancialmente inferior (cerca de 64% inferior).

3.7 - Controlo dimensional - Turbina Daimler Ø88mm

A realização deste trabalho, não está diretamente ligada à presente dissertação, no entanto surgiu a necessidade de o realizar, sendo por isso seguidamente apresentado.

3.7.1 - Objetivos

Os objetivos deste controlo dimensional passam por determinar:

- ✓ Compensação necessária dar aos modelos CAD (nos diferentes eixos) para obtermos protótipos em cera (obtidos diretamente do equipamento de prototipagem rápida PROJET CP3510) com os menores desvios possíveis;
- ✓ Tolerância expectável para os modelos em cera;
- ✓ Contração [cera – metal (TiAl)] nos diferentes eixos para as referidas peças;
- ✓ Tolerância final (CAD – metal) expectável.

3.7.2 - Descrição da peça em estudo

Referência da peça em estudo: TiAl Turbinenrad hohl HRB472096F000_1 (Turbina Ø 88mm com alívio de massa no eixo). A Figura 92 apresenta o modelo em CAD 3D da peça em estudo.

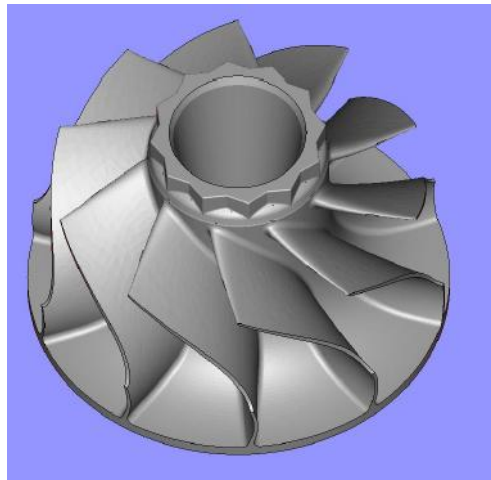


Figura 92 - Modelo CAD 3D

3.7.3 - Metodologia desenvolvida

Para se determinar as contrações entre as diferentes fases do processo (CAD – prototipagem em cera e modelo em cera – metal) utilizou-se a seguinte metodologia:

- a) Obter o modelo inicial em CAD (“modelo de partida”)
 - ✓ No caso da determinação da contração CAD – protótipo o modelo CAD já é o ponto de partida;
 - ✓ No caso da determinação da contração cera – metal o CAD (ficheiro STL) é obtido a partir da digitalização (engenharia inversa) do modelo em cera.
- b) Obter o modelo em CAD após conversão (“modelo de chegada”)
 - ✓ No caso da determinação da contração CAD – Protótipo o CAD (ficheiro STL) obtido a partir da digitalização (engenharia inversa) do modelo em cera
 - ✓ No caso da determinação da contração cera – metal o CAD (ficheiro STL) obtido a partir da digitalização (engenharia inversa) do modelo em metal;

- c) O “modelo de chegada” é escalado (a partir de iterações sucessivas) de forma a aproximar-se o melhor possível (maior correlação) com o “modelo de partida”;
- d) Finalmente o valor do “escalamento” referido no ponto anterior é o valor de referência para a contração dessa fase do processo.

Para a peça em questão:

- ✓ A turbina foi escalada (em CAD) em 1%;
- ✓ Foi medida a peça produzida em cera para se determinar as contrações resultantes deste processo de prototipagem rápida;
- ✓ Vão ser vazadas as peças para se determinar a contração cera-metal.

3.7.4 - Medições

As medições foram realizadas com recurso a um equipamento de levantamento de forma da marca GOM Modelo ATOS III.

A Figura 93 mostra a turbina durante a fase de medição.



Figura 93 - Modelo durante a fase de medição – levantamento de forma.

A Figura 94 seguidamente apresentada, mostra os desvios (maioritariamente geométricos) entre os “modelos de partida” e “modelos de chegada” após o processo iterativo de determinação (seguida do respetivo escalamento) do valor da contração.

