

**Desenvolvimento do processo de fabrico de ferramentas de
fundição elastoméricas para o processo de moldação em gesso**

Zollern & Comandita

Bruno Miguel Matos Alves

Relatório do Projecto Final/ Dissertação do MIEM

Orientador na Zollern & Comandita: Engenheiro Rui Jorge de Lemos Neto

Orientador na FEUP: Engenheiro Fernando Jorge Lino Alves



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Dedico esta tese à Vânia

Resumo

Esta dissertação teve como principal objectivo a concepção e optimização de ferramentas elastoméricas, para utilização no processo de fundição de ligas de alumínio em moldações de gesso, destinada principalmente ao fabrico de impulsores para turbocompressores de automóveis.

O início deste trabalho consistiu no desenvolvimento de processos de conversão e respectivas ferramentas de reprodução, de forma a obter modelos em borracha de silicone que fossem cópias fiéis do componente original, ou Master em alumínio maquinado. Para tal foi necessária uma abordagem aprofundada a nível de materiais, como os silicones, poliuretanos e resinas epoxídicas, e a nível de processos como foi o caso da electrodeposição de cobre. Este desenvolvimento resultou na obtenção de três processos distintos, denominados por processo poliuretano, processo silicone e processo cobre.

Foram realizados estudos dimensionais que permitiram seleccionar o melhor processo de conversão, tendo em conta a aplicação e exigência da peça em fabrico, otimizar os resultados dimensionais e cadência produtiva através da alteração das temperaturas de cura, analisar o comportamento dimensional das cavidades em resina epoxídica ao longo do tempo e verificar a durabilidade dos modelos de silicone em produção de moldações de gesso.

Desenvolveram-se ainda placas molde e caixas de moldação e suas ferramentas de revestimento com silicone, que em conjunto com os modelos de silicone (moldes) permitiram a fabricação de moldações de gesso.

Como conclusão principal verificou-se que o processo de conversão desenvolvido que utiliza cavidades de cobre é aquele que permite obter modelos de silicone (moldes) com os melhores resultados dimensionais.

Abstract

This work had as principal objective the conception and optimization of the elastomeric tools to use in the aluminium alloys cast process in plaster mouldings, to be used in the production of impellers wheels for the automotive turbocharger.

The beginning of this work consisted in the development of the conversion process and reproduction tools to obtain silicon models that are identical to the original part or aluminium machined Master, to do that it was necessary to deepest the knowledge about materials like silicone rubbers, polyurethanes and epoxy resins, and about processes like the copper electrodeposition. This results in the creation of three different conversions processes, denominated by polyurethane process, silicon process and copper process.

Some dimensional studies were made in order to select the best conversion process according to the apply and the demand of the part, optimize the dimensional results and the production capacity by changing the cure temperature of the silicon rubber, analyse the behaviour of the epoxy resin cavities during the time and study the durability of the silicone rubbers under production of plaster mouldings.

To make possible the plaster moulding fabrication it was necessary to developed match plates, mould boxes and silicone cover tools that in association with the silicon models.

The main conclusion is that the copper cavity process is the best way to obtain silicon models with good dimensional results.

Agradecimentos

Ao Engenheiro Rui Neto e Engenheiro Jorge Lino pela sua disponibilidade e excelente orientação.

Ao Engenheiro Virgílio Oliveira, director geral da Zollern & Comandita em Portugal, pela oportunidade, apoio e confiança que disponibilizou no decurso do projecto.

Ao INEGI e à Zollern & Comandita pela cedência das instalações e pela flexibilidade que me proporcionaram para a realização deste projecto.

Aos colegas de trabalho, Pedro, Rui, Hugo e Sofia, pelo incentivo, ajuda e troca de ideias.

À minha Mãe, Pai, restante família e em especial à minha Esposa pelo incentivo, ajuda e paciência.

A todos aqueles que de alguma forma colaboraram na execução deste projecto.

Índice de conteúdos

1. Introdução.....	1
2. Pesquisa bibliográfica	5
2.1. Processo de fundição em moldações de gesso.....	5
2.1.1. Características do gesso.....	8
2.1.2. Ferramentas elastoméricas.....	9
2.1.3. Preparação do gesso.....	9
2.2. Materiais usados no fabrico de moldes.....	10
2.2.1. Resina Epoxídica	11
2.2.1.1. Junção de aditivos na resina Epoxídica.....	12
2.2.2. Borracha de poliuretano (PU).....	13
2.2.3. Silicone	16
2.2.3.1. Silício	17
2.2.3.2. Silanos	18
2.2.3.3. Processo Rochow	18
2.2.3.4. Reacções químicas para obtenção do silicone como produto final.....	19
2.2.3.5. Produtos inibidores de silicones RTV's.....	22
2.2.3.6. Diferenças entre os silicones RTV-2 de condensação e de adição	23
2.2.3.7. Adesão do silicone	24
2.3. Ferramentas de projecto.....	25
2.3.1. Desenho técnico assistido por computador	25
2.3.2. Prototipagem rápida.....	26
2.3.2.1. Fabricação de objectos por camadas – LOM	27
2.3.2.2. Processo de estereolitografia.....	29
2.4. Tecnologias de fabrico de modelos.....	31

2.4.1.	Execução de “Masters”	31
2.4.2.	Obtenção de cavidades de cobre – electrodeposição	33
2.4.2.1.	"Electroforming"	33
3.	Trabalho experimental	39
3.1.	Processo de Fundição	39
3.2.	Meios laboratoriais	42
3.3.	Projecto de ferramentas	49
3.3.1.	Ferramentas para obtenção de modelos de silicone	49
3.3.1.1.	1ª Geração de ferramentas para reprodução de silicones.....	49
3.3.1.2.	2ª Geração de ferramentas para reprodução de silicones.....	51
3.3.1.3.	3ª Geração de ferramentas para reprodução de silicones.....	56
3.3.1.4.	4ª Geração de ferramentas para reprodução de silicones.....	60
3.3.1.5.	Esqueletos (estrutura rígida dos modelos de silicone (moldes))	65
3.3.2.	Ferramentas para obtenção de placas molde.....	67
3.3.2.1.	Evolução das placas molde e suas ferramentas de revestimento	67
3.3.2.1.1.	1ª Geração de Placas molde	69
3.3.2.1.2.	2ª Geração de Placas molde	71
3.3.2.1.3.	3ª Geração de Placas molde	73
3.3.2.2.	Optimização da montagem dos modelos de silicone (moldes)	76
3.3.3.	Ferramentas para obtenção de caixas de moldação	78
3.3.3.1.	Evolução das caixas de moldação e suas ferramentas de revestimento.....	78
3.3.3.1.1.	1ª Geração de caixas de moldação	80
3.3.3.1.2.	2ª Geração de caixas de moldação	82
3.4.	Processo de obtenção de modelos de silicone (moldes).....	85
3.4.1.	Procedimento de fabrico de modelos de silicone (moldes).....	86
3.4.2.	Processo poliuretano	91
3.4.2.1.	Características gerais	91

3.4.2.2.	Análise ao processo poliuretano.....	99
3.4.3.	Processo silicone	99
3.4.3.1.	Características gerais.....	99
3.4.3.2.	Análise ao processo silicone	103
3.4.4.	Processo cobre	105
3.4.4.1.	Características gerais.....	105
3.4.4.2.	Deposição de cobre	107
3.4.4.3.	Remoção do alumínio.....	113
3.4.4.4.	Limpeza e abrilhantamento da superfície de cobre.....	118
3.4.4.5.	Modelos de silicone.....	119
3.4.4.6.	Análise ao processo cobre.....	120
3.5.	Optimização do processo de obtenção de modelos de silicone (moldes)	120
3.5.1.	Metodos de controlo dimensional.....	121
3.5.2.	Resultados dimensionais	124
3.5.2.1.	Processo poliuretano	127
3.5.2.2.	Processo silicone	131
3.5.2.2.1.	Evolução dimensional das cavidades rígidas em resina epoxídica ao longo do tempo	134
3.5.2.3.	Processo cavidade de cobre.....	139
3.5.2.3.1.	Influência da temperatura na cura do silicone	141
3.5.2.3.2.	Estudo comportamental dos vários tipos de silicone em função da temperatura	143
3.5.3.	Conclusões dos estudos dimensionais	145
3.6.	Estudo da durabilidade dos modelos de silicone em produção	146
4.	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	153
5.	Referências e Bibliografia.....	157

Índice de figuras

Figura 1-1 – Turbocompressor em corte [1].	1
Figura 1-2 – Turbinas obtidas pelo processo de cera perdida [2].	2
Figura 1-3 – Desenho em CAD 3D de um impulsor.....	2
Figura 2-1 – Ilustração do método de fabrico de moldações de gesso [2].	6
Figura 2-2 – Tipos possíveis de vazamentos para o processo de obtenção de impulsores; a) Processo de vazamento em baixa pressão; b) Processo de vazamento em contra-gravidade por acção de vácuo [2].	7
Figura 2-3 – Ilustração das dimensões ideais para mistura do gesso [2].	10
Figura 2-4 – Estrutura de uma molécula de resina epoxídica [7].....	11
Figura 2-5 – Esquema da reacção para criação do anel de epoxídica [7].	11
Figura 2-6 – Esquema das estruturas de domínios nos PU's [9].	16
Figura 2-7 – Fórmula de estrutura da molécula do silicone através de cura peroxídica (HTV) [11].....	20
Figura 2-8 – Fórmula de estrutura do silicone com cura por adição [11].	21
Figura 2-9 – Fórmula de estrutura da molécula de silicone com cura por condensação (RTV-2) [11].....	21
Figura 2-10 – Fórmula de estrutura da molécula do silicone com cura por condensação (RTV-1) [11].	22
Figura 2-11 – Ilustração explicativa sobre a adesão do silicone [11].....	24
Figura 2-12 – Exemplo de um componente protótipo em LOM de uma ferramenta.	29
Figura 2-13 – Esquema de funcionamento do processo de estereolitografia [25].	30
Figura 2-14 – Exemplo de um componente protótipo em "SLA" de uma ferramenta	31
Figura 2-15 – Esquema de funcionamento do processo de “electroforming” [12].....	34
Figura 2-16 – Factores a serem considerados na concepção do Master para ser submetido a electroformação [9].....	37
Figura 3-1 – Esquema detalhado do processo de fundição com moldações de gesso.....	40
Figura 3-2 – Moldação em gesso.	41
Figura 3-3 – Pormenor de um conjunto placa molde e caixa de moldação.	41
Figura 3-4 – Balança de precisão usada no desenvolvimento do trabalho.	43
Figura 3-5 – Tina de limpeza por ultra sons.	44
Figura 3-6 – Câmara de vácuo.	44
Figura 3-7 – Granalhadora e respectivo filtro.	45

Figura 3-8 – Hélice usada nas misturas automáticas de resina epoxídica e silicone.	46
Figura 3-9 – Mufla para efectuar curas a temperatura controlada.	46
Figura 3-10 – Prensa hidráulica usada na desmoldagem das caixas de moldação.....	47
Figura 3-11 – Imagens da máquina de controlo dimensional "Quickvision" da "Mitutoyo".	48
Figura 3-12 – Imagem da ferramenta exploratória	50
Figura 3-13 – CAD 3D da ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes).	52
Figura 3-14 – Aspecto final da 2ª geração de ferramenta de reprodução.	53
Figura 3-15 – Demonstração da direcção provocada pela expansão térmica da resina epoxídica.	54
Figura 3-16 – Imagem ilustrativa do fenómeno de destruição que ocorre na resina rígida.	55
Figura 3-17 – Apresentação dos três moldes necessários para fabricação dos componentes da ferramenta de reprodução em resina rígida.	57
Figura 3-18 – Vista em corte do molde de execução da base da ferramenta de reprodução.....	57
Figura 3-19 – Ferramenta em alumínio para a fabricação da base em resina.	58
Figura 3-20 – Pormenor dos insertos com interior roscado.	58
Figura 3-21 – Exemplo de um componente da ferramenta em resina.....	59
Figura 3-22 – Conjunto da ferramenta de reprodução em resina.	60
Figura 3-23 – Definição da forma interior da ferramenta de reprodução.	61
Figura 3-24 – Apresentação dos componentes principais da ferramenta de reprodução.	62
Figura 3-25 – Anel porta cavidades da ferramenta de reprodução de modelos.	63
Figura 3-26 – Anel central da ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes).	64
Figura 3-27 – Base furada da ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes).	64
Figura 3-28 – Pormenor de uma ferramenta de reprodução de modelos.	65
Figura 3-29 – Evolução da geometria dos esqueletos; a) 1ª geração, b) 2ª geração.....	66
Figura 3-30 – Pormenor do modelo de silicone em corte (esqueleto + silicone).	67
Figura 3-31 – Esquema de montagem dos modelos de silicone, da placa molde e da caixa de moldação. ...	68
Figura 3-32 – 1ª Geração de ferramenta de revestimento de placas molde.	69
Figura 3-33 – 1ª e 2ª geração de placa molde.	70
Figura 3-34 – Descrição da 2ª geração da ferramenta de revestimento de placas molde.	72
Figura 3-35 – 2ª geração da ferramenta de revestimento de placas molde.	72
Figura 3-36 – Exemplo da 3ª geração da placa molde.	74
Figura 3-37 – Vista em corte da ferramenta de revestimento de placas molde.....	74

Figura 3-38 – Pormenor de uma placa molde revestida.....	75
Figura 3-39 – Indicação de encaixe do modelo de silicone na placa molde.	76
Figura 3-40 – Pormenor da alteração na geometria dos postigos.....	77
Figura 3-41 – Sequência de desmoldação das moldações.....	79
Figura 3-42 – 1ª Geração de caixa de moldação.....	80
Figura 3-43 – Ferramenta de revestimento de caixas de moldação da 1ª geração.....	81
Figura 3-44 – Aspecto da 1ª geração da caixa de moldação em conjunto com a placa molde.	82
Figura 3-45 – 2ª Geração da caixa de moldação.	83
Figura 3-46 – Pormenor real de uma caixa de moldação.....	84
Figura 3-47 – Peça interior da ferramenta de revestimento da caixa de moldação.....	84
Figura 3-48 – Ferramenta de revestimento da caixa de moldação.....	85
Figura 3-49 – Etapas principais dos vários processos de obtenção de modelos.	86
Figura 3-50 – Demonstração do posicionamento do esqueleto na base da ferramenta de reprodução.....	88
Figura 3-51 – Cavidade com silicone vazado no seu interior.....	89
Figura 3-52 – Processo de degaseificação do silicone após vazamento na cavidade.....	89
Figura 3-53 – Exemplo do fecho da ferramenta após vazamento do silicone.....	90
Figura 3-54 – Sistema de desmoldagem dos modelos de silicone (moldes).	90
Figura 3-55 – Exemplo de um modelo de silicone (molde).....	91
Figura 3-56 – Esquema da sequência dos passos do processo poliuretano.....	92
Figura 3-57 – Imagens demonstrativas da execução da cavidade de poliuretano.....	92
Figura 3-58 – Exemplo da geometria complexa de um Master maquinado em alumínio.	93
Figura 3-59 – Exemplo demonstrativo da evolução dimensional dos Masters oriundos da mesma cavidade de poliuretano (medição da altura das alhetas em três pontos diferentes).....	94
Figura 3-60 – Exemplo de um Master de silicone retirado da respectiva cavidade de poliuretano.	95
Figura 3-61 – Exemplificação da espessura controlada da parede de uma cavidade em resina epoxídica.	96
Figura 3-62 – Evolução da temperatura durante a cura da resina.	97
Figura 3-63 – Exemplo de uma cavidade de resina epoxídica.	98
Figura 3-64 – Modelo de silicone (molde).....	98
Figura 3-65 – Esquema da sequência de trabalho do processo silicone.	100
Figura 3-66 – Exemplo de um Master de resina.	102
Figura 3-67 – Evolução dimensional dos Masters realizados a partir da mesma cavidade de silicone.....	104

Figura 3-68 – Evolução dimensional do diâmetro dos Masters provenientes da mesma cavidade de silicone.	104
Figura 3-69 – Exemplo de uma cavidade de cobre.	106
Figura 3-70 – Indicação das zonas de maior dificuldade de deposição de cobre.....	108
Figura 3-71 – Desenho em CAD 3D da estrutura dos eléctrodos de titânio.....	109
Figura 3-72 – a) imagem da montagem em desenho de CAD 3D. b) imagem real da montagem dos eléctrodos na peça fundida.....	109
Figura 3-73 – Resultado final da deposição de cobre.....	110
Figura 3-74 – Imagem ilustrativa da alteração do Master para se proceder à electrodeposição de cobre.....	111
Figura 3-75 – Exemplo de um desenho 2D das alterações a executar à cavidade de cobre.....	112
Figura 3-76 – Exemplo da alteração geométrica realizada ao cobre depositado.	112
Figura 3-77 – Ilustração da reacção de dissolução do alumínio.	116
Figura 3-78 – Neutralização do ácido.....	116
Figura 3-79 – Limpeza da cavidade de cobre com água corrente.	117
Figura 3-80 – Introdução da cavidade no balde de ácido.....	117
Figura 3-81 – Demonstração de uma dissolução incompleta do alumínio.	118
Figura 3-82 – Aspecto final da cavidade de cobre, após o procedimento de limpeza e abrilhantamento. .	119
Figura 3-83 – Imagem dos Masters usados no estudo dimensional; a) Master BW50, b) Master BW75. .	121
Figura 3-84 – Sistema de medição por análise de imagem.	122
Figura 3-85 – Esquema demonstrativo dos meios de medição usados durante o desenrolar dos processos de conversão.	123
Figura 3-86 – Definição das dimensões a controlar e respectivos valores em mm. BW50 (BW75).	124
Figura 3-87 – Evolução da altura das alhetas ao longo do tempo.....	135
Figura 3-88 – Evolução da altura das pás na primeira semana de existência.	136
Figura 3-89 – Evolução da altura das pás após a primeira semana de existência.....	136
Figura 3-90 – Evolução do diâmetro das alhetas ao longo do tempo.....	137
Figura 3-91 – Evolução do diâmetro das alhetas durante a primeira semana de existência.....	137
Figura 3-92 – Evolução do diâmetro das alhetas após a primeira semana de existência.....	138
Figura 3-93 – Evolução do diâmetro da base ao longo do tempo.	138
Figura 3-94 – Imagens ilustrativas do molde e respectivos provetes.....	144
Figura 3-95 – Evolução da contracção do silicone em função da temperatura de cura.....	145

Figura 3-96 – Demonstração da deformação geométrica provocada pela produção de moldações.	147
Figura 3-97 – Definição das cotas controladas no estudo de durabilidade dos modelos de silicone em produção.....	149
Figura 3-98 – Evolução dimensional da altura das alhetas dos modelos de silicone (moldes).	150

Índice de tabelas

Tabela 2-1 – Lista de materiais potencialmente inibidores de silicones RTV's	23
Tabela 2-2 – Diferença entre os silicones com cura por condensação ou por adição.....	23
Tabela 2-3 – Valores das contracções ou mingas dos materiais usados nos processos de obtenção de modelos.	32
Tabela 3-1 – Dimensões do Master em alumínio maquinado BW50.....	125
Tabela 3-2 – Dimensões do Master em alumínio maquinado BW75.....	126
Tabela 3-3 – Dimensões do Master de silicone BW50 obtido pelo processo da cavidade de poliuretano. .	127
Tabela 3-4 – Dimensões do Master de silicone BW75 obtido pelo processo da cavidade de poliuretano. .	128
Tabela 3-5 – Diferenças entre Master maquinado e Master em silicone.	128
Tabela 3-6 – Dimensões do Modelo de silicone BW50 obtido pelo processo da cavidade de poliuretano..	129
Tabela 3-7 – Dimensões do Modelo de silicone BW75 obtido pelo processo da cavidade de poliuretano..	129
Tabela 3-8 – Diferenças entre o Master maquinado e o Modelo de silicone.....	130
Tabela 3-9 – Dimensões do Master de resina BW50 obtido pelo processo da cavidade de silicone.	131
Tabela 3-10 – Dimensões do Master de resina BW75 obtido pelo processo da cavidade de silicone.	132
Tabela 3-11 – Diferenças entre Master maquinado e Master de resina.	132
Tabela 3-12 – Dimensões do Modelo de silicone BW50 obtido pelo processo da cavidade de silicone.....	133
Tabela 3-13 – Dimensões do Modelo de silicone BW75 obtido pelo processo da cavidade de silicone.....	133
Tabela 3-14 – Diferenças entre Master maquinado e Modelo de silicone.....	134
Tabela 3-15 – Dimensões do Modelo de silicone BW50 obtido pelo processo da cavidade de cobre.....	139
Tabela 3-16 – Dimensões do Modelo de silicone BW75 obtido pelo processo da cavidade de cobre.....	140
Tabela 3-17 – Diferenças entre o Master maquinado e o Modelo de silicone.....	140
Tabela 3-18 – Dimensões do Modelo de silicone BW50 a diferentes temperaturas de cura.	141
Tabela 3-19 – Dimensões do Modelo de silicone BW75 a diferentes temperaturas de cura.	142
Tabela 3-20 – Valores médios da altura das alhetas em função do número de moldações fabricadas.	149

Abreviaturas

2D – Two Dimensional – Duas dimensões

3D – Three dimensional – Três dimensões

CAD – Computer Aided Design – Projecto Assistido por Computador

CAE – Computer Aided Engeneering – Engenharia Assistida por Computador

CAM – Computerized Aided Machining – Maquinagem Assistida por Computador

CIM – Computer Integrated Manufacturing – Fabricação integrada por computador

CNC – Computerized Numerical Control – Controlo Numérico computadorizado

FDM – Fused Deposition Modelling – Modelação por extrusão de plástico

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HTV – High Temperature Vulcanization

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

LOM – Laminated Object Manufacturing – Fabricação de Objectos por Camadas

RIM – Reaction Injection Molding – Moldação por injeção por reacção

RTV - Room Temperature Vulcanization - Temperatura de vulcanização controlada

RTV 1 – Room Temperature Vulcanization (silicon of one Component) – Temperatura de vulcanização controlada (silicone de um componente)

RTV 2 - Room Temperature Vulcanization (silicon of two Components) - Temperatura de vulcanização controlada (silicone de dois componentes)

SLA – Stereolithography - Estereolitografia

Nomenclatura

CO_2 – Dióxido de Carbono

$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ – Sulfato de cálcio hidratado

SiO_2 – Óxido de silício

Si – Silício

C – Carbono

Cu – Cobre

Δl – Expansão

α – Coeficiente de expansão

ΔT – Diferença de temperatura

L – Comprimento da secção

l_0 – Comprimento inicial

l_1 – Comprimento final

1. Introdução

Os motores dos automóveis mais recentes, particularmente os motores a diesel, têm uma tendência crescente para serem compactados, o que levou à adopção sistemática de sobrealimentação com o auxílio de vários tipos de compressores do ar de admissão, nomeadamente dos turbocompressores. Esta metodologia tem uma certa tendência a propagar-se aos motores a gasolina, embora as suas mais elevadas temperaturas de funcionamento exijam materiais para as turbinas e para os compressores que ainda não se encontram plenamente desenvolvidos, nomeadamente os titanatos de alumínio para as turbinas e as ligas de titânio convencionais para os compressores.

Um turbocompressor (figura 1-1) para um motor de um automóvel é basicamente constituído por duas volutas, uma para a turbina que recebe os gases quentes do escape e outra para o impulsor compressor que vai comprimir o ar de admissão. A turbina e o compressor estão solidários através de um veio com lubrificação sob pressão [1].

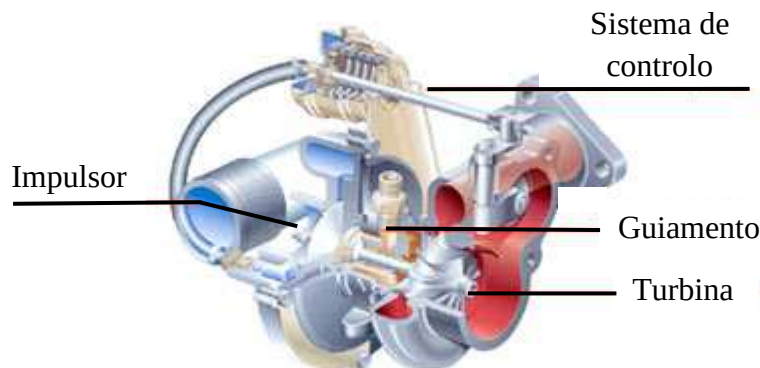


Figura 1-1 – Turbocompressor em corte [1].

A turbina utiliza a energia cinética proveniente dos gases de escape do motor para accionar o compressor. Esta, por sua vez, através de um eixo, transfere esta energia ao compressor localizado na admissão do motor. Ao atingir determinada rotação e carga, o compressor começa a gerar pressão positiva no colector de admissão. Ou seja, aumenta a massa de ar que o motor admite por ciclo, fazendo-o comprimir o ar, (adicionando-lhe calor para aumento da entropia) [1].

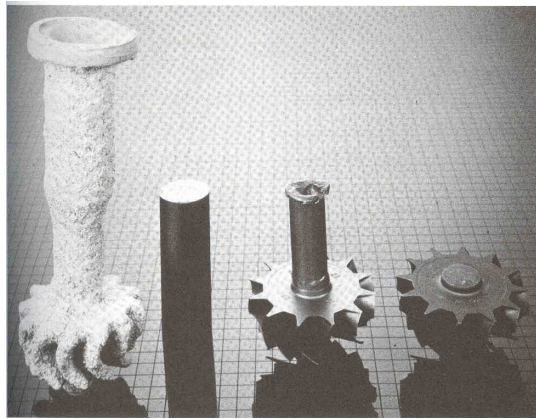


Figura 1-2 – Turbinas obtidas pelo processo de cera perdida [2].

As turbinas diesel actuais trabalham normalmente a temperaturas médias da ordem dos 700 – 800°C e, por isso, são feitas em ligas de Níquel (Inconel) pelo processo de fundição por cera perdida, figura 1.2. Os impulsores trabalham a menos de 300°C e por isso podendo ser fabricados por fundição de precisão em ligas de alumínio de alta resistência. Como a geometria dos impulsores mais recentes é extremamente complexa, figura 1.3, com as pás simultaneamente axiais e radiais, não é possível a utilização económica do processo da cera perdida, porque por um lado os moldes teriam que ter gavetas com movimentos curvilíneos complexos e por outro lado o custo das carapaças cerâmicas seria muito elevado (o valor comercial de um impulsor de $\varnothing 40 - 60$ mm não passa de 2-3€).

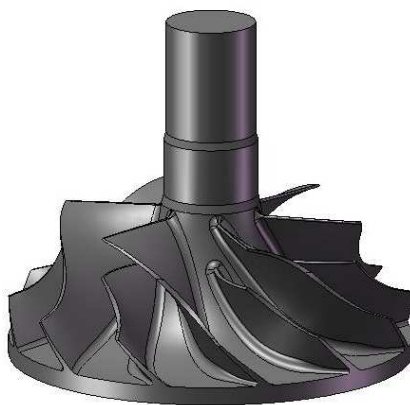


Figura 1-3 – Desenho em CAD 3D de um impulsor.

Actualmente, a obtenção de compressores em alumínio pode ser realizada de dois modos diferentes, por maquinagem, cujo preço de fabrico o torna pouco competitivo, ou pelo processo de fundição com vazamento de alumínio em moldações de gesso, que quando bem executado permite a fabricação de peças em grandes séries com níveis qualitativos próximos aos das peças maquinadas [1].

Contudo, as poucas empresas no mundo que fabricam este tipo de peças de precisão mantêm em segredo as suas tecnologias. Este facto associado à procura crescente deste tipo de peças no mercado, suscitou o interesse da Zollern & Comandita, empresa que actualmente produz outros tipos de componentes para turbocompressores.

A Zollern & Comandita, empresa sediada na Maia há cerca de 15 anos, que se dedica, desde então, à fabricação de peças em aço através do processo de fundição de precisão de cera perdida, muitas das quais são utilizadas no sector automóvel e em particular na indústria dos turbocompressores, decidiu aproveitar a oportunidade de negócio com vista a alargar o seu leque de produtos com grande potencial de facturação. Para tal, escolheu como parceiro tecnológico a instituição INEGI, sediada no Porto, que se dedica à investigação e desenvolvimento e que reunia as condições ideais a nível de conhecimento técnico para desenvolver esta tecnologia. Esta parceria iniciou, então, o desenvolvimento do processo de fabricação de compressores, usando o processo de vazamento de alumínio em moldações de gesso.

O desenvolvimento deste processo de obtenção de compressores (impulsores) em alumínio exigiu a investigação de diversas tecnologias independentes, tais como a execução de ferramentas elastoméricas para obtenção de moldações de gesso, a própria fabricação de moldações em gesso e o vazamento de ligas de alumínio por acção de vácuo em contra-gravidade em moldações de gesso [2].

Este projecto em particular, teve como objectivo principal o desenvolvimento e optimização das ferramentas elastoméricas para obtenção das moldações de gesso. Como o estado dimensional e o acabamento superficial das ferramentas elastoméricas têm um impacto importante no resultado final das peças fundidas, houve a necessidade de desenvolver ferramentas especiais e processos de conversão para a obtenção de modelos de silicone, assim como placas molde e caixas de moldação e suas ferramentas de revestimento.

A fim de seleccionar e optimizar o melhor processo de conversão, efectuaram-se estudos dimensionais aos modelos de silicone e subprodutos das conversões, através da utilização de

sistemas de medição sem contacto. Para isso, estudou-se os comportamentos dos materiais em termos de durabilidade e de funcionalidade, quando combinados entre si.

A parte experimental deste trabalho inicia-se com a explicação e evolução das ferramentas e métodos de conversão necessários para obter os modelos de silicone (moldes), que idealmente devem de ser cópias fiéis de uma peça Mãe, ou Master. De seguida, encontram-se apresentados alguns estudos dimensionais realizados, com o objectivo de conhecer e otimizar as diferenças entre os vários processos de conversão desenvolvidos, a durabilidade dos materiais em utilização no processo produtivo, a influência da temperatura no resultado dimensional dos modelos de silicone, assim como a sua durabilidade.

É necessário mencionar que o desenvolvimento do processo de fabrico dos compressores (impulsores) permitiu à Zollern & Comandita a comercialização dos mesmos. Pelo que neste momento é uma das empresas detentoras do conhecimento necessário à sua produção e por isso exigiu confidencialidade em relação aos pormenores mais técnicos deste projecto. Sendo assim, apresenta-se de seguida todo o processo de desenvolvimento e optimização das ferramentas elastoméricas para obtenção das moldações de gesso, mas com a ressalva de apenas se referir o permitido pela empresa.

2. Pesquisa bibliográfica

Sendo este projecto exclusivamente dedicado ao estudo de moldes para o processo de fundição em moldações de gesso, a pesquisa bibliográfica incide apenas sobre generalidades do processo de fundição em moldações de gesso e sobre alguns materiais e técnicas usadas na concepção de moldes, nomeadamente materiais elastoméricos como os poliuretanos e os silicones e rígidos como as resinas epoxídicas e o cobre electrolítico.

Salienta-se no entanto que o processo de fabrico de impulsores em ligas de alumínio é um processo muito fechado e que não abundam nas referências bibliográficas as abordagens de questões específicas relacionadas com estas tecnologias, o que de certa forma pode justificar o baixo número de referências nesta pesquisa bibliográfica.

2.1. Processo de fundição em moldações de gesso

O processo correntemente utilizado para produzir os impulsores é um processo de fundição de precisão em moldações bloco de gesso, usando ferramentas (moldes ou placas molde) elastoméricas [1]. É frequentemente referido na literatura que o processo para obtenção destes impulsores é o processo das moldações em gesso (“Plaster molding”) [2]. Na figura 2-1 podem observar-se algumas imagens ilustrativas deste processo.

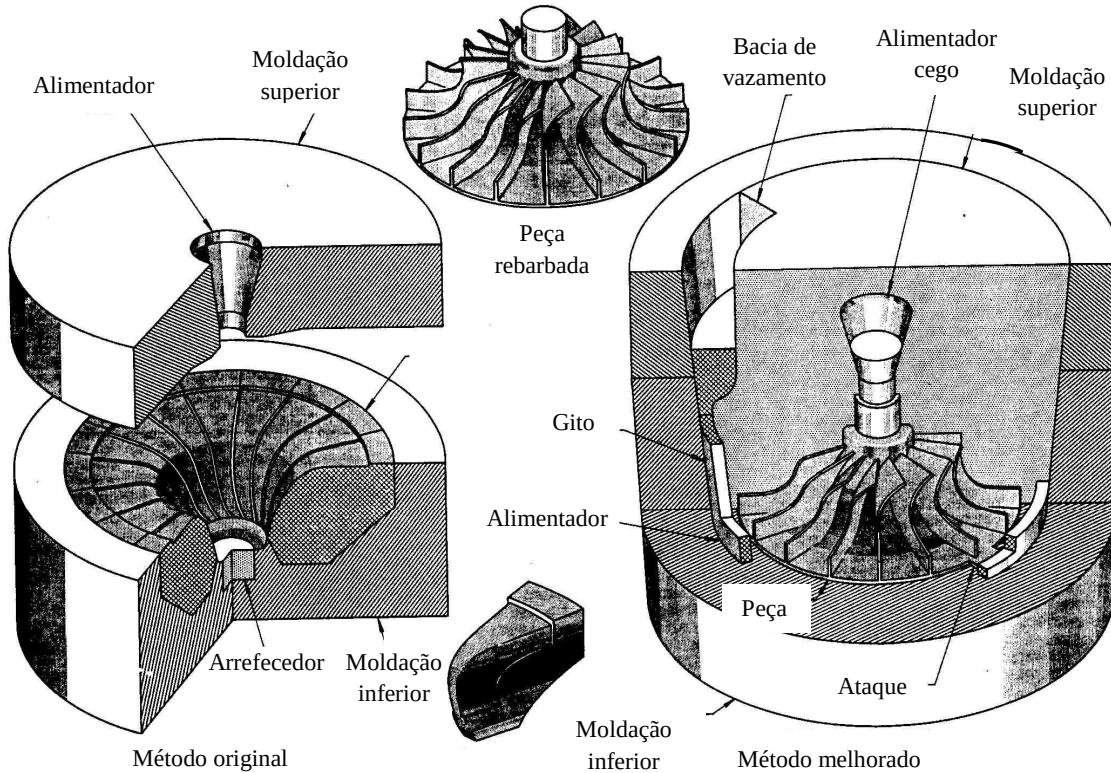


Figura 2-1 – Ilustração do método de fabrico de moldações de gesso [2].

Devido ao facto do gesso ser um material pouco permeável, e de haver a necessidade de obter peças com espessuras extremamente finas, até os 0,3mm, é necessário forçar o enchimento das moldações com alumínio através do auxílio de pressão de injeção (processo de baixa pressão), ou através da realização de vácuo sobre a moldação [2], tal como se exemplifica na figura 2-2.

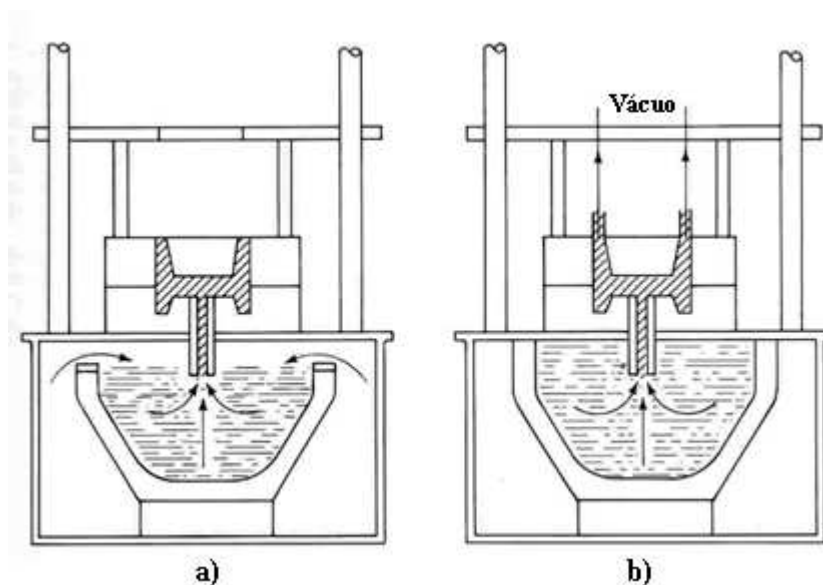


Figura 2-2 – Tipos possíveis de vazamentos para o processo de obtenção de impulsores; a) Processo de vazamento em baixa pressão; b) Processo de vazamento em contra-gravidade por acção de vácuo [2].

A nível qualitativo, as maiores vantagens inerentes à utilização do processo de moldações de gesso são, a nível qualitativo, as seguintes:

- É possível obter peças com acabamentos superficiais muito próximos dos 0,8Ra, utilizando modelos de silicone;
- A nível dimensional consegue-se obter resultados muito bons;
- Paredes com espessura muito fina são possíveis de ser obtidas por este processo, uma vez que permite taxas de arrefecimento muito lentas (baixa condutibilidade térmica do gesso);
- A baixa taxa de arrefecimento ajuda a uniformizar a estrutura metalográfica do alumínio, melhorando as suas propriedades mecânicas;
- Realização de sistemas de arrefecimento que possibilitam controlar os gradientes térmicos no interior da moldação de gesso durante o vazamento de alumínio, melhorando assim as características mecânicas dos fundidos

A nível de desvantagens, pode-se dizer que estão mais relacionadas com a parte processual, tais como:

- Necessidade de múltiplas ferramentas de fundição devido à lentidão do processo;

- Custo elevado devido à lentidão do processo e principalmente devido ao facto dos materiais usados não poderem ser reutilizados;
- Requer muitos mais equipamentos em relação aos outros processos de fundição;
- A permeabilidade das moldações em gesso é muito baixa;
- Cada fase do processo deve ser muito bem controlada, para que haja uma boa reprodutibilidade.

A obtenção de peças fundidas através do processo de vazamento de alumínio em moldações em gesso é mais dispendioso que os processos de vazamento em moldações de areia. Contudo, as moldações em gesso são apenas usadas quando nenhum dos outros processos consegue responder à precisão e rugosidade exigida. turbinas de geometria complexa, componentes electrónicos e moldes para pneus de borracha, são alguns exemplos de peças que são obtidas em moldações de gesso.

Para o fabrico de moldações, existem duas qualidades de gesso que normalmente são usadas, o gesso espuma e o gesso denso. O gesso espuma tem como vantagem principal o facto de ser mais permeável do que o denso, mas em contra partida, é mais difícil de ser processado, pelo facto de provocar defeitos superficiais nas superfícies críticas das peças a obter [2-6].

2.1.1. Características do gesso

O principal ingrediente do gesso é o sulfato de cálcio, com adição de outros materiais, tais como cimento, talco, fibra de vidro, areia, “wollastanite”, entre outros, para melhorar propriedades como a resistência no estado verde e em seco, a permeabilidade e assim facilitar o processo de vazamento.

De forma geral, qualquer gesso comercial, quando aquecido a uma temperatura de aproximadamente 128°C, perde três quartos da água da sua composição, transformando-se em gesso hemidratado, mais conhecido como o “gesso de paris”. Contudo, quando este é aquecido a uma temperatura de equilíbrio superior a 163°C, toda a água é removida e transformando-se em gesso anidrido.

Para a produção de moldações de gesso, é necessário misturar o gesso hemidratado com água de forma a obter uma espécie de lama, que quando preparada tem de ser imediatamente vazada sobre o modelo (molde) no interior da caixa de moldação. Após vazamento é necessário esperar que o gesso solidifique de modo a que seja possível ser desmoldado do molde e da caixa de moldação sem ser deformado.

O próximo passo é secar a moldação de forma a retirar todo o excesso de água da sua composição, segundo ciclos de secagem predefinidos [2-6].

2.1.2. Ferramentas elastoméricas

Para o fabrico de moldações de gesso é muito comum recorrer ao uso de ferramentas elastoméricas em silicone, principalmente por este ser um material autodesmoldante e por permitir a execução de peças com geometrias complexas (com contrasaídas). Neste tipo de processo de fundição não é possível usar madeira para o fabrico das ferramentas, uma vez que o permanente contacto desta com a água do gesso iria limitar o seu tempo de vida.