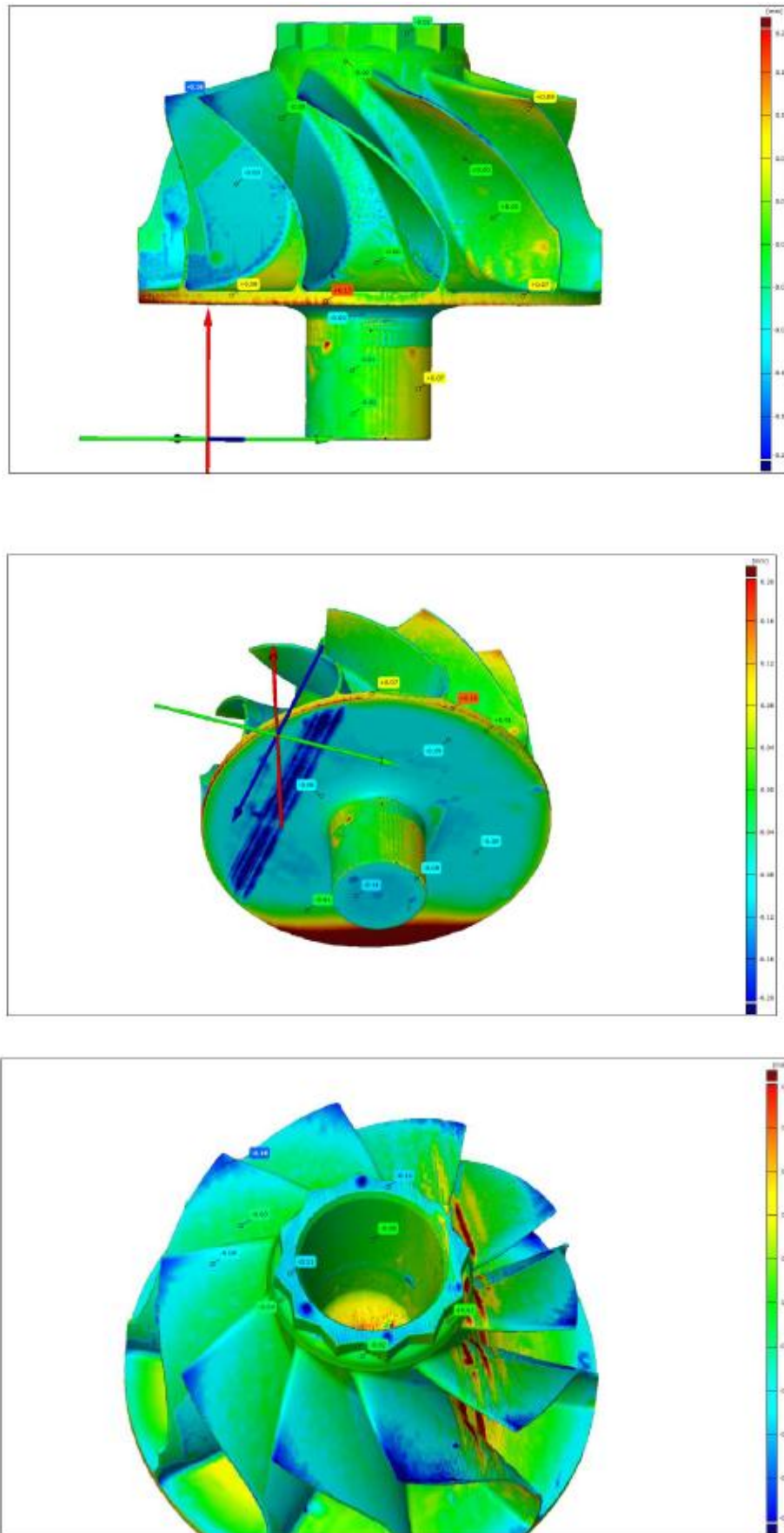


Figura 94 - Diferenças entre o CAD e o modelo em cera (Azul – cera; Vermelho – CAD)

As Figuras 95 e 96 apresentam as diferenças entre a cera e o metal.