A standardização das caixas de moldação é de extrema importância para o sistema de produção, para simplificar as ferramentas, especialmente quando se usa vazamentos com a acção do vácuo. Deste modo a caixa de moldação possui flexibilidade suficiente, de modo a permitir a obtenção de diferentes tipos de peças diferentes [2-6].

2.1.3. Preparação do gesso

A nível de preparação e de composição da mistura, pode-se dizer que é comum realizar misturas de gesso comercial ($\text{CaSO}_4\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) e água, as suas proporções variam mediante o tipo de gesso usado e do tipo de resultado que se pretende obter.

O equipamento principal necessário para efectuar a mistura, consiste num balde e num misturador. Para que a mistura seja realizada de uma forma eficiente é conveniente seguir algumas regras na definição das dimensões e geometria do balde e do misturador. O balde deve ter uma altura igual ou maior ao seu diâmetro superior. Quanto ao diâmetro inferior, este deve ser cerca de dois terços do tamanho do diâmetro superior. Em relação ao misturador, este deve estar a uma altura compreendida entre os 25 e os 50mm da base do balde. O ângulo de

inclinação do misturador deve fazer cerca de 10 a 15° com a vertical e 20 a 30° em relação ao plano vertical que divide simetricamente o balde, tal como se pode ver na imagem seguinte:

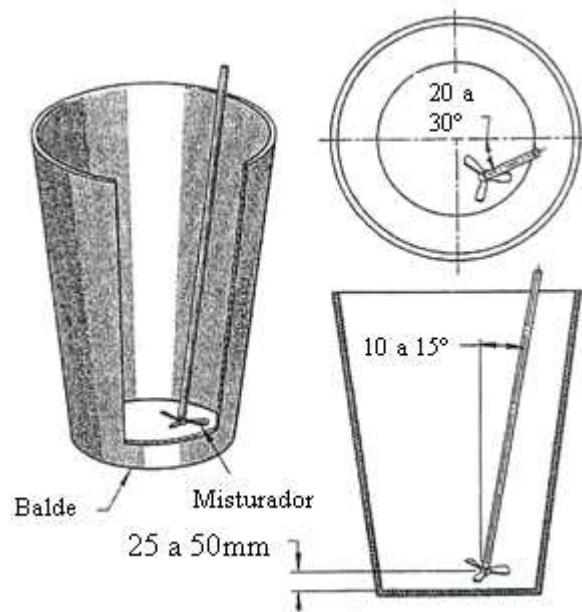


Figura 2-3 – Ilustração das dimensões ideais para mistura do gesso [2].

A velocidade de rotação deve estar compreendida entre os 1725 e 1760 rpm, O seu tamanho e a sua força depende da quantidade de gesso que se pretende preparar em cada lote.

Os tempos de mistura têm de ser controlados, tendo em conta que este factor varia consoante a qualidade de gesso usado.

Em relação à secagem das moldações, é aconselhável realizar uma cura num forno de convecção forçada ventilado a uma temperatura e tempo que o tipo de gesso usado exige. Por exemplo, para uma moldação de gesso polimérico, é comum realizar curas em fornos que seguem um ciclo predefinido pelo fabricante do gesso em questão [2].

2.2. Materiais usados no fabrico de moldes

Os vários processos de conversão, que têm como objectivo a produção de modelos que têm de reproduzir o mais fielmente possível as características geométricas e dimensionais do Master, ou peça Mãe, usam normalmente materiais elastoméricos e/ou rígidos, que permitam a sua aplicação através de vazamento por gravidade [7]. Da grande diversidade de gamas e tipos de materiais, destacam-se as resinas epoxídicas, as borrachas de poliuretano e os silicones do tipo RTV, que se encontram de seguida apresentados.

2.2.1. Resinas Epoxídicas

A resina epoxídica ou poliepóxido, é um polímero termoendurecível, que polimeriza quando se mistura com um agente catalisador. As resinas epoxídicas mais frequentes são produtos de uma reacção entre epiclorohidrina e o bisfenol-a. As primeiras tentativas comerciais de preparação de resina através da epiclorohidrina ocorreram em 1927 nos Estados Unidos. O mérito da primeira síntese de uma resina baseada no bisfenol-a foi compartilhado entre o Dr. Pierre Castan, da Suíça, e o norte-americano Dr. S. O. Greenlee em 1936 [7].

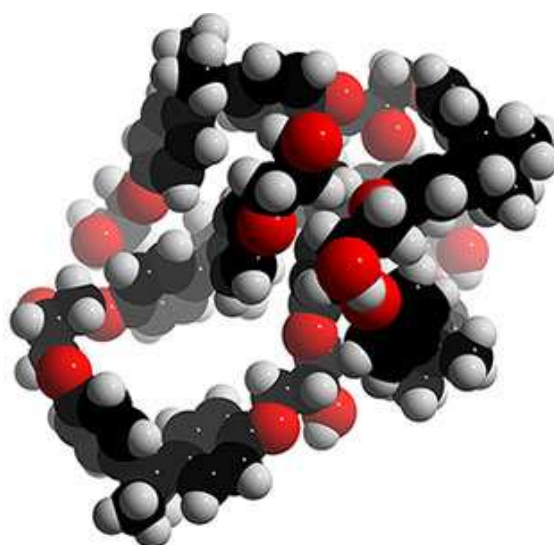


Figura 2-4 – Estrutura de uma molécula de resina epoxídica [7].

A resinas epoxídicas são caracterizadas pela estrutura em anel epoxídica de três membros (ver Figura 2.4), que é muito forte e reactiva com a maioria das substâncias, e que origina uma reacção com a forma esquemática a seguir representada:

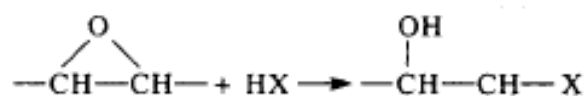


Figura 2-5 – Esquema da reacção para criação do anel de epoxídica [7].

Este tipo de reacção pode originar cadeias de extensões e/ou ligações sem eliminação de pequenas moléculas como as da água, que no caso de existirem podem reagir por um tipo de

reação de polimerização reorganizada, o que faz com que este material possua baixos valores de contracção em comparação com outros tipos de termoendurecíveis.

As resinas mais importantes existentes no mercado, são as preparadas com “bisfenol a” e “epiclorohidrina”. A utilização destes compostos tem como razões principais:

- Facilidade de obtenção;
- Baixo peso molecular;
- Pureza não tem de ser muito elevada, ao contrário de outros compostos;
- Ponto de fusão de 153°C, que permite a sua utilização na maior parte das aplicações;

A nível de catalisadores ou de agentes de endurecimento, o número de produtos disponíveis comercialmente é muito extenso, mas a sua escolha depende de factores como o custo, a facilidade de utilização, “pot life” (tempo de trabalho), tempos de cura e as propriedades mecânicas, químicas, térmicas e eléctricas do produto após cura.

Como regra geral, as “aminas” são de cura mais rápida e dão mais resistência química, mas quase todos têm problemas na pele da superfície curada. Os “emidrados” são menos tóxicos, mas nalguns casos exigem temperaturas de cura altas que provocam deformação geométrica.

Em conjunto com as características de cada agente endurecedor utilizado, convém ter em consideração que as temperaturas e os tempos de cura usados têm sempre um papel fundamental nas propriedades finais da resina epoxídica [7-9].

2.2.1.1. Junção de aditivos nas resinas epoxídicas

O uso das resinas no seu estado original pode ter algumas desvantagens, que nalguns casos podem ser eliminadas através da introdução, durante a preparação da resina, de substâncias, como diluentes, cargas metálicas, plasticizantes, entre outros produtos, mas tendo, sempre em conta um propósito pretendido específico.

Para casos de necessidade de baixar viscosidade da resina, é normal a introdução de diluentes na preparação da resina. Os solventes têm tendência para atrasar a cura, prejudicar

as propriedades mecânicas e poder criar irritação à pele recomendando-se por isso a sua utilização em pequenas quantidades.

As cargas têm um papel importante no fabrico de ferramentas e aplicações para a fundição, nomeadamente:

- Redução de custos;
- Diminuição da contracção;
- Diminuição do coeficiente de expansão;
- Aumento da condutividade térmica;
- Aumento da resistência ao choque;

Para a alteração destas propriedades, é normal a utilização de pós de alumínio, óxidos metálicos, areias, fibras, cobre, aço, entre outros materiais.

Para o aumento da flexibilidade e/ou fluidez da resina, é normal a utilização dos plasticizantes e/ou flexibilizadores. De todos os materiais deste género, os mais aconselháveis são as poliamidas e os polisulfatos de baixo peso molecular, assim como o poliglicol diepóxido.

Por fim e sem nunca esquecer, que os resultados finais desejados numa peça em resina epoxídicas, além de estarem dependentes da resina, catalisador, cargas ou modificadores, e parâmetros de cura utilizados, podem ser bastante influenciados pelo método de utilização e preparação escolhidos, assim como as limitações que a ferramenta utilizada pode impor [7-9].

2.2.2. Borrachas de poliuretano (PU)

Desde os anos 40 que os elastómeros de poliuretano se encontram disponíveis no mercado, e são utilizadas como materiais de engenharia, reconhecidos pelas excelentes propriedades de resistência mecânica, e resistência à abrasão e a óleos, aliados a alta resiliência.

Neste projecto, em particular, foi necessário tirar partido deste material, pela facilidade em ser moldado por vazamento, em conjunto com as suas propriedades elásticas, e na relativa garantia de estabilidade dimensional.

Os poliuretanos foram descobertos por Otto Bayer, em 1937, tornando-se uma fantástica história de sucesso. São produzidos por reacção de poliadição de um isocianato (di ou polifuncional) com um poliol, e com outros agentes auxiliares. Os isocianatos podem ser aromáticos ou alifáticos, enquanto os poliois podem ser poliéteres, poliésteres ou possuir uma estrutura hidrocarbónica.

Embora as propriedades do poliuretano possam ser determinadas principalmente pela escolha do poliol, o isocianato também exerce alguma influência. As propriedades mecânicas são influenciadas pela funcionalidade e pela forma da molécula, assim como a escolha do diisocianato que pode afectar a estabilidade do poliuretano à exposição da luz. Os diisocianatos aromáticos amarelam-se quando expostos à luz, enquanto que os alifáticos mostram-se muito estáveis.

Diferentes técnicas são usadas para o processamento dos elastómeros de PU como é o caso de moldagem por vazamento, centrifugação ou rotação; moldagem por injeção e reacção (RIM); Spray; injeção e extrusão dos TPUs (elastómeros termoplásticos que são comercializados em grânulos e são processados por técnicas usuais de termoplásticos, como a injeção, extrusão ou sopro) e vulcanização como nas borrachas convencionais.

A nível de consumo de PU's, a sua distribuição está assim ordenada:

- RIM sólido → 41%;
- Microcelulares → 18%;
- Termoplásticos → 17%;
- Moldados por vazamento → 17%;
- Moídos → 1%

A possibilidade do fabrico de peças a partir de matérias-primas líquidas vazadas ou injectadas em moldes, é uma característica que diferencia os elastómeros de PU das borrachas sólidas (naturais ou sintéticas) que são moídas ou prensadas, ou injectadas como os termoplásticos. Geralmente, as peças feitas com elastómeros de PU moldados por vazamento (fundidos), ou por RIM, são obtidos na forma final, com a aplicação de uma pós-cura para obtenção das propriedades desejadas. A técnica de vazamento em moldes abertos empregando sistemas de elastómeros de PU, feitos com matérias-primas líquidas, é utilizada em diversas

aplicações como: fabricação de peças técnicas de alto desempenho, revestimento de cilindros de impressão, entre outras.

Existem dois processos para a obtenção de elastómeros de PU vazados, que diferem apenas pela ordem de adição dos reagentes, que podem ser:

- Processo numa etapa – onde o polioliol, diisocianato, extensor de cadeia e catalisador são misturados simultaneamente, e a seguir vazados no molde. Devido ao calor libertado pela reacção, só é possível produzir peças de pequena dimensão;

Os sistemas de uma etapa de cura a frio, normalmente empregam polipropileno glicóis e seus copolímeros e ocasionalmente, polióis poliésteres. A mistura polioliol e poliéster/glicol, tem estabilidade térmica limitada devido à transesterificação (processo químico de transformação dos ésteres).

- Processo de duas etapas (prepolímero) – onde é permitido uma poliadição melhor controlada e com formação de estruturas segmentadas. No processo de prepolímero, na etapa inicial é feita a reacção do diisocianato com o polioliol numa proporção molar igual ou ligeiramente superior a 2:1.

Os sistemas de dois componentes moldados a quente por vazamento em moldes abertos, são normalmente processados da seguinte forma:

- Os prepolímeros (poliuretano no estado primário), são aquecidos até à temperatura de trabalho e é efectuada uma desgaseificação para retiro das bolhas de ar existentes;
- Os agentes de cura (catalisadores) são aquecidos até à temperatura desejada;
- É realizada a mistura dos prepositivos com o agente de cura, com um sistema de mistura adequado para prevenir a formação de bolhas;
- Vazamento da preparação para o interior do molde pré aquecido e com desmoldante no caso de ser necessário;
- Colocação do molde numa estufa para que se processe a cura;
- Desmoldagem da peça e recolocação na estufa para se efectuar a pós cura, e obtenção das propriedades físicas finais;

Convém salientar que existem tipos de poliuretano que podem ser trabalhados à temperatura ambiente e que conseqüentemente não necessitam de pós curas a fim de obter as propriedades finais.

A nível de propriedades físicas e resistência química do poliuretano, pode-se afirmar que são determinados na fase de reacção da cura do material liquido devido à segregação dos segmentos flexíveis e rígidos (ver Figura 2-6). Quanto maior for a polaridade dos segmentos flexíveis, maior será a separação entre as duas fases.

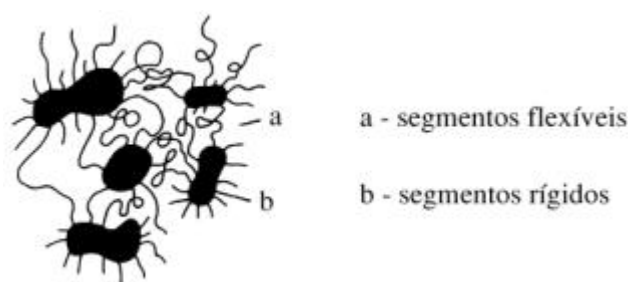


Figura 2-6 – Esquema das estruturas de domínios nos PU's [9].

Propriedades como a tensão de ruptura e extensão na ruptura, que são determinados sob deformação máxima, são limitadas no que diz respeito à previsão do desempenho do material em uso.

Os elastómeros de PU, e todos os materiais poliméricos, comportam-se segundo a lei de Hook, em níveis baixos de carga, onde o material adquire rapidamente a forma inicial quando a tensão é removida. Quando submetidos a grandes cargas durante longos períodos de tempo, aumenta a tendência a deformações permanentes. A distensão dos segmentos flexíveis é reversível, porém os segmentos rígidos podem redistribuir as tensões sofridas, pelo deslizamento das cadeias poliméricas e subseqüentes regenerações das pontes de hidrogénio. Estas alterações localizadas são irreversíveis e podem ser macroscopicamente medidas pela deformação permanente [9-10].

2.2.3. Silicones

Os silicones são industrialmente produzidos a partir de compostos derivados da sílica. Apesar do silício ser o segundo elemento mais comum na crosta terrestre, tem grande afinidade para o oxigénio, o que significa que é encontrado em compostos com oxigénio,

designados por silicatos e dióxido de sílica, que é um material encontrado nos minerais e na areia.

O silício elementar foi descoberta relativamente tarde, devido às fortes energias de ligação entre o silício e o oxigénio [11-17].

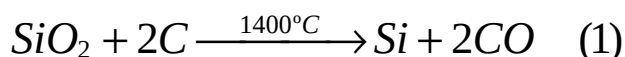
Os primeiros paços no desenvolvimento da produção do silicone, foram:

- A descoberta do silicone por Berzelios, em 1924, através da redução do tetrafluoreto de sílica, na presença de potássio;
- Kipping, considerado o Pai da química do silicone, criou a fundação da indústria, que entre outras coisas, desenvolveu a preparação de vários silanos através da reacção de Grignard e a hidrólise de clorosilanos para produzir “moléculas grandes”.

2.2.3.1. Silício

O elemento silício deriva do termo latim “Síllex” e é normalmente encontrado em combinações de minerais quimicamente e termicamente estáveis, mas nunca em forma pura. O silício é a chave para toda a química do silicone cuja estrutura atómica dita as suas propriedades.

Hoje em dia o silício elementar é obtido através da electro-redução de SiO_2 com carbono a 1400°C .



O silício elementar apresenta-se como um material cinzento-escuro, metálico brilhante, duro e com forma octaédrica. O seu ponto de fusão é 1423°C e o de ebulição encontra-se a 2630°C . Tal como o carbono, o silício apresenta-se com uma estrutura cristalina muito similar à do diamante.

Como um representante do quarto maior grupo da tabela periódica, o silício, tal como o carbono, dispõem de ambas as propriedades, metálicas e não metálicas. No entanto existem algumas diferenças importantes entre os dois elementos, os componentes químicos do silício e do carbono são predominantemente tetravalentes, contudo ambos são capazes de formar altos

e baixos números de coordenação. As diferenças entre o Si e C encontram-se principalmente na baixa electronegatividade entre os dois materiais (1.8 contra 2.5) e no diâmetro atómico (1.15Å contra 0.77Å). O Si forma ligações simples muito estáveis com a electronegatividade do oxigénio, enquanto o carbono pode também formar ligações duplas. As ligações duplas na química do silicone são geralmente limitadas a um pequeno número de componentes de silanos estáveis [11-17].

2.2.3.2. Silanos

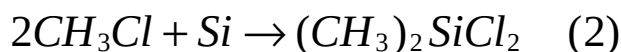
Os Silanos são o homólogo dos hidrogeno-carbonetos saturados, que podem também ser designados por alcanos. Todos eles partilham a mesma fórmula “ $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$ ”. Os silanos feitos apenas com silício e hidrogénio, são muito instáveis e podem apenas ser produzidos na ausência de oxigénio. Muito mais importantes são os metilsilanos, onde alguns ou todos os átomos de hidrogénio são repostos parcialmente pelos grupos de metilo. Se os átomos de hidrogénio são parcialmente repostos pelos átomos de cloro e outros átomos de hidrogénio em grupos de metilo, resulta no mais importante grupo de metilclorosilanos, que é vulgarmente abreviado como clorosilanos. Metilclorosilanos formam a base de toda a química do silicone.

Um facto importante na química dos clorosilanos é a tendência para a policondensação. Os organoclorosilanos reagem violentamente com a água, dando origem a ácido clorídrico [11-17].

2.2.3.3. Processo Rochow

Os metilsilanos são a matéria-prima para a produção de silicone. São produzidos através do “processo de Rochow”, que por reacção directa entre o Si e o cloreto de metilo, usando o Cu como catalisador, a uma temperatura de 280°C, produz cloreto de metilo.

O dimetildiclorosilano (o mais importante organoclorosilano), foi decisivo para o processo de produção comercial. A sua obtenção pode ser representada por:



Segundo uma reacção do monómero organoclorosilano com água (hidrólise) ou metanol (metanolise) produz-se silanos, que por sua vez usando um catalisador à base de ácido clorídrico, conduz directamente a uma maior reacção com os oligómeros ou polímeros siloxanos (“sil” representa o silício, “ox” representa o oxigénio e “anos” descreve a fronteira natural saturada). A denominação de “Silicone” para toda a classe de polisiloxanos, não é mais do que uma imitação das ligações do óxido de carbono da química do carbono conhecido por “cetonas”.

Contudo, os oligómeros lineares ou cíclicos obtidos pela hidrólise do dimetildiclorosilano são demasiados pequenos para a maioria das aplicações em cadeia. Por esta razão, precisam de ser condensados (lineares) ou polimerizados (cíclicos) para dar origem a macromoléculas de comprimento suficiente [11-17].

2.2.3.4. Reacções químicas para obtenção do silicone como produto final

Os componentes da borracha de silicone considerado “finais” necessitam de ser ligados uns aos outros, através da vulcanização ou cura. Para este efeito existem três tipos diferentes de reacções de ligação [11-18]:

- Ligação com radicais ou cura peroxídica (borracha HTV – High Temperature Vulcanization) – Uma ligação eficiente através de ligações com radicais que é apenas conseguida quando os grupos de vinil estão presentes nas fronteiras do polímero.

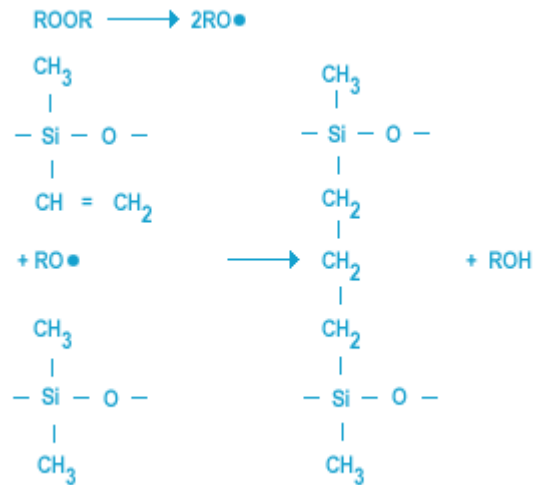


Figura 2-7 – Fórmula de estrutura da molécula do silicone através de cura peroxídica (HTV) [11].

Os tipos de silicones que se formam por este tipo de reacção são denominados de “borrachas de silicone HTV”. Este tipo de ligação pode ser feita através de calor ou de radiação.

- Ligação com cura por adição (Borracha de silicone RTV-2 – Room Temperature Vulcanization) – A cura por adição funciona pelo agrupamento dos grupos de Si-H em ligações duplas. Os sais complexos de platina, paládio ou ródio podem servir de catalisadores. Se forem usados os complexos de oleofinas de platina, a cura irá ocorrer à temperatura ambiente. Os complexos de platina que contêm azoto são usados para efectuar curas por adição a altas temperaturas. A fórmula de estrutura para um silicone de cura por adição, tem o seguinte aspecto:

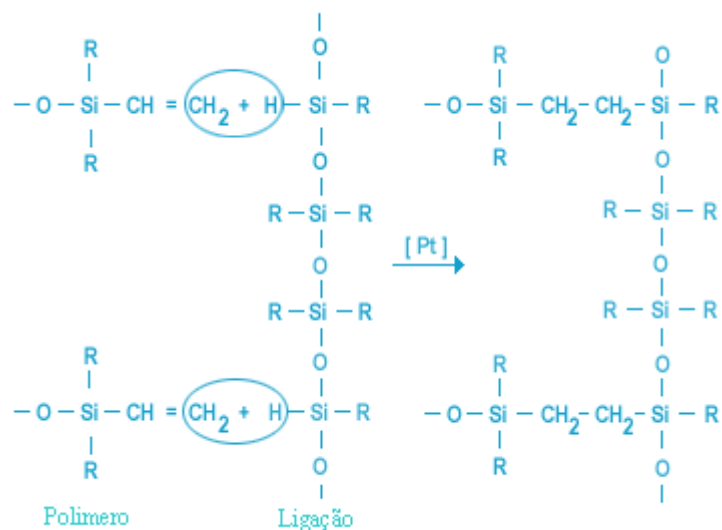


Figura 2-8 – Fórmula de estrutura do silicone com cura por adição [11].

- Ligação com cura por condensação (Borracha de silicone RTV-2) – Este tipo de silicone também é formado através da junção de dois componentes, mas a sua cura é gerada por uma reacção entre os dihidroxipolimetilsiloxanos e os esteres de ácidos silícicos. A água tem um efeito acelerador muito grande na taxa da reacção, que está também muito dependente do agente de ligação e do tipo de catalisador. Ao contrário do látex e das borrachas, o enxofre não pode ser usado na cura da borracha de silicone, criando um efeito inibidor, pois destrói as cadeias de ligação das moléculas.

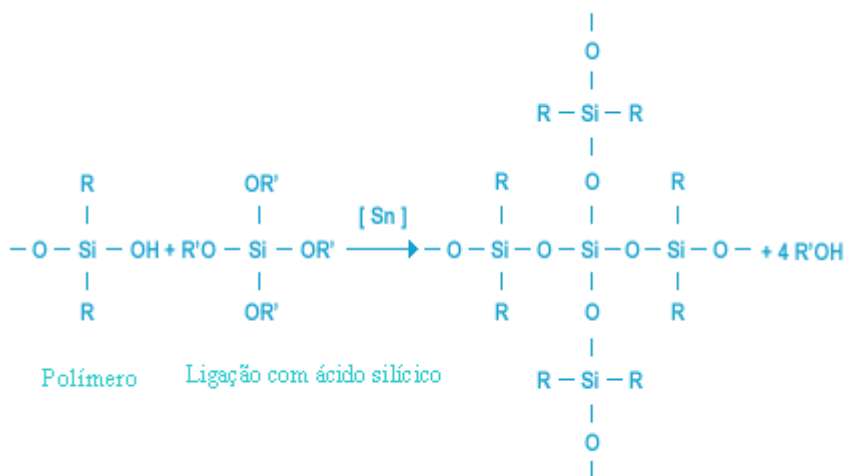


Figura 2-9 – Fórmula de estrutura da molécula de silicone com cura por condensação (RTV-2) [11].

- Ligações por cura de condensação (Borracha de silicone RTV-1) – Os RTV-1 são silicones que se apresentam como produto de um componente. Este tipo de material reage com a humidade atmosférica para formar borracha de silicone flexível, sendo ideal para ser utilizado em aplicações de vedação, união de junções e revestimentos.

A reacção inicia-se com a exposição do silicone à humidade que é acompanhada com a libertação de produtos como, por exemplo, o ácido acético [11-18].

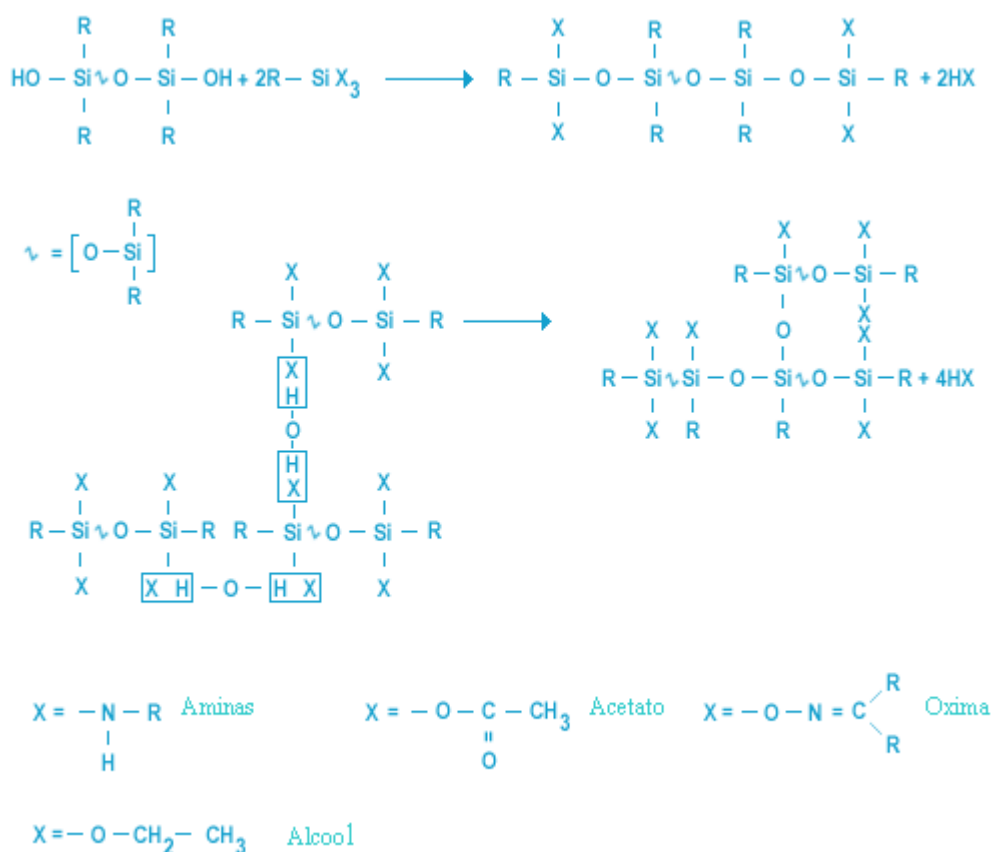


Figura 2-10 – Fórmula de estrutura da molécula do silicone com cura por condensação (RTV-1) [11].

2.2.3.5. Produtos inibidores de silicones RTV's

Uma vasta gama de produtos podem criar inibições à cura dos silicones RTV, principalmente materiais que contêm enxofre na sua composição, sendo estes os mais destruidores. Desses produtos pode-se destacar aqueles que mais facilmente se encontram em ambientes de trabalho e que estão indicados na tabela 2-1 [11-17]:

Tabela 2-1 – Lista de materiais potencialmente inibidores de silicones RTV's

Resina epoxídica com fibra de madeira	Adesivos de Neoprene
Borracha natural	Adesivos de vinil
Isolantes de silicone	Cola de madeira transparente
Poliuretano flexível compacto	Cola de cianoacrilato
Resina de poliéster	Silicones de condensação em silicones de adição
Tubos de PVC transparente	Luvax e espuma de latex
Filme de PVC plastificado	

2.2.3.6. Diferenças entre os silicones RTV-2 de condensação e de adição

Para perceber melhor as diferenças entre os silicones de condensação e adição, pode-se visualizar a seguinte tabela:

Tabela 2-2 – Diferença entre os silicones com cura por condensação ou por adição.

Cura por condensação	Cura por adição
O rácio de quantidades entre a borracha e o catalisador variam dentro de limites.	O rácio de quantidades entre os dois componentes é fixo.
Os agentes de ligação e o catalisador estão ambos contidos no próprio catalisador.	O agente de ligação está no componente da borracha 1 (H siloxane) e o catalisador (complexo de platina) está no componente da borracha 2.
A cura pode ser impedida pela falta de água.	A cura pode ser impedida por várias substâncias (componente com enxofre, entre outros.)
A taxa de cura é independente da temperatura.	A taxa de cura depende muito da temperatura utilizada.
A contracção química depende da libertação do álcool.	Praticamente não existe contracção.
Produtos libertados (como o álcool) podem causar reversão da cura a partir dos 80°C.	Não existe reversão do estado de cura.

2.2.3.7. Adesão do silicone

As propriedades de adesão do silicone, são um produto da ligação química entre as matrizes orgânicas do polímero e os substratos aos quais eles são tradicionalmente difíceis de aderir, como o vidro, o metal e a pedra. Esta ligação química é muitas vezes mais forte e mais fiável que as ligações mecânicas ou físicas de outros promotores de adesão, sendo esta a razão para o qual os adesivos com base em silicone têm tão boa resistência à corrosão, suportando químicos altamente ácidos ou básicos, água e solventes orgânicos [11].

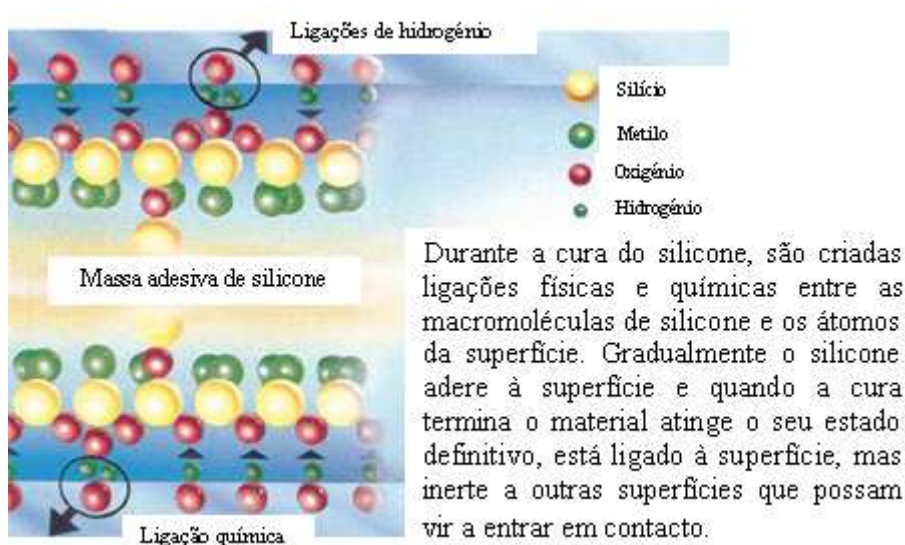


Figura 2-11 – Ilustração explicativa sobre a adesão do silicone [11].

Podemos também ter em conta a necessidade de promover adesões extremamente fortes de silicones RTV-2 a superfícies metálicas através do uso de produtos especiais de promoção de adesão, denominados comercialmente por “Prime Coat”, em conjunto com métodos específicos para aumento de rugosidade superficial, como por exemplo através do processo de granalhagem.

2.3. Ferramentas de projecto

2.3.1. Desenho técnico assistido por computador

Grande parte do trabalho desenvolvido neste projecto foi centrado no fabrico de ferramentas. Para essa tarefa, foi necessário recorrer à utilização de software de desenho tridimensional para modelação em CAD 3D na realização de estudos e optimizações de ferramentas, que sem dúvida se revelou fundamental nesta necessidade.

CAD é acrónimo inglês de *Computer Aided Design*, que significa em português *Desenho assistido por computador*, mas na verdade em Portugal, o termo CAD é usado em vez do termo CADD que é o acrónimo de *Computer Aided Design and Drafting*, quando na verdade é este ultimo que diz respeito à prática do desenho técnico.

O CAD é uma ferramenta informática, que permite rapidamente e com precisão a realização de desenhos técnicos e não técnicos em computador. Na realidade, com o CAD o utilizador pode facilmente, com auxílio de um computador, realizar desenhos muito elaborados. Acresce que os desenhos em CAD apresentam diversas vantagens sobre os desenhos tradicionais, já que permitem uma excelente apresentação, podem ser facilmente modificados e podem ser impressos em diferentes formatos.

Actualmente existem basicamente dois tipos diferentes de programas CAD, os bidimensionais (2D), e os tridimensionais (3D), tendo os 3D muito maiores potencialidades. A utilização de programas 2D corresponde à representação em projecções ortogonais, enquanto os programas 3D permitem a manipulação dos objectos desenhados como se fossem tridimensionais [19-21].

Assim nestes objectos, é possível efectuar cortes, visualizar sombras, efeitos de luz, projecções, pormenores tridimensionais dos seus componentes, bem como alterar a escala de representação em qualquer das suas dimensões.

Como pontos fortes do CAD podem referir-se os seguintes:

- Possibilidade de ligação ao sistema de CAM, acrónimo inglês de *Computer Aided Manufacturing*, ou ao sistema de CIM, acrónimo de *Computer Integrated Manufacturing*;
- Possibilidade de ligação a programas de simulação CAE;
- Grande precisão de desenho e muita boa apresentação;

- Possibilidade de efectuar correcções dos desenhos com grande facilidade e rapidez;
- Elaboração rápida de relatórios e listas de peças relacionadas com os desenhos;
- Facilidade de armazenamento dos desenhos e acesso aos mesmos;
- Possibilidade de trabalhar com programas mais actualizados e de maior precisão;

No que se refere à ligação do sistema de CAD ao sistema de CAM, é conveniente referir que a maior parte das máquinas que usam o processo de corte por arranque de apara, podem actualmente ser ligadas a um computador com auxílio de uma placa de controlo. Existem também no mercado um imenso número de máquinas que permitem a ligação directa a sistemas CAD.

Ao sistema integrado de desenho e projecto, com passagem directa para o fabrico, dá-se o nome de CAD-CAM. Este sistema importa os desenhos do CAD para softwares CAM, automatizando todo o processo de fabrico.

Em relação aos sistemas de análise estrutural de peças modeladas em CAD, dá-se o nome de CAE (*Computer Aided Engeneering*). Por exemplo, em casos de necessidade de análise do impacto de uma carga numa determinada superfície de uma peça, ou do estudo de uma estrutura, ou mesmo na análise do efeito de espaçamento e dimensionamento de diversos elementos, este sistema permite facilmente obter respostas exactas, quando bem elaboradas [19-21].

2.3.2. Prototipagem rápida

As tecnologias de prototipagem rápida, tiveram um papel importante no desenvolvimento deste projecto. Devido aos prazos apertados para execução das ferramentas e aos custos envolvidos na sua execução final por maquinagem, optou-se em alguns casos por tirar partido das tecnologias de prototipagem que o INEGI domina, como é o caso do Processo de LOM e de SLA. Deste modo, foi possível testar a funcionalidade da ferramenta desejada através de protótipos, permitindo realizar alguns ajustes antes da adjudicação das ferramentas finais obtidas normalmente por processos de maquinagem.

A concepção de “Masters” de impulsores em resina através do processo de SLA, foi também uma realidade, já que deste modo foi possível testar o processo de fundição com geometrias diferentes, sem recorrer à execução de “Masters” em alumínio maquinado, que por sua vez apresentam custos extremamente elevados.

2.3.2.1. Fabricação de objectos por camadas – LOM

O processo LOM, Layer Object Manufacturing, baseia-se na construção de objectos por adição de sucessivas folhas de papel. Neste processo, cada camada de papel impregnado de cola térmica é colado ao anterior por acção de um rolo compressão aquecido e, seguidamente um laser de CO₂ de 20 – 50W corta os contornos do “corte local” do componente. A parte sem componente do papel é cortada em quadrículas para facilitar posteriormente a descubagem. No final obtêm-se um paralelepípedo de papel, com a consistência semelhante à da madeira, no interior do qual existe uma ou várias peças [22-23].

As grandes vantagens deste processo serão:

- Baixo preço da matéria-prima;
- Rapidez de execução;
- Possibilidade de obter peças muito grandes sem colagem;
- Não necessita de suportes como no caso do SL e FDM;
- Tolerância razoável aos erros de CAD 3D;
- Baixo preço global inferior ao de qualquer outro processo de prototipagem rápida;

Como inconvenientes podemos citar:

- Dificuldade de obter grandes peças com paredes finas;
- Baixas propriedades mecânicas dos componentes, o que pode obrigar a fazer infiltrações em vácuo com resinas tipo epoxídicas ou outras;
- Acabamento superficial deficiente; o que obriga a operações morosas e cuidadosas de acabamento com verniz e lixa;

- Pouca tolerância à humidade, o que obriga a infiltrações ou pinturas para impermeabilização;
- Necessidade de definir muito bem as estratégias de fabricação, para obviar os inconvenientes citados;
- Grande consumo de tempo na descubicagem e acabamento;

De um modo geral, o LOM é um processo que poderá ter muitas vantagens relativas para componentes médios e grandes, onde os custos dos outros processos são insuportáveis, embora se possam construir componentes de pequena dimensão. A título de exemplo o LOM pode ser usado pela indústria em aplicações:

- Modelos de pára-choques;
- Modelos e cavidades de painéis de porta de automóveis;
- Modelos e cavidades de volantes;
- Modelos e cavidades de bancos de vários tipos;
- Modelos e ferramentas de fundição para corpos de bombas, impulsores e turbinas, etc;
- Modelos e ferramentas para hélices de vários tipos, e
- Modelos de engenharia de peças a serem obtidas por fundição injectada.

O LOM poderá ter ainda interesse para o fabrico de protótipos para outros tipos de indústria, como a da fundição, ferragens, torneiras, construção metalomecânica, entre outras [22-23].

Como exemplo prático desta tecnologia podemos observar a seguinte imagem.



Figura 2-12 – Exemplo de um componente protótipo em LOM de uma ferramenta.

2.3.2.2. Processo de estereolitografia

A estereolitografia (SL – “Stereolithography”) é o processo de prototipagem rápida mais utilizado e mais antigo [25], tendo sido disponibilizado comercialmente em 1989 por intermédio da empresa *3D Systems Inc.*, e encontrando-se particularmente vocacionado para o fabrico de protótipos de pequena e média dimensão, de paredes finas, de complexidade média ou elevada, e com um elevado nível de detalhe [25].

Este processo é (à semelhança dos restantes processos de prototipagem rápida) um processo automático de fabrico de objectos pela adição sucessiva de camadas [25], baseando-se no princípio da fotopolimerização de uma resina epoxídica líquida. Quando esta resina é submetida a uma radiação ultravioleta proveniente de um feixe laser, desenvolve-se uma reacção fotoquímica de alta velocidade, a qual provoca a solidificação da resina na zona de acção daquele feixe e numa extensão inversamente proporcional à sua velocidade de passagem.

Combinando sofisticados meios de geração e controlo automáticos de trajectórias do laser com sistemas de precisão para posicionamento e recobrimento de camadas, possibilita-se a construção de modelos de formas complexas.

O ciclo de construção de um modelo inicia-se assim com o carregamento do contorno da primeira secção definida nos ficheiros de camadas, sendo os suportes fabricados em simultâneo com aquele. O “software” de controlo procede então à definição automática das trajectórias do laser e à consequente iluminação da área pretendida, de acordo com os parâmetros previamente definidos. Findo o período de iluminação, é efectuada a leitura da

camada seguinte, descendo a plataforma de construção no líquido, de uma distância correspondente à espessura de camada utilizada. De seguida, procede-se à operação de recobrimento da camada anterior, repondo-se a espessura de resina necessária à iluminação da camada seguinte. Este ciclo repete-se até à conclusão do modelo, encontrando-se ilustrado na figura 2-13 [25].

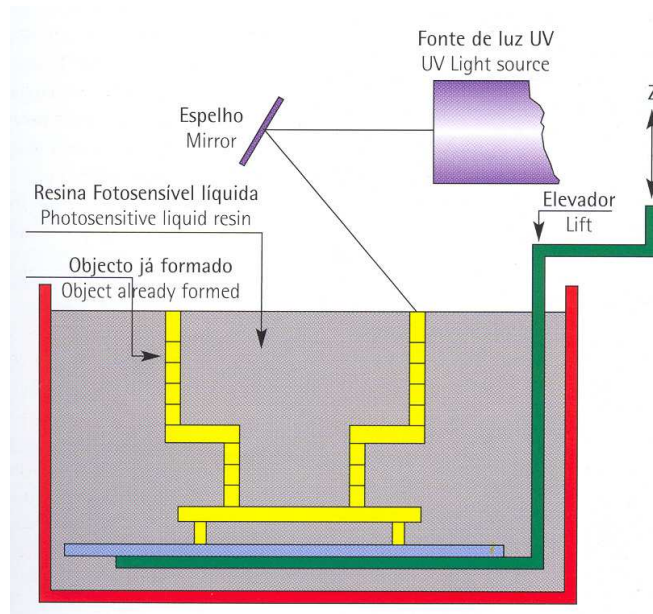


Figura 2-13 – Esquema de funcionamento do processo de estereolitografia [25].

Durante o fabrico, para que a construção do modelo seja possível, é necessário que todas as suas eventuais zonas em suspensão sejam apoiadas por meio de suportes sólidos em resina, uma vez que o meio envolvente é líquido. Tais suportes sólidos são gerados automaticamente, recorrendo a software próprio.

No final da construção do modelo, este encontra-se completamente imerso na resina líquida não polimerizada, a qual, por ser relativamente pouco viscosa, permite que ele seja retirado com facilidade do seu seio.

Uma vez que durante o fabrico do modelo ocorre apenas uma polimerização parcial da resina utilizada, para que aquele apresente a máxima resistência mecânica, é necessária a aplicação de um processo de pós-cura a essa resina, o qual passa pela exposição do referido modelo a uma intensa luz ultravioleta de maneira a completar a reacção de polimerização.

Após a produção do modelo em estereolitografia, ele é normalmente submetido a operações de lixagem e/ou polimento, com o objectivo de ver melhorados o seu aspecto e a sua funcionalidade [24-31].

Um exemplo prático de uma peça em estereolitografia que foi usada no desenvolvimento deste projecto pode ser observada na figura 2-14.



Figura 2-14 – Exemplo de um componente protótipo em "SLA" de uma ferramenta

2.4. Tecnologias de fabrico de modelos

2.4.1. Execução de “Masters”

O “Pattern Making”, é a arte de fabricar um Modelo “Mãe” ou Master, para ser usado no fabrico de um ou mais moldes, podendo este último ser realizado através do vazamento de materiais como metais, resinas, gesso, entre outros, com o objectivo de produzir peças com geometria semelhante.

Um Master pode ser tão simples como a superfície de uma peça original, ou pode ser algo mais complexo como a totalidade de uma peça com detalhes elaborados em todas as suas superfícies.

Existe muitos factores a considerar quando se pretende realizar um Master, como a durabilidade, contracção, zonas de maquinagem, geometria sem contra-saídas, zonas de encaixe, entre outros, podendo-se destacar:

Durabilidade – Está directamente relacionado com o modo como o Master vai ser usado e em que material vai ser feito. Dependendo do tipo de aplicação, o melhor compromisso possível será realizar o Master num material que permita uma reprodução com todos os detalhes bem definidos, de modo a ser possível guardar as primeiras peças vazadas para serem usadas como Masters, no caso de a peça original estar danificada.

Contração – Normalmente a contração é insignificante nos materiais usados para a obtenção dos moldes, mas para os materiais usados no vazamento final para a obtenção dos modelos já têm que ser controlada, principalmente quando se vazam metais, tal como se pode ver pela tabela 2-3.

Para as peças fundidas possuírem as dimensões nominais desejadas, é necessário compensar a peça Mãe ou Master, com os valores das contrações de todos os materiais que fazem parte da cadeia do processo de fundição.

Tabela 2-3 – Valores das contrações ou mingas dos materiais usados nos processos de obtenção de modelos.

Material	Contração
	(%)
ferro cinzento	1.0
Aço	1.6
Alumínio	1.1
latão	1.4
Resinas epoxídicas	0.1
Silicone	0.1
Gesso	0.1

Zonas de maquinagem – São partes da peça que possuem porções de material extra, para poder ser retirado por maquinagem, de forma a conceder a essas zonas características geométricas e dimensionais muito específicas que os processos de conversão não conseguem assegurar.

Geometria sem contra-saídas – De forma a ajudar a desmoldagem ou separação entre os modelos e a cavidade, é conveniente que o Master possua uma geometria com paredes inclinadas ou com formas cónicas, apesar de nem sempre ser possível a aplicação de saídas de desmoldagem.

Zona de encaixe – Para fixar os Masters ou mesmo os modelos de modo a ser possível executar os vazamentos, é necessário criar zonas específicas e preparadas para o seu encaixe. Se os moldes vão ser feitos em silicone RTV (“Room Temperature Vulcanization”), então

convém ter um cuidado especial em vedar bem o Master e a ferramenta, no caso de se usar algum produto especial para vedação, ter em atenção se este não provoca inibição ao silicone [32-35].

No caso do fabrico de impulsores, o Master ou peça original é realizada em ligas de alumínio pelo processo de maquinagem. Devido à sua geometria complexa, cheia de contra-saídas, para garantir altos rendimentos no turbocompressores, normalmente é fabricado pelo processo de maquinagem em alta velocidade em máquinas de 5 eixos simultâneos. Apesar de ser um processo muito dispendioso e consumidor de tempo, quando bem executado, possibilita a obtenção de Masters com um acabamento superficial de excelente qualidade (0,5Ra) e com dimensões dentro de tolerâncias abaixo dos 0,005mm.

Para a concepção do Master convém ter em conta se este vai ser submetido ao processo de electrodeposição de cobre. Nesse caso terá de se ter em conta as regras apontadas no capítulo 2.4.2, referentes aos problemas que o processo pode enfrentar, originados por pormenores geométricos existentes nos Masters [32-35].

2.4.2. Obtenção de cavidades de cobre – electrodeposição

Um dos processos de conversão possível para a obtenção de modelos de silicone, sobre o fabrico de uma cavidade de cobre, através da tecnologia de electrodeposição de cobre em Master, ou peça Mãe, em alumínio maquinado. Trata-se de um processo relativamente complexo, mas que permite obter cópias perfeitas da peça original em alumínio, tanto a nível dimensional e geométrico como a nível de acabamento superficial, sendo por isso conveniente abordá-lo com mais detalhe, de modo a melhor compreender as suas características [8-9].

2.4.2.1. “Electroforming”

O “Electroforming” apenas difere dos processos normais de electrodeposição de cobre pelo facto das espessuras de deposição serem muito maiores, o que obriga a pequenas alterações de parâmetros e procedimentos processuais.

O cobre é um metal que tem como propriedades principais a boa condutividade térmica e eléctrica. Uma característica muito importante é o facto de este metal oxidar muito

rapidamente quando entra em contacto com o ar, adquirindo uma camada superficial de óxido sobre a sua superfície.

O “Electroforming” é um processo, em que as formas e detalhes de uma peça podem ser exactamente reproduzidas, sobre o Master ou peça mãe que mais tarde é removido, obtendo-se assim uma cavidade ou um inverso duplicado preciso da peça original. Os aditivos usados noutros tipos de electrodeposições mais comuns, são também usados na electroformação, para controlar tensões superficiais, tamanho de grão entre outras propriedades mecânicas necessárias para garantir cavidades de alta qualidade [8-9].

Para compreender melhor o processo de electrodeposição podemos observar a seguinte imagem.

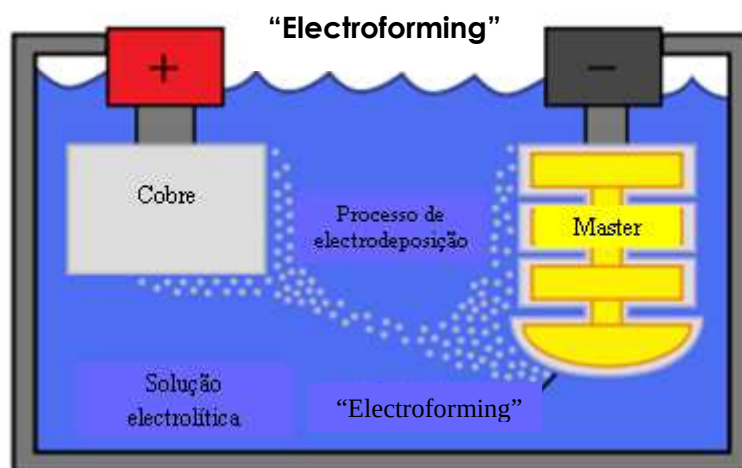


Figura 2-15 – Esquema de funcionamento do processo de “electroforming” [12].

O “Electroforming” foi inventado pelo Professor Jacobi da Academia de Ciências de St Peterburgo, na Rússia, em 1938, enquanto trabalhava com placas de cobre para gravação por impressão. Após conseguir realizar a separação entre a uma peça original e a camada de cobre, o professor Jacobi reparou que esta ultima era um duplicado perfeito da peça original. Com este conceito, mais tarde, outras pessoas usaram-no principalmente para a criação de réplicas exactas de peças de arte em níquel, ferro ou cobre.

Hoje em dia, a indústria do “Electroforming” tem um diversonúmero de utilizações de alta tecnologia usando deposições de cobre, ferro ou outras ligas usadas em componentes de extrema importância como por exemplo as câmaras de combustão do “Space Shuttle” ou componentes usados na medicina. Peças de alta precisão como os moldes e as cavidades

moldantes, onde as tolerâncias das superfícies internas são críticas, são casos onde a electroformação pode ser aplicada.

Exemplos de aplicação da “Electroforming” são quase ilimitados, mas alguns dos exemplos mais exactos são:

- Componentes com paredes finas e delicadas como peças de arrefecimento para a indústria aeronáutica, agulhas hipodérmicas e visores de malha fina;
- Peças que são difíceis de obter por qualquer outro processo, como componentes electrónicos, instrumentos musicais, câmaras dos mecanismos dos foguetões e peças metálicas de geometria complexa.
- União por electroformação (solda a frio) entre metais diferentes que são difíceis, se não impossíveis, de serem unidos por meios térmicos.

O uso do “Electroforming”, tem como vantagens principais:

- A obtenção de peças em série com tolerâncias idênticas entre si, tendo em conta que as peças originais são bem executadas e em condições semelhantes;
- A capacidade de reprodução de detalhes com espessuras finas, é imbatível em relação a outros métodos de fabricação;
- As propriedades mecânicas dos resultantes do “Electroforming” podem ser seleccionadas através da escolha dos banhos electrolíticos e ajustando as condições de operação;
- Algumas formas, principalmente aquelas com detalhes internos complexos, não podem ser feitos por outro método sem excesso de custos de maquinaria e perdas em sucata;
- Relativa facilidade em produzir peças por “Electroforming” em grandes séries;
- O tamanho e a espessura das peças não são limitação para o processo de electroformação;

A nível de desvantagens, deve-se referir:

- O “Electroforming” é geralmente um processo muito caro, e normalmente é escolhido quando os outros métodos são ainda mais caros ou são impossíveis de serem executados;
- Espessuras elevadas, através do “Electroforming”, exigem tempos de trabalho muito extensos;
- Existem limitações na geometria das peças, como os furos fundos e estreitos e os ângulos rectos que podem causar problemas. Diferenças acentuadas nas superfícies das peças ou nas espessuras das paredes devem ser evitadas a não ser que a posterior operação de maquinagem seja possível;
- Algumas electrodeposições podem causar tensões nas superfícies, que mais tarde podem originar distorções depois da remoção da peça original;
- Qualquer degradação na superfície da peça original é reproduzida na peça electroformada.

O processo de “Electroforming” é muito semelhante ao processo de revestimentos electrolíticos, apesar dos sistemas de controlo serem apertados, porque o processo de electroformação consome mais tempo e o produto final tem de possuir boas características mecânicas e poucas tensões internas para ser aceite dimensionalmente. Com os longos tempos de deposição, as altas densidades de corrente resultam em faltas de material, aparecimento de nódulos e crescimentos descontrolados nas arestas e superfícies fechadas. Isto resulta em variações da densidade de corrente que podem afectar seriamente as propriedades mecânicas da deposição [8-9].

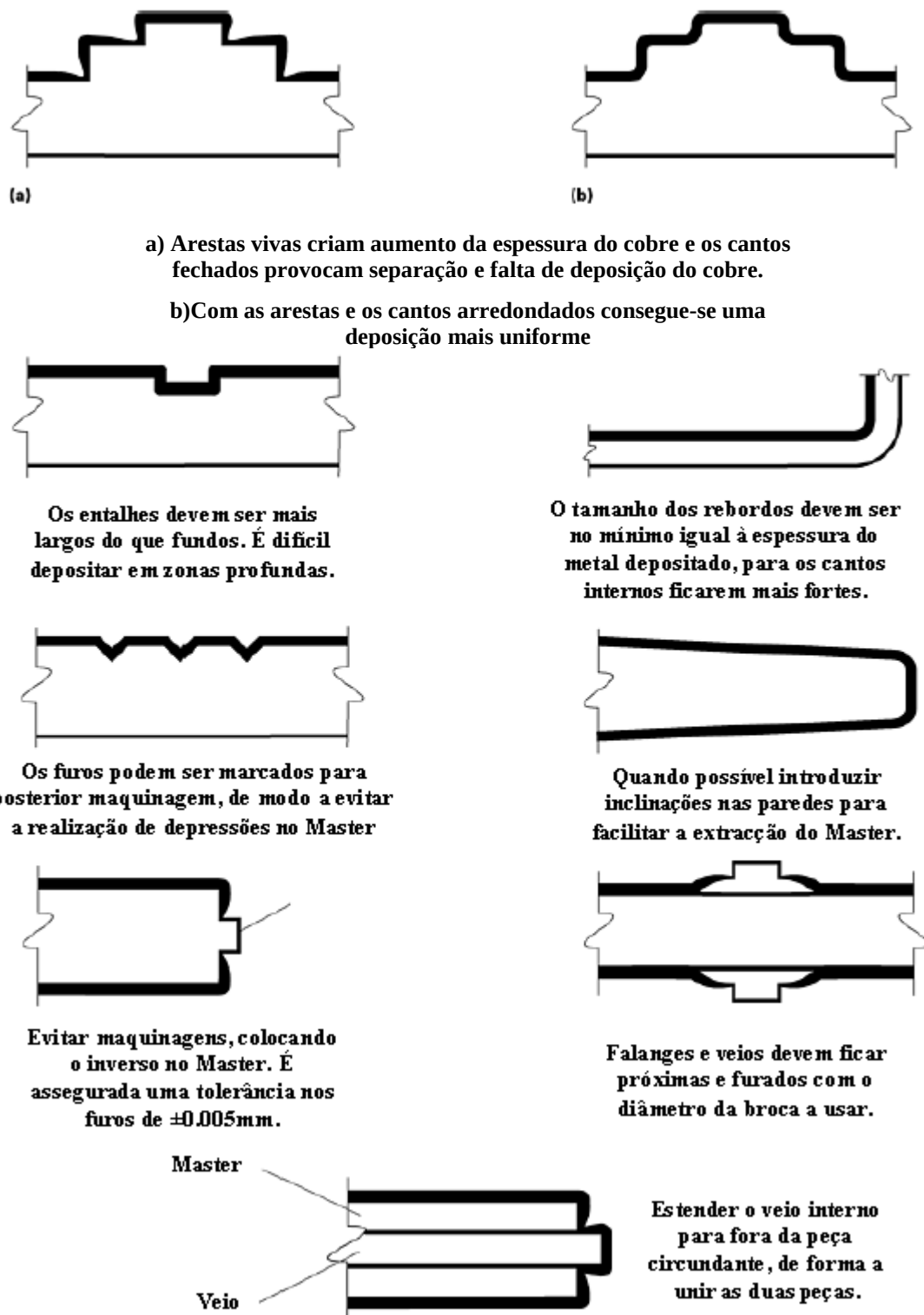


Figura 2-16 – Factores a serem considerados na concepção do Master para ser submetido a electroformação [9].

No “Electroforming”, é normal a utilização de electrolíticos de ácido sulfúrico. A introdução de aditivos tem também um papel importante para a obtenção de algumas

propriedades como a afinação do grão (melhora as propriedades mecânicas), homogeneização da deposição e abrilhantamento. Podem também ser usados compostos orgânicos capazes de reduzir a oxidação do cobre dos cátodos com o objectivo de produzir oxigénio livre, aumentando a condutibilidade eléctrica do cobre.

Sem aditivos, ao banho de ácido sulfúrico faz com que o tamanho do grão vá crescendo proporcionalmente com o aumento da espessura do cobre depositado, o que por sua vez pode criar vazios intergranulares que prejudicam seriamente as propriedades mecânicas. Uma técnica de deposição conhecida como corrente periódica reversível, promove uma deposição de cobre com tamanho de grão muito uniforme e excelentes propriedades mecânicas até espessuras de aproximadamente 5mm. Este procedimento exige uma deposição numa direcção convencional por um determinado período de tempo, seguido por uma reversão da direcção da corrente por mais um intervalo de tempo definido. Apesar da taxa de deposição muito lenta, os benefícios nas propriedades mecânicas e na qualidade superficial compensam largamente a sua utilização.

Em relação ao Master utilizado no processo de electrodeposição de cobre, este, além de ter de cumprir as regras atrás mencionadas, terá de ser realizado num material bom condutor eléctrico, de preferência aços inoxidáveis, mas é também muito comum o uso de alumínio, pelo facto de ser fácil de maquinar, polir e dissolver sem destruir as paredes da cavidade de cobre [8-9].

3. Trabalho experimental

3.1. Processo de Fundição

O trabalho apresentado representa uma das etapas do processo de fundição de precisão de peças em alumínio. Mais concretamente, o objectivo deste trabalho foi a concepção e optimização das ferramentas elastoméricas necessárias para a produção de moldações em gesso, que por sua vez vão ser vazadas com alumínio, dando origem às peças fundidas finais. Na figura seguinte encontra-se um esquema detalhado do processo de fundição para obtenção de impulsores para turbocompressores em alumínio.

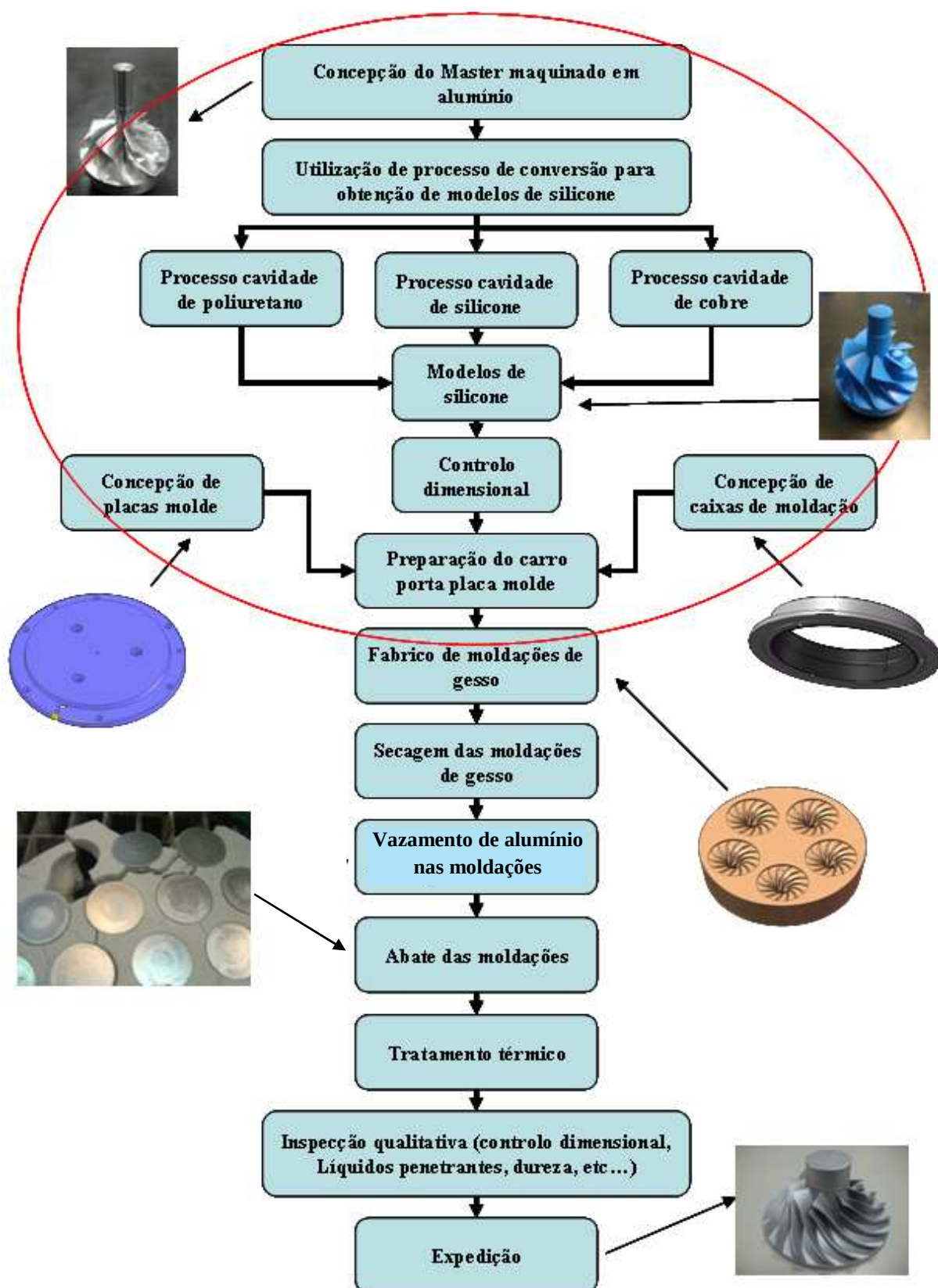


Figura 3-1 – Esquema detalhado do processo de fundição com moldações de gesso.

Como se verifica na imagem anteriormente apresentada, este trabalho tem o objectivo principal de fornecer as ferramentas nas condições mais perfeitas possíveis, de forma a possibilitar a fabricação de moldações de gesso, do tipo indicado na Figura 3-2.

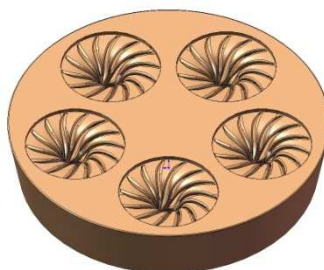


Figura 3-2 – Moldação em gesso.

Como já foi referido anteriormente, para o fabrico de moldações em gesso (onde aparece moldado as cavidades dos impulsores a obter), é necessário a execução de ferramentas com as superfícies internas em materiais elastoméricos, para que deste modo, seja facilitada a desmoldagem entre o gesso e as ferramentas que o moldam. Mais concretamente a este conjunto de ferramentas, chama-se normalmente de caixa de moldação.

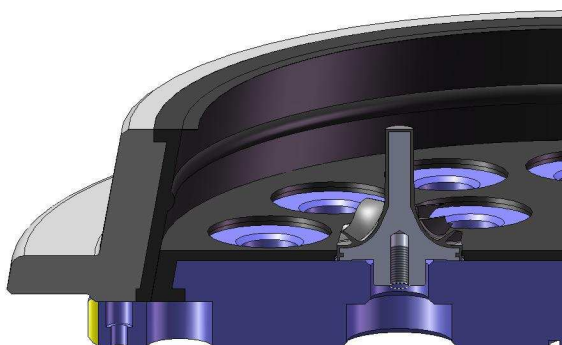


Figura 3-3 – Pormenor de um conjunto placa molde e caixa de moldação.

Resumidamente, as ferramentas são as seguintes:

- **Placa molde** – Placa em alumínio revestido a silicone onde são acoplados os impulsores em silicone, numa disposição pré-definida;

- **Caixa de moldação** – Anel em alumínio interiormente revestido com uma película de silicone, que quando encaixado na placa molde, tem a função de sustentação do gesso no estado líquido e de dar forma exterior à moldação em gesso quando no estado sólido;

- **Impulsor em silicone** – Cópia fiel do Master em alumínio maquinado, mas em material elastomérico, que devido à sua flexibilidade, permite moldar geometrias com detalhes e contra-saídas muito complexas. O seu interior é em alumínio (chamado normalmente de esqueleto), que tem como função conceder alguma rigidez ao corpo que sustenta as alhetas, caso contrário existiria demasiada flexibilidade e haveria deformação da peça.

Tendo em conta a necessidade de obtenção destas ferramentas, foi necessário efectuar vários estudos e desenvolvimentos em diversas áreas, com por exemplo:

- Técnicas de maquinagem;
- Projecto de Masters (peça Mãe) em alumínio maquinado, de alta precisão;
- Projecto de ferramentas;
- Conhecimento a nível de materiais e suas aplicações;
- Trabalho com materiais elastoméricos e produtos associados (silicones, poliuretanos, primários, etc.)
- Trabalho com resinas epoxídicas;
- Tecnologias de revestimentos, tratamentos e protecções superficiais e electrodeposições;
- Técnicas de controlo dimensional;
- Entre outros.

3.2. Meios laboratoriais

Este projecto baseou-se no desenvolvimento e optimização das tecnologias de conversão e reprodução de peças com geometrias complexas, como é o caso dos impulsores dos turbocompressores para a indústria automóvel. Devido a alguns factores característicos desta

peça e dos processos de conversão nela empregues, foi necessário recorrer a equipamentos e ferramentas de trabalho específicos.

Mais concretamente, para o desenvolvimento das conversões para a obtenção de modelos de silicone, revestimento de placas molde e caixas de moldação, foi necessário o seguinte equipamento:

- Balanças de precisão – Devido ao facto dos produtos utilizados, como os silicones, as resinas e poliuretanos, serem de dois componentes (material primário e o respectivo catalisador), é necessário que as suas misturas cumprem com rigor as proporções impostas pelos fornecedores desses mesmos materiais, para não existir o risco de diferenças nas suas propriedades físicas e mecânicas. A balança utilizada permite medições à décima de grama, sendo bastante indicada principalmente para a pesagem de pequenas proporções de material.

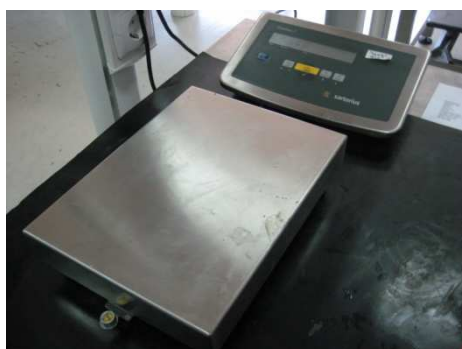


Figura 3-4 – Balança de precisão usada no desenvolvimento do trabalho.

- Tina de ultra-sons – Devido à incompatibilidade dos materiais usados nas conversões, com alguns tipos de sujidade como pós, gorduras, óleos, entre outras matérias, que podem promover inibições, falta de adesão e mesmo alteração das propriedades físicas, foi necessário usar uma tina de ultra-sons, que permite efectuar limpezas com ajuda de solventes de uma forma bastante eficaz e rápida.



Figura 3-5 – Tina de limpeza por ultra sons.

- Câmara de vácuo – A utilização dos materiais usados nas conversões, exigiu a necessidade de efectuar desgaseificações e homogeneizações de mistura através da aplicação de vácuo. Houve casos particulares onde houve a necessidade de efectuar misturas e vazamentos de resinas e borrachas de poliuretano, entre outros produtos, em vácuo. Principalmente por estes factores foi necessário recorrer à utilização de uma câmara de vácuo, que permite valores de pressão na ordem dos 0,005bar, e cuja estrutura está preparada com um mecanismo de mistura e vazamento sob vácuo. A câmara utilizada possui um controlador digital de vácuo e permite controlar a velocidade do misturador e do sistema de vazamento.



Figura 3-6 – Câmara de vácuo.

- Granalhadora – Para promover a adesão do silicone às superfícies metálicas, foi necessário recorrer ao uso de uma granalhadora. Através da granalhagem das superfícies com “Corindon”, de 300 mesh, a uma pressão de aproximadamente 5bar, cria-se superficialmente uma rugosidade (cerca de 6,4Ra) que permite a ancoragem do silicone. Tendo em conta a sua aplicação, a granalha tem de se encontrar em perfeitas condições, o que exigiu que a própria granalhadora possuisse um filtro especial para recolha de partículas finas de granalha destruída e de metal removido. Outro pormenor de muita importância é o facto do ar comprimido usado na projecção da granalha ter de ser limpo e essencialmente seco, de forma a não contaminar as superfícies a revestir, o que exigiu aplicação de um secador de ar comprimido e filtros especiais.



Figura 3-7 – Granalhadora e respectivo filtro.

- Sistema automático de mistura – Como sistema automático de mistura, normalmente usado na preparação das resinas e grandes quantidades de silicone, recorreu-se à utilização de um berbequim com uma potência de 900W e uma hélice especialmente concebida para mistura de líquidos, que evita a introdução em excesso de bolhas de ar na mistura.



Figura 3-8 – Hélice usada nas misturas automáticas de resina epoxídica e silicone.

- Muflas – Para a polimerização dos materiais como os silicones, resinas epoxídicas e borrachas de poliuretano a temperatura controlada, foi necessário recorrer à utilização de fornos especialmente concebidos para este efeito, com ventilação forçada e controlador de temperatura.



Figura 3-9 – Mufla para efectuar curas a temperatura controlada.

- Prensa hidráulica – A necessidade de efectuar desmoldagens que exigem forças consideráveis e movimentos sincronizados, exigiu a utilização de uma prensa hidráulica especialmente adquirida para o efeito.



Figura 3-10 – Prensa hidráulica usada na desmoldagem das caixas de moldação.

- Equipamento de controlo tridimensional com contacto – A necessidade de efectuar medições a Masters maquinados de alumínio, a Masters de resina e a impulsores fundidos exigiu a utilização de uma máquina de controlo tridimensional por contacto.
- Equipamento de controlo dimensional por análise de imagem – A necessidade de controlar dimensionalmente os modelos de silicone, antes e durante a sua utilização em produção, exigiu a utilização de uma máquina de controlo dimensional sem contacto físico, já que tratando-se de peças em material flexível, impossibilita o uso de sistema de controlo com contacto.

Esta máquina além de permitir a medição por análise de imagem está preparada para efectuar medições com contacto, mas devido ao facto de este sistema não ter estado disponível durante o decorrer do projecto, impossibilitou a sua utilização.

A máquina em questão é uma “QuickVision” da “Mitutoyo”, devidamente calibrada, que além das capacidades já descritas, permite efectuar programas de medição automáticos, que possibilita a execução de um controlo dimensional complexo em muito pouco tempo, mantendo a precisão e a exactidão necessárias para o tipo de peças usadas neste projecto. Este factor é de extrema importância, já que durante a produção não podem existir tempos de paragem muito extensos, o

que implica que caso seja necessário retirar os modelos de silicone de uma placa molde para inspecção dimensional, terá de ser executada muito rapidamente.



Figura 3-11 – Imagens da máquina de controlo dimensional "Quickvision" da "Mitutoyo".

- Controlador de temperatura – Para controlar a temperatura em ocasiões pontuais, usou-se um pirómetro digital equipado com um “flute” calibrado, acoplado a um termopar do tipo “K”
- Sistema de aquisição de dados – Para a aquisição de evoluções de temperatura nas ferramentas de reprodução, durante as curas de alguns materiais, usou-se um sistema de aquisição de dados, constituído por um computador, uma placa de aquisição de dados e um software “Labview”.

A nível de softwares usados para o desenvolvimento deste trabalho, há a destacar os seguintes:

- Software de desenho – Para o projecto de ferramentas e equipamentos, foi necessário realizar desenhos de CAD 3D e 2D. Para tal recorreu-se a softwares como “SolidWorks”, “Unigraphics”, “Catia” e “Autocad”, de modo a aproveitar as

capacidades de cada programa tendo em conta as dificuldades que ao longo do projecto iam surgindo.

- Software de controlo dimensional – Como apoio à máquina de controlo dimensional “Quickvision” da “Mitutoyo”, foi usado um software para a realização dos programas de medição, tratamento da imagem a controlar e apresentação dos resultados dimensionais, pertencente ao próprio equipamento.

3.3. Projecto de ferramentas

3.3.1. Ferramentas para obtenção de modelos de silicone

3.3.1.1. 1ª Geração de ferramentas para reprodução de silicones (ferramentas exploratórias)

No início do desenvolvimento da investigação deste processo, recorreu-se a princípios e conhecimentos básicos de conversão, como por exemplo algumas noções usadas na área do modelismo para realizar as primeiras tentativas de obtenção de uma caixa de moldação com modelos em silicone o mais similar possível do modelo original. Como Peça “Master” foi utilizado um impulsor de um turbocompressor já usado.

A primeira metodologia de conversão desenvolvida foi a seguinte:

1. Original retirado de turbocompressor avariado;
2. Obtenção de um negativo transitório do original, em borracha de silicone, sem recurso a desmoldantes;
3. Obtenção de um impulsor positivo, integralmente em silicone, usando vaselina como desmoldante.
4. Obtenção de 8 reproduções individuais e construção por colagem de negativo da placa molde em resina rígida de poliuretano carregado com pó de alumínio sem utilização de desmoldante.
5. Vazamento de 3 placas molde integralmente em silicone para vazamento de moldações em gesso.



Figura 3-12 – Imagem da ferramenta exploratória

Estas placas molde foram testadas com diversos vazamentos de moldações em gesso e permitiram verificar que globalmente o processo tinha viabilidade técnica. No entanto existiram grandes problemas que tinham que ser ultrapassados, nomeadamente:

- A utilização de vaselina ou outros desmoldantes para vazar silicone sobre silicone não permite a reprodução integral de todos os detalhes da peça porque a sua distribuição é difícil nestas geometrias complexas, cria espessuras inadequadas, introduz portanto irregularidades superficiais inadmissíveis nas cópias.
- O primeiro silicone degrada-se e deforma-se com as sucessivas cópias com resinas de poliuretano F19, devido ao aquecimento de 50-60° que se verifica durante o seu processo de polimerização.
- Existem variações dimensionais e geométricas perfeitamente inadmissíveis, principalmente ao nível da altura das pás do impulsor e da perpendicularidade do eixo do impulsor em relação à base, visíveis a olho nu, o que significa diferenças na perpendicularidade e na altura das pás de 0,5-1mm.

Com estes resultados verifica-se que as futuras placas molde e os modelos teriam que ter a superfície em silicone para ser auto desmoldável do gesso e uma estrutura rígida interna metálica para assegurar as dimensões dos modelos, planeza das placas e perpendicularidade entre as bases e os eixos dos modelos nas placas molde.

De salientar também a importância de desenvolver ferramentas, tanto de reprodução de silicones como de revestimento de placas molde e caixas de moldação, capazes de garantir:

- Boa reprodutibilidade nos resultados dimensionais finais;
- Uso bastante prático, durante as conversões e durante o fabrico de modelos de silicone e revestimentos;
- Que durante o seu uso, se minimize a probabilidade de degradação, principalmente da cavidade rígida, pela acção do homem (tornar as ferramentas mais robustas e simples de usar);

3.3.1.2. 2ª Geração de ferramentas para reprodução de silicones

Tendo em conta as conclusões retiradas da primeira geração, na próxima geração era necessário conseguir encontrar um elastómero que fosse auto desmoldante em relação ao modelo original de alumínio e auto desmoldante em relação ao modelo de silicone. Foi-nos cedido um Master maquinado com alto rigor dimensional, e foi a partir deste Master que se desenvolveram os primeiros processos de conversão.

Após uma série de testes, os materiais foram identificados comercialmente e a metodologia desenvolvida, foi a seguinte:

1. Aquisição de um Master maquinado em CNC de alta velocidade em máquina de 5 eixos.
2. Obtenção de um negativo transitório do original em elastómero de poliuretano sem recurso a desmoldantes.
3. Obtenção de um impulsor em silicone com esqueleto metálico.
4. Obtenção de um novo negativo (ou vários) em resina rígida epoxídica ou de poliuretano, dimensionalmente mais estável que o primeiro negativo em borracha de poliuretano.
5. Obtenção de modelos a implantar nas placas molde.

Esta metodologia, em termos de materiais, denominou-se “*processo poliuretano*”, que se encontra descrito em detalhe no capítulo 3.4.2.

Esta metodologia serviu de base para o desenvolvimento da 2ª geração de ferramentas de reprodução de silicone. Esta ferramenta foi fabricada por maquinagem na liga de alumínio 7075, para ser leve e facilmente manipulável e simultaneamente ser algo resistente a eventuais choques e maus-tratos durante o manuseamento e manipulação nesta fase de desenvolvimento, particularmente nas superfícies tolerânciadas e de referência que asseguram a perpendicularidade e as cotas da base do impulsor. O esquema da ferramenta desenvolvida encontra-se descrito na figura 3-13 e o seu aspecto final na figura 3-14.

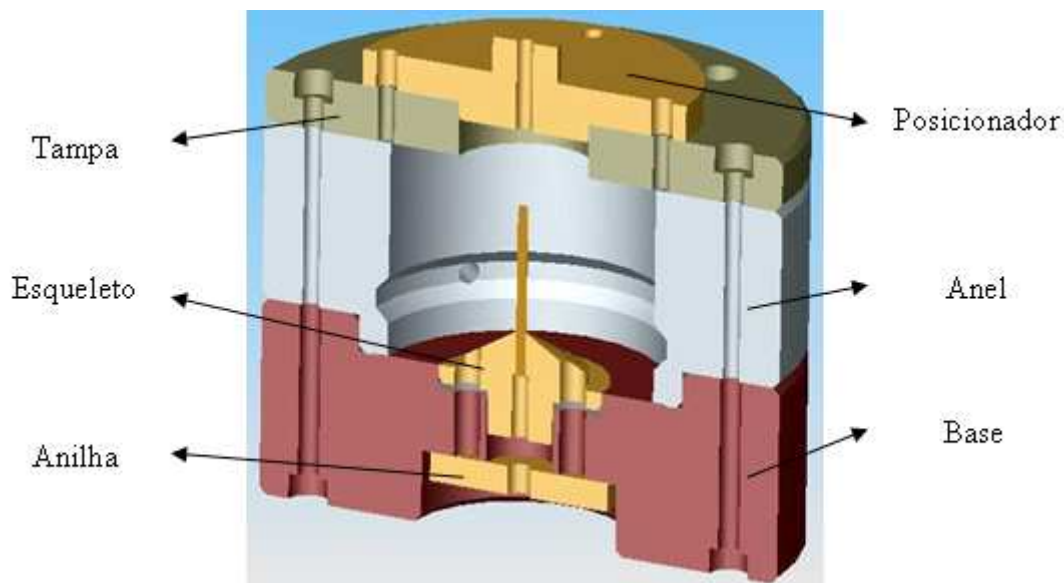


Figura 3-13 – CAD 3D da ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes).