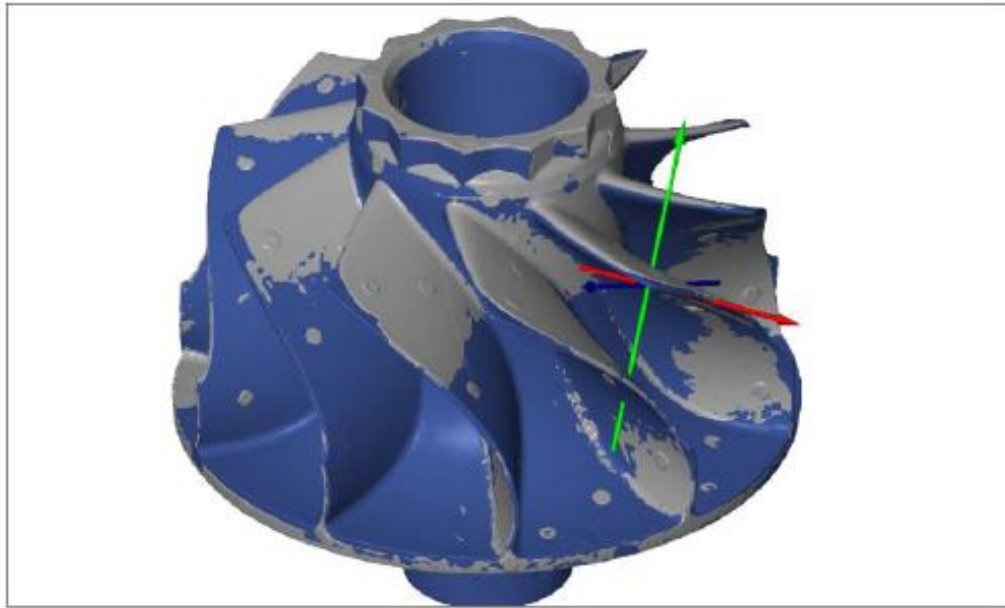


Figura 95 - Azul: Cera; Cinzento: Metal

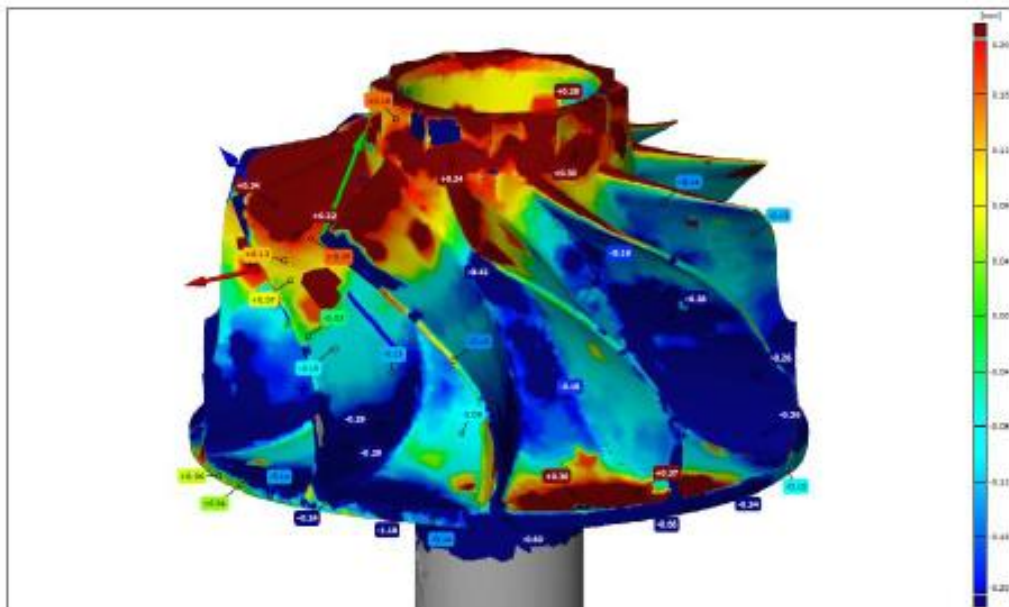


Figura 96 - Diferenças entre a cera e o metal (Azul – Cera; Vermelho – Metal)

3.7.5 - Resultados

Contração CAD - Cera

a) Os valores nominais são:

✓ Diâmetro: 88mm

✓ Altura: 78,5mm

b) Os valores do CAD escalado 1% (modelo que foi para fabrico aditivo) são:

✓ Diâmetro: 88,8mm

✓ Altura: 79,29 mm

c) Os valores do CAD escalado ($xy=0,7\%$ e $z=0,4\%$) (**ver nota**) são:

✓ Diâmetro: 88,61mm

✓ Altura: 78,81mm

Nota: Este valor de escalamento como referido anteriormente foi aquele que mais aproximou o CAD do modelo digitalizado em cera.

Perante estes dados a contração (CAD-Cera) foi:

✓ Eixo x,y: 0,3% (passagem de 88,88 mm para 88,61 mm)

✓ Eixo z: 0,6% (passagem de 79,29 mm para 78,81 mm)

Contração Cera - Metal

Os valores nominais do modelo em cera são:

- Diâmetro = 88,6 mm;
- Altura = 78,8 mm

Os valores do modelo em cera escalados (xy= -1,5% e z= 1,1%) (**ver nota**) são:

- Diâmetro = 87,27mm;
- Altura = 77,9 mm

Nota: Este valor de escalamento como referido anteriormente foi aquele que mais aproximou o CAD da digitalização da cera com o modelo digitalizado da peça metálica.