Figura 3-14 – Aspecto final da 2ª geração de ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes).

A nível de guiamento, esta ferramenta apenas possui um entalhe circunferencial, que assegura a concentricidade entre as várias partes da ferramenta. No que diz respeito ao guiamento radial, este é assegurado pelos parafusos de aperto da ferramenta.

Após uma análise e alguma prática com esta ferramenta detectaram-se problemas, alguns dos quais levaram à realização de experiências com o objectivo de os compreender ou mesmo solucionar-los, tais como:

1. Baixa cadência de produção. Possuindo apenas uma ferramenta implica que só se pode obter um modelo de silicone por dia, tendo em conta que todos os tipos de silicone que se usavam neste período, tinham tempos de cura à temperatura ambiente de pelo menos 24 horas.

Deste modo, fizeram-se algumas experiências, na tentativa de obter mais silicones em menos tempo, aumentando a temperatura de cura. Nos primeiros modelos de silicone obtidos existia uma variação considerável, como exemplo, a altura das pás logo no primeiro modelo de silicone já se encontrava com valores acima do desejado. Os modelos fabricados, com a mesma cavidade, apresentavam sequencialmente um aumento das dimensões, inviabilizando assim, o processo produtivo.

Após análise detalhada deste fenómeno, verificou-se que este ocorria devido a dois factores, um deles era o efeito do coeficiente de expansão da resina epoxídica, e o outro era a excessiva massividade da mesma, que se encontrava aprisionada radialmente entre as paredes cilíndricas da ferramenta. Para entender melhor este fenómeno pode-se observar a figura seguinte.

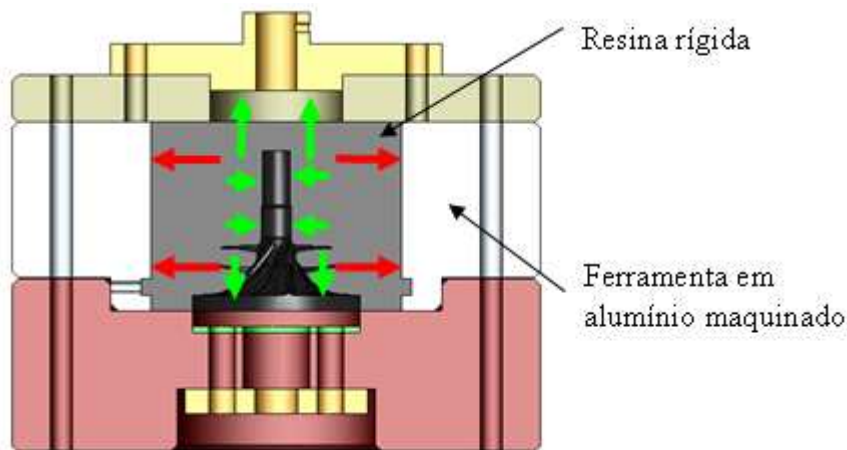


Figura 3-15 – Demonstração da direcção provocada pela expansão térmica da resina epoxídica.

Tal como se pode perceber na imagem anterior, com o uso de temperaturas altas a expansão do material é maior do que a 25 °C, mas como existe uma limitação por parte da ferramenta que impede a expansão da resina na direcção radial, todo o fenómeno se concentra apenas nas direcções onde existe liberdade de movimento. Neste caso em particular, a resina apenas se pode expandir na direcção axial (no sentido exterior da ferramenta) e radial (com sentido ao interior da cavidade), logo criam-se condições propícias a uma deformação ou distorção na cavidade, o que explica as alterações dimensionais.

Apresenta-se de seguida um pequeno exemplo demonstrativo do referido fenómeno. A resina usada na realização das cavidades nesta fase do projecto tem um coeficiente de expansão de cerca de 50 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$. Se a dimensão do cilindro de resina que se forma dentro da ferramenta, apresentar 82mm de diâmetro e se for aquecida a 50°C para acelerar a cura dos modelos de silicone, então, de acordo com os referidos parâmetros a expansão radial para estes parâmetros é de:

$$\Delta l(\text{expansão}) = \alpha \times \Delta T \times L$$

onde,

L = comprimento da secção;

ΔT = diferença entre a temperatura de cura e a temperatura ambiente (20°C);

$$50 \times 0,082 \times (50 - 20) = 123 \mu\text{m} = 0,123\text{mm}$$

Se a resina tiver uma altura de 60mm, a expansão axial será na ordem de:

$$60 \times 0,082 \times (50 - 20) = 148 \mu m = 0,148 \text{ mm}$$

Uma vez que o objectivo final do processo é a obtenção de peças fundidas dentro de tolerâncias em zonas sensíveis de $\pm 0,3 \text{ mm}$, verifica-se pelos valores anteriores que tal não é possível, isto porque, a fase inicial do processo com modelos de silicone já apresenta desvios superiores a 0,15mm.

2. Geometria limitada. Outro problema detectado nesta ferramenta é o facto de ser concebida para uma determinada geometria de Master e caso seja necessário usar um Master diferente na mesma ferramenta tal é praticamente impossível, a não ser que esta tenha dimensões muito semelhantes.
3. Existência de um entalhe na parede lateral do interior da ferramenta. O referido entalhe é necessário para servir de ancoragem da resina, no entanto, verificou-se ser pouco funcional, já que sempre que era necessário retirar a cavidade de resina da ferramenta, esta era destruída, impossibilitando a sua reutilização, como se pode ver na figura 3-16.

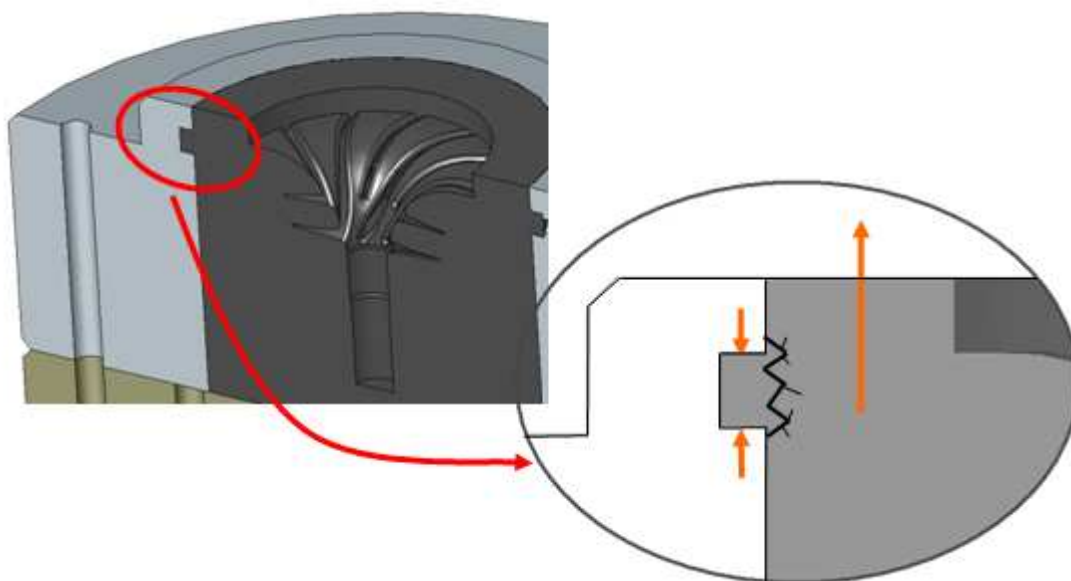


Figura 3-16 – Imagem ilustrativa do fenómeno de destruição que ocorre na resina rígida.

4. Sistema de guiamento da ferramenta ineficiente. Não há precisão a nível de concentricidade e esta tende a agravar-se com a sucessiva utilização da ferramenta.

3.3.1.3. 3ª Geração de ferramentas para reprodução de silicones

Tendo em conta o problema de baixa capacidade produtiva apontada na última ferramenta, desenvolveu-se uma nova ferramenta com o objectivo de permitir utilizar temperaturas de cura mais altas, evitando que a dilatação térmica deforme a geometria dos modelos de silicone. Para este efeito, pensou-se realizar ferramentas totalmente em resina carregada, em substituição das ferramentas em alumínio maquinado. Deste modo, o valor da dilatação térmica da ferramenta e da cavidade vão ser praticamente os mesmos, evitando-se a deformação provocada pelo esmagamento da cavidade por parte das paredes da ferramenta (figura 3-16).

Para a realização das ferramentas em resina existem duas opções possíveis:

- a) Maquinagem da resina;
- b) Vazamento da resina em ferramentas especiais.

Como já foi explicado, por vezes, no processo industrial há a necessidade de aquisição de várias ferramentas iguais para o aumento da capacidade de produção de modelos de silicone, o que significa que se as ferramentas forem maquinadas, o custo de fabricação pode ser extremamente elevado. Sendo assim, a opção de adquirir essas mesmas ferramentas por vazamento de resina epoxídica carregada com pó de alumínio seria a mais viável. Para uma determinada gama de tamanhos de Masters (por exemplo, peças com diâmetro na base entre os 30 e os 60mm), torna-se necessário o uso de 3 peças (base, porta cavidade e tampa), que juntas constituíam a ferramenta de reprodução. Para a obtenção de cada uma destas ferramentas seria necessário fabricar um molde onde se pudesse vaziar a resina carregada.

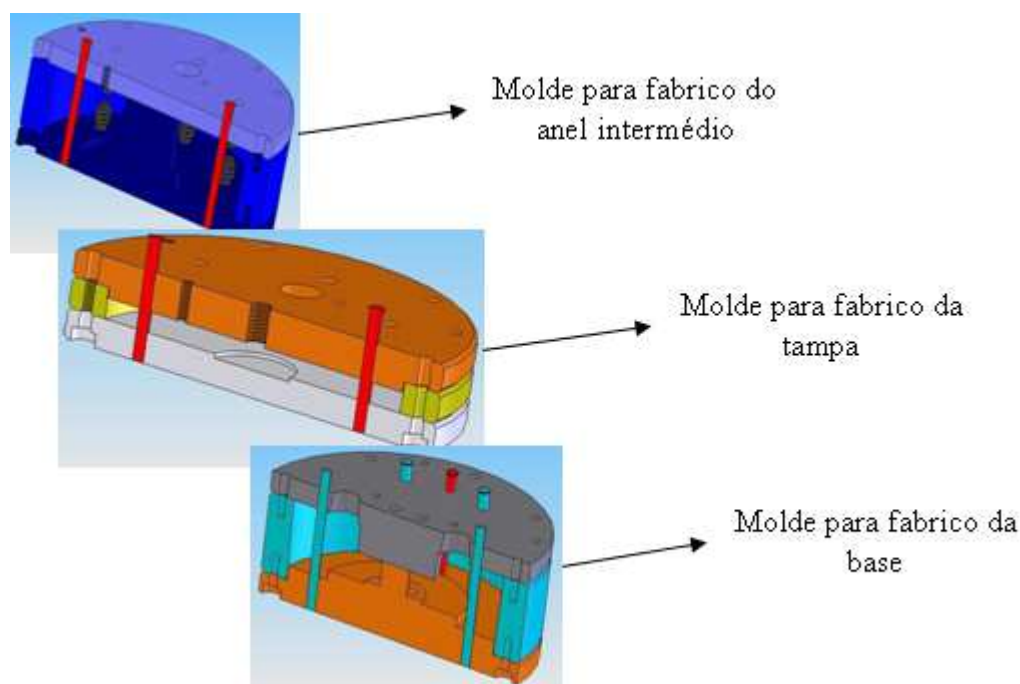


Figura 3-17 – Apresentação dos três moldes necessários para fabricação dos componentes da ferramenta de reprodução em resina rígida.

Tendo em conta um dos aspectos negativos apontados na ferramenta anterior, considerou-se que esta ferramenta deveria possuir cavilhas de guiamento, o que significa que cada peça teria de possuir furos de dimensão controlada para passagem das cavilhas, juntando-se assim os furos de passagem de parafusos de aperto e zonas roscadas para aperto dos mesmos.

Para se perceber melhor esta metodologia, podemos observar a figura seguinte, com um exemplo de um dos 3 moldes e a denominação de cada peça que o constitui.

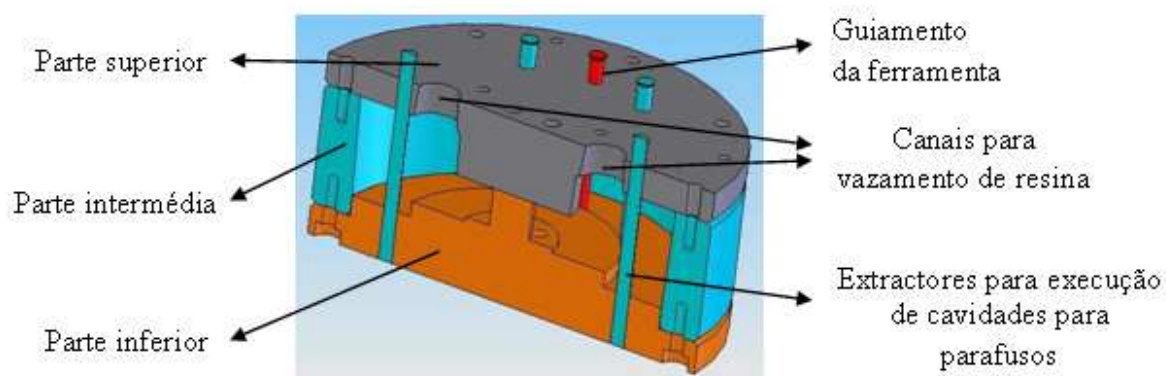


Figura 3-18 – Vista em corte do molde de execução da base da ferramenta de reprodução de resina rígida.

O molde de execução da base da ferramenta de reprodução de modelos de silicone está representado na figura 3-19.



Figura 3-19 – Ferramenta em alumínio para a fabricação da base em resina.

Na realização destes moldes, assumiram-se as seguintes regras de projecto:

1. Para promover a desmoldagem das peças em resina, foi necessário que todas as paredes verticais e canais de entrada da resina tivessem um pequeno ângulo de saída de 1° a 2°;
2. As partes superiores e inferiores dos três moldes possuem furos roscados “M6” distribuídos de forma homogénea, para se efectuar a desmoldagem entre resinas e moldes. Através do aperto de parafusos nestes furos roscados, aplica-se pressão na resina, de modo a permitir uma desmoldação de forma suave.
3. Criação de furos roscados, através da utilização de insertos metálicos, devidamente posicionados, de modo a que a resina após vazada e curada, os envolva e aprisione. Estes insertos podem ser porcas maquinadas no exterior para criar ancoragens, ou podem ser buchas metálicas expansíveis.

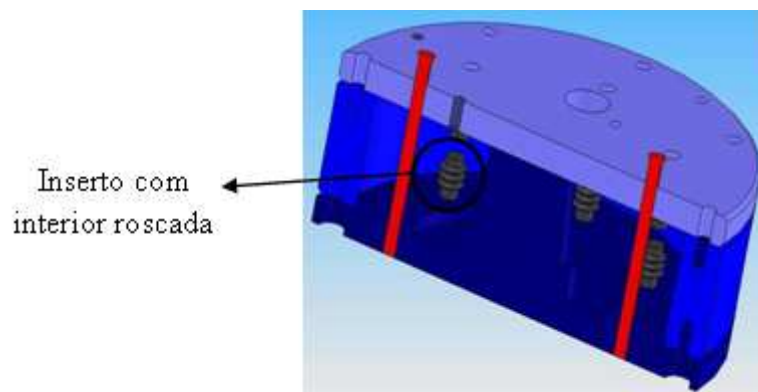


Figura 3-20 – Pormenor dos insertos com interior roscado.

4. Tendo em conta o número de reproduções que este tipo de ferramentas exige, é necessário que todas as peças maquinadas tenham tolerâncias dimensionais e geométricas apertadas, como paralelismos e perpendicularidades, entre outras.

A figura 3-21 ilustra o resultado de um dos moldes obtidos, após se ter realizado a respectiva cura da resina.



Figura 3-21 – Exemplo de um componente da ferramenta em resina.

Apesar destas ferramentas terem funcionado relativamente bem, foi necessário efectuar ajustes a nível de alturas. Outro pormenor que deve ser corrigido é a existência de folgas em alguns dos encaixes entre bases e anéis, devido a deformações originadas pelas dilatações térmicas e contracções normais com este tipo de materiais (neste caso uma resina epoxídica carregada com pó de alumínio).

Na imagem seguinte, podemos observar uma ferramenta constituída por três peças em resina, resultado dos três moldes respectivos.



Figura 3-22 – Conjunto da ferramenta de reprodução em resina.

Nesta ferramenta realizaram-se todas as conversões necessárias para a obtenção de cavidades em resina epoxídica, com vista à obtenção de modelos de silicone.

Após algum tempo de trabalho com esta ferramenta, detectaram-se alguns problemas, que ditaram a sua inviabilidade, tais como:

- Apesar de toda a ferramenta ser em resina, continuou-se a verificar alguma deformação nos modelos de silicone, principalmente falta de rigor dos materiais base da ferramenta (resina);
- Falta de concentricidade entre modelos de silicone e esqueletos (estrutura rígida dos modelos). Apesar do guiamento aplicado na ferramenta, a deformação da resina prejudica a planeza, perpendicularidade e paralelismo, afectando o resultado final do modelo de silicone;
- Desgaste, que faz com que os resultados dimensionais dos modelos de silicone sejam sempre diferentes.

Tendo em conta os problemas apresentados concluiu-se que este tipo de ferramenta, não podia ser usado para a fabricação de modelos de silicone. O rigor dimensional e geométrico destas peças é de tal modo apertado, que qualquer desvio no processo de conversão em conjunto com os problemas dimensionais na ferramenta, traduzem-se em resultados inaceitáveis.

3.3.1.4. 4ª Geração de ferramentas para reprodução de silicones

Tendo em conta os pontos negativos apontados nas ferramentas anteriores, decidiu-se conceber uma ferramenta com o objectivo de os eliminar, tendo plena consciência que alguns desses problemas são, em grande parte, provocados por factores externos à ferramenta, tais

como os materiais usados nas conversões, as temperaturas, entre outros. Nestes casos, a preocupação passa mais pela concepção da ferramenta na óptica de minimização dos efeitos indesejáveis, já que será praticamente impossível anulá-los.

Para o projecto da nova ferramenta, tentou-se atingir os seguintes objectivos:

- Para minimizar os efeitos dos materiais usados nas conversões, seria de todo o interesse diminuir as concentrações de massividades, para tentar diminuir os efeitos de contracção, evitando causar deformações nas peças finais. Para isto decidiu-se modelar a ferramenta com uma forma que acompanhasse o perfil externo da peça, a uma distância da mesma o mais funcional possível, tal como explica seguinte imagem:

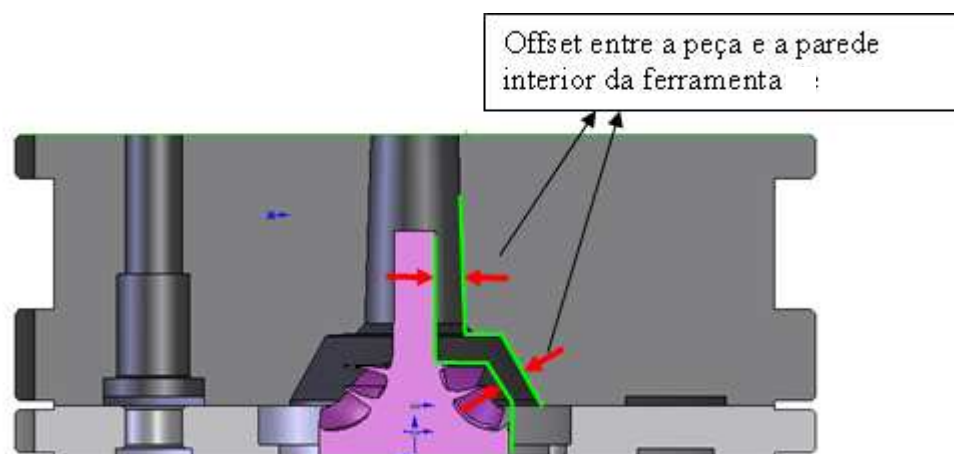


Figura 3-23 – Definição da forma interior da ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes).

Após experiências de optimização do melhor valor de “offset”, decidiu-se optar pela utilização de 7mm para peças com dimensões de diâmetro da base até aproximadamente os 80mm e 10mm para peças com dimensões superiores.

- Realizar um sistema de guiamento eficaz e robusto, através do uso de cavilhas mais compridas e de maior diâmetro, com guiamento em casquilhos metálicos apropriados;
- De forma a facilitar as operações de desmontagem da ferramenta e desmoldagem das cavidades nela executada decidiu-se eliminar o conceito de postigos internos

passando a montagem da ferramenta a ser realizada através do encosto entre superfícies perfeitamente planas.

O desenho de CAD 3D da figura 3-24 em corte e em explosão, demonstra bem o resultado geométrico da ferramenta de reprodução de silicones (moldes).

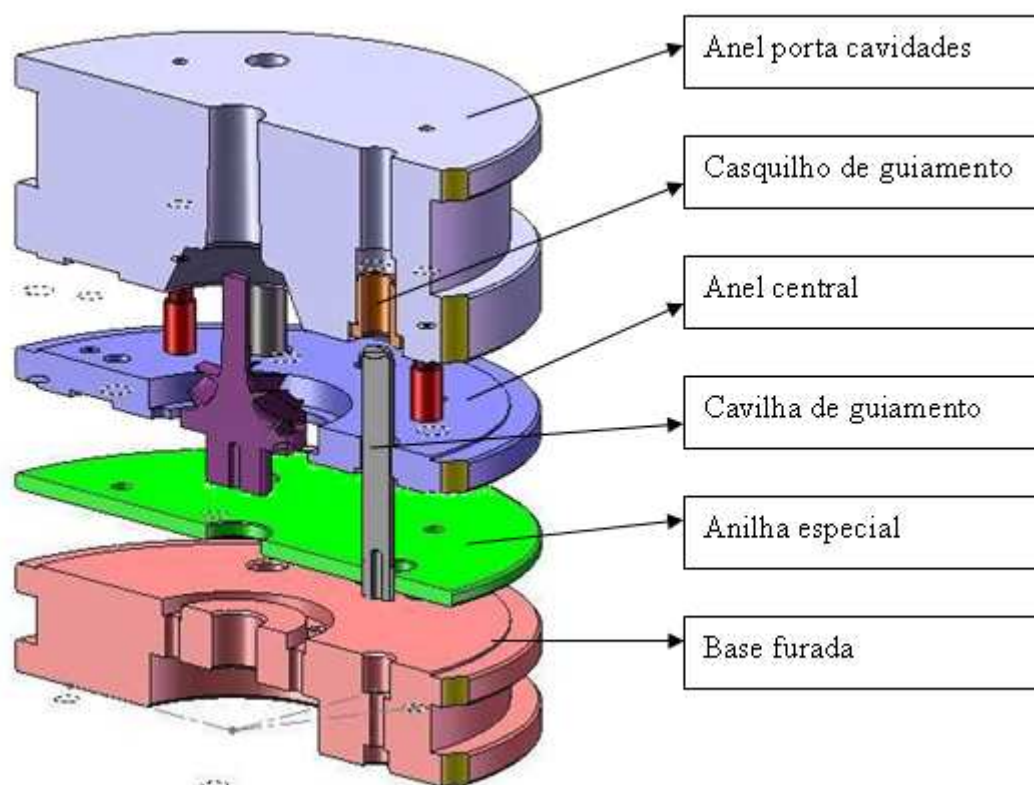


Figura 3-24 – Apresentação dos componentes principais da ferramenta de reprodução de modelos de silicone.

A nível de escolha de material para os componentes da ferramenta, decidiu-se que seria utilizado alumínio com uma anodização superficial, à excepção do anel central e da anilha especial, que pela espessura que possuem e pelo desgaste a que estão sujeitos, optou-se pela execução em aço de construção com uma niquelagem superficial.

Tanto a anodização como a niquelagem realizadas às superfícies dos componentes, tiveram como objectivo:

- Manter o aspecto superficial;

- Facilitar a limpeza de resíduos de material como o silicone ou a resina;
- Aumentar a resistência das superfícies ao impacto e ao desgaste.

De seguida pode-se ver a explicação e a caracterização de cada componente da 4ª geração da ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes):

Anel porta cavidade – Este componente tanto é responsável por realizar a forma exterior das cavidades flexíveis e rígidas, como aloja-las durante os processos de conversão. Tal como foi dito, a sua geometria inversa é definida consoante a peça em utilização, o que faz com que não seja possível ser utilizada em peças com geometrias diferentes.

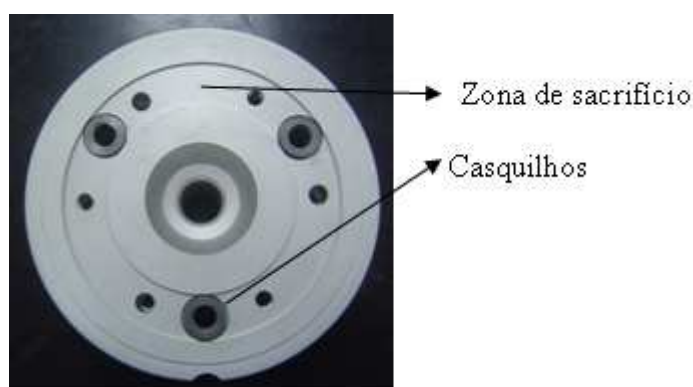


Figura 3-25 – Anel porta cavidades da ferramenta de reprodução de modelos.

A peça possui os casquilhos que permitem o guiamento correcto de toda a ferramenta, através da introdução de cavilhas, presentes na “base furada”. De forma a evitar que se danifique a superfície principal de encosto, criou-se um rebaixo, ou zona de sacrifício onde contactam as cavilhas, os parafusos e os limitadores de curso.

Anel central – Este componente além de servir para dar forma às cavidades, também é responsável por aprisioná-las no anel porta cavidades. A fixação do anel central ao anel porta cavidades é realizada por três limitadores de curso. Tal como o componente anterior e pelas mesmas razões indicadas, o anel central também possui uma zona de sacrifício, que pode ser observada na seguinte imagem.



Figura 3-26 – Anel central da ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes).

Base furada – Este componente tem como função principal a fixação do Master maquinado em alumínio (peça Mãe) e os esqueletos (estruturas rígidas) durante o decurso dos processos de conversão. Esta peça aloja as cavilhas de guiamento e os parafusos de aperto de todo o conjunto.

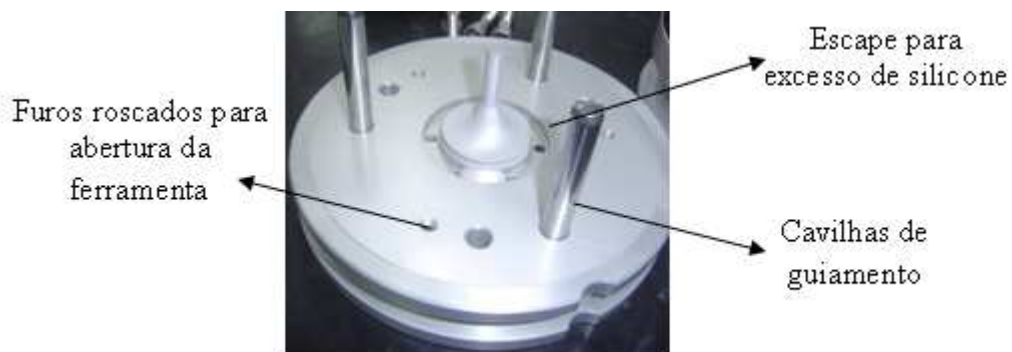


Figura 3-27 – Base furada da ferramenta de reprodução de modelos de silicone (moldes).

Como se pode verificar pela figura anterior, existe um rasgo que circunda a zona onde o esqueleto é colocado, que serve de escape para o excesso de silicone que é introduzido na cavidade. Se o rasgo não existisse, o excesso de silicone iria alojar-se nas zonas de encosto prejudicando a montagem da ferramenta e consequentemente as dimensões finais do modelo de silicone (molde).

De modo a apoiar a operação de abertura da ferramenta, foram criados furos roscados que em conjunto com parafusos compridos, vão exercer forças de separação entre a base furada e o anel central.

Anilha especial – Este componente é apenas usado na realização das cavidades flexíveis, dando-lhes uma forma plana na superfície inferior.

Esta ferramenta tem como vantagens principais:

- Manuseamento muito prático, a nível de montagem e desmontagem;
- Boa resistência ao desgaste;
- Boa eficiência do sistema de guiamento;
- Garantia de perpendicularidade nos modelos de silicone;

Como desvantagens há a referir:

- Elevado custo de fabrico da ferramenta;
- É necessário algum cuidado no manuseamento da ferramenta para não danificar as superfícies de encosto;
- Impossibilidade de utilização da ferramenta em geometrias de peças diferentes (a ferramenta é concebida em função da geometria da peça)

O aspecto final da ferramenta montada, pode ser observado na figura seguinte:



Figura 3-28 – Pormenor de uma ferramenta de reprodução de modelos.

3.3.1.5. Esqueletos (estrutura rígida dos modelos de silicone (moldes))

O esqueleto ou também denominado de estrutura rígida dos modelos de silicone (moldes), tem como função principal conceder alguma rigidez estrutural aos modelos, de

forma a evitar a possibilidade de deformação provocada pela flexibilidade dos materiais elastoméricos.

Durante o desenvolvimento deste projecto, existiram várias evoluções e gerações de esqueletos, mas o conceito manteve-se inalterável. A mudança mais notável durante a evolução da geometria dos esqueletos, teve a ver com a evolução das ferramentas de reprodução, visto que na 2ª e 3ª geração de ferramentas a saída do excesso de silicone era realizada por furos localizados nos próprios esqueletos. Na 4ª geração, essa operação passou a ser realizada pelas bordas laterais da estrutura rígida. A diferença pode ser visualizada na figura 3-29:

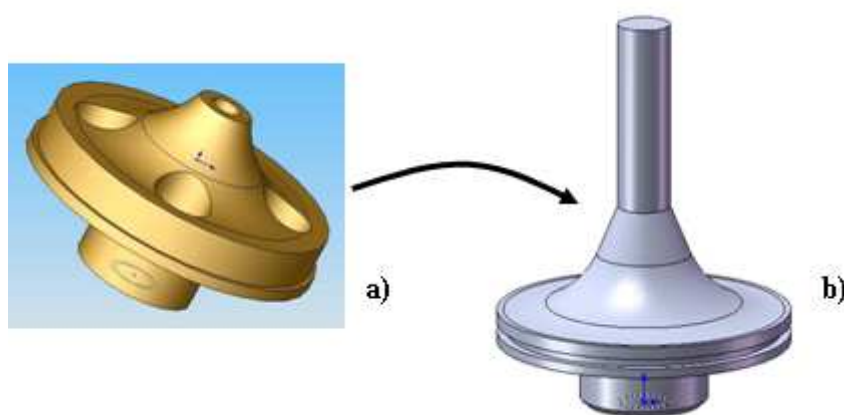


Figura 3-29 – Evolução da geometria dos esqueletos; a) 1ª geração, b) 2ª geração.

O esqueleto possui um veio na parte inferior da sua estrutura, que normalmente é realizado com alguma precisão e que tem como objectivo principal permitir um encaixe perfeito na base furada da ferramenta de reprodução de silicones. Esta junção é responsável pela garantia de concentricidade entre o esqueleto e a cavidade rígida.

A última geração de geometria de esqueletos, tinha como regra principal de projecto o acompanhamento do perfil do corpo da peça segundo um valor de “offset” definido. Este valor não é mais do que a espessura de silicone definida entre a superfície exterior do esqueleto e a superfície exterior do corpo principal do modelo de silicone (molde).

Para conseguir que o esqueleto cumprisse a sua função o mais eficazmente possível, foi necessário testar vários valores de “offset”. Quanto maior este valor, maior é a deformação por contracção e por excesso de flexibilidade, no caso de ser demasiado pequeno, pode haver fragilidade devido à fina película de silicone existente e maior probabilidade de ocorrência de defeito superficiais, como mau enchimento, bolhas de ar aprisionadas, entre outros.

Como resultado final deste estudo, concluiu-se que o melhor compromisso, seria a utilização de esqueletos com um “offset” de aproximadamente 1mm. Nas zonas onde é necessário maior flexibilidade para facilitar a operação de desmoldagem das moldações de gesso, é normal conceder mais espessura de silicone, podendo chegar aos 2mm de “offset”.

O conceito geral pode ser observado na figura 3-30.

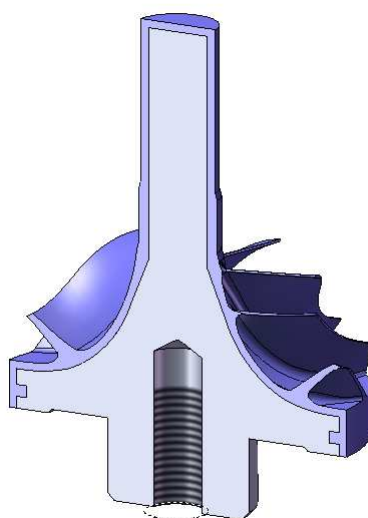


Figura 3-30 – Pormenor do modelo de silicone em corte (esqueleto + silicone).

3.3.2. Ferramentas para obtenção de placas molde

3.3.2.1. Evolução das placas molde e suas ferramentas de revestimento

A produção de moldações de gesso é realizada sobre um conjunto de ferramentas elastoméricas (para serem auto-desmoldáveis), constituídas pelos modelos de silicone (já apresentados anteriormente), pelas placas molde e pelas caixas de moldação. Em particular, neste capítulo, encontra-se apresentado a explicação de todo o desenvolvimento e sucessivas optimizações, tanto a nível de projecto de ferramentas como a nível de técnica de revestimento de silicone, para que deste modo o resultado final, permita em conjunto com as outras ferramentas elastoméricas, a produção de moldações de gesso eficazes e estáveis.

A placa molde é a base de todo o conjunto de ferramentas elastoméricas. É nela que os modelos de silicone e as caixas de moldação são devidamente fixados. A exigência desta fixação é de tal ordem importante, que por melhor que estejam os modelos de silicone, no

caso de uma placa molde não cumprir os requisitos necessários, o resultado final na fundição pode ficar comprometido.

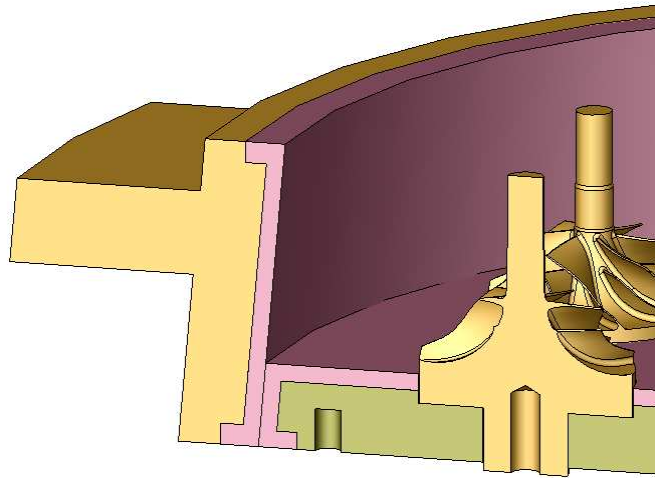


Figura 3-31 – Esquema de montagem dos modelos de silicone, da placa molde e da caixa de moldação.

Para melhor se entender a funcionalidade da placa molde, segue-se uma lista das principais exigências numa placa molde:

- Possuir uma planeza, tanto na superfície metálica como na elastomérica, de pelo menos 0,05mm;
- Garantir o posicionamento e fixação exacta dos modelos de silicone;
- O encaixe entre placa molde e modelos de silicone tem de ser perfeito, de tal ordem que a existência de folga pode provocar lixo na moldação de gesso, ou no caso de aperto excessivo, pode-se provocar deformação no modelo de silicone e/ou na placa molde;
- O encaixe entre placa molde e caixa de moldação tem de ser perfeito, de tal ordem que a existência de uma folga pode provocar lixo na moldação de gesso, ou no caso de aperto excessivo, não se realiza perfeitamente o encaixe do conjunto das ferramentas, que pode originar moldações com alturas diferentes às projectadas e excessos de gesso em zonas indesejáveis.
- A adesão do silicone às placas de alumínio tem de ser perfeita. Qualquer eventual descolamento provoca uma deformação na placa molde ou mesmo nos modelos de silicone, que pode impossibilitar o sucesso dos resultados finais desejados.

Para se entender melhor o desenvolvimento da execução das placas moldes revestidas a silicone, apresentam-se em seguida as três gerações de ferramentas e técnicas de revestimento de silicone.

3.3.2.1.1. 1ª Geração de Placas molde

Tendo em conta o primeiro design de placa molde decidiu-se desenvolver as ferramentas e técnicas para se efectuar o revestimento elastomérico, que inicialmente consistiu nos seguintes passos:

1º - Maquinagem de uma placa molde em alumínio, com uma geometria exactamente igual ao resultado final desejado (geometria da parte rígida em alumínio e a geometria da parte flexível em silicone).

2º - Obtenção do negativo em borracha de poliuretano, a partir da placa maquinada em alumínio.

Este passo consistia na fixação da placa rígida, numa ferramenta especialmente executada para servir de apoio para a execução desta conversão, que por sua vez iria ser preenchida com borracha de poliuretano, para obtenção de uma cavidade moldante, tal como se pode ver na figura 3-32:

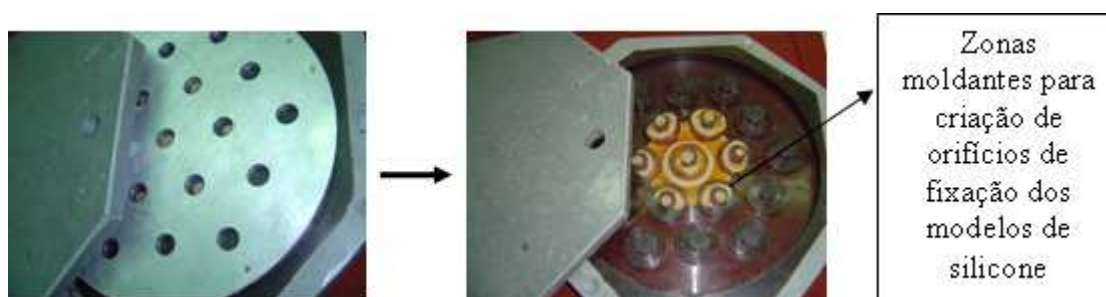


Figura 3-32 – 1ª Geração de ferramenta de revestimento de placas molde.

Basicamente esta conversão, tinha a função de realizar as zonas moldantes que iriam permitir a criação dos orifícios na placa molde para encaixe dos modelos de silicone.

3º - O terceiro passo consistia na fabricação de placas em alumínio maquinadas, que diferem da placa original, pelo facto de não possuírem a porção de alumínio que corresponde à geometria a ser preenchida por silicone.

4º - Após a respectiva granalhagem e ataque químico à superfície a revestir na última placa maquinada (que nesta fase do desenvolvimento ainda era um processo bastante rudimentar), procedeu-se à sua fixação de forma idêntica ao procedimento referido no segundo passo. Desta forma, realizava-se o vazamento do silicone para o interior da cavidade moldante, de modo a garantir que todo o espaço destinado para o silicone era completamente preenchido.

Após a respectiva cura do silicone, a placa molde estava pronta para ser desmoldada e usada na produção (ver figura 3-33).



Figura 3-33 – 1ª e 2ª geração de placa molde.

Contudo, tanto o projecto de ferramentas como a técnica de vazamento de silicone apresentavam alguns problemas, tais como:

- Devido à instabilidade dos materiais usados (principalmente o poliuretano), este processo não permitia a obtenção de placas molde geometricamente aceitáveis;
- Devido à instabilidade dimensional do poliuretano, as placas molde fabricadas nunca apresentavam propriedades dimensionais iguais entre si, verificando-se que com o decorrer do tempo os sucessivos revestimentos de silicone executados mostravam resultados dimensionais cada vez piores.
- Cada cavidade moldante executada estava limitada ao revestimento de placas molde para a geometria de peça em produção, não permitindo a sua utilização com outras peças com diâmetros de base diferentes;

- O tempo necessário para a fabricação da primeira placa molde era relativamente extenso.

Como conclusão deste processo, pode-se dizer que carece de algum rigor, já que ao trabalharmos em conjunto com materiais como borracha de poliuretano e silicones, estamos à partida a introduzir variações dimensionais devidas a expansões e contracções dos materiais, tornando-se difícil controlar os resultados a atingir.

3.3.2.1.2. 2ª Geração de Placas molde

Com o objectivo de melhorar o processo de revestimento e consequentemente o seu resultado final (mantendo o design das placas molde), decidiu-se avançar para uma novo projecto de ferramentas, que por sua vez se baseou nas seguintes ideias:

- Eliminar a execução de uma placa original maquinada e respectiva conversão em borracha de poliuretano, que tinham como objectivo principal a criação de zonas moldantes dos orifícios de encaixe dos modelos de silicone. Decidiu-se, então criar uma ferramenta onde esses mesmos orifícios seriam realizados directamente através de postigos metálicos encaixados individualmente na placa molde a revestir;
- Criar ferramentas de revestimento de placas molde, de modo a permitir a sua utilização em qualquer geometria de peça, ou seja, tornar as ferramentas o mais standard possível;
- Ao eliminar as zonas moldantes em borracha de poliuretano que por sua vez passam a ser em alumínio, era necessário que houvesse exigências a nível de tolerânciamento geométrico e dimensional de modo a garantir a não existência de deformação;
- Criação de ferramentas estáveis dimensionalmente e resistentes ao desgaste.

O resultado a nível de ferramentas para revestimento de placas molde pode ser visualizado na figura 3-34 em CAD 3D.

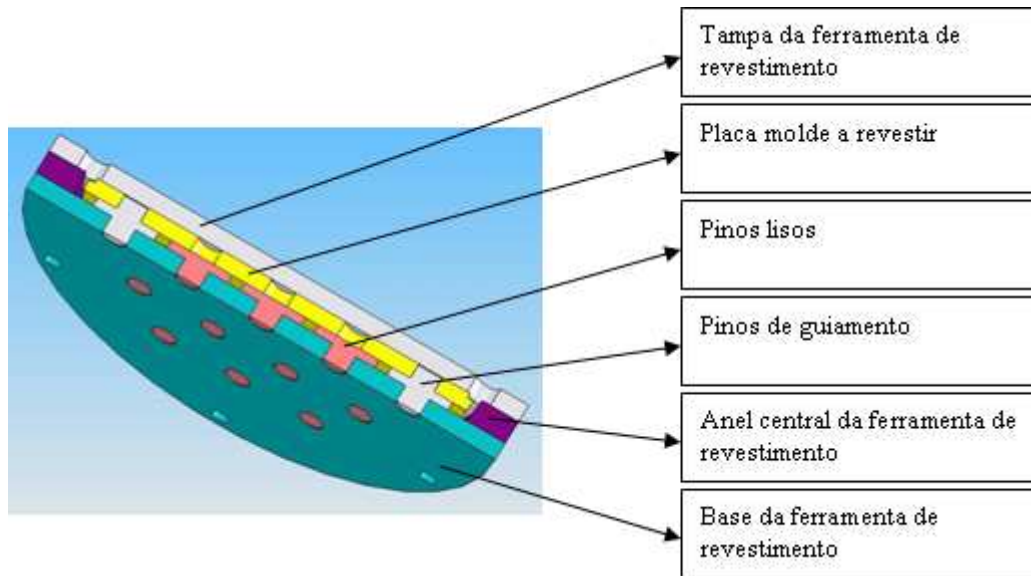


Figura 3-34 – Descrição da 2ª geração da ferramenta de revestimento de placas molde.

Para evitar arestas redondas na placa molde, foi necessário optar por dividir a ferramenta em três zonas: base, tampa e anel central.

Foram criados dois furos na tampa da ferramenta, um com o objectivo de vaziar o silicone líquido para o seu interior, enquanto que o outro permite que o ar, que fica aprisionado durante o enchimento, escoasse para o exterior da ferramenta. Para este efeito se verificar, é necessário inclinar a ferramenta o suficiente para que o vazamento seja direccionado.

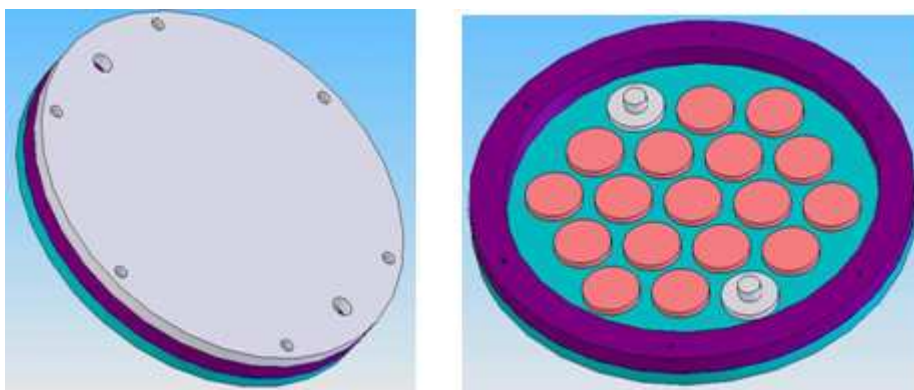


Figura 3-35 – 2ª geração da ferramenta de revestimento de placas molde.

Após a concepção desta ferramenta, efectuaram-se alguns revestimentos que serviram para analisar certos aspectos, como, por exemplo, o funcionamento da placa molde em

produção, quando em conjunto com a caixa de moldação e os respectivos modelos de silicone. As conclusões foram as seguintes:

- O encaixe entre os modelos de silicone e os furos da placa molde, mostraram ser ineficazes;
- As exigências a nível de tolerânciamento geométrico e dimensional, deram os resultados esperados, principalmente a planeza exigida nas placas, que permitiu obter moldações sem deformação;
- Verificou-se alguma dificuldade na montagem desta ferramenta pelo facto de não existir guiamento entre a tampa, o anel central e a base.
- Verificou-se alguma dificuldade na extracção da placa molde após cura do silicone, assim como a falta de zonas de sacrifício para introdução de ferramentas auxiliares ao acto de desmoldagem.
- O facto de não existir aperto do conjunto da ferramenta no seu centro, origina a ocorrência de pequenas folgas entre os pinos, a tampa e a base, que por sua vez causava fugas de silicone para zonas indesejáveis.

Após dos problemas verificados anteriormente, optou-se por voltar a projectar o conceito geométrico e funcional da placa molde e a sua ferramenta de revestimento, originando deste modo a 3ª geração de placas molde.

3.3.2.1.3. 3ª Geração de Placas molde

Modificou-se o design da placa molde de modo a melhorar a sua funcionalidade em conjunto com as outras ferramentas elastoméricas, tendo em conta os problemas apontados anteriormente.

A nível geométrico obteve-se o resultado ilustrado na seguinte figura, onde podemos analisar os pormenores mais importantes:

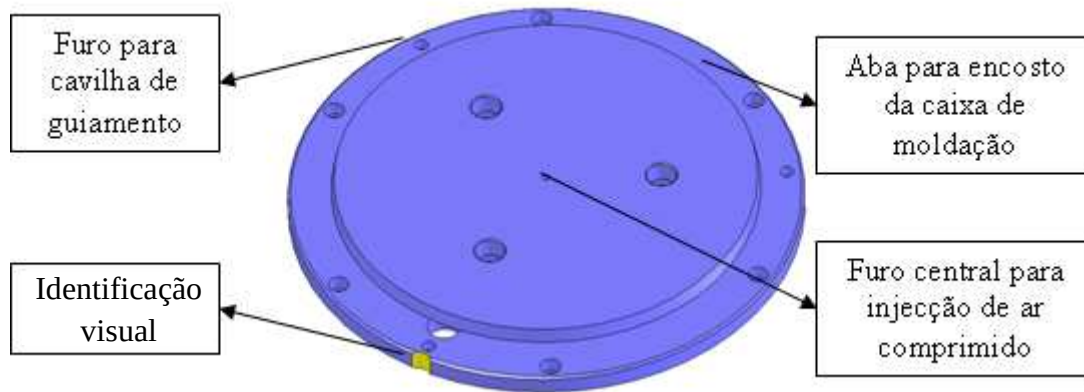


Figura 3-36 – Exemplo da 3ª geração da placa molde.

Para entender melhor a funcionalidade deste novo conceito de placa molde, é conveniente observar a nova ferramenta de revestimento, também ela redesenhada, tendo em conta os problemas presentes nas ferramentas anteriormente usadas.

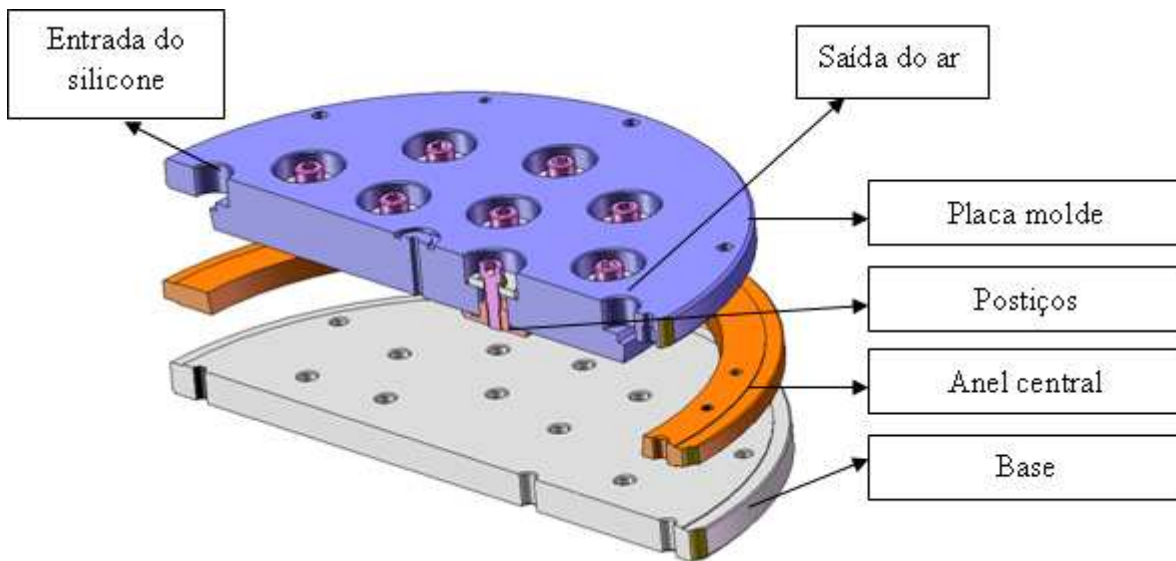


Figura 3-37 – Vista em corta da ferramenta de revestimento de placas molde em posição de vazamento.

Da nova placa molde e da sua ferramenta de revestimento, salientam-se os seguintes pormenores:

- A placa molde passou a possuir uma aba lateral, que tem como funções principais:
 - o A substituição da tampa usada nas últimas gerações de ferramentas

- o Permitir um encosto perfeito entre a placa molde e anel central e entre a placa molde e a caixa de moldação;
- o Permite a introdução de cavilhas de guiamento, que são utilizadas para o processo de revestimento e no processo de fabricação de moldações de gesso;
- O vazamento de silicone é realizado através de dois furos presentes na placa molde, que não afectam o bom funcionamento da mesma;
- Os postigos são guiados e fixados na própria placa molde;
- A placa molde possui um furo central, para injeção de ar comprimido, que serve de apoio ao processo de desmoldação de moldações de gesso;
- O anel central passou a ser realizado em aço inox, por questões de resistência ao desgaste e corrosão, e foi projectado com superfícies de sacrifício na sua periferia, para não danificar a superfície de encosto;
- A nível de projecto, tanto as placas molde como as outras peças da ferramenta, foram exigidas nos respectivos desenhos, tolerâncias dimensionais e geométricas, relativamente apertados, como planeza e concentricidades na ordem dos 0,050mm, furos “H7”, entre outros.



Figura 3-38 – Pormenor de uma placa molde revestida

3.3.2.2. **Optimização da montagem dos modelos de silicone (moldes) na placa molde**

Um dos problemas levantados durante o desenvolvimento do projecto, foi o facto de por vezes a montagem dos modelos de silicone na placa molde não se efectuar da melhor forma. Convém salientar que esta montagem, é realizada pelo encaixe entre a base do modelo e o orifício criado pelo postigo na placa molde.

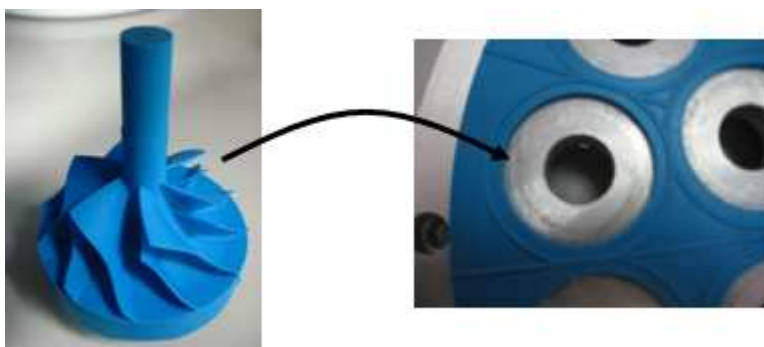


Figura 3-39 – Indicação de encaixe do modelo de silicone na placa molde.

Em alguns casos detectou-se folga entre o modelo e o orifício, o que originou uma fonte de lixo permanente durante a produção de moldações de gesso. Como se pode imaginar, neste tipo de processo de fundição, qualquer partícula de lixo que se deposite na superfície de peça, significa que muito provavelmente o fundido vai ser produzido com defeitos.

A nível de projecto, pensou-se desde o início que o mais correcto seria a atribuição ao postigo do mesmo valor do diâmetro do modelo de silicone a usar na placa molde, mas a verdade é que o silicone sofre contracções (mesmo quando curado a temperaturas baixas) e mesmo ao longo do tempo, em grandes massividades de silicone, como é o caso do revestimento da placa, verifica-se alterações geométricas que podem ser provocadas por degradação, absorção de líquidos¹, entre outros factores. Por isso numa primeira fase tentou-se estimar as possíveis contracções que tanto o modelo como o revestimento da placa molde podem sofrer, de modo a aplicar essa diferença no diâmetro do postigo, mas rapidamente se concluiu, que essa tarefa ia ser muito enganadora, pelo facto da geometria do revestimento não ser constante.

¹ Ver o artigo sobre o comportamento dos silicões de adição em contacto com vários tipos de líquidos [36]

Seria fácil pensar em projectar os postigos de modo a provocar uma interferência entre o modelo e o orifício, mas o problema aparece quando essa interferência é de tal modo excessiva que provoca deformação no modelo de silicone, o que inviabiliza automaticamente o processo de produção.

Decidiu-se então iniciar uma série de revestimentos introduzindo algumas acções de melhoria, tais como:

- Pelo método de tentativa erro, encontrar a melhor interferência possível, através de sucessivas maquinagens nos postigos com incrementos na ordem das décimas por diâmetro;
- Introduzir um produto plasticizante na mistura de silicone, com o objectivo de flexibilizar o revestimento de silicone, evitando deformações nos modelos, em casos de excesso de interferência;
- Modificar a geometria do postigo de modo a flexibilizar mais o revestimento da placa molde.

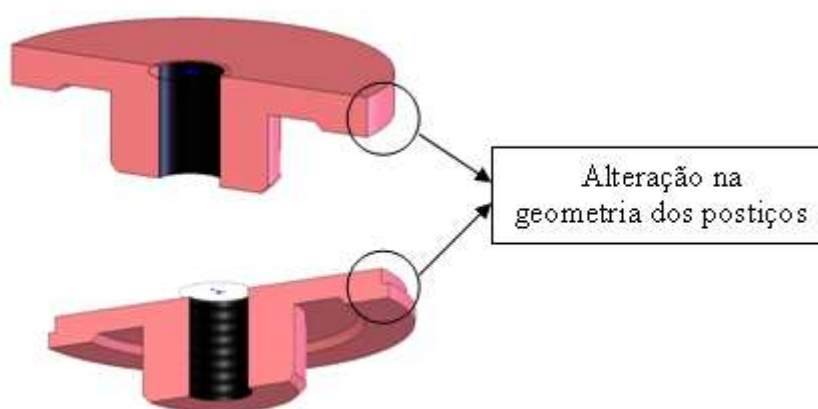


Figura 3-40 – Pormenor da alteração na geometria dos postigos.

De salientar a dificuldade em controlar dimensionalmente os diâmetros dos orifícios originados pelos postigos, pelo facto do revestimento ser em silicone, o que impossibilita a medição por contacto, e pelo facto das esquinas que definem o diâmetro do furo conterem pequenas rebarbas que também impossibilitam a medição por análise de imagem. A única possibilidade em analisar o resultado das alterações feitas aos postigos, foi através da verificação das moldações em gesso e posteriormente das peças fundidas fabricadas através do uso da placa em estudo. Esta análise é baseada na existência, ou não, de rebarbas nas peças

fundidas ou ondulações na superfície do gesso, que são bons indicadores de problemas na geometria dos postigos.

A nível de resultados podemos afirmar que os melhores valores de interferências encontrados, foram de 0,2mm (por raio) para peças de pequena e média dimensão, e de 0,3mm para peças de grande dimensão. Convém ainda salientar o facto de em algumas peças a alteração da geometria dos postigos relevar-se prejudicial, pelo facto de criar pequenos depósitos de gesso sobre o lábio de silicone, que originava deformação no silicone do revestimento, criando-se assim mais uma fonte suplementar de lixo na moldação de gesso.

3.3.3. Ferramentas para obtenção de caixas de moldação

3.3.3.1. Evolução das caixas de moldação e suas ferramentas de revestimento

Como já foi referido, para a produção de moldações de gesso, é necessário existirem três tipos de ferramentas elastoméricas, os modelos de silicone, as placas molde e as caixas de moldação. Este capítulo vai-se debruçar sobre a evolução geométrica da caixa de moldação e das suas ferramentas de revestimento, referindo pormenores que foram importantes para a sua definição e que introduziram melhorias nas operações produtivas.

A caixa de moldação tem um papel fundamental na execução de moldações de gesso. É esta ferramenta elastomérica que dá forma às paredes laterais das moldações, que mais tarde no vazamento do alumínio, é responsável pelo seu encaixe na câmara de vazamento, garantindo concentricidades e posicionamentos segundo regras de projecto definidas.

Inicialmente, a definição da geometria da caixa de moldação seguiu algumas regras, como por exemplo:

- O interior do anel teria de ser num material elastomérico, para ser desmoldável com o gesso;
- A parede lateral da moldação teria de ter uma inclinação para que fosse possível colocar e retirar manualmente a moldação de gesso no anel porta moldação da câmara de vazamento, e para que o aperto da câmara de vazamento provocasse pressão radial na moldação de gesso;

- Para que a desmoldagem da moldação cumprisse uma sequência de passos definidos (ver figura 3-14), era necessário que possuísse uma saliência flexível na parede lateral, para criar prisão entre a moldação e a caixa.

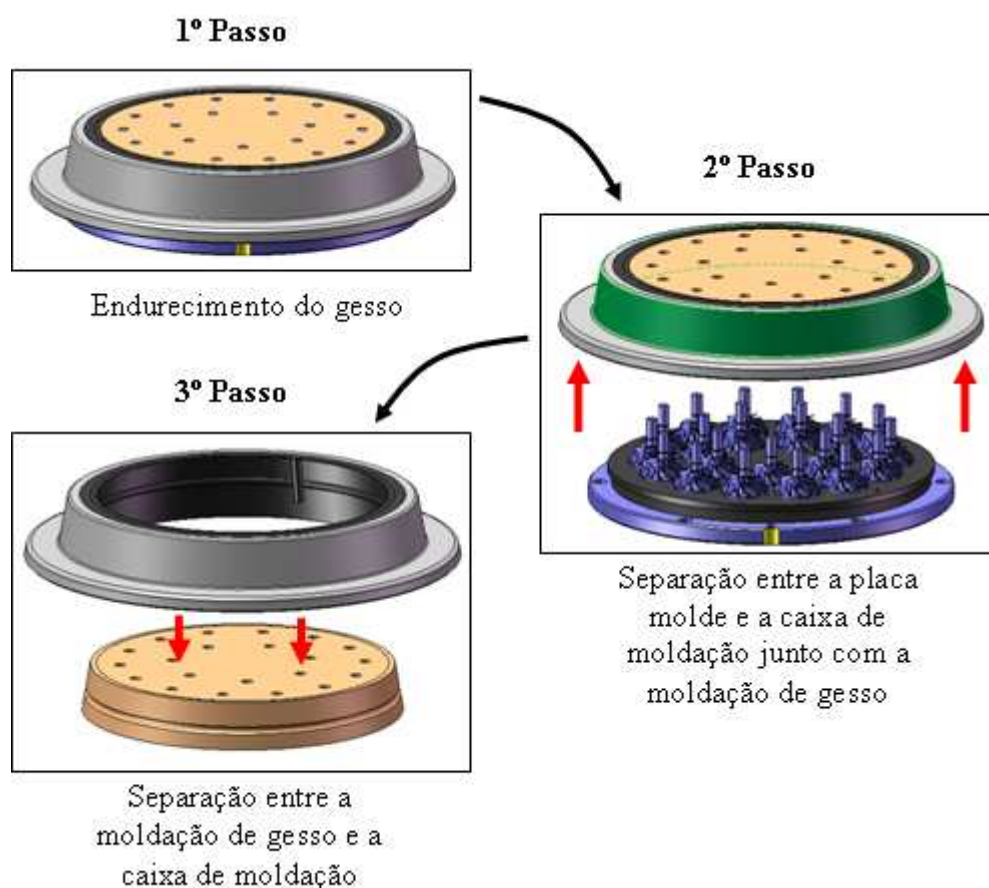


Figura 3-41 – Sequência de desmoldação das moldações.

- A caixa de moldação teria de ter asas ou uma aba lateral, onde podesse ser aplicada pressão, tanto para imobilizá-la contra a placa molde, uma vez que é sujeita a vibração durante o vazamento do gesso, como para aplicar as forças de desmoldagem necessárias para extrair a moldação do interior das ferramentas elastoméricas;
- Tem de possuir um sistema de posicionamento e/ou guiamento em relação à placa molde e/ou ao carro porta placas molde;

Tendo em vista a execução de uma ferramenta elastomérica que cumprisse as condições estabelecidas anteriormente, iniciou-se a definição da melhor geometria para a caixa de moldação e suas ferramentas de revestimento.

3.3.3.1.1. 1ª Geração de caixas de moldação

Da primeira abordagem realizada com destino a definir a geometria da caixa de moldação, resultou a seguinte forma, conforme a imagem demonstra:

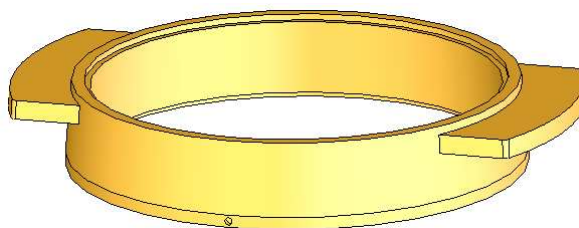


Figura 3-42 – 1ª Geração de caixa de moldação.

Como se pode verificar, a caixa de moldação possui duas abas laterais que servem para aplicar força descendente na altura de vazamento de gesso, e ascendente durante a desmoldagem da moldação de gesso.

Para a execução das primeiras caixas de moldação em alumínio, recorreu-se à tecnologia de prototipagem rápida “LOM”. Realizaram-se os moldes das asas e do cilindro individualmente, permitindo assim realizar moldações em areia furânica para posterior vazamento de alumínio. No final foi necessário executar alguns acabamentos e maquinagens, principalmente na parte interior da caixa, de forma a garantir as dimensões funcionais da mesma, ficando pronta para se proceder ao seu revestimento em silicone.

Para a operação de revestimento em silicone, houve a necessidade de projectar uma ferramenta especial, que completasse as necessidades descritas anteriormente. Deste modo desenvolveram-se algumas ideias que deram forma à ferramenta que se encontra apresentada na figura 3-43.

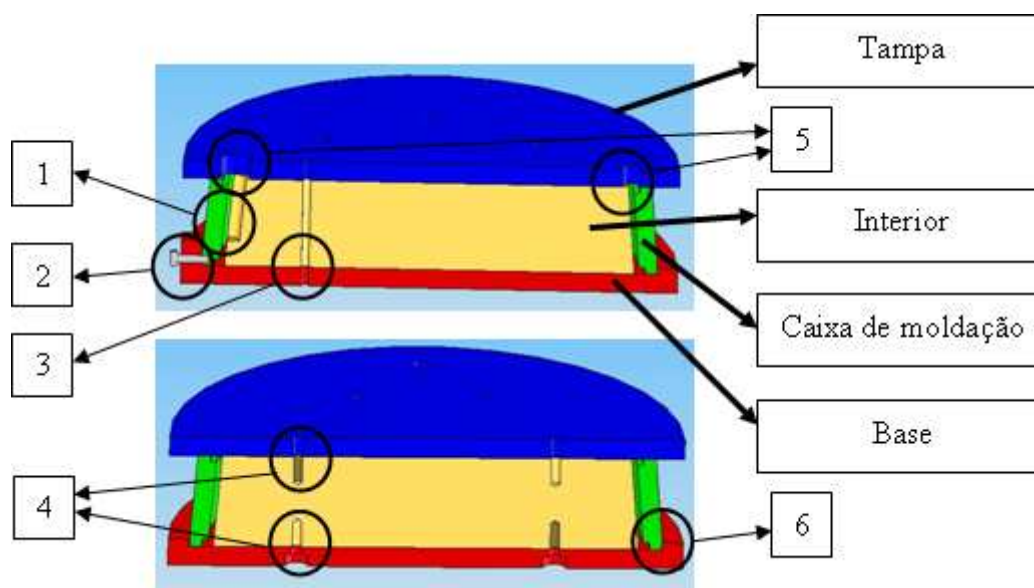


Figura 3-43 – Ferramenta de revestimento de caixas de moldação da 1ª geração.

Mais pormenorizadamente, encontram-se de seguida descritos alguns detalhes relevantes do funcionamento da ferramenta e da posterior caixa revestida, segundo a numeração referente à figura anterior:

1. Entalhe no molde interior da ferramenta de revestimento, que serve para criar uma forma de guiamento na moldação de gesso, para posicionamento da mesma na câmara de vazamento;
2. Sistema de posicionamento da caixa de moldação com a forma do molde interior da ferramenta de revestimento da caixa de moldação;
3. Furos mandrilados para passagem de cavilhas de guiamento da tampa, do interior e da base da ferramenta de revestimento da caixa de moldação;
4. Sistema de fixação entre as várias peças da ferramenta;
5. Entrada e/ou saída de silicone e ar do interior da cavidade da ferramenta de revestimento da caixa de moldação;
6. Gola de encaixe entre a caixa e a base da ferramenta para garantir a concentricidade entre ambas as peças.

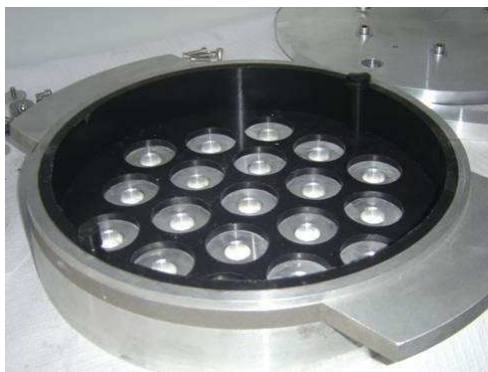


Figura 3-44 – Aspecto da 1ª geração da caixa de moldação em conjunto com a placa molde.

Contudo esta ferramenta e a sua ferramenta de revestimento, apresentaram problemas e algumas limitações, das quais algumas estavam associadas aos problemas apontados na primeira e segunda geração de concepção de placas molde, onde se pode destacar por exemplo, a ineficácia do guiamento entre ferramentas. Um dos grandes problemas encontrados foi a existência de folga entre a caixa de moldação e a placa molde, que implicava a introdução de gesso entre ambas as ferramentas, criando-se deste modo uma fonte de lixo que acompanhava as moldações até à fase do vazamento de alumínio, que consequentemente produziam defeitos graves nas peças fundidas.

Estes problemas foram a base para o início de uma nova geração de caixas de moldação.

3.3.3.1.2. 2ª Geração de caixas de moldação

Sem dúvida a geração anterior de caixas de moldação, apesar de ter permitido a experimentação e compreensão do processo de fabricação de moldações de gesso, apresentou problemas que necessitavam de ser melhorados, daí a preocupação em redesenhar o seu conceito.

Uma dos problemas verificados foi o facto da geometria da parte rígida da caixa de moldação apresentar um custo de fabricação relativamente elevado, mesmo quando realizada em grandes séries. Deste modo ao pensar em melhorar a funcionalidade da caixa de moldação, foi imprescindível redesenhar a sua geometria, de forma a torná-la mais simples e economicamente mais acessível. Resultando na geometria apresentado na figura seguinte (CAD 3D).



Figura 3-45 – 2ª Geração da caixa de moldação.

Mais objectivamente, para a definição da 2ª geração de caixa de moldação, tiveram-se em conta as seguintes ideias e necessidades:

- Para tornar a aquisição da caixa de moldação mais acessível economicamente, decidiu-se que em substituição das duas asas a meio do cilindro, deveria existir uma aba em todo o perímetro colocado na parte inferior da caixa. Deste modo, a sua execução por fundição passaria a ser muito mais fácil, permitindo à posteriori um acabamento superficial por maquinagem abaixo dos 1,6Ra, indicado para ferramentas de trabalho com gesso;
- Para garantir uma correcta concentricidade entre caixa de moldação e placa molde, criaram-se três furos guia (com desfasamento) na superfície inferior de encosto da caixa de moldação. Os mesmos furos seriam usados para o guiamento das ferramentas de revestimento;
- Adelgaçou-se o lábio horizontal em silicone para aprisionamento da moldação na primeira fase da desmoldação e o lábio vertical em silicone de marcação para posicionamento da moldação de gesso;
- Realizou-se uma anodização na caixa de moldação, para conferir mais resistência ao desgaste, tendo em conta que vão trabalhar com gesso.



Figura 3-46 – Pormenor real de uma caixa de moldação.

Como já foi referido, a 2ª geração contemplou também algumas alterações a nível de ferramenta de revestimento da caixa de moldação, tais como:

1. Simplificação da tampa e da base da ferramenta, passando o guiamento, outrora feito lateralmente pela base da ferramenta, para as superfícies planas de todos os elementos da ferramenta;
2. Com o objectivo de tornar o trabalho mais prático na óptica do operador, diminuiu-se a massividade no centro da peça interior da ferramenta de revestimento da caixa de moldação;
3. De modo a não danificar as superfícies de encosto, criaram-se zonas de sacrifício onde se localizam os sistemas de desmoldagem, parafusos e cavilhas de guiamento;



Figura 3-47 – Peça interior da ferramenta de revestimento da caixa de moldação.

4. Realizaram-se anodizações em todas as peças da ferramenta para conceder mais resistência ao desgaste;

O resultado final da ferramenta de revestimento da caixa de moldação, pode ser observado na figura 3-48:



Figura 3-48 – Ferramenta de revestimento da caixa de moldação.

Em geral este conceito de caixa de moldação e sua ferramenta apresentaram resultados bastante razoáveis, verificando-se uma maior funcionalidade tanto na operação de revestimento da caixa, como na sua utilização na produção de moldações de gesso.

3.4. Processo de obtenção de modelos de silicone (moldes)

Durante este projecto foram desenvolvidos, sequencialmente, vários processos de reprodução para obtenção de modelos de silicone.

A sequência que ditou a evolução do processo de obtenção de modelos foi a seguinte:

- 1º - Processo poliuretano;
- 2º - Processo silicone;
- 3º - Processo cobre.

Para uma melhor compreensão de cada um dos processos, apresentam-se no esquema da figura 3-49 as fases características de cada um:

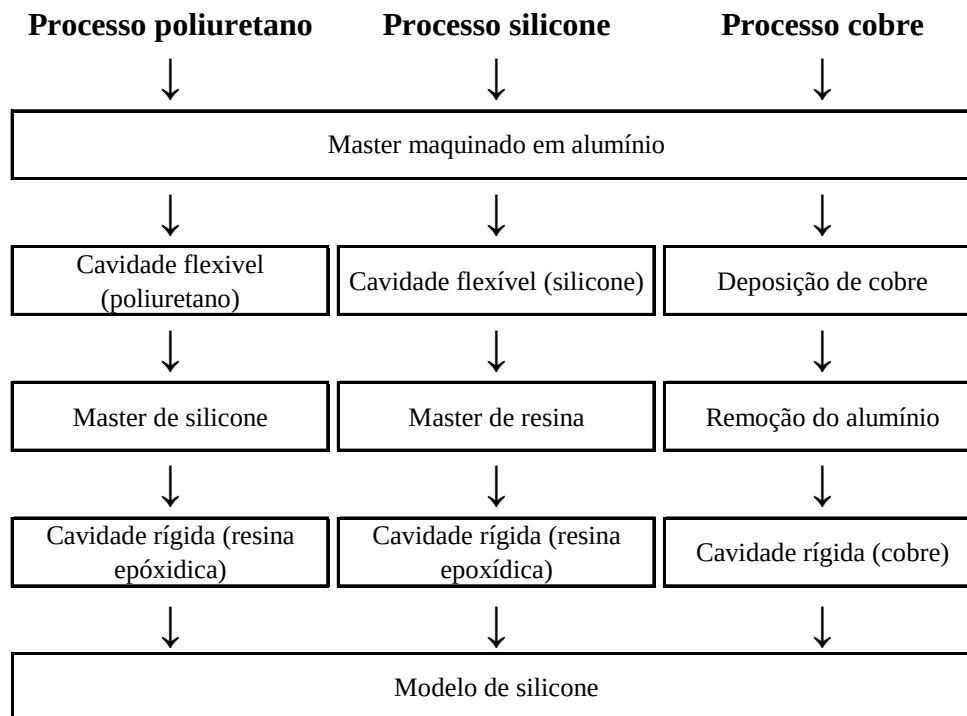


Figura 3-49 – Etapas principais dos vários processos de obtenção de modelos.

3.4.1. Procedimento de fabrico de modelos de silicone (moldes)

Como já foi referido anteriormente, um modelo silicone é uma peça com exterior flexível em silicone, que tem de reproduzir com rigor a geometria do Master maquinado que lhe deu origem segundo um dos processos de conversão que posteriormente vão ser apresentados. Apesar da flexibilidade necessária para este tipo de peças, de modo a ultrapassar o facto das geometrias terem contra-saídas, é fundamental que tenham, também, alguma rigidez estrutural, ou seja, é importante que o interior do modelo de silicone seja rígido, por forma a evitar a deformação durante a fabricação de moldações de gesso. Para isso, é utilizado o já descrito esqueleto em alumínio.

Outro pormenor, para este tipo de peças em silicone, é garantir que a sua geometria não contem qualquer defeito, comuns neste tipo de material, tais como lixo preso na superfície da peça de silicone, bolhas de ar que ficaram alojadas dentro da cavidade, más curas e/ou inibições do silicone.

Para a execução de um modelo de silicone é necessário efectuar o seguinte procedimento:

Preparação da cavidade

Sempre que a cavidade não esteja em uso, é essencial que ela se encontre tapada com uma folha de papel ou outra barreira. Deste modo, evitamos que qualquer tipo de lixo se deposite no seu interior. Antes da sua utilização deve-se injectar ar-comprimido, limpo e seco, para o seu interior, sem danificar a superfície.

Preparação do esqueleto

Tal como já foi mencionado anteriormente, o esqueleto é a estrutura metálica, que permite conceder rigidez aos modelos de silicone. A sua preparação, consiste numa primeira fase, em desengordurar através da imersão do esqueleto em acetona durante 5 a 10 minutos, se possível sob acção de uma tina de ultra-sons. De seguida, para ajudar a adesão do silicone à superfície metálica, é necessário granalha-lo a uma pressão de aproximadamente 4 bar, com granalha de corindon “Ek45”, limpa e isenta de gordura e/ou humidade. Para completar, é necessário a colocação de um produto para promover quimicamente a adesão do silicone, comercialmente conhecido por “prime coat” ou “primário”. A sua aplicação exige alguma experiência, já que quando colocado em excesso pode provocar o efeito contrário (fica uma camada espessa de “prime coat” seco, que se desfaz e cria separação entre o metal e o silicone). O tempo de secagem varia entre os 10 e 20 minutos, dependendo das especificações do fornecedor do produto. Para acelerar a secagem pode ser usado ar-comprimido bem seco e limpo.

Por fim, o esqueleto é fixado na base da ferramenta de reprodução conforme se pode observar na figura 3-50.

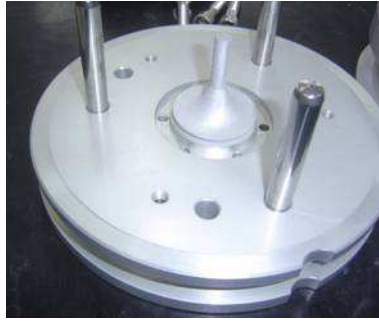


Figura 3-50 – Demonstração do posicionamento do esqueleto na base da ferramenta de reprodução.

Preparação da mistura de silicone

Para executar a mistura de silicone, é necessário um balde de dimensões adaptadas à quantidade a misturar, normalmente com um volume 10 vezes superior ao volume da mistura. Como se trata de misturas de silicones RTV (“Room Temperature Vulcanization”), é necessário juntar os dois componentes para se realizar a reacção. Primeiro, deve ser vazado para o balde o catalisador e só depois o silicone em estado primário, nas proporções indicadas pelo fornecedor.

A mistura pode ser feita manualmente, através do uso de um varão de madeira ou de plástico limpo (aconselhado para pequenas quantidades), ou automaticamente com misturadoras especiais. Usando este ultimo método conseguem-se misturas muito homogéneas e mais rapidamente, no entanto quando exagerada pode provocar aquecimento da mistura e consequentemente acelerar a cura do silicone, introduzindo muitas bolhas de ar.

Para homogeneizar a mistura e eliminar a maior parte das bolhas criadas pela mistura dos dois componentes, é necessário sujeitá-la a uma desgaseificação numa câmara de vácuo. Conforme aumenta o valor do vácuo, o silicone expande de volume, até chegar a um ponto onde todas as bolhas vão colapsar, aproximadamente entre 25 e os 50mbar absolutos. É nessa altura que se pode voltar a repor a pressão normal dentro da câmara de vácuo, concluindo-se assim a preparação da mistura de silicone.

Vazamento para o interior da cavidade

O vazamento do silicone usa a técnica de molde aberto. Assim após a preparação da mistura, realiza-se o vazamento do silicone para o interior da cavidade, que pode ser efectuado com o auxílio do mesmo varão com que se efectua a mistura, de modo a garantir

que o vazamento é realizado lentamente, não introduzindo assim bolhas de ar. A quantidade a colocar na cavidade é a necessária para preencher a zona das alhetas.