Perante estes dados a contração (Cera – Metal) foi:

- Eixo x,y = 1,5 % (passagem de 88,6 mm para 87,27 mm)
- Eixo z = 1,1 % (passagem de 78,8 mm para 77,9 mm)

3.7.6 - Conclusões

As conclusões que se podem tirar, se bem que seja necessário fazer mais medições para melhor sustentar as mesmas são:

- ✓ As contrações (quer as originadas pelo equipamento de fabrico aditivo quer as conversões cera – metal) dependem da geometria da peça;
- ✓ As contrações variam segundo os diferentes eixos;
- ✓ O valor que a *Zollern & Comandita* possuía como referência de contração cera-TiAl (1,3%) é diferente dos valores que foram obtidos nas medições. O valor obtido foi de 1,5% no eixo x,y e 1,1% no eixo z.
- ✓ A utilização das tecnologias de fabrico aditivo (nomeadamente do fabrico aditivo de cera) permite “prever” com maior exatidão a contração que as peças vão sofrer permitindo partir para a produção do molde com valores de referência mais precisos, reduzindo no limite o numero de iterações (no fabrico de moldes) necessárias para se obter as peças dentro das tolerâncias impostas pelos clientes.

4. Conclusões e trabalhos futuros

4.1 - Conclusões

4.1.1 - Friabilidade

- ✓ Relativamente aos ensaios realizados foi possível concluir que com a nova barbotina SAZY4 de *facecoat*, os níveis de friabilidade melhoraram quando comparados com os valores obtidos por Francisco Torres para os *facecoat's* AY 1% TiO₂ e AFZrYC.
- ✓ A dúvida inicial de aplicação de uma ou duas camadas de *facecoat* foi esclarecida, chegando-se à conclusão que o melhor é a aplicação de apenas uma camada;
- ✓ É possível, ainda com resultados satisfatórios, praticar temperaturas de sinterização menores (1200°C), face aos 1450°C exigidos pelos *facecoat's* AY 1% TiO₂ e AFZrYC. Como consequência, é possível reduzir os custos energéticos associados;
- ✓ Tal como esperado, maiores temperaturas de sinterização traduzem-se em menores níveis de friabilidade;
- ✓ Para as formulações com *facecoat* SAZY4, a formulação que apresentou de forma geral os melhores resultados foi a número 3 – SAZY4+zircão 100mesh/ AFAL+AlSiO₄.
- ✓ A barbotina de *facecoat* SAZY20 formulada foi descartada devido aos fracos resultados obtidos. Pensa-se que o tamanho de partícula utilizado (20-100 µm) tenha sido o principal problema. A ligação entre as partículas nunca foi suficientemente eficiente para se formar um filme de barbotina uniforme e se proporcionarem níveis de friabilidade dentro de patamares aceitáveis;
- ✓ A viscosidade das primeiras camadas de *facecoat* tem um papel determinante na friabilidade. Com valores mais altos de viscosidade há uma melhoria da friabilidade da camada, pois uma menor percentagem de água na barbotina permite uma melhor ligação entre as partículas cerâmicas e, conseqüentemente, superfícies mais lisas.

4.1.2 - Reatividade

- ✓ Da análise dos gráficos apresentados é possível constatar que os valores de microdureza agora obtidos para o *facecoat* SAZY4, em cada zona estudada da turbina, são inferiores relativamente aos valores dos *facecoat's* SZ e SAZ15% (valores anteriormente estudados com *facecoat's* económicos);
- ✓ Os valores de microdureza do *facecoat* AY continuam a ser inferiores aos obtidos com o *facecoat* SAZY4, no entanto, como estamos na presença de um *facecoat* “*low-cost*” podemos considerar que a diferença não é significativa.
- ✓ Analisando as microestruturas na periferia da alheta é possível concluir que, para os *facecoat's* AY e SAZY4 não se verificam alterações na sua microestrutura, ao contrário dos *facecoat's* SZ e SAZ15% onde, na periferia, se verificam algumas alterações sugestivas de formação da camada α -case;
- ✓ No corpo da turbina sucede o mesmo, verificando-se apenas alterações microestruturais na periferia do mesmo, para os *facecoat's* SZ e SAZ15%;
- ✓ No ataque, para o *facecoat* SAZY4, verifica-se uma ligeira alteração na periferia, sugestiva de formação da camada α -case;
- ✓ Foi assim possível, com um *facecoat* “*low-cost*”, obter resultados satisfatórios em termos de reatividade.

4.2 - Trabalhos Futuros

- ✓ Continuação da realização de carapaças com *facecoat* SAZY4, de forma a verificar a robustez da solução baseada na qualidade global das peças obtidas;
- ✓ Analisar em pormenor a causa da contaminação das carapaças que foram realizadas inicialmente;
- ✓ Otimização das composições da barbotina SAZY4 desenvolvida;
- ✓ Realizar novas formulações de *facecoat*, com introdução da zircónia e alumina em substituição do zircão para tentar ter *facecoat's* um pouco mais dispendiosos mas menos reativos. Apesar de ser desconhecida a energia livre de formação do zircão ($ZrSiO_4$) admite-se que essa energia esteja situada entre a sílica (SiO_2) e a zircónia (ZrO_2);
- ✓ Realização de ensaios de permeabilidade e de caracterização mecânica com a nova formulação.