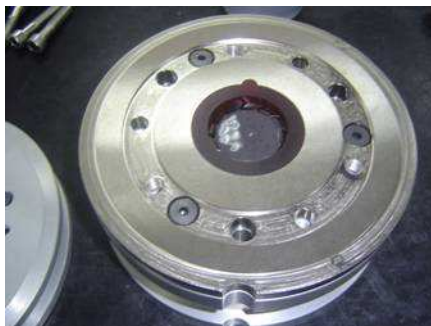


Figura 3-51 – Cavidade com silicone vazado no seu interior.

Desgaseificação do silicone após vazamento na cavidade

Para garantir que toda a cavidade fica totalmente preenchida com silicone (sem bolhas de ar aprisionadas), é necessário efectuar uma ultima desgaseificação com uma duração entre os 10 e os 15 minutos. No caso da geometria da cavidade ser muito complexa este tempo deverá ser alargado para 15 minutos.

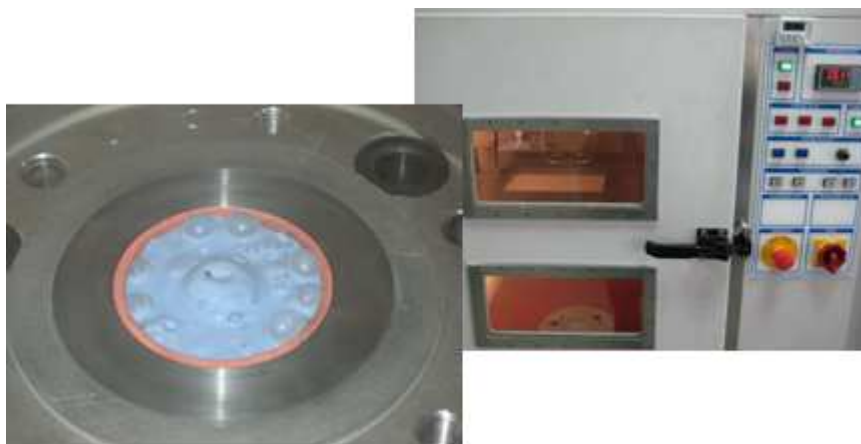


Figura 3-52 – Processo de desgaseificação do silicone após vazamento na cavidade.

Fecho da ferramenta

Com o silicone na cavidade e o esqueleto na base, realiza-se o fecho lento total da ferramenta. Após o fecho e aparafusamento da ferramenta, esta é colocada na mufla com temperatura controlada, de forma a efectuar a respectiva polimerização do silicone.



Figura 3-53 – Exemplo do fecho da ferramenta após vazamento do silicone.

Desmoldagem do modelo de silicone

Após a polimerização do silicone, a temperatura e tempo controlados, é necessário extrair o modelo do interior da cavidade. Num primeiro passo, a base da ferramenta é retirada, de modo a ficar exposto o veio central do esqueleto rígido. De seguida, com o apoio de uma ferramenta de desmoldagem especialmente concebida para o efeito, realiza-se a operação de desmoldagem, tal como se pode verificar pela figura 3-54.

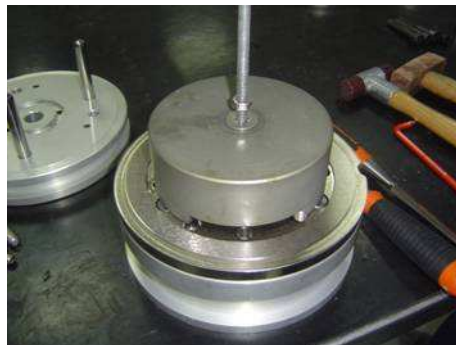


Figura 3-54 – Sistema de desmoldagem dos modelos de silicone (moldes).

Através de aplicação do movimento de rotação na porca localizada no veio roscado, consegue-se transmitir uma força ascendente apenas ao modelo de silicone, de tal forma que lentamente vai sendo separado da cavidade que lhe deu origem.

Após a extracção do modelo de silicone, pode-se iniciar uma inspecção visual rigorosa seguida de um controlo dimensional, para que seja aprovado para uso no processo produtivo.

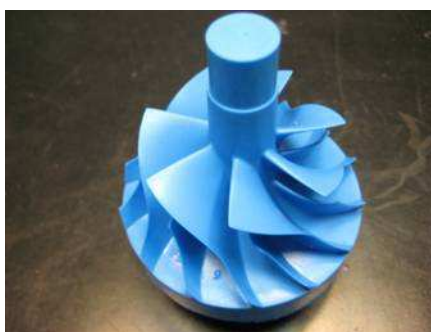


Figura 3-55 – Exemplo de um modelo de silicone (molde).

3.4.2. Processo poliuretano

3.4.2.1. Características gerais

Uma das primeiras ideias que surgiu para obtenção de modelos de silicone, que representem fielmente o Master maquinado em alumínio, foi a de utilizar materiais comuns no processo de fabrico rápido de ferramentas normalmente usado no INEGI, tendo sempre em conta as seguintes preocupações:

- Não destruir o Master maquinado em alumínio, visto que em alguns casos, este é propriedade do cliente e pode ser necessária a sua devolução. Por outro lado, possuir o Master em perfeitas condições permite repetir o processo de conversão sempre que necessário;
- Alterar o mínimo possível o aspecto dimensional, por efeito de contracções e dilatações térmicas;
- Possuir um processo que não promova deformação geométrica;

Foi este processo, que serviu de base para o desenvolvimento das ferramentas de reprodução de silicones, descritas anteriormente.

Após a realização de vários testes, encontrou-se um conjunto de materiais que se consideraram aceitáveis para o uso no processo de conversão que se definiu com os seguintes passos:



Figura 3-56 – Esquema da sequência dos passos do processo poliuretano.

- **Cavidade flexível** (1ª Conversão) – Realização de uma cavidade flexível, a partir do Master maquinado em alumínio. A escolha de um material flexível, deve-se ao facto de ser necessário garantir que se possui uma cavidade com a geometria inversa do Master com contrasídas, sem que ambos sejam danificados durante o processo de desmoldagem.

O material escolhido nesta fase, foi uma resina de poliuretano flexível (polyol) de dois componentes. Entre muitos materiais da mesma gama disponíveis no mercado, escolheu-se aquele que apresentou melhores propriedades a nível de estabilidade dimensional e de características físicas.



Figura 3-57 – Imagens demonstrativas da execução da cavidade de poliuretano.

É de salientar, a dificuldade da desmoldagem entre a cavidade e o Master maquinado em alumínio. Esta tarefa, foi sempre realizada manualmente, tendo em atenção a não deformação do Master (que seria praticamente irrecuperável) e evitar rasgar a superfície da cavidade em poliuretano. Esta tarefa, é tanto mais difícil quanto mais complexa e delgada for a geometria do Master (figura 3-58).



Figura 3-58 – Exemplo da geometria complexa de um Master maquinado em alumínio.

- **Master em silicone** (2ª Conversão) – Após a obtenção de uma cavidade negativa da geometria do Master, seria de pensar em obter directamente os modelos de silicone necessários para a obtenção de moldações de gesso, mas o problema reside no facto da resina de poliuretano ser um material que apresenta alguma instabilidade dimensional ao longo do tempo, sendo apenas possível trabalhar numa cavidade deste material durante dois ou três dias.

Sendo assim, optou-se por introduzir mais duas conversões neste processo, ficando como segunda conversão a produção de um ou três Masters em silicone (também com utilização de esqueleto metálico). A sua obtenção consiste no vazamento de silicone para o interior da cavidade flexível em poliuretano. Pelo facto do silicone ser um material auto desmoldante em relação ao poliuretano, não é necessário o uso de desmoldantes, o que garante que os referidos Masters possuam um acabamento superficial igual ao do Master original.

De todos os silicones testados durante a fase de desenvolvimento, optou-se por um, que a nosso ver, apresentou os melhores resultados dimensionais, e características físicas, como a dureza (cerca de 60 ShoreA) e resistência ao desgaste.

Convém salientar que a duração de cerca de três dias da cavidade de poliuretano permite apenas a obtenção de dois ou três Masters de silicone, respectivamente, sem grandes diferenças dimensionais significativas entre eles. Normalmente, a partir do terceiro dia, a

deformação existente na cavidade de poliuretano, já não permite obter Masters de silicone aceitáveis dimensionalmente. Conforme se pode ver na figura 3-59, que representa um exemplo da evolução dimensional da cavidade de poliuretano ao longo do tempo.

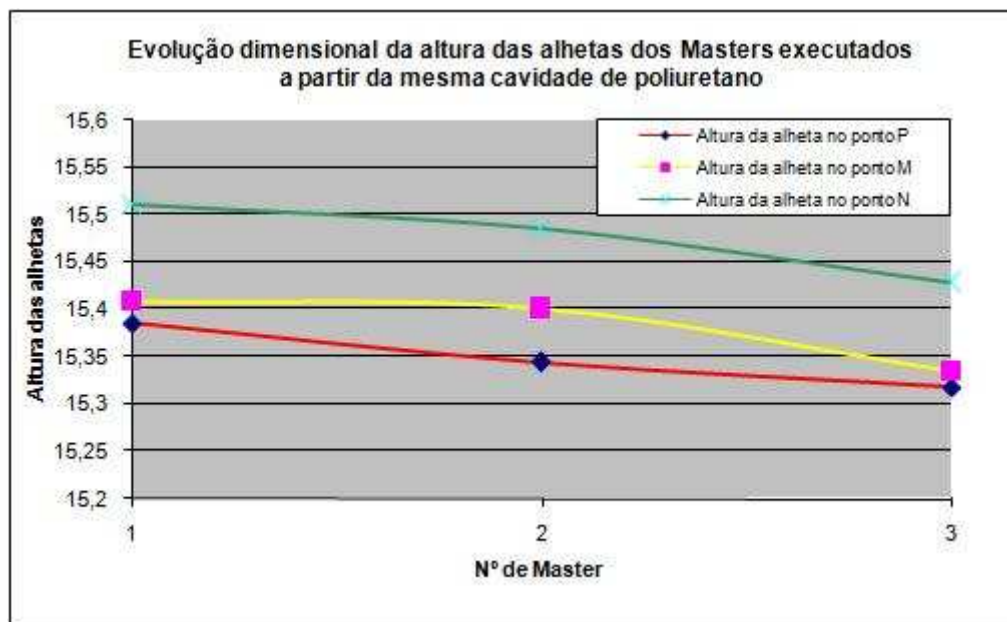


Figura 3-59 – Exemplo demonstrativo da evolução dimensional dos Masters oriundos da mesma cavidade de poliuretano (medição da altura das alhetas em três pontos diferentes).

Deste modo, temos uma ou mais cópias dimensionalmente próximas do Master maquinado em alumínio, como se poderá confirmar no capítulo 3.5, referente aos estudos dimensionais;

Para garantir o total preenchimento da cavidade de poliuretano ou para evitar o aprisionamento de bolhas no seu interior, é importante referir, a necessidade da aplicação de cerca de 10 a 15 minutos de vácuo ao silicone ainda no estado líquido, logo após o seu vazamento.

Para geometrias com espessura de alhetas mais finas, onde o seu preenchimento com silicone é muito difícil, recomenda-se a realização de pelo menos 4 vezes a operação de aumento repentino de pressão de vácuo (até, pelo menos aos 800mbar), seguido de uma nova diminuição (até cerca de 5 a 20 mbar). Esta operação cíclica, ajuda a libertar bolhas de ar aprisionadas no interior da cavidade, promovendo-se o enchimento completo da cavidade. Sempre que o vácuo é aplicado, cria-se uma diferença de pressão entre o ambiente na câmara e o ar das bolhas aprisionadas, que faz com que as bolhas aumentem de volume, este aumento

de pressão repentino faz com que rebentem ou então se libertem da zona onde se encontram alojadas.



Figura 3-60 – Exemplo de um Master de silicone retirado da respectiva cavidade de poliuretano.

Com vista à aprovação do Master de silicone para ser usado continuamente no processo de conversão, é necessário realizar uma inspecção visual, com uma lupa iluminada, bem como realizar um controlo dimensional, com o objectivo de determinar se existe algum defeito superficial ou desvios dimensionais consideráveis, que impossibilitem a seguimento do processo de conversão.

- **Cavidade rígida** (3ª Conversão) – Como é necessário obter centenas de modelos de silicone iguais entre si ao longo do tempo de produção é fundamental possuir uma cavidade que os origine, que tenha como principais propriedades, a estabilidade dimensional e a resistência ao desgaste.

Após a pesquisa e testes de vários produtos comerciais, encontrou-se um que se achou ser o melhor para a função desejada. É um material relativamente fácil de processar, com um valor de contracção baixo, com uma dureza e resistência ao desgaste que permite o seu uso ao longo do tempo e que é indicado para trabalho com silicones, onde é necessário reproduzir na perfeição detalhes de geometrias complexas e de pequenas dimensões. O material que mostrou melhor desempenhar estas exigências, foi uma resina epoxídica de dois componentes com cargas metálicas.

A obtenção da cavidade rígida consiste no vazamento da resina no estado líquido sobre o Master de silicone. Como já foi referido anteriormente, tanto a sua preparação, como o seu vazamento para o interior da ferramenta e sua respectiva cura, são operações que têm de ser

muito bem realizadas e controladas, visto que, os defeitos superficiais são fenómenos muito frequentes com este tipo de materiais.

Um dos fenómenos que ocorreu com muita frequência nas cavidades da peça, foi o rechupe superficial na zona crítica da mesma. Este defeito detecta-se, quando se verifica um abatimento ou deslocamento da superfície da peça, em relação ao perfil original.

Ao detectar-se este tipo de defeito, pensou-se nas seguintes hipóteses para justificar a sua ocorrência:

- Muita massividade de resina, que origina mais contracção, na referida zona da peça;
- Gradientes térmicos dentro da ferramenta ou mesmo aquecimento excessivo da resina durante a sua cura;
- Sedimentação das cargas da resina no balde de origem, que origina diferença nas proporções finais da mistura e que por sua vez pode causar defeitos.

Tendo em conta as dúvidas anteriormente expostas, fizeram-se os seguintes procedimentos:

- Testou-se espessuras de resina, entre os 7 e os 10mm, que acompanhavam aproximadamente o perfil exterior da peça, de modo a diminuir o impacto da massividade;

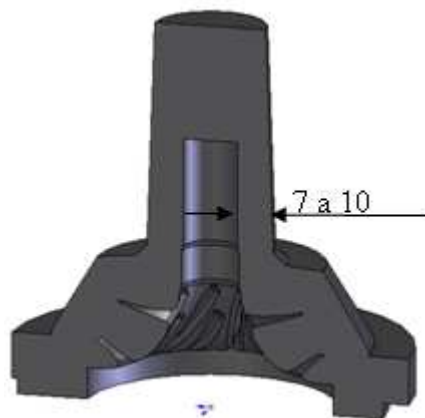


Figura 3-61 – Exemplificação da espessura controlada da parede de uma cavidade em resina epoxídica.

- Monitorizou-se a temperatura durante a cura da resina, através da colocação de um termopar na ferramenta de reprodução, na tentativa de verificar se existiam picos de temperatura que por efeitos de dilatação térmica e contracção, pudessem promover o referido defeito. Deste modo, obteve-se o perfil de temperaturas indicado na seguinte figura:

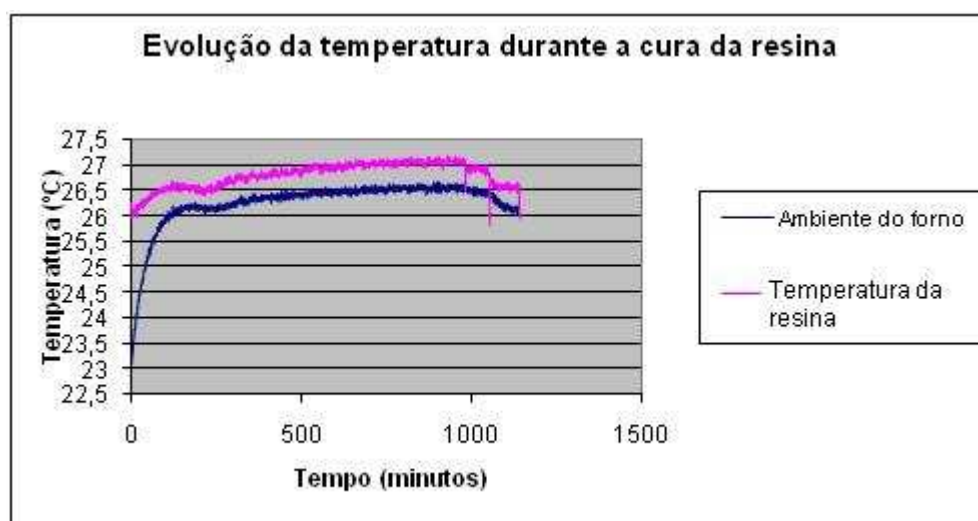


Figura 3-62 – Evolução da temperatura durante a cura da resina.

Como se pode verificar, não existem picos de temperatura durante a cura da resina e a temperatura máxima verificada não chega aos 28°C, o que põe de parte a hipótese de existir excesso ou mudanças repentinas de temperatura.

- Melhorou-se o método de mistura da resina epoxídica, introduzindo um sistema mecânico com hélices de mistura apropriadas para o efeito. Antes de efectuar a própria mistura, passou-se a envolver a resina no balde, de modo a evitar que haja sedimentação das cargas no fundo, tornando a mistura mais homogénea.

- Visto que é inevitável contornar o efeito da contracção após a cura da resina, pensou-se na tentativa de evitar que esta se manifeste como defeitos de rechupe ou abatimento superficial, na zona crítica da peça. Para isso, criou-se uma zona de sacrifício na cavidade, fora da zona crítica que evitou o aparecimento do defeito.

Fizeram-se alguns testes, colocando uma anilha de acetato na base do Master de silicone, antes do vazamento da resina. Tendo em conta a flexibilidade do acetato, no local onde este se encontra praticamente não existe resistência à tendência de deformação da resina, o que faz com que esta se possa deformar livremente, evitando que o efeito da contracção se manifeste numa zona crítica da cavidade.

Em resumo, todas estas tentativas de eliminação do defeito, resultaram apenas na sua minimização e não a sua total resolução. Verificou-se que com esta conversão o processo se

tornou mais robusto, mas mesmo assim continuou a ser uma das conversões mais sensíveis do processo, já que continuou a ser frequente o aparecimento deste tipo de defeito.



Figura 3-63 – Exemplo de uma cavidade de resina epoxídica.

- **Modelo de Silicone** (4ª conversão) – Com a cavidade rígida em resina epoxídica pronta, vazou-se o silicone para o seu interior, de forma a obter todos os modelos de silicone necessários para o processo de produção de moldações em gesso.

Devido ao facto da resina poder perder propriedades quando submetida a temperaturas superiores a 25°C, os modelos de silicone só devem ser curados a 25°C. Isto significa que a nível produtivo, como a essa temperatura é necessário um tempo de cura de no mínimo 12 horas (este tempo varia mediante o tipo de silicone usado), só é possível obter na melhor das hipóteses, dois modelos por dia.



Figura 3-64 – Modelo de silicone (molde).

3.4.2.2. Análise ao processo poliuretano

Após a realização de largas dezenas de conversões, usando o processo poliuretano, verificou-se e concluiu-se o seguinte:

- O poliuretano, é por si só um material muito instável dimensionalmente ao longo do tempo. Este assunto será abordado com mais detalhe no capítulo respeitante aos estudos dimensionais;
- Deu-se quase como certo, que o poliuretano mesmo nos primeiros dias após a sua produção, possui uma deformação geométrica, que praticamente compromete o resultado final do modelo de silicone, como se pode comprovar nos estudos dimensionais apresentados posteriormente no capítulo 3.5.2.1;
- A realização da cavidade rígida em resina epoxídica, sobre o Master de silicone, revelou-se bastante problemática, tanto no aspecto de defeitos superficiais (rechupes e inibições), como a nível de aspectos dimensionais;
- O facto de se vaziar a resina no estado líquido sobre o Master de silicone, devido às diferenças de densidade entre o silicone e a resina, principalmente nas alhetas (onde a espessura é mais fina e mais susceptível a deformação) origina deformações críticas que comprometem a sanidade final do impulsor em alumínio;
- Para minimizar as perdas dimensionais, em todas as fases do processo, usou-se temperaturas de cura próximas dos 25°C;
- Os procedimentos descritos anteriormente a nível de aplicação de vácuo para desgaseificação e vazamentos dos materiais, revelaram ter um papel importante, no sentido de evitar maus enchimentos, diminuir o aparecimento de bolhas e melhorar a mistura dos componentes.

3.4.3. Processo silicone

3.4.3.1. Características gerais

O desenvolvimento de um novo processo de conversão, assente na mesma filosofia de trabalho e nas mesmas ferramentas desenvolvidas até então, surgiu para evitar os problemas inerentes ao processo poliuretano.

A aplicação deste novo processo, teve como finalidade, atingir os seguintes objectivos:

- Melhorar as características dimensionais dos modelos de silicone;
- Eliminar os defeitos superficiais, principalmente na cavidade rígida;
- Eliminar materiais instáveis dimensionalmente com o tempo, para que não exista um limite temporal demasiado curto para a sua utilização;
- Eliminar a deformação provocada por diferenças de densidade entre materiais.

Assente na experiência já existente no INEGI de realizar conversões a partir de modelos de estereolitografia, pensou-se em aproveitar esse conhecimento e aplicá-lo na reprodução de modelos de silicone, já que os materiais usados neste processo são mais fáceis de processar e permitem obter cópias fiéis de peças, mesmo quando estas possuem geometrias bastante complexas e com detalhes de espessuras finas.

Basicamente, o novo processo consiste na substituição da borracha de poliuretano, usada na 1ª conversão (cavidade flexível), por silicone e substituir o silicone, usado na 2ª conversão (Master de silicone), por resina epoxídica. Esta nova sequência pode ser observada na figura 3-65.

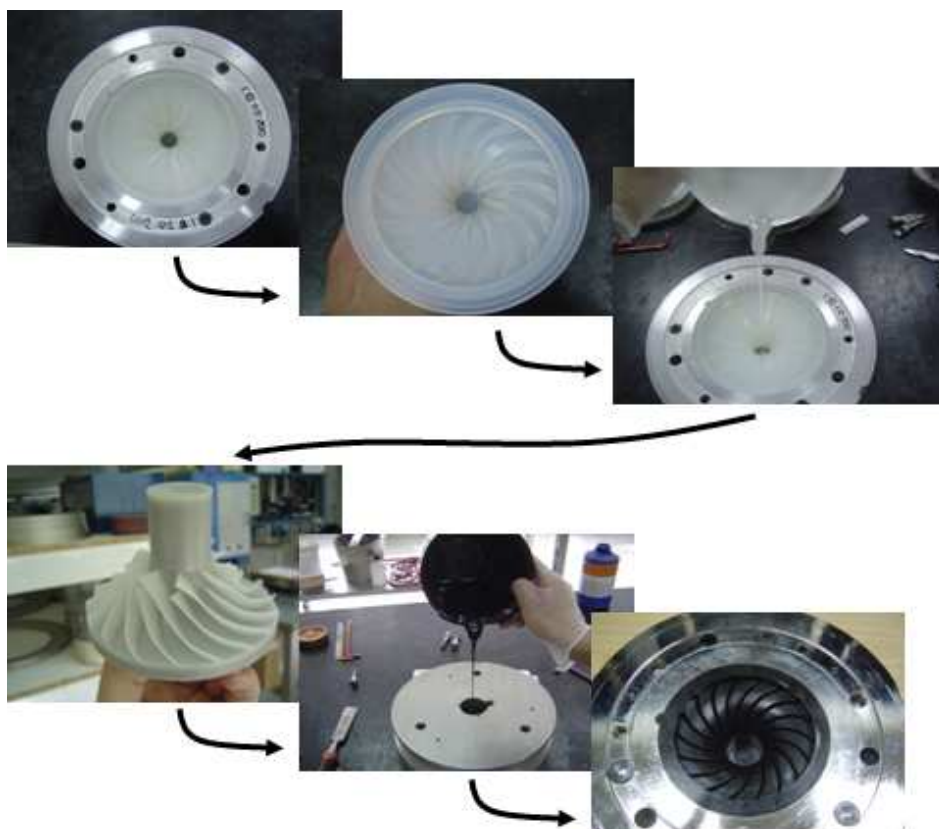


Figura 3-65 – Esquema da sequência de trabalho do processo silicone.

- **1ª Conversão** (Cavidade de silicone) – Ao contrário do processo poliuretano, o processo silicone substitui a borracha de poliuretano por um silicone auto lubrificante, correntemente usado no fabrico de moldes obtidos a partir de modelos de prototipagem rápida.

Além de ser um material fácil de usar, o silicone tem um bom comportamento dimensional e características físicas como dureza, resistência à tracção, fluidez, entre outros, que permite obter uma cavidade praticamente sem deformação geométrica. A utilização deste material necessita apenas dos cuidados básicos característicos desta gama de produtos, salientando-se apenas o facto de se ter utilizado uma temperatura de cura de aproximadamente 25°C, na tentativa de não afectar negativamente a geometria da cavidade por efeito de grandes contracções e dilatações térmicas.

Convém realçar, que tal como no processo poliuretano, é necessário um cuidado especial na desmoldagem manual entre a cavidade de silicone e o Master maquinado, para evitar os mesmos tipos de problemas.

- **2ª Conversão** (Master de resina) – Talvez se possa dizer, que a grande diferença, entre o processo silicone e o processo poliuretano, se encontra na 2ª conversão. Na verdade, e como já foi dito, ambos os processos começam com cavidades flexíveis, mesmo sendo tipos de materiais diferentes, mas já o seguinte passo não é assim.

No processo silicone, a 2ª conversão consiste no fabrico de um Master em resina rígida, que também este é perfeitamente desmoldável da cavidade flexível em silicone.

O material escolhido foi uma resina epoxídica, sendo também este um material comum na indústria de cópias e execução de moldes rápidos, com qualidades dimensionais minimamente aceitáveis (como se poderá ver no capítulo 3.5.2) e muito prático de trabalhar.

Um dos grandes problemas, encontra-se mais uma vez na desmoldagem. A separação entre a cavidade flexível e o Master em resina, exige um cuidado extremo. Sendo uma tarefa manual, e normalmente realizada por duas pessoas, é muito fácil existir uma descoordenação na força aplicada durante a desmoldação, que faz partir irremediavelmente as alhetas do impulsor. A fragilidade da resina, é sem duvida o ponto fraco desta conversão, principalmente, em peças com geometrias de alhetas mais finas, situação muito frequente.

Face a este problema, pensou-se aumentar a resistência da resina, sem afectar a funcionalidade da mesma. Para isso, testou-se a introdução de cargas de fibra de

“Woolastonite” que foram inicialmente misturada com a resina numa proporção de 1:1. Contudo, após diversas experiências com diferentes proporções, verificou-se, que a quantidade óptima seria 1:0,8. Esta mistura contribuiu para uma diminuição significativa da fragilidade da resina, tornando mais eficiente o processo de desmoldagem.



Figura 3-66 – Exemplo de um Master de resina.

Dimensionalmente, o Master em resina mostrou-se sempre bastante estável, apresentando até a esta fase do processo, um desvio quase mínimo em relação ao Master em alumínio maquinado, como se poderá confirmar posteriormente, no capítulo 3.5.2.

- **Cavidade rígida** (3ª Conversão) – Tal como no processo poliuretano, existe a necessidade de produzir uma cavidade rígida, estável dimensionalmente e resistente ao desgaste. Para tal achou-se por bem aproveitar esse conhecimento, usando o mesmo material, através dos mesmos métodos de preparação e vazamento. Contudo, existem diferenças processuais que exigiram a obtenção de soluções alternativas:

- No processo poliuretano não se verificou qualquer tipo de dificuldades relativas à desmoldagem uma vez que o Master era flexível e a cavidade rígida. No entanto, no processo silicone, quer o Master quer a cavidade são rígidas. Assim para a obtenção da cavidade em perfeitas condições, face às contrasáidas que a geometria da peça possui, tornou-se necessária a destruição do Master.
- O facto da resina do Master e a resina da cavidade não serem materiais autodesmoldáveis exigiu que fosse aplicado um produto que realizasse essa função. Caso não seja aplicado este tipo de produto, pode ocorrer adesão entre as resinas

sem que haja qualquer tipo de recuperação de ambas as partes. A escolha do desmoldante foi baseada noutros trabalhos executados no INEGI, onde ocorria o mesmo tipo de necessidade.

Convém salientar a importância da aplicação do desmoldante na superfície do Master de resina. A ocorrência de defeitos superficiais devidos a excessos deste produto na superfície da peça é muito comum. Como procedimento, estabeleceu-se que o Master teria de estar totalmente mergulhado no desmoldante durante 10 minutos, de seguida retiravam-se os excessos com ar comprimido e por fim, usando um papel absorvente, efectuava-se uma limpeza de toda a superfície da peça.

Neste procedimento havia dois riscos sempre presentes. Caso se limpasse demais o agente desmoldante, poderia haver adesão entre as resinas, caso a limpeza fosse incorrecta, a probabilidade de aparecimento de rechupes (ou abatimentos) superficiais era alta. Apesar de várias tentativas, nunca se conseguiu implementar um método de limpeza seguro e uniforme, que garantisse com eficácia a função do desmoldante e que ao mesmo tempo não contribuísse para o aparecimento de defeitos na cavidade.

- **Modelo de silicone** (4ª conversão) – Esta fase do processo silicone cumpre exactamente os mesmos procedimentos e utiliza os mesmos materiais que o processo poliuretano.

3.4.3.2. Análise ao processo silicone

Após a realização de algumas dezenas de conversões, verificou-se que:

- Em comparação com a cavidade de poliuretano do processo poliuretano, a cavidade de silicone, além de ser mais fácil de trabalhar, demonstrou ser um material, que quando curado a baixas temperaturas reproduz fielmente a peça original. Mesmo a nível de duração, a cavidade em silicone permite ser usada no mínimo 4 a 5 vezes, praticamente sem se verificar qualquer tipo de modificação geométrica e dimensional. Convém salientar, que só se consegue ter uma ideia se a cavidade tem variação ou não dimensional ao longo do tempo, através da medição dos Masters dela resultantes, já que é impossível controlar dimensionalmente a cavidade flexível. Para tal e como exemplo, podemos

observar os gráficos a seguir representados que demonstram a evolução dimensional de 8 Masters provenientes da mesma cavidade de silicone, de uma peça escolhida aleatoriamente.



Figura 3-67 – Evolução dimensional dos Masters realizados a partir da mesma cavidade de silicone.

Convém salientar que casos como o resultado dimensional do Master nº 7, podem ocorrer facilmente. Este facto pode ser devido a oscilações de temperatura durante a cura do material, e muito frequentemente devido ao mau manuseamento que pode provocar deformação geométrica. Mesmo assim estamos a falar de um desvio de 0,1mm em relação ao valor nominal, o que se pode considerar aceitável.

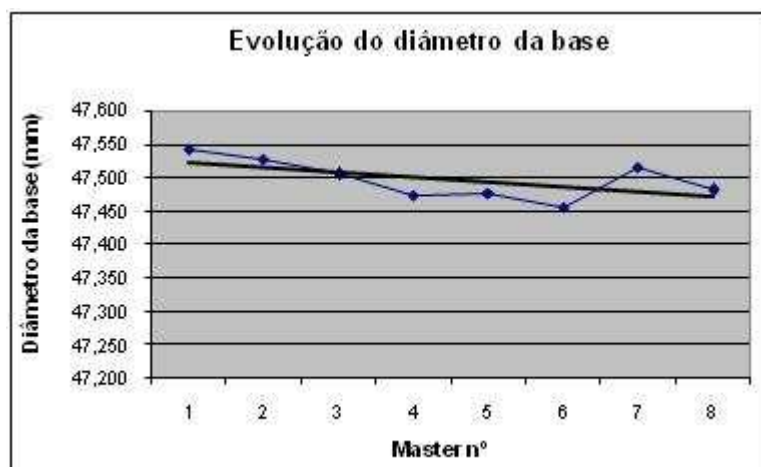


Figura 3-68 – Evolução dimensional do diâmetro dos Masters provenientes da mesma cavidade de silicone.

- Independentemente da geometria da peça, este tipo de evolução costuma ser muito comum, e reflecte que até aos cinco primeiros Masters realizados, a variação dimensional é muito baixa, mas que a partir do sexto Master, começa-se a verificar uma dispersão nas suas dimensões, que pode comprometer o resultado final desejado.
- Em relação ao Master de resina, é de referir a sua fragilidade, uma vez que quando mal manuseado pode ser danificado de forma irreversível. Estamos obviamente a falar de um ponto negativo, maior ainda se compararmos o Master de resina com o Master de silicone do processo poliuretano.
- A aplicação de desmoldante no Master de resina para a execução da cavidade rígida é, sem dúvida nenhuma, o ponto mais difícil e sensível de contornar. As tentativas de implementação de vários métodos para aplicação deste produto, nunca foram bem sucedidas, sendo sempre um problema associado à experiência do operador e a alguma aleatoriedade.

3.4.4. Processo cobre

3.4.4.1. Características gerais

Como resultado das experiências anteriores conclui-se, que por melhor que seja o processo de conversão para obtenção de modelos de silicone, que não destruam o Master e utilizem materiais como as resinas, poliuretanos e silicones, nunca se conseguiria um resultado final rigoroso (principalmente a nível dimensional) e que garanta a isenção de defeitos, sobretudo superficiais.

Como alternativa, encarou-se a hipótese, da execução de uma cavidade de cobre. Neste processo, apenas existe um passo de conversão, que por sua vez é realizado através de uma tecnologia que não tem contracções e se bem executada, não gera deformações. Assim têm-se quase como certo que a cavidade rígida produzida representa com exactidão o negativo da geometria do Master que lhe deu origem.



Figura 3-69 – Exemplo de uma cavidade de cobre.

Este processo deve contemplar os seguintes passos:

- Preparação do Master de alumínio maquinado;
- Electrodeposição de cobre sobre o Master de alumínio;
- Adaptação da cavidade às ferramentas de reprodução de modelos de silicone;
- Remoção ou dissolução do Master de alumínio;
- Limpeza e abrilhantamento da superfície da cavidade de cobre;

Após algum estudo e apoio de alguns especialistas internacionais nestas tecnologias, tomou-se consciência dos seguintes factos:

- A execução da cavidade de cobre implicava a destruição do Master;
- Não poderiam existir danos durante a preparação, ou mesmo utilização da cavidade de cobre. As reparações a uma cavidade de cobre são praticamente impossíveis e implicam um custo extremamente elevado para a empresa, principalmente se a peça em questão se encontrar em produção;
- O processo de deposição de cobre é de extrema complexidade;
- A remoção do alumínio implicava o uso de produtos de difícil utilização;

Em contrapartida, sabia-se que o processo da cavidade de cobre apresentava as seguintes vantagens:

- Este era o melhor processo de conversão em termos de manutenção das dimensões, permitindo obter modelos de silicone com uma geometria muito semelhante à do Master que lhe deu origem;
- Pelo facto da cavidade ser em cobre (este material tem dilatações térmicas muito baixas), sabia-se que poderíamos aumentar a temperatura de cura do silicone, sem prejudicarmos significativamente a componente dimensional, aumentando assim a capacidade de produção de modelos de silicone;
- A ferramenta para adaptar a cavidade de cobre seria mais simples que as ferramentas usadas para os processos de conversão poliuretano ou silicone;
- A durabilidade da cavidade era praticamente eterna;

3.4.4.2. Deposição de cobre

Quando se decidiu iniciar o processo da cavidade de cobre, optou-se por tentar criar os meios e obter internamente o conhecimento para a realização das deposições de cobre sobre um Master de alumínio, através de parcerias com empresas que detêm algum conhecimento na área, apesar da aplicação da tecnologia ser muito diferente.

Os primeiros ensaios, foram realizados em peças fundidas, para não se destruírem Masters em alumínio o que como já foi referido, são de elevado custo. Estes ensaios foram de extrema importância, pois permitiram perceber os problemas inerentes à deposição de cobre em peças com geometria complexa.

Um dos problemas de maior relevância encontrados neste processo foi o facto de o revestimento de cobre não ser efectuado de um modo homogéneo. Verificou-se que as zonas de geometria mais complexa, nomeadamente a zona de fronteira entre as pás e a zona do corpo do impulsor, quase não se encontravam revestidas, tal como se pode ver na figura seguinte:

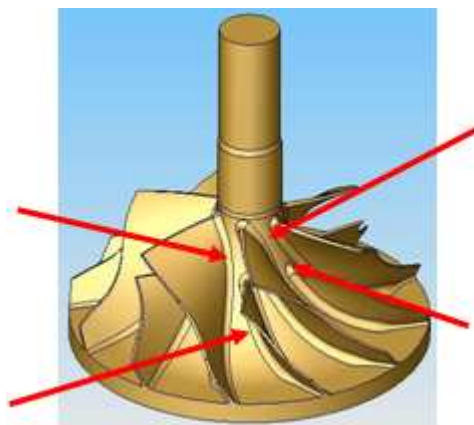


Figura 3-70 – Indicação das zonas de maior dificuldade de deposição de cobre.

O facto referido anteriormente, significa que na melhor das hipóteses, nas zonas de difícil acesso, apenas era possível obter uma camada de cobre de algumas décimas de milímetro de espessura, o que criava uma zona frágil, susceptível à deformação da cavidade. Tendo em conta esta dificuldade, aumentou-se o tempo de deposição de cobre, na expectativa de aumentar a espessura em toda a peça, mas nem assim se conseguiu solucionar o problema, pois detectou-se que o cobre tem tendência a depositar-se nos sítios mais acessíveis, o que significa que para a geometria de peça que se pretende revestir, a espessura da parte da periferia aumentava muito mais do que no interior, ou seja, como a intensidade de corrente na periferia é maior o fluxo de iões direccionam-se para lá. Este efeito agrava-se com o aumento do tempo de revestimento, já que chega a um ponto onde a camada de cobre na periferia é tão grande que praticamente não existe acesso do fluxo de iões para as zonas de pior acesso.

Sem se conseguir ultrapassar este problema seria praticamente inviável a utilização deste processo.

Foi então que surgiu a ideia de introduzir eléctrodos em titânio entre as pás do impulsor permitindo assim, uma distribuição mais homogénea do cobre pela superfície do impulsor, mesmo nas zonas de difícil acesso.

Para a introdução desses eléctrodos, foi necessário criar uma estrutura que os suportasse e os posicionasse em relação ao impulsor, surgindo assim a peça apresentada na figura seguinte.

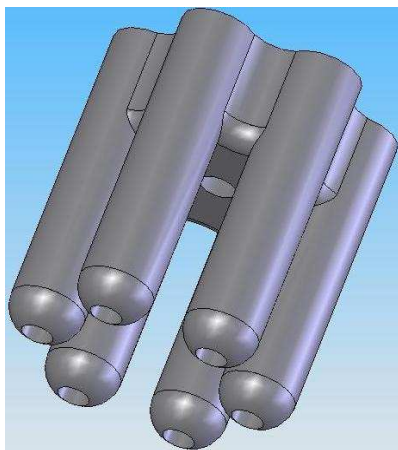


Figura 3-71 – Desenho em CAD 3D da estrutura dos eléctrodos de titânio.

Após a modelação desta peça e tendo em consideração que ela não necessita de muita resistência e que teria de ser num material que não permitisse o depósito electrolítico na sua superfície, decidiu-se realizar este componente em estereolitografia (o material é uma resina epoxídica).

Tal como se pode verificar, existem seis tubos na parte exterior da referida estrutura que vão alojar os eléctrodos de titânio, permitindo assim a sua fixação. No topo da peça a revestir vai ser realizado um furo cego roscado, onde vai ser fixado um varão, também ele roscado, que por sua vez vai servir de guiamento e suporte para a estrutura agregada aos eléctrodos. Por fim, todo este conjunto é apertado a partir de uma porca, na posição pretendida e os eléctrodos de titânio ligados a partir das suas extremidades superiores em paralelo com cabos de cobre flexível.

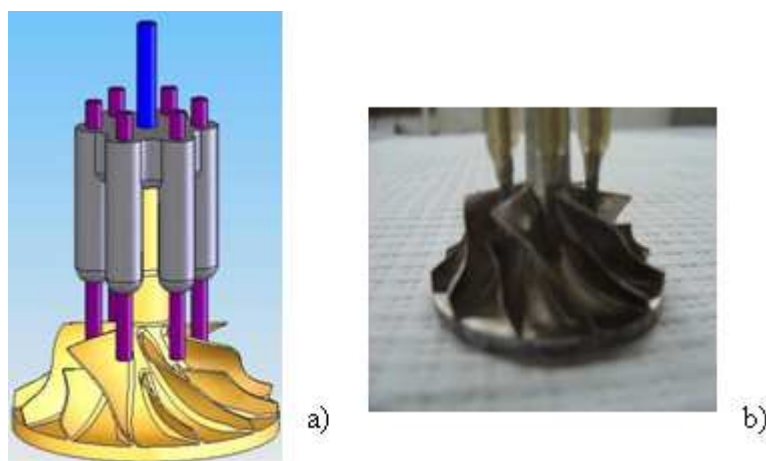


Figura 3-72 – a) imagem da montagem em desenho de CAD 3D. b) imagem real da montagem dos eléctrodos na peça fundida.

Na verdade, esta solução não teve o êxito pretendido. Os problemas persistiram e com o tempo deu para perceber que esta tecnologia era muito complexa e iria necessitar de muito esforço, tanto humano como financeiro, para o seu desenvolvimento.



Figura 3-73 – Resultado final da deposição de cobre.

De forma a contornar esta situação, uma vez que não se pretendia abandonar a ideia de utilizar cavidades de cobre, optou-se por efectuar uma pesquisa de mercado de empresas especialistas em electrodeposições de cobre, com o objectivo de as subcontratar. Assim, seria possível disponibilizar esforços humanos e financeiros no que realmente necessita de ser desenvolvido e não naquilo que já se encontra implementado no mercado.

Após a realização de alguns contactos e testes com empresas supostamente detentoras da tecnologia, optou-se pela que detém melhores referências e que mais facilmente demonstrou interesse em satisfazer as nossas necessidades. Os problemas que seriam de esperar, tendo em conta as experiências efectuadas, foram largamente ultrapassados, pela tecnologia de electrodeposição que a empresa em questão domina.

Iniciou-se, então, uma nova etapa no que diz respeito à utilização de cavidades de cobre. Após as primeiras trocas de informação com a empresa, foi necessário afinar alguns pormenores, tais como:

- Preparação do Master – Foi necessário abrir um furo passante no centro do Master de uma extremidade à outra (figura 3-74), para garantir que após a electrodeposição a remoção do alumínio fosse mais eficaz (como vai ser explicado mais à frente). Foi, também, necessário efectuar um furo roscado no topo do tarugo do Master para colocação de um tampão em material polimérico (figura 3-74). Deste modo, evita-se a deposição do cobre no topo do tarugo e no interior do furo central, para que após a

electrodeposição, não seja necessário efectuar maquinagens, eliminando o risco de danificar tanto a parte de alumínio como a de cobre.



Figura 3-74 – Imagem ilustrativa da alteração do Master para se proceder à electrodeposição de cobre.

- Para que a cavidade possua alguma resistência mecânica e para que possa ser trabalhada de modo a ser introduzida na ferramenta de reprodução, foi necessário definir a espessura da electrodeposição. Para Masters com dimensão reduzida, é suficiente uma espessura entre 3 a 4mm, para Masters com dimensão superior, é mais aconselhável a realização de uma espessura de pelo menos 6mm;
- Após a realização da deposição de cobre e antes da remoção do Alumínio, foi necessário efectuar maquinagens laterais na cavidade, de modo a permitir que possa ser introduzida na ferramenta de reprodução, garantindo a concentricidade, fixação e posicionamento entre a cavidade e a ferramenta, conforme se pode observar nas figuras 3-75 e 3-76.

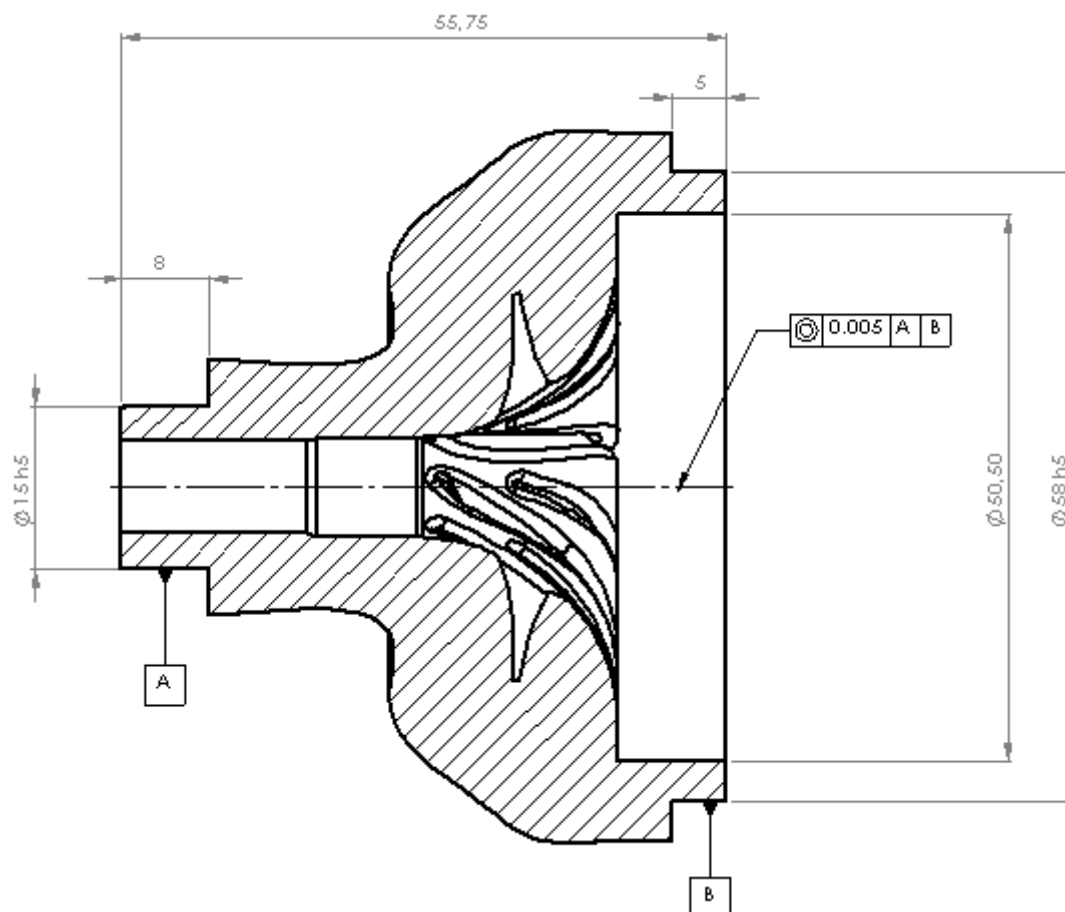


Figura 3-75 – Exemplo de um desenho 2D das alterações a executar à cavidade de cobre.



Figura 3-76 – Exemplo da alteração geométrica realizada ao cobre depositado.

3.4.4.3. Remoção do alumínio

Após a realização da electrodeposição de cobre, era necessário efectuar a remoção do alumínio, sem danificar a cavidade. A única via exequível para realizar esta tarefa, é a via química, onde existem algumas soluções possíveis. Entre pesquisas realizadas e sugestões de fornecedores foram encontradas três soluções diferentes para a dissolução:

- Uma Solução de 10% de Hidróxido de potássio com uma pureza de 85% (KOH – Potássia Cáustica) em água;
- Uma solução de 20% de Soda Cáustica (NaOH) em água;
- Uma solução pura de Ácido Clorídrico Pró Analise com uma concentração de 37%;

A nível químico, a solução de 10% de hidróxido de potássio e a solução de 20% de soda cáustica, funcionam de forma muito semelhante, tornando-se irrelevante o uso de uma ou outra. Contudo, apenas por ser um material de maior facilidade de aquisição, optou-se pela soda cáustica.

Remoção do alumínio a partir de uma solução de Soda Cáustica

Quando colocamos alumínio numa solução de soda cáustica, dá-se uma reacção que faz com que os iões hidróxido se liguem aos iões alumínio, formando-se hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), daí a dissolução do alumínio. Já com o cobre não se verifica qualquer tipo de reacção com o hidróxido de sódio, o que faz com que a cavidade se mantenha inalterável.

Após alguns testes executados, definiu-se como procedimento para a dissolução do alumínio com soda cáustica, os seguintes passos:

- Devido ao facto da soda cáustica ser um produto que exige um cuidado especial no seu manuseamento, é obrigatório o uso de óculos de protecção, máscara de filtro de gases tóxicos e luvas de borracha;
- A remoção do alumínio tem de ser realizada numa hote com boa exaustão;

- O manuseamento da cavidade tem de ser feita com uma tenaz em aço inoxidável de haste comprida;
- Sempre que se retira a cavidade do banho deve-se passar por água corrente durante alguns minutos;
- A colocação da cavidade no recipiente com a base virada para baixo, ajuda a renovação da solução nas zonas de mais difícil acesso;
- A solução pode ser renovada apenas uma vez por dia;
- A acção de dissolução é acelerada quando realizada numa tina de ultra-sons, apesar de este procedimento promover o aumento da temperatura. Quando a temperatura fica próximo dos 100°C, a tina deve ser imediatamente desligada.

Os primeiros testes referentes à remoção de alumínio foram realizados nas cavidades com espessura de cobre muito finas. Estas experiências foram fundamentais para perceber, que com o aumento da temperatura, normalmente originada pela própria reacção (reacção exotérmica), se verificava um aumento da deformação nessas mesmas zonas. Foi a partir daqui que se começou a ter uma atenção especial às temperaturas presentes na remoção do alumínio e se decidiu que as cavidades teriam de possuir espessuras de cobre maiores em toda a parte da peça e de forma homogénea. A nível de temperatura achou-se que, como regra de segurança, esta não deveria exceder os 100°C durante a dissolução.

A nível de resultado final, pode-se afirmar que esta solução resulta muito bem. Talvez a única desvantagem presente, se tivermos em consideração que o mercado actual exige tempos de resposta de introdução de peças muito curtos, onde cada dia perdido, significa custos avultados para a empresa, é o facto do processo ser um pouco lento, mesmo usando concentrações de 20% de soda cáustica em água com auxílio de ultra-sons.

Remoção do alumínio a partir de uma solução de ácido clorídrico

Para que o ácido só reaja com o alumínio, e não com o cobre, é muito importante que a pureza e concentração do mesmo seja elevada (daí os 37%), já que o aparecimento de impurezas na solução pode promover reacções independentes, que por sua vez podem atacar a

superfície do cobre, como é o caso do ácido clorídrico com concentrações na ordem dos 33% a 34%.

É muito importante que a remoção com este tipo de soluções, seja realizada numa hote com um sistema de exaustão muito forte. Mesmo assim, os gases libertados pelo ácido envolvem-se no meio ambiente circundante, de tal forma que corroem um leque alargado de materiais, principalmente os metálicos.

Tratando-se de um produto altamente tóxico, o uso de equipamento de protecção é um tema que exige um cuidado especial, principalmente devido aos salpicos e gases libertados, sendo por isso necessário o uso de máscaras com filtros especiais, óculos de protecção, avental, luvas de borracha compridas e botas de protecção.

Após alguns testes, afinou-se o processo segundo o seguinte procedimento:

- Deve-se colocar a cavidade num copo de polipropileno alto. Ter sempre o cuidado de manter a cavidade com a base virada para baixo, para que haja renovação do banho no interior da cavidade. É conveniente que a cavidade fique assente em cima de duas barras de plástico, para que a lama criada com a remoção se deposite no fundo do recipiente e não fique em contacto com a cavidade;
- Colocar o copo dentro de outro balde mais largo com água. Deste modo é possível anular o aumento da temperatura originada pela reacção, diminuindo a probabilidade de deformação por geração de elevadas temperaturas;
- O uso de ultra-sons nesta solução, não se mostrou muito vantajoso em termos de aumento da taxa de dissolução do alumínio. Aliás, devido aos efeitos destrutivos do ácido clorídrico, teríamos de adaptar a tina de ultra-sons a este tipo de material, caso contrário ficaria rapidamente inutilizada;
- Introduzir o ácido clorídrico no interior do copo até que o nível de ácido ultrapasse o topo da peça no mínimo 5 centímetros. Como o início da reacção é muito violento, este excesso de ácido, ajuda a que não haja projecção de ácido no sentido vertical (evita salpicos);



Figura 3-77 – Ilustração da reacção de dissolução do alumínio.

- Preparar num balde de plástico, uma solução saturada com cerca de 4 litros de água e 0,25 kg de bicarbonato de sódio. Esta solução básica é necessária para anular o efeito do ácido, sempre que se retira a cavidade do recipiente. Esta solução alcalina deve estar sempre disponível ao lado do balde onde decorre a remoção de alumínio;



Figura 3-78 –Neutralização do ácido.

- É aconselhável que a cavidade não esteja muito tempo exposta ao ar, para evitar a oxidação superficial do cobre, principalmente quando se retira da solução de ácido;
- Logo após a anulação do ácido na solução básica (água com bicarbonato de sódio), deve-se passar a cavidade em água corrente durante alguns minutos, seguido de uma boa secagem;



Figura 3-79 – Limpeza da cavidade de cobre com água corrente.

- Deve-se verificar constantemente a temperatura do banho. Normalmente a temperatura não excede os 90°C, mas caso aconteça, deve-se ter em atenção se é necessário acrescentar mais ácido no copo ou então substituir a solução por uma nova;
- O manuseamento da cavidade deve ser feito com o uso de uma tenaz de cabo longo;



Figura 3-80 – Introdução da cavidade no balde de ácido.

- Principalmente no início, o banho deve ser substituído por um novo de hora a hora. A massividade de alumínio do Master é que dita quantas renovações do banho são necessárias;
- Quando se inicia a remoção de alumínio na zona das pás, o banho pode ser renovado apenas quando o aparecimento de bolhas à superfície abrandar;

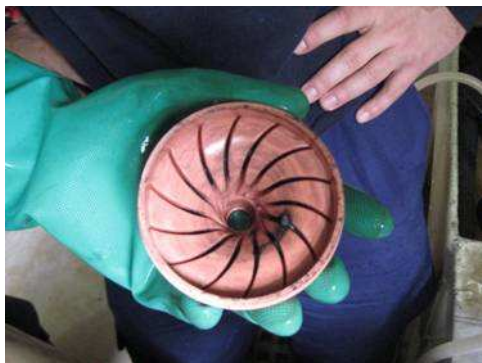


Figura 3-81 – Demonstração de uma dissolução incompleta do alumínio.

- Quando acabar o fluxo de bolhas à superfície, mesmo que pequenas, isto pode significar que a remoção chegou ao fim;
- Se a geometria das alhetas for de espessura muito fina e de comprimento relativamente grande, a remoção total poderá demorar dias. Nesta fase, a renovação do banho pode ser feita apenas duas a três vezes por dia, sem nunca esquecer de colocar a cavidade com a base virada para baixo.

A nível geral esta técnica de dissolução do alumínio funcionou muito bem. Mesmo a nível de tempos de execução pode-se dizer que quando comparada com a solução de soda caustica, esta é muito mais rápida, apesar de abrandar significativamente a taxa de remoção, quando se trata de peças com geometria de alhetas de espessura muito comprida e delgada.

3.4.4.4. Limpeza e abrilhantamento da superfície de cobre

Após a realização da remoção do alumínio, verifica-se que além do aspecto baço, a superfície do cobre permanece com manchas e pequenos resíduos, que podem afectar a qualidade superficial da peça, tornando indispensável a aplicação de um banho de limpeza e abrilhantamento da superfície.

Segundo algumas recomendações definiram-se as seguintes soluções:

- Cianeto de sódio (8 – 60g/l), com uma imersão de um a dois minutos com a solução à temperatura ambiente;

- 17% de ácido clorídrico de 34% em água com 0,5% de nonifenol etoxilado, com imersões de 10 a 15 segundos;
- 10% de ácido cítrico à temperatura de 70 a 80°C, durante dois minutos;
- Água quente a 80°C, seguido de banho de álcool durante 10 minutos;

De todas as soluções apresentadas anteriormente, o banho de ácido clorídrico, foi a mais aprofundada. Foram realizados testes com várias concentrações e estados de pureza, dando sempre resultados positivos.

O banho mencionado ajuda a remover algumas manchas na superfície de cobre. A seguir à imersão na solução de ácido é necessário introduzir a peça no banho de água e bicarbonato de sódio. Deste modo além de neutralizar anular o efeito do ácido, a cavidade fica com um aspecto ainda mais brilhante.

Um banho posterior de água quente, seguido de uma limpeza com álcool, além de ajudar à limpeza e abrillhantamento, permite eliminar qualquer agente inibidor de silicone que possa estar alojado no interior da cavidade.

A figura seguinte, mostra o aspecto final da cavidade, após esta etapa.



Figura 3-82 – Aspecto final da cavidade de cobre, após o procedimento de limpeza e abrillhantamento.

3.4.4.5. Modelos de silicone

Quanto à realização de modelos de silicone na cavidade de cobre, praticamente não existe diferença, em relação aos outros processos de conversão. A grande diferença, incide no facto de se poder aumentar as temperaturas de cura, sem que isso afecte demasiado os resultados

dimensionais dos modelos de silicone, permitindo deste modo efectuar mais modelos por dia encurtando-se o tempo de cura do silicone.

3.4.4.6. Análise ao processo cobre

A nível de conclusão e em comparação com os outros processos de conversão, sem dúvida que a cavidade de cobre parece ser a melhor solução, tanto a nível dimensional e geométrico como a nível de estabilidade ao longo do tempo. A nível processual, não deixa de ser um processo um pouco dispendioso, complexo e arriscado, já que no caso de existir algum dano no Master ou na cavidade, não existe hipótese de recuperação ou de repetição do processo.

3.5. Optimização do processo de obtenção de modelos de silicone (moldes)

Após a descrição dos vários processos de conversão (poliuretano, silicone e cobre), é extremamente importante saber como é que cada um deles se comporta a nível dimensional, principalmente no produto final das conversões (modelo de silicone).

Para um melhor conhecimento, decidiu-se realizar os três processos de conversão já referidos, em duas geometrias de peças diferentes, cujos Masters maquinados em alumínio já se encontravam disponíveis. Uma das peças possui um diâmetro na base de 50mm e a outra 75mm, e foram referenciados internamente pelos nomes de BW50 e BW75, respectivamente.

O facto de poder utilizar neste estudo dois Masters, permitiu retirar algumas dúvidas a nível de resultados, que possam parecer mais tendenciosos e, pelo facto de possuírem tamanhos diferentes, permitiu estudar a robustez dos processos de conversão.



Figura 3-83 – Imagem dos Masters usados no estudo dimensional; a) Master BW50, b) Master BW75.

A realização de modelos de silicone a partir dos diferentes processos de conversão teve como objectivo principal saber qual dos passos do processo tinha maior impacto no resultado dimensional das peças acabadas. Para isso foi necessário realizar controlos dimensionais ao produto resultante desses mesmos passos, ou conversões, tendo em conta o respectivo processo de conversão.

O controlo dimensional foi, sempre que possível, realizado segundo as mesmas condições, usando os mesmos programas automáticos, de modo a minimizar os erros de medição.

3.5.1. Métodos de controlo dimensional

Durante praticamente todas as etapas do processo, foi necessário realizar sucessivos controlos dimensionais. Como se tratam de peças com alto rigor dimensional, onde alguns valores dimensionais têm de ser controlados até ao micrómetro, é essencial a utilização de aparelhos de medição com uma precisão, exactidão, e fiabilidade de alto nível, sem nunca esquecer a rapidez de medição que é necessária para responder ao alto volume de peças a inspeccionar.

Além das características já referidas, teve que se ter em conta que algumas das peças a medir são em materiais flexíveis, o que impossibilita a utilização de equipamentos

convencionais de contacto, caso contrário a medição viria afectada de erros causados por deformação.

De modo a satisfazer as nossas necessidades, iniciou-se todo o trabalho através do uso de um equipamento de medição por controlo visual e mais tarde por um projector de perfis (máquinas de medição sem contacto), existente no INEGI. Estas medições permitiram adquirir muita experiência, tanto a nível de métodos de medição como de interpretação dos desenhos dos clientes (já que se tratam de peças com geometrias complexas e de extremo rigor dimensional). Contudo, estas máquinas continham algumas limitações em termos de rigor dimensional, consistência dos valores, rapidez de medição e falta de capacidade em controlar tolerâncias geométricas, entre outras exigências frequentemente presentes nos desenhos.

Tendo em conta as necessidades referidas e através de pesquisas de mercado, encontrou-se um equipamento capaz de satisfazer as necessidades. O equipamento em questão é uma “Quickvision” da Mitutoyo, onde é possível medir de três modos diferentes, por análise de imagem, projecção de perfis e por contacto, com uma precisão na casa da décima de micron (0,0001mm).

O trabalho com esta máquina exigiu o estudo de programação através da linguagem “visual basic”, associado a conhecimentos profundos de geometria e desenho técnico. Deste modo, conseguiu-se executar medições de uma forma bastante consistente, rápida e praticamente sem erro humano.

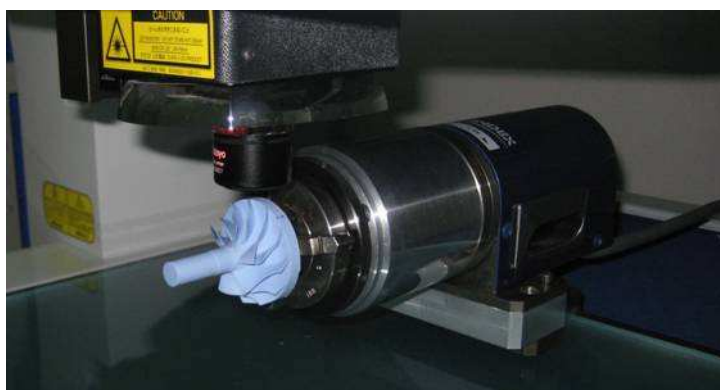


Figura 3-84 – Sistema de medição por análise de imagem.

Relativamente a cada processo e em particular para cada passo, quando possível, o controlo dimensional foi realizado conforme a descrição seguinte:

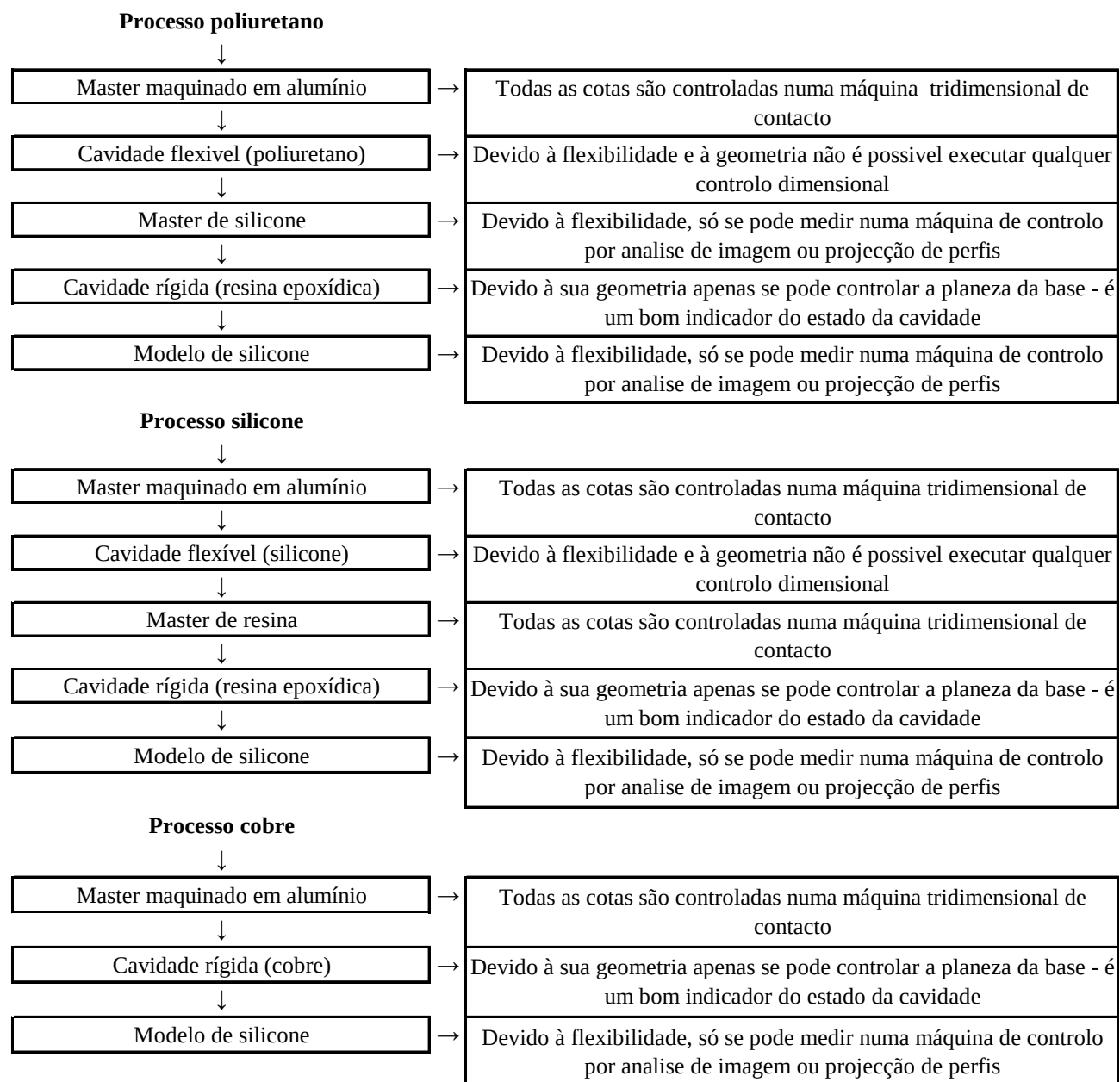


Figura 3-85 – Esquema demonstrativo dos meios de medição usados durante o desenrolar dos processos de conversão.

3.5.2. Resultados dimensionais

Como já foi referido, este estudo teve como objectivo principal a análise dimensional dos produtos finais e seus subprodutos, resultantes das conversões dos três processos apresentados. Apesar dos levantamentos dimensionais serem bastante completos, optou-se por concentrar este estudo apenas em algumas cotas que são bastante representativas da sanidade dimensional das peças em estudo, tal como se pode ver pelo desenho da figura seguinte:

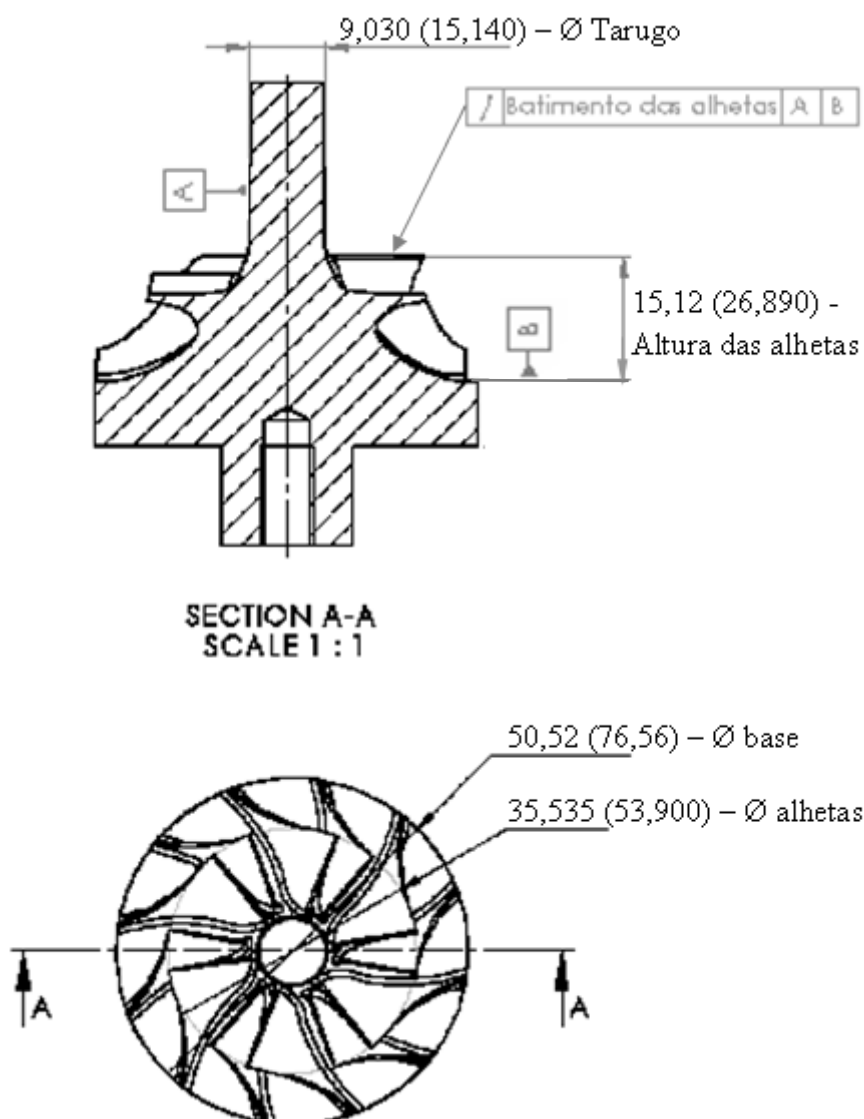


Figura 3-86 – Definição das dimensões a controlar e respectivos valores em mm. BW50 (BW75).²

² Batimento – Neste caso específico, tem como objectivo a medição da diferença ou amplitude entre alturas das várias alhetas do Master. Um valor elevado de batimento pode significar uma perda considerável no rendimento do turbocompressor.

Criaram-se algumas regras para a execução dos programas de medição, tais como:

- O alinhamento da peça é realizado através do plano, formado por pontos de um círculo virtual na periferia da base e pelo eixo formado pelo tarugo ou veio da peça;
- Os pontos retirados das alhetas, são definidos por uma distância ao eixo da peça.

Dimensões do Master maquinado em alumínio:

Independentemente do processo utilizado, os Masters foram sempre os mesmos, o que significa que se iniciou as conversões partindo do mesmo resultado dimensional. As tabelas seguintes apresentam as dimensões das cotas mais importantes usadas neste estudo.

Tabela 3-1 – Dimensões do Master maquinado em alumínio BW50.

Peça nº		Master maquinado BW50						
Cota		Altura alheta (20mm)	Batimento alheta (20mm)	Planeza	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo	Valor a atingir
Cota nominal		15,12	0	0,000	50,520	35,535	9,030	Limites a cumprir
Limite superior		15,13	0,2	0,020	50,530	35,545	9,040	
Limite inferior		15,11	0	0,000	50,510	35,525	9,020	
Pá nº	1	15,126	0,022	0,011	50,520	35,544	9,027	Resultado das medições
	2	15,120		0,012	50,521	35,546	9,028	
	3	15,132		0,012	50,521	35,545	9,027	
	4	15,126						Valor médio das medições
	5	15,121						
	6	15,110						
média		15,123	0,022	0,012	50,521	35,545	9,027	Valores máximos e mínimos atingidos
maior		15,132	0,022	0,012	50,521	35,546	9,028	
menor		15,110	0,022	0,011	50,520	35,544	9,027	
amplitude		0,022	0,000	0,001	0,001	0,002	0,001	

Tabela 3-2 – Dimensões do Master em alumínio maquinado BW75.

Peça nº		Master maquinado BW75					
Cota		Altura pá (26mm)	Batimento pá (26mm)	Planeza	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Valor nominal		26.890	0.000	0.000	76.560	53.900	15.140
Limite superior		26.900	0.150	0.020	76.570	53.910	15.150
Limite inferior		26.880	0.000	0.000	76.550	53.890	15.130
Pá nº	1	26.893	0.020	0.005	76.562	53.909	15.136
	2	26.896		0.005	76.562	53.905	15.136
	3	26.890		0.011	76.563	53.905	15.136
	4	26.910		0.007	76.562		15.137
	5	26.904		0.006	76.562	53.899	15.137
	6	26.904		0.005	76.563	53.861	15.137
	7	26.897		0.011	76.562	53.895	15.137
média		26.899	0.020	0.007	76.562	53.896	15.137
maior		26.910	0.020	0.011	76.563	53.909	15.137
menor		26.890	0.020	0.005	76.562	53.861	15.136
amplitude		0.020	0.000	0.006	0.001	0.048	0.001

Os limites apresentados, servem apenas de orientação, já que não existiu qualquer tipo de exigência. Desta forma demonstra-se que o Master surgiu dentro de tolerâncias muito apertadas.

De seguida apresenta-se a evolução dimensional de cada processo de conversão. Só vão estar apresentadas as dimensões dos produtos que realmente deram origem aos modelos de silicone finais.

O valor nominal a atingir e suas tolerâncias ao longo das conversões, foram definidas segundo o seguinte raciocínio:

Compensação do Master → 1,5%

Contracção do alumínio + gesso → aproximadamente entre 1 a 1,1%

Que significa que os modelos de silicone devem ter valores nominais 0,4 a 0,5% mais baixos do que os valores que o Master maquinado apresenta. Quanto ao Master de silicone e Master de resina, por serem produtos intermédios das conversões, e que à partida não podem ter desvios muito grandes em relação ao Master maquinado, tomaram os mesmos valores nominais mas com tolerâncias maiores.

Todos os valores de contracções apresentados, foram calculadas segundo a seguinte formula:

$$\text{Contracção}(\%) = \left(\frac{l_0 - l_1}{l_0} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$l_0 \rightarrow$ valor inicial;

$l_1 \rightarrow$ valor final

3.5.2.1. Processo poliuretano

Como já foi descrito anteriormente, após a recepção do Master foi realizado a cavidade de poliuretano, que pela sua flexibilidade e característica geométrica não permite qualquer controlo dimensional, por consequência, só após a realização dos Masters em silicone, é que se torna possível obter dimensões, que vão reflectir o estado da cavidade de poliuretano do Master de silicone. Mais uma vez as tolerâncias apresentadas servem apenas de orientação.

As tabelas 3-3 e 3-4, apresentam os valores dimensionais dos Master em silicone para cada geometria, respectivamente.

Tabela 3-3 – Dimensões do Master de silicone BW50 obtido pelo processo da cavidade de poliuretano.

Peça nº		BW50 - Master de silicone				
Cota		Altura alheta (20mm)	Batimento alheta (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		15,12	0	50,520	35,535	9,030
Limite superior		15,22	0,2	50,570	35,585	9,080
Limite inferior		15,02	0	50,470	35,485	8,980
Pá nº	1	15,149	0,051	50,396	35,418	9,001
	2	15,125		50,432	35,380	9,011
	3	15,176		50,388	35,312	8,991
	4	15,159		50,390	35,394	8,985
	5	15,132		50,388	35,444	8,972
	6	15,168		50,375	35,412	8,957
média		15,152	0,051	50,395	35,393	8,986
maior		15,176	0,051	50,432	35,444	9,011
menor		15,125	0,051	50,375	35,312	8,957
amplitude		0,051	0,000	0,057	0,132	0,054

Tabela 3-4 – Dimensões do Master de silicone BW75 obtido pelo processo da cavidade de poliuretano.

Peça nº		BW75 - Master de silicone				
Cota		Altura alheta (26mm)	Batimento alheta (26mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		26,890	0,000	76,560	53,900	15,140
Limite superior		26,990	0,2	76,610	53,950	15,190
Limite inferior		26,79	0	76,510	53,850	15,090
Pá nº	1	26,247	0,187	76,507	53,870	15,302
	2	26,328		76,455	53,728	15,248
	3	26,428		76,504	53,694	15,200
	4	26,399		76,521	53,738	15,240
	5	26,404		76,398	53,876	15,326
	6	26,302		76,462	54,018	15,386
	7	26,241		76,493	54,072	15,389
média		26,336	0,187	76,477	53,857	15,299
maior		26,428	0,187	76,521	54,072	15,389
menor		26,241	0,187	76,398	53,694	15,200
amplitude		0,187	0,000	0,123	0,378	0,189

Nesta fase do processo, pode-se verificar que já existem diferenças dimensionais consideráveis, e que essas diferenças não se apresentam de uma forma tendenciosa. Isto significa que estamos perante peças com deformação geométrica, tal como se pode constatar ao analisarmos as diferenças em relação aos valores do Master original (tabela 3-5).

Tabela 3-5 – Diferenças entre Master maquinado e Master em silicone.

Cota	Altura alheta (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Diferença na BW50	-0,20%	0,25%	-0,40%	0,49%
Diferença na BW75	2,50%	0,43%	0,17%	0,59%

A seguir à execução dos masters de silicone, realizou-se a cavidade rígida em resina epoxídica, que também pela sua geometria não permite o seu controlo dimensional, apenas se pode medir a planeza na base da cavidade, que normalmente serve de indicador de existência de deformação. Mas como neste estudo estamos a analisar a evolução dimensional ao longo do processo, a planeza da cavidade não serve de comparação com o resto, logo não se encontra aqui apresentado qualquer valor.

Por fim tem-se a produção dos modelos de silicone. Para possibilitar a comparação entre processos e entre peças diferentes decidiu-se considerar a medição da primeira peça de cada

resultado das conversões. Assim sendo, as tabelas 3-6 e 3-7 apresentam os valores dimensionais do primeiro modelo de silicone da BW50 e BW75, respectivamente.

Tabela 3-6 – Dimensões do Modelo de silicone BW50 obtido pelo processo da cavidade de poliuretano.

Peça nº		BW50 - Modelo de silicone				
Cota		Altura alheta (20mm)	Batimento alheta (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		15,045	0	50,267	35,357	8,985
Limite superior		15,245	0,2	50,467	35,557	9,085
Limite inferior		14,845	0	50,067	35,157	8,885
Pá nº	1	14,854	0,050	50,341	35,332	9,020
	2	14,893		50,399	35,322	9,036
	3	14,887		50,348	35,262	9,015
	4	14,858		50,328	35,330	9,006
	5	14,885		50,358	35,376	8,986
	6	14,843		50,321	35,346	8,975
média		14,870	0,050	50,349	35,328	9,006
maior		14,893	0,050	50,399	35,376	9,036
menor		14,843	0,050	50,321	35,262	8,975
amplitude		0,050	0,000	0,078	0,114	0,061

Tabela 3-7 – Dimensões do Modelo de silicone BW75 obtido pelo processo da cavidade de poliuretano.

Peça nº		BW75 - Modelo de silicone				
Cota		Altura alheta (26mm)	Batimento alheta (26mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		26,756	0,000	76,181	53,631	15,061
Limite superior		26,956	0,150	76,381	53,831	15,161
Limite inferior		26,556	0,000	75,981	53,431	14,961
Pá nº	1	26,326	0,138	76,438	53,866	15,344
	2	26,394		76,300	53,708	15,298
	3	26,433		76,402	53,836	15,295
	4	26,377		76,441	53,838	15,326
	5	26,352		76,278	53,884	15,367
	6	26,311		76,325	53,930	15,448
	7	26,295		76,382	54,040	15,426
média		26,355	0,138	76,367	53,872	15,358
maior		26,433	0,138	76,441	54,040	15,448
menor		26,295	0,138	76,278	53,708	15,295
amplitude		0,138	0,000	0,163	0,332	0,153

As tolerâncias apresentadas são uma aproximação das tolerâncias especificadas nos desenhos técnicos das peças fundidas finais. Logo, se nesta fase já existem dimensões fora do

especificado, muito provavelmente os fundidos não vão estar de acordo com as especificações do cliente.

As diferenças dimensionais entre os modelos de silicone e o Master maquinado, estão indicados na tabela 3-8:

Tabela 3-8 – Diferenças entre o Master maquinado e o Modelo de silicone.