Referências Bibliográficas

- [1] T. G. Barrigana, «Estudo da reatividade com os refratários de ligas de titânio e aluminetos de titânio fundidos», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [2] F. F. R. de A. Torres, «Otimização do processo de obtenção de peças em aluminetos de titânio por fundição de precisão», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [3] J. F. C. de C. Pinto, «Desenvolvimento e implementação do processo de maquinagem química de ligas de titânio para turbinas e próteses», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [4] F. Appel, J. D. H. Paul, e M. Oehring, *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology*. 2011.
- [5] B. Liu, Y. Liu, C. Qiu, C. Zhou, J. Li, H. Li, e Y. He, «Design of Low-Cost Titanium Aluminide Intermetallics», *J. Alloys Compd.*, vol. 640, pp. 298–304, Abr. 2015.
- [6] X. Wu, «Review of alloy and process development of TiAl alloys», *Intermetallics*, vol. 14, n. 10–11, pp. 1114–1122, Out. 2006.
- [7] J. Zhang, D. Feng, e F. J. Yin, «Some New Aspects in Developing TiAl Based Alloys as Competitive High Temperature Materials», *Adv. Mater. Res.*, vol. 278, pp. 557–562, Jul. 2011.
- [8] Y. W. Kim, W. Smarsly, J. Lin, D. Dimiduk, e F. Appel, *Gamma Titanium Aluminide Alloys 2014*. Wiley, 2014.
- [9] G. Hénaff e A.-L. Gloanec, «Fatigue properties of TiAl alloys», *Intermetallics*, vol. 13, n. 5, pp. 543–558, Mai. 2005.
- [10] K. Kothari, R. Radhakrishnan, e N. M. Wereley, «Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques», *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 55, pp. 1–16, Nov. 2012.
- [11] Á. Magalhães, «Desenvolvimento do processo de fundição de turbinas para turbocompressores em aluminetos de titânio», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [12] N. L. de S. da S. Pires, «Projeto e otimização de sistemas de alimentação e gitagem para peças em aluminetos de titânio», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [13] Y.-W. Kim, «Intermetallic alloys based on gamma titanium aluminide», *JOM*, vol. 41, n. 7, pp. 24–30, Jul. 1989.
- [14] S. H. Whang, D. P. Pope, e C. T. Liu, *High Temperature Aluminides and Intermetallics: Proceedings of the Second International ASM Conference on High Temperature Aluminides and Intermetallics, September 16-19, 1991, San Diego, CA, USA*. Elsevier Science, 2013.
- [15] S. Djanarthany, J.-C. Viala, e J. Bouix, «An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti3Al and TiAl», *Mater. Chem. Phys.*, vol. 72, n. 3, pp. 301–319, Dez. 2001.
- [16] K. Nice, «Como funcionam os turbocompressores», 2015. Disponível em: <http://carros.hsw.uol.com.br/turbocompressores.htm>.
- [17] H. MacInnes e B. MacInnes, *Turbochargers*. HP Books, 1987.

- [18] T. Tetsui, «Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles», *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 329–331, pp. 582–588, Jun. 2002.
- [19] S. Pattnaik, D. B. Karunakar, e P. K. Jha, «Developments in investment casting process—A review», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, n. 11, pp. 2332–2348, Nov. 2012.
- [20] I. C. Institute, *Investment casting handbook*. Investment Casting Institute, 1979.
- [21] «Investment Casting», 2015. Disponível em: <http://www.custompartnet.com/wu/investment-casting>.
- [22] K. G. Swift e J. D. Booker, *Manufacturing Process Selection Handbook*. Elsevier, 2013, pp. 61–91.
- [23] «Casting », vol. 4th printi. ASM International , [S.l.] , p. XIII, 937 p. a 3 coln.—XIII, 937 p. a 3 coln., 1998.
- [24] F. R. Sias, *Lost-wax Casting: Old, New, and Inexpensive Methods*. Woodsmere Press, 2005.
- [25] J. M. G. de C. Ferreira, *Tecnologia da Fundição*. 1999.
- [26] C. M. Cheah, C. K. Chua, C. W. Lee, C. Feng, e K. Totong, «Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, n. 3–4, pp. 308–320, Ago. 2004.
- [27] SolidConcepts, «QuickCast», 2015. Disponível em: <https://www.solidconcepts.com/technologies/quickcast/>.
- [28] *Refractory Engineering: Materials - Design - Construction*. Vulkan-Verlag, 2004.
- [29] N. H. ASA, «Alumina», 2015. Disponível em: <http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Produtos/Bauxita-e-alumina/Alumina/>.
- [30] E. Dörre e H. Hübner, *Alumina: processing, properties, and applications*. Springer, 1984.
- [31] Y. Xu, Q. Miao, W. Liang, X. Yu, Q. Jiang, Z. Zhang, B. Ren, e Z. Yao, «Tribological behavior of Al₂O₃/Al composite coating on γ -TiAl at elevated temperature», *Mater. Charact.*, vol. 101, pp. 122–129, Mar. 2015.
- [32] «Elevator FlashFire Dewax System», 2015. Disponível em: <http://www.pacifickiln.com/investmentcastingproducts/flashfiredewaxsystem/elevatorflashfiredewaxsystem.aspx>.
- [33] «Dewaxing Autoclave Systems», 2015. Disponível em: <http://www.wsfindustries.com/dewaxing.html>.
- [34] H. G. André Luiz Molisani, Humberto Naoyuki Yoshimura, «Sinterização de Cerâmicas Técnicas no Estado Sólido e Assistida por Fase Líquida», 2006.
- [35] D. S. Viswanath, T. Ghosh, D. H. L. Prasad, N. V. K. Dutt, e K. Y. Rani, *Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data*. 2007.

- [36] C. Yuan, D. Compton, X. Cheng, N. Green, e P. Withey, «The influence of polymer content and sintering temperature on yttria face-coat moulds for TiAl casting», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 32, n. 16, pp. 4041–4049, Dez. 2012.
- [37] CastingsTechnologyInternacion, «Induction Skull Melting (ISM) of Titanium Alloys.» Disponível em: <http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp>.
- [38] X. Xu, R. M. Ward, M. H. Jacobs, P. D. Lee, e M. McLean, «Tree-ring formation during vacuum arc remelting of INCONEL 718: Part I. Experimental investigation», *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 33, n. 6, pp. 1795–1804, Jun. 2002.
- [39] J. E. Harry, *Introduction to Plasma Technology: Science, Engineering, and Applications*. Wiley, 2013.
- [40] Bruno António Fernandes Martins, «Desenvolvimento de um forno de indução para fusão e vazamento de ligas de titânio e outras ligas reactivas Zollern & Comandita Portugal e INEGI», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [41] P. Beeley, «Foundry technology », vol. 2nd ed . Butterworth Heinemann , London [etc] , p. X, 719 p.–X, 719 p.
- [42] K. S. Chan, M. Koike, B. W. Johnson, e T. Okabe, «Modeling of Alpha-Case Formation and Its Effects on the Mechanical Properties of Titanium Alloy Castings», *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 39, n. 1, pp. 171–180, Dez. 2007.
- [43] S.-Y. Sung e Y.-J. Kim, «Alpha-case formation mechanism on titanium investment castings», *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 405, n. 1–2, pp. 173–177, Set. 2005.
- [44] M. R. Winstone e I. of Materials (Great Britain), *Titanium Alloys at Elevated Temperature: Structural Development and Service Behaviour*. IOM Communications, 2001.
- [45] Y. Guilin, L. Nan, L. Yousheng, e W. Yining, «The effects of different types of investments on the alpha-case layer of titanium castings.», *J. Prosthet. Dent.*, vol. 97, n. 3, pp. 157–64, Mar. 2007.
- [46] J. C. M. Li, *Microstructure and Properties of Materials*, n. vol. 2. World Scientific, 2000.
- [47] M. Robinson, *Thermal Cycle Effects on Alpha Case Characteristics in Titanium Weldments*. Ohio State University, 2003.
- [48] S.-Y. Sung e Y.-J. Kim, «Influence of Al contents on alpha-case formation of Ti-xAl alloys», *J. Alloys Compd.*, vol. 415, n. 1–2, pp. 93–98, Mai. 2006.
- [49] W. C. Say e Y. Y. Tsai, «Surface characterization of cast Ti-6Al-4V in hydrofluoric-nitric pickling solutions», *Surf. Coatings Technol.*, vol. 176, n. 3, pp. 337–343, Jan. 2004.
- [50] L. Yue, Z. Wang, e L. Li, «Material morphological characteristics in laser ablation of alpha case from titanium alloy», *Appl. Surf. Sci.*, 2012.

Anexos

Anexo A: Granulometria

FEPA

A FEPA (*Federation of European Producers of Abrasives*) estabeleceu a sua própria conversão de granulometria para os materiais abrasivos. Esta conversão está apresentada na tabela seguinte.

MACROGRÃOS		MICROGRÃOS	
Designação	Diâmetro médio (μm)	Designação	Diâmetro médio ds50 (μm)
F 4	4890	F 230	53.0 ± 3
F 5	4125	F 240	44.5 ± 2
F 6	3460	F 280	36.5 ± 1.5
F 7	2900	F 320	29.2 ± 1.5
F 8	2460	F 360	22.8 ± 1.5
F 10	2085	F 400	17.3 ± 1
F 12	1765	F 500	12.8 ± 1
F 14	1470	F 600	9.3 ± 1
F 16	1230	F 800	6.5 ± 1
F 20	1040	F 1000	4.5 ± 0.8
F 22	885	F 1200	3.0 ± 0.5
F 24	745	F 1500	2.0 ± 0.4
F 30	625	F 2000	1.2 ± 0.3
F 36	525		
F 40	438		
F 46	370		
F 54	310		
F 60	260		
F 70	218		
F 80	185		
F 90	154		
F 100	129		
F 120	109		
F 150	82		
F 180	69		
F 220	58		

MESH

A granulometria do tipo “mesh” reside numa medida de distribuição de tamanho de grão. O valor de “mesh” indica o número de aberturas por polegada numa peneira, sendo que quanto maior for o seu valor, maior o número de aberturas e mais fino é o material que por elas passam.

Um valor negativo antes do valor “mesh” indica que as partículas passam pela peneira desse valor (por exemplo: -325 mesh significa que as partículas passam pela peneira 325), enquanto um valor positivo, como por exemplo 325 mesh, sugere que a peneira retém as partículas dessa dimensão.

Mesh	Diâmetro médio (µm)
3	7086
4	4750
5	3360
8	2464
10	2460
12	2000
14	1680
16	1410
18	1190
20	1000
25	840
30	710
40	590
50	420
60	297
70	250
80	210
90	177
100	149
120	125
140	105
170	88
200	74
250	62
270	53
325	44
400	37
450	32
500	25
635	20

Anexo B: Fichas dos materiais utilizados na composição das barbotinas

Farinhas cerâmicas:

- Ítria chinesa 4-7µm e 20-100µm;

成都恒瑞新材料有限公司
CHENGDU HENRY ADVANCED MATERIALS LIMITED

分析测试报告单
Certificate of Analysis and Testing

品名: 氧化钇	报告日期:	
Commodity: Yttrium Oxide	Date:	March 13th, 2007
批号:	重量:	
Batch No.: 070313YD	Net Weight:	750 KG

TREO: 99.15% Y2O3/TREO: >99.99%	
稀土杂质含量 RE Impurities Content (%)	非稀土杂质含量 Non-RE Impurities (max, %)
Testing results	Testing results
La2O3/TREO 0.0002%	Fe2O3 0.0008%
CeO2/TREO 0.0002%	SiO2 0.0070%
Pr6O11/TREO 0.0002%	CaO 0.0030%
Nd2O3/TREO 0.0008%	Cl- 0.0260%
Sm2O3/TREO 0.0002%	L.O.I. 0.50%
Eu2O3/TREO 0.0002%	Particle size D50: 43um
Gd2O3/TREO 0.0007%	
Tb4O7/TREO 0.0002%	
Dy2O3/TREO 0.0016%	
Ho2O3/TREO 0.0020%	
Er2O3/TREO 0.0015%	
Tm2O3/TREO 0.0002%	
Yb2O3/TREO 0.0002%	
Lu2O3/TREO 0.0002%	




Add: 7-115, Hollywood Plaza, No.18, Nanshanwan, Erhuanglu, Chengdu, China, 610041

(Tel) : 86-28-8512-1560

(Fax) : 86-28-8518-7485

- Zircão (ZrSiO₄) - (250 mesh)



dupré Minerals

Precision Casting
www.dupreminerals.com

ZIRCONIUM SILICATE

The highest purity Zircon or Zirconium Silicate can be found in deposits close to the American, Australian and South African coasts. Zircon sand is separated from other minerals by ore dressing techniques during which strict controls are made to ensure the quality of the final product.

Depending on the application, Zircon sand may be calcined at a high temperature giving a stabilised product.

At one of most sophisticated plants in Europe Zircon is processed and milled to the most stringent grading and particle sizes required.

A range of Zircon materials is available. However, for special applications, alternative particle sizes can be processed.

Typical Chemical Analysis	
ZrO ₂ + HfO ₂	66 %
SiO ₂	33 %
Fe ₂ O ₃	0.1 %
TiO ₂	0.15 %
Al ₂ O ₃	0.1 %

Typical Physical Properties	
Specific Gravity	4.6
Melting Point	2200°C

CALCINED ZIRCON FLOURS				
Typical Particle Size Analysis	Zircon 200 M392	Zircon 325# M172	Zircon 200# M173	Zircalflow 200R M405
d10 (µm)	1.76	2.12	4.39	1.69
d25 (µm)	4.67	7.22	14.04	4.70
d50 (µm)	14.98	22.34	32.67	20.53
d75 (µm)	31.68	44.06	59.17	50.59
d90 (µm)	50.01	65.26	85.99	106.28

CALCINED ZIRCON SAND		
Sieve Analysis		Zircon Sand M170
BSS #	Size (µm)	%
30#	500	0
60#	250	0
85#	180	1.5
100#	150	12.1
120#	125	28.9
150#	106	27.4
200#	75	31.2
Pan		0.9

Information presented above is given in good faith as accurate and reliable but is not to be taken as a guarantee. The figures provided are intended to be a guide to expected average values and should not be interpreted as a specification. Any potential applications referred to are not to be construed as recommendations. It is the responsibility of the user to determine suitability for any specific purpose.

ISSUE 161009

Dupré Minerals Ltd. Spencroft Road, Newcastle-under-Lyme, Staffordshire, England. ST5 9JE
 Telephone: +44 (0) 1782 383100 Fax: +44 (0) 1782 383101 E-mail: info@dupre-vermiculite.co.uk

PRECISION CASTING

Ligante:

- Levasil 300/30 (Stark), sílica coloidal 30% com latex.

18/06/2015

Levasil 300/30 - AkzoNobel - datasheet

Technical Datasheet | *Supplied by: AkzoNobel*

Levasil 300/30

Sodium or ammonia anionic colloidal silica. It has good abrasion resistance. It is used in paints, floor wax and polishes and printing.

Product Type Abrasion Resistance Agents>Colloidal Silicas	Applications/Recommended for Coatings>Waterborne
Chemical Composition Sodium or ammonia anionic colloidal silica	Inks>Water-based
Physical Form Dispersion	Inks
Product Status COMMERCIAL	Coatings Markets>Architectural / Decorative

Biodegradable	No
Bio Based	No
Filled with Bio Fillers	No
Labels/Agency Rating	ISO 9000, ISO 14000

Properties


Property	Unit	Value
Silica content	%	30
pH		10
Average particle size	nm	11
Surface area	m ² /g	250

Polímero:

- Primal E330 EF

PRIMAL E 330 EF

Technical Data Sheet



RHOPLEX™ E-330
Acrylic Polymer

Introduction

RHOPLEX™ E-330 cement modifier is an acrylic polymer designed for modifying Portland cement compositions. Cement mortars mixed with RHOPLEX™ E-330 cement modifier are hard, tough and durable. Compared with unmodified mortars, the polymer-modified mortars have exceptional flexural, adhesive and impact strengths – as well as excellent abrasion resistance. They are especially useful for applications with thin sections, excessive vibration and heavy traffic.

Typical Physical Properties

These properties are typical but should not be considered specifications.

Solids content, %	47 ± 0.5
pH (as packed)	9.3-10.2
Viscosity, cPs	18-90
Density, kg/m ³	1.6
Freeze-thaw stability	5 cycles
Glass transition temperature (T _g), °C	13
Minimum film formation temperature (MFFT), °C	10-12
Specific gravity	1.089

Performance Advantages

Durability and Strength

Cement mortars modified with RHOPLEX™ E-330 are hard, tough and durable. Compared with unmodified mortars, polymer-modified mortars have exceptional flexural, adhesive and impact strengths, as well as excellent abrasion resistance. They are especially useful where thin sections are desirable and where excessive vibration and heavy traffic are encountered.

Adhesion

RHOPLEX™ E-330 modified cement mortars have excellent adhesion to a variety of surfaces, such as concrete, masonry, brick, wood and metals.

Resistance Properties

Cement mortars prepared with RHOPLEX™ E-330 are resistant to many industrial chemicals and have excellent resistance to ultraviolet light and heat. They dry to a uniform color with no tendency toward yellowing or discoloration.

Curing

For optimum physical properties, cement mortars modified with RHOPLEX™ E-330 should be air-cured at ambient temperature and relative humidity. Unlike unmodified mortars, which require laborious moist curing conditions for optimum strength properties, polymer-modified mortars should not be cured under these conditions.

Storage

RHOPLEX™ E-330 emulsion is sediment-free and stable to a minimum of 5 cycles of freezing at -15°C and thawing at 25°C. However, in cold weather or after prolonged storage, the emulsion should be thoroughly stirred prior to use to ensure a completely homogeneous mixture.

Page 1 of 2

®/™ Trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow
RHOPLEX™ E-330 | Dow Construction Chemicals

July 2011