Cota	Altura alheta (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Diferença na BW50	4,30%	0,34%	0,58%	0,23%
Diferença na BW75	2,03%	0,25%	0,05%	-1,46%

Como se pode verificar, este processo de conversão introduz deformações nos modelos de silicone que pelas suas diferenças, praticamente inviabilizaram a hipótese de utilização dos mesmos para o fabrico de moldações de gesso. Estas diferenças são bem visíveis nas alhetas das peças, uma das partes mais sensíveis do impulsor.

Nas diferenças detectadas, comprova-se que as mesmas não se comportam em todas as cotas com uma tendência, o que significa que se está perante modelos de silicone deformados geometricamente. Quando há problemas de excesso de contracção ou dilatação térmica, todas as cotas que se apresentam segundo os mesmos eixos, como é o caso dos três diâmetros em estudo, teriam de se comportar de modo semelhante, o que, não se verifica neste caso. Por exemplo, na peça BW50 tanto temos diferenças de 0,23% como 4,3%, ou o caso da peça BW75, onde tanto temos diferenças de 0,05% como -1,46%, o que mostra que a alteração da geometria não ocorreu de forma constante.

Outra análise que se pode realizar, é o facto do comportamento da peça BW50 e BW75, apesar de parecerem semelhantes, apresentaram diferenças bem distintas, o que significa que o facto de se usar o processo da cavidade de poliuretano, não permite estimar, ainda na fase de projecto, os valores das compensações a aplicar ao Master sem que haja desvios de tolerância.

Em resumo, a nível dimensional a utilização deste processo tem uma grande probabilidade de reprovação, mesmo sendo executado segundo os procedimentos estabelecidos.

3.5.2.2. Processo silicone

Conforme já descrito anteriormente, a seguir à recepção do Master, realiza-se a cavidade flexível em silicone, que pelas mesmas razões do processo da cavidade de poliuretano, não pode ser controlada dimensionalmente. Só depois, com a obtenção do Master rígido em resina, é que se torna possível obter dimensões. Sendo assim, para as peças em estudo obtiveram-se os resultados que se encontram apresentados nas tabelas 3-9 e 3-10.

Tabela 3-9 – Dimensões do Master de resina BW50 obtido pelo processo da cavidade de silicone.

Peça nº		BW50 - Master de resina				
Cota		Altura alheta (20mm)	Batimento alheta (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		15,12	0	50,520	35,535	9,030
Limite superior		15,22	0,2	50,570	35,585	9,080
Limite inferior		15,02	0	50,470	35,485	8,980
Pá nº	1	15,116	0,015	50,343	35,498	8,994
	2	15,101		50,319	35,459	9,004
	3	15,114		50,270	35,441	8,989
	4	15,116		50,354	35,419	8,977
	5	15,106		50,307	35,408	8,990
	6	15,104		50,271	35,404	8,937
média		15,109	0,015	50,311	35,438	8,982
maior		15,116	0,015	50,354	35,498	9,004
menor		15,101	0,015	50,270	35,404	8,937
amplitude		0,015	0,000	0,084	0,094	0,067

Tabela 3-10 – Dimensões do Master de resina BW75 obtido pelo processo da cavidade de silicone.

Peça nº		BW75 - Master de resina				
Cota		Altura alheta (26mm)	Batimento alheta (26mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		26,890	0,000	76,560	53,900	15,140
Limite superior		26,990	0,2	76,610	53,950	15,190
Limite inferior		26,79	0	76,510	53,850	15,090
Pá nº	1	26,911	0,082	76,288	53,862	15,074
	2	26,925		76,283	53,838	15,067
	3	26,947		76,293	53,794	15,044
	4	26,923		76,310	53,800	15,047
	5	26,891		76,294	53,846	15,060
	6	26,882		76,295	53,886	15,108
	7	26,865		76,300	53,966	15,128
média		26,906	0,082	76,295	53,856	15,075
maior		26,947	0,082	76,310	53,966	15,128
menor		26,865	0,082	76,283	53,794	15,044
amplitude		0,082	0,000	0,027	0,172	0,084

A tabela 3-11 compara os valores médios dos Masters de resina com os valores do Master maquinado.

Tabela 3-11 – Diferenças entre Master maquinado e Master de resina.

Cota	Altura alheta (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Diferença na BW50	0,07%	0,41%	0,27%	0,53%
Diferença na BW75	-0,06%	0,35%	0,08%	0,43%

Pelas diferenças apresentadas, é fácil perceber que o Master de resina do processo de conversão com cavidade de silicone, praticamente não é afectado com desvios dimensionais, já que as diferenças em geral não ultrapassam os 0,5%.

A seguir temos a execução da cavidade rígida, da qual também não é possível obter dimensões, mas que posteriormente originou os modelos de silicone, finalizando o processo de conversão da cavidade de silicone. Os valores dos referidos modelos de silicone, encontram-se apresentados nas tabelas 3-12 e 3-13.

Tabela 3-12 – Dimensões do Modelo de silicone BW50 obtido pelo processo da cavidade de silicone.

Peça nº		BW50 - Modelo de silicone				
Cota		Altura alheta (20mm)	Batimento alheta (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		15,045	0	50,267	35,357	8,985
Limite superior		15,245	0,2	50,467	35,557	9,085
Limite inferior		14,845	0	50,067	35,157	8,885
Pá nº	1	15,064	0,067	50,118	35,241	8,963
	2	15,066		50,236	35,037	8,968
	3	15,056		50,208	35,003	8,969
	4	15,111		50,133	35,146	8,967
	5	15,083		50,215	35,336	8,971
	6	15,044		50,192	35,324	8,973
média		15,071	0,067	50,184	35,181	8,968
maior		15,111	0,067	50,236	35,336	8,973
menor		15,044	0,067	50,118	35,003	8,963
amplitude		0,067	0,000	0,117	0,333	0,011

Tabela 3-13 – Dimensões do Modelo de silicone BW75 obtido pelo processo da cavidade de silicone.

Peça nº		BW75 - Modelo de silicone				
Cota		Altura alheta (26mm)	Batimento alheta (26mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		26,756	0,000	76,181	53,631	15,061
Limite superior		26,956	0,150	76,381	53,831	15,161
Limite inferior		26,556	0,000	75,981	53,431	14,961
Pá nº	1	26,865	0,122	76,296	53,834	15,080
	2	26,887		76,289	53,734	15,053
	3	26,943		76,292	53,652	15,030
	4	26,917		76,315	53,662	15,036
	5	26,875		76,305	53,764	15,054
	6	26,821		76,288	53,850	15,102
	7	26,827		76,304	53,976	15,188
média		26,876	0,122	76,298	53,782	15,078
maior		26,943	0,122	76,315	53,976	15,188
menor		26,821	0,122	76,288	53,652	15,030
amplitude		0,122	0,000	0,027	0,324	0,158

Mais uma vez, podemos analisar as diferenças entre o original maquinado e os modelos de silicone, em percentagens na tabela 3-14.

Tabela 3-14 – Diferenças entre Master maquinado e Modelo de silicone.

Cota	Altura pá (20mm)	Diâmetro base	Diâmetro alhetas	Diâmetro tarugo
Diferença na BW50	0,32%	0,67%	0,50%	0,69%
Diferença na BW75	0,05%	0,47%	-0,72%	0,41%

A nível de resultado final, podemos considerar que este processo de conversão garante, com mais eficácia, modelos de silicone dimensionalmente muito próximo dos valores nominais exigidos. De tal forma que a maioria das deformações situam-se perto dos 0,5%.

Ao contrário do que seria de esperar, verifica-se um aumento excessivo do diâmetro das alhetas na peça BW75 (-0,72%). Este caso não é considerado crítico, porque como é uma zona onde o fundido vai ser sujeito a maquinagem, qualquer excesso é facilmente retirado. O caso contrário é bem mais crítico, porque a falta de material pode comprometer a operação de maquinagem.

Comparando os processos de conversão em função dos resultados dimensionais obtidos, pode-se afirmar, que o processo da cavidade de silicone aparenta ser muito mais estável e robusto que o processo da cavidade de poliuretano. Porém, apesar dos valores de ambas as peças aqui apresentados serem bastante regulares (vão de encontro com a maioria das experiências realizadas), é comum observar-se casos onde os resultados dimensionais fogem daquilo que seria o mais espectável, dando origem a modelos de silicone com desvios de tal ordem que inviabilizam o seu uso no processo produtivo. Isto significa que tal como o processo da cavidade de poliuretano, mesmo assegurando que se cumprem correctamente todos os procedimentos, o sucesso dos resultados finais estão muito dependentes de factores aleatórios, o que vem confirmar mais uma vez a dificuldade no controlo comportamental dos materiais usados nas conversões. Exemplo disso é a diferença no diâmetro das alhetas na peça BW50 e a peça BW75, que tiveram comportamentos bem distintos.

3.5.2.2.1. Evolução dimensional das cavidades rígidas em resina epoxídica ao longo do tempo

Apesar de não ter sido mencionado no estudo referente ao comportamento dimensional dos processos de conversão da cavidade de poliuretano e da cavidade de silicone, verificou-se

que as cavidades rígidas em resina, usadas nesses mesmos processos, se alteraram dimensionalmente. Isto porque, os modelos de silicone inicialmente produzidos nas cavidades, apresentavam dimensões diferentes dos modelos fabricados alguns dias depois. Estas alterações começaram a ser de tal ordem consideráveis, que levaram a que dimensões, que inicialmente eram aceitáveis, ficassem fora das tolerâncias especificadas.

Decidiu-se, então, compilar as medições de modelos de silicone cuja geometria se encontrava em preparação para início de produção (BW47), daí o grande número de modelos produzidos ser significativo para este estudo, ao contrário das peças anteriormente estudadas (BW50 e BW75).

Altura das alhetas

A figura seguinte mostra graficamente a evolução dimensional da altura das alhetas das cavidades de resina rígida ao longo do tempo:



Figura 3-87 – Evolução da altura das alhetas ao longo do tempo.

Como se pode verificar, existe um acréscimo dimensional da altura das alhetas ao longo do tempo, mas essa diferença é mais visível após os primeiros dias de produção. Se dividirmos temporalmente a produção dos primeiros seis dias do restante, verifica-se que cada modelo realizado diariamente sofre um acréscimo em cerca de 0,014 mm.

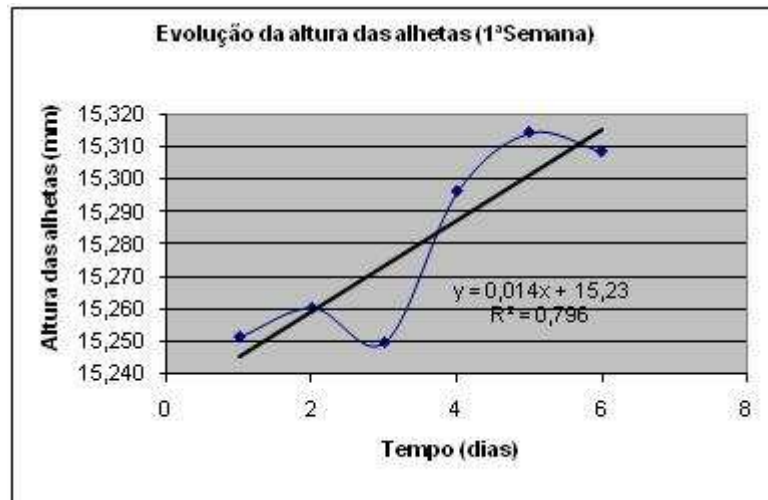


Figura 3-88 – Evolução da altura das alhetas na primeira semana de existência.

Contudo, após os primeiros seis dias de trabalho, é visível que as variações dimensionais para esta cota já não são tão expressivas, tal como indica a equação da recta de tendência, onde a deformação diária é muito próximo de 0mm.

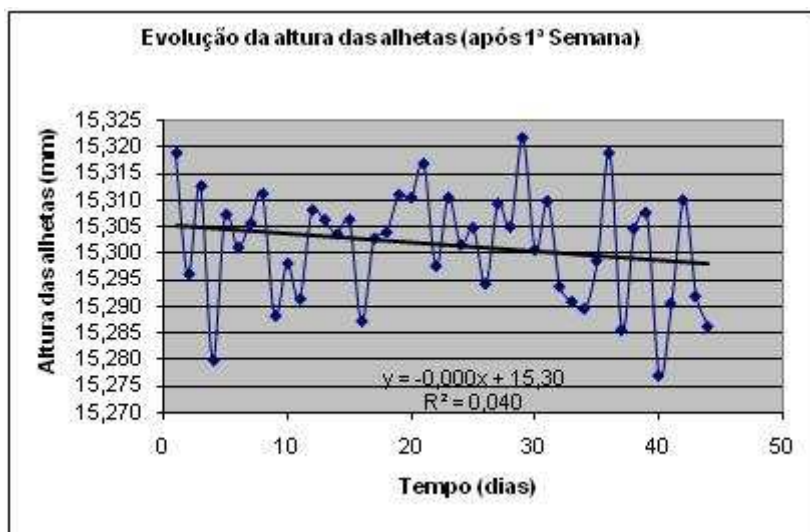


Figura 3-89 – Evolução da altura das alhetas após a primeira semana de existência.

Diâmetro das alhetas

A evolução dimensional do diâmetro das alhetas, que sem dúvida é uma das dimensões mais sensíveis de toda a peça, está indicada na figura seguinte, apresentando uma variação

muito significativa, que pode ser descrita por uma equação de potência. Tal como na altura das alhetas, também neste caso, é possível analisar estas diferenças em dois intervalos temporais.

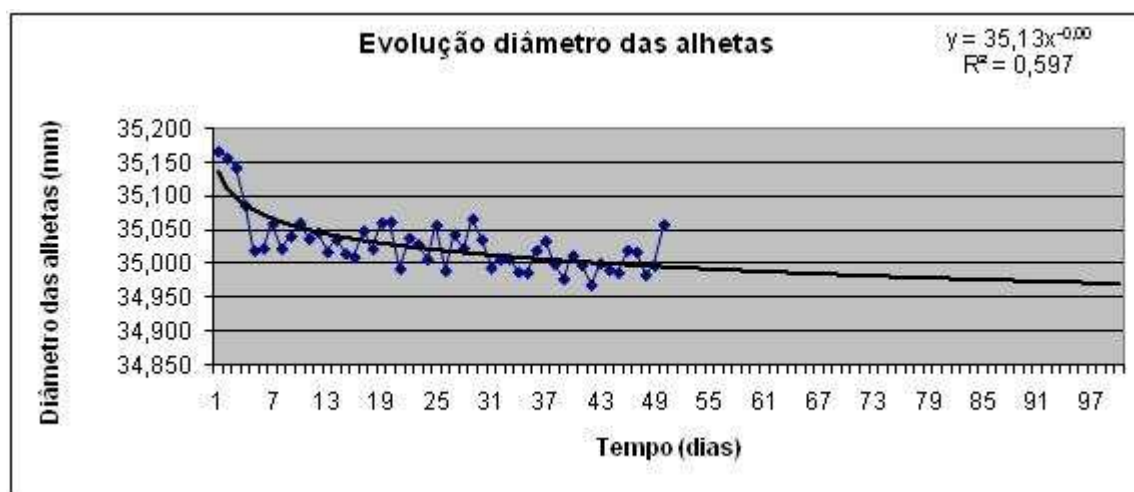


Figura 3-90 – Evolução do diâmetro das alhetas ao longo do tempo.

A deformação nos seis primeiros dias traduz-se numa diminuição do diâmetro em cerca de 0,034mm por dia, tal como se pode observar na figura seguinte.

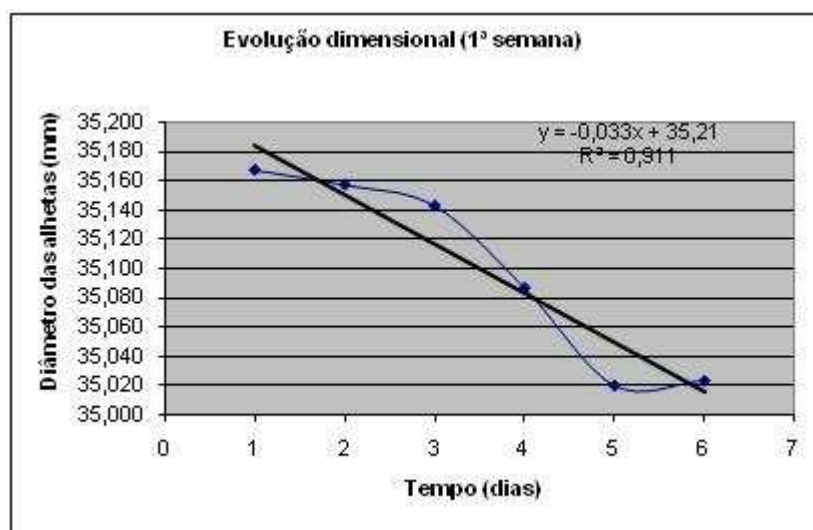


Figura 3-91 – Evolução do diâmetro das alhetas durante a primeira semana de existência.

Em relação à produção após os seis primeiros dias, verifica-se uma vez mais, que a deformação é quase nula, onde o valor estimado para a perda de dimensão diária, segundo a equação da recta de tendência, é de cerca de 0,001mm.

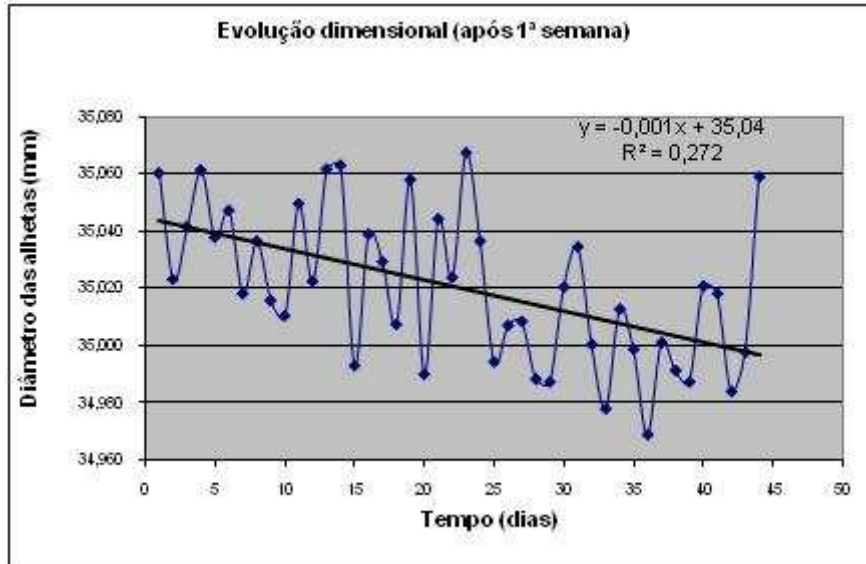


Figura 3-92 – Evolução do diâmetro das alhetas após a primeira semana de existência.

Diâmetro da base

Esta cota, vem confirmar a tendência de deformação, o que também pode ser descrita segundo uma equação de potência, tal como se pode ver na figura 3-93.

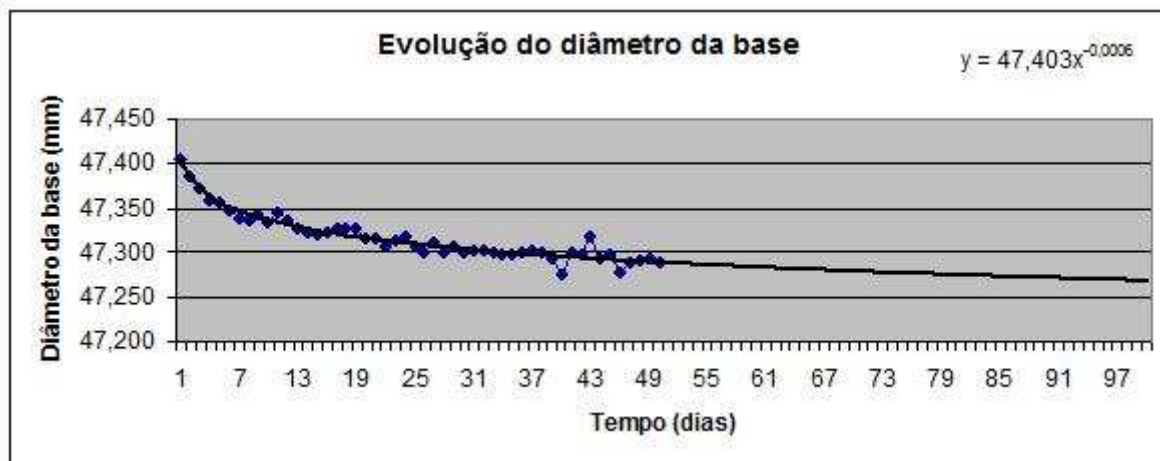


Figura 3-93 – Evolução do diâmetro da base ao longo do tempo.

3.5.2.3. Processo cavidade de cobre

Como no processo da cavidade de cobre não existem conversões intermédias entre o Master maquinado e a cavidade rígida, além das dimensões do Master já apresentadas, realizou-se apenas o controlo dimensional aos Modelos de silicone.

Para este processo ser comparável com os anteriores, usou-se uma temperatura de cura de 25°C, apesar deste processo permitir o uso de temperaturas de cura mais altas, permitindo diminuir o tempo de cura, sem afectar em demasia as dimensões dos modelos e a própria cavidade.

O resultado para cada uma das peças encontra-se apresentado nas tabelas 3-15 e 3-16:

Tabela 3-15 – Dimensões do Modelo de silicone BW50 obtido pelo processo da cavidade de cobre.

Peça nº		BW50 - Modelo de silicone				
Cota		Altura alheta (20mm)	Batimento alheta (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Cota nominal		15,045	0	50,267	35,357	8,985
Limite superior		15,245	0,2	50,467	35,557	9,085
Limite inferior		14,845	0	50,067	35,157	8,885
Pá nº	1	15,113	0,035	50,382	35,358	9,041
	2	15,148		50,377	35,328	9,044
	3	15,120		50,359	35,336	9,040
	4	15,126		50,379	35,336	9,028
	5	15,118		50,359	35,328	9,010
	6	15,117		50,364	35,340	9,028
média		15,124	0,035	50,370	35,338	9,032
maior		15,148	0,035	50,382	35,358	9,044
menor		15,113	0,035	50,359	35,328	9,010
amplitude		0,035	0,000	0,023	0,030	0,034

Tabela 3-16 – Dimensões do Modelo de silicone BW75 obtido pelo processo da cavidade de cobre.

Peça nº		BW75 - Modelo de silicone				
Cota		Altura alheta (26mm)	Batimento alheta (26mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Raio de medida		26,756	0,000	76,181	53,630	15,061
Limite superior		26,956	0,150	76,381	53,830	15,161
Limite inferior		26,556	0,000	75,981	53,430	14,961
Pá nº	1	26,7948	0,091	76,4296	53,9842	15,1307
	2	26,8633		76,4409	53,8526	15,1259
	3	26,877		76,422	53,8564	15,1259
	4	26,8853		76,4244	53,9044	15,1105
	5	26,8728		76,4286	53,951	15,1436
	6	26,8161		76,4239	54,0208	15,1838
	7	26,7947		76,3971	54,0516	15,192
média		26,843	0,091	76,424	53,946	15,145
maior		26,885	0,091	76,441	54,052	15,192
menor		26,795	0,091	76,397	53,853	15,111
amplitude		0,091	0,000	0,044	0,199	0,082

As diferenças em relação ao Master maquinado são as seguintes:

Tabela 3-17 – Diferenças entre o Master maquinado e o Modelo de silicone.

Cota	Altura pá (20mm)	Diâmetro base	Diametro alhetas	Diametro tarugo
Diferença na BW50	-0,03%	0,30%	-0,01%	-0,02%
Diferença na BW75	0,17%	0,18%	-0,09%	-0,03%

A análise da tabela permite concluir que o processo da cavidade de cobre, permite obter modelos quase idênticos ao Master maquinado.

Em comparação com os outros processos de conversão, pode-se afirmar que este é o processo que permite obter modelos de silicone, o mais próximo possível do Master maquinado original. No entanto se tivermos em conta que o objectivo final é a obtenção de modelos com um desvio dimensional na ordem dos 0,4 a 0,5%, então segundo os resultados apresentados, este processo dimensional não cumpriu em pleno as necessidades.

Não se deve esquecer, que ao contrário das cavidades de resina rígida, a cavidade de cobre, não apresenta deformações com o aumento da temperatura, e por sua vez, ao utilizar temperaturas de cura mais altas do que os 25°C, há possibilidade de obter contracções no

silicone maiores, aproximando o desvio dos modelos de silicone aos 0,4% pretendidos. Decidiu-se então realizar um estudo independente com o objectivo de encontrar o melhor compromisso entre a temperatura e a contracção do silicone.

3.5.2.3.1. Influência da temperatura na cura do silicone

Como se viu anteriormente, no processo de conversão da cavidade de cobre, existe a possibilidade de produzir modelos de silicone com as dimensões desejadas usando temperaturas mais altas para a sua cura. Para determinar as condições ideais, efectuou-se um estudo onde se testou curas de silicone a temperaturas compreendidas entre os 25°C e os 50°C, com aumento gradual de 5°C. Os resultados obtidos estão indicados na seguinte tabela (valores médios de cada medição).

Tabela 3-18 – Dimensões do Modelo de silicone BW50 a diferentes temperaturas de cura.

BW50								
	Altura pá (20mm)	Contracção (%)	Diâmetro base (mm)	Contracção (%)	Diâmetro alhetas (mm)	Contracção (%)	Diâmetro tarugo (mm)	Contracção (%)
	15,045		50,267		35,357		8,985	
	15,245		50,467		35,557		9,085	
Temperatura	14,845		50,067		35,157		8,885	
25°C	15,124	-0,02	50,370	0,30	35,338	0,56	9,032	-0,02
30°C	15,099	0,14	50,355	0,33	35,330	0,58	9,038	-0,09
35°C	15,082	0,25	50,312	0,41	35,291	0,69	9,034	-0,04
40°C	15,050	0,46	50,306	0,42	35,284	0,71	9,030	0,00
45°C	15,060	0,40	50,277	0,48	35,274	0,73	9,029	0,01
50°C	15,030	0,60	50,253	0,53	35,220	0,89	9,006	0,26

O uso de temperaturas mais altas influencia o resultado dimensional do modelo de silicone. Tendo em conta o objectivo de encontrar a temperatura ideal que permita a obtenção de modelos de silicone com uma diminuição nas suas dimensões em cerca de 0,4%, verifica-se pela análise dos resultados da tabela anterior, que a temperatura óptima ronda os 35 a 40°C.

A escolha da temperatura ideal foi baseada no facto de terem sido obtidos valores muito próximos dos 0,4% em duas das cotas mais importantes, diâmetro da base e altura das alhetas. A dúvida assenta entre a escolha dos 35°C ou dos 40°C, o que leva a que se ponderem os seguintes factores:

1. Das três dimensões analisadas, podemos imediatamente excluir o diâmetro da base, já que apresentam valores quase idênticos entre si;
2. Pela altura das alhetas, o que os valores indicam é que 40°C permite ter um valor mais próximo do ideal, já que os 35°C, provocam apenas contracções de 0,25%, o que origina alhetas ligeiramente acima do pretendido. Este facto pode até ser benéfico, se considerarmos que esta dimensão normalmente sofre abaixamento durante a utilização dos modelos na produção de moldações de gesso. Logo, tendo em conta a geometria em uso, nada indica que seja prejudicial o facto da altura das alhetas ser um ligeiramente superior do que o valor nominal.
3. Pelo diâmetro das alhetas, ambas as temperaturas provocam excesso de contracção. Mas pelo facto de a 35°C essa diminuição dimensional ser menos gravosa, é mais indicada a sua escolha.

Após esta análise, podemos afirmar que a temperatura ideal para ser usada como cura dos modelos de silicone, é os 35°C, sem esquecer a possibilidade do uso de 40°C em peças com geometrias adequadas.

Para comprovar o que anteriormente foi apresentado, indicam-se de seguida os valores dimensionais para os modelos de silicone realizados na cavidade de cobre da peça BW75. Contudo, por não ter sido possível a execução dos modelos de silicone a todas as temperaturas estudadas, encontra-se apenas os valores para 25 e 35°C.

Tabela 3-19 – Dimensões do Modelo de silicone BW75 a diferentes temperaturas de cura.

BW75								
Temperatura	Altura alheta (26mm)	Contracção (%)	Diâmetro base	Contracção (%)	Diametro alhetas	Contracção (%)	Diametro tarugo	Contracção (%)
	26,756		76,181		53,630		15,061	
	26,956		76,381		53,830		15,161	
	26,556		75,981		53,430		14,961	
25°C	26,843	0,17	76,424	0,18	53,946	-0,09	15,145	-0,03
30°C	-	-	-	-	-	-	-	-
35°C	26,83	0,21	76,32	0,32	53,80	0,18	15,13	0,06

Como se pode verificar na tabela anterior, a 35°C consegue-se obter resultados muito próximos dos apresentados no estudo com a peça BW50.

Convém salientar uma vez mais, que cada geometria de modelo tem o seu comportamento próprio. As espessuras de silicone, as massividades, as curvaturas das alhetas e corpo e os próprios tamanhos dos diâmetros e alturas das alhetas, influenciam muito o resultado dimensional. Estes estudos serviram apenas para orientação e ajuda na decisão do melhor procedimento possível para a execução de modelos de silicone, mas sem nunca eliminar a hipótese de possíveis ajustes nos parâmetros de trabalho tendo em conta a geometria de peça a ser produzida.

3.5.2.3.2. Estudo comportamental dos vários tipos de silicone em função da temperatura

Para reforçar o estudo anteriormente efectuado e para ajudar na escolha do silicone a usar para a realização dos modelos de silicone, realizou-se um outro estudo, que consistiu na execução de provetes, em diferentes silicones, a diferentes temperaturas, de forma a avaliar a contracção ou deformação que cada combinação sofreu.

Este estudo, tem também a função de ajudar a escolher um ou dois materiais para serem utilizados na futura produção de modelos, placas molde e caixas de moldação, já que não é viável manter tantas qualidades de silicone em constante utilização (sem esquecer que os seus preços e propriedades mecânicas e químicas também foram considerados).

Decidiu-se então executar um molde em alumínio, com uma forma negativa de um paralelepípedo, no seu centro, com as dimensões de 10x10x100mm. Uma das condições foi a de que todos os cantos presentes no molde teriam de estar o mais bem definidos possível, de forma a poder originar provetes com arestas vivas, para assim poderem ser controlados num sistema de medição por análise de imagem.



Figura 3-94 – Imagens ilustrativas do molde e respectivos provetes.

Ao todo, foram testados 7 tipos de silicone diferentes a temperaturas que variaram entre os 25°C e 50°C com incrementos de 5°C. Cada combinação foi repetida duas a três vezes. Os resultados encontram-se expostos sobre a forma gráfica na figura 3-95:

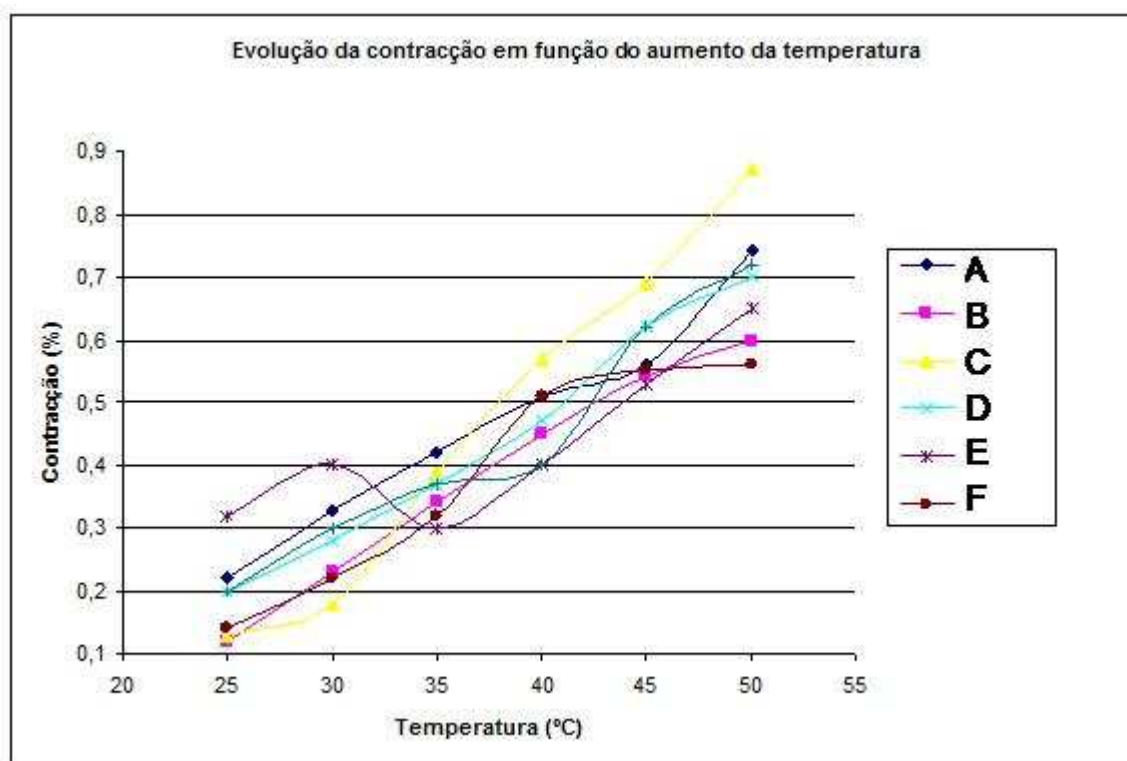


Figura 3-95 – Evolução da contração do silicone em função da temperatura de cura.

Apesar de existir alguma oscilação nos resultados dimensionais entre os diferentes silicones estudados, comprova-se mais uma vez que entre os 35 e os 40°C, os silicones apresentam uma contração na ordem dos 0,4%. Contudo, à temperatura de 40°C, praticamente todos os silicones apresentam valores de contração ligeiramente superiores a 0,4%, significando que, por precaução, não é aconselhável o uso dessa temperatura.

3.5.3. Conclusões dos estudos dimensionais

A análise dos resultados dimensionais obtidos para os vários processos de conversão utilizados, os estudos comportamentais entre vários tipos de silicones e temperaturas e os estudos de evoluções dimensionais ao longo do tempo, permitem tirar algumas conclusões, e verificar vantagens e desvantagens processuais.

A nível de processo de conversão, pode-se concluir que a utilização da cavidade de cobre, pode ser o melhor processo para a fabricação de modelos de silicone.

Tanto o processo da cavidade de poliuretano como o processo da cavidade de silicone, por muitas vantagens que tenham, nunca serão um método eficaz para obtenção de modelos,

sobretudo quando a exigência dimensional é muito apertada, como é o caso da indústria automóvel.

A nível de vantagens em utilizar os processos de conversão da cavidade de poliuretano e da cavidade de silicone (as diferenças entre eles já foram referidos anteriormente), e relativamente ao processo da cavidade de cobre, pode-se referir o seguinte:

- Não existe destruição do Master maquinado;
- O custo total da conversão é reduzido;
- O tempo para execução da cavidade é reduzido;
- Para pequenas séries é indicado, já que não é necessário muito tempo para executar os modelos de silicone.

A nível de vantagens do uso do processo da cavidade de cobre em relação aos outros processos de conversão, pode-se referir:

- A cavidade de cobre é o único processo testado que possui rigor dimensional suficiente para realizar peças com extremo rigor dimensional para a indústria automóvel;
- Seja qual for a geometria da peça, o resultado dimensional pode ser aproximadamente calculado;
- É possível realizar pelo menos 4 modelos de silicone nas 7 horas normais de trabalho diário, quando se utiliza 35°C como temperatura de cura;
- A cavidade tem uma vida útil de utilização quase interminável.

3.6. Estudo da durabilidade dos modelos de silicone em produção

Para comprovar a viabilidade do processo de fundição e em especial as suas ferramentas elastoméricas, foi necessário analisar o tempo de vida dos modelos de silicone (moldes) em produção.

Pela experiência adquirida com algumas geometrias diferentes já produzidas, verificou-se que o desgaste nos modelos pode manifestar-se de algumas formas, tais como:

- Desgaste na superfície inferior das alhetas;

- Desgaste na superfície do veio central superior;
- Danificação na superfície por mau manuseamento em produção (corte ou rasgo do silicone);
- Descolamento entre o silicone e a superfície metálica do esqueleto;
- Deformação geométrica, principalmente nas alhetas.

Devido ao facto da geometria das alhetas ser delgada, comprida e flexível e pelo facto de estar sujeita a solicitações mecânicas, faz com que o próprio material perca características, verificando-se a referida deformação geométrica. Pelo facto de este problema se manifestar do mesmo modo em todos os modelos, e por ser o defeito que mais facilmente coloca a peça fundida fora do especificado (provocando reprovações pelos critérios do cliente), é necessário estimar uma vida útil dos modelos de silicone (moldes) para serem renovados.

A deformação geométrica das alhetas, traduz-se numa flexão em comprimento, sem solicitação mecânica, conforme a explicação da figura 3-96.

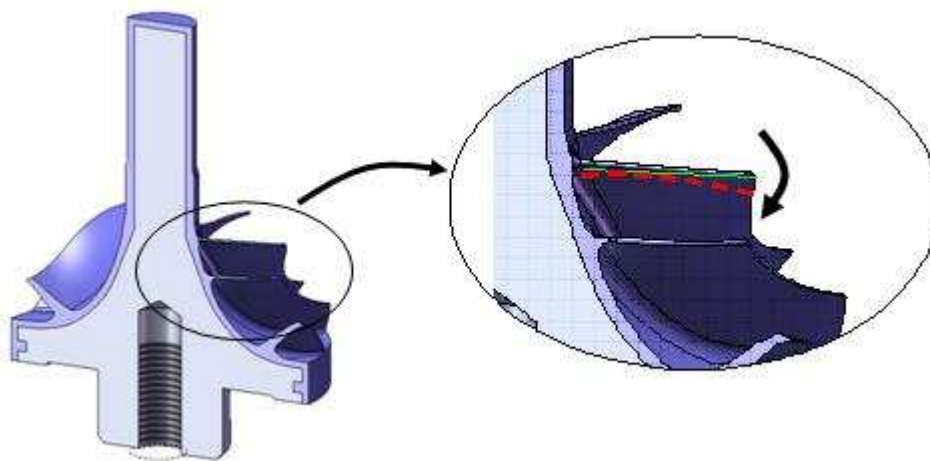


Figura 3-96 – Demonstração da deformação geométrica provocada pela produção de moldações de gesso.

A referida deformação causada pela sucessiva produção de moldações de gesso pode ser verificada pela medição da altura das alhetas, que por sua vez não pode exceder um limite que ponha em causa o resultado final do fundido, baseado na tolerância imposta no desenho de fundido do cliente.

Convém salientar que a situação ideal para este estudo seria a possibilidade de executar moldações sobre os mesmos modelos de silicone (moldes) durante um tempo muito extenso, de modo a verificar as verdadeiras capacidades limites, em termos de durabilidade, dos modelos, e avaliar de um modo mais prolongado a evolução da deformação. A avaliação correcta não foi ainda completamente executada devido ao facto de ser necessário mais tempo para além daquele que este projecto disponibilizou. Mesmo assim, foi possível obter alguns resultados, que demonstram uma certa tendência, que vai de encontro com os resultados esperados.

Para este estudo usou-se uma geometria de modelo de silicone que tem vindo a ser produzida à já algum tempo, através do uso de uma placa molde com uma disposição de 15 modelos de silicone (moldes). Foram efectuadas sucessivas medições, a primeira realizada aos 15 modelos antes de serem introduzidos na placa molde. Após o início da produção de moldações de gesso, efectuaram-se medições intermédias, com intervalos dependentes da disponibilidade da linha de produção e da máquina de controlo dimensional.

Apesar de este estudo só contemplar a altura das alhetas, realizaram-se medições a outras cotas que também ajudam a definir o estado geométrico da peça. Deste modo, foi possível observar a existência de outros possíveis sinais de desgaste prematuro dos modelos.

Os resultados a seguir apresentados tiveram em conta alguns pormenores, tais como:

- O silicone usado foi aquele que apresentou melhores propriedades (flexibilidade, dureza e estabilidade dimensional) para satisfazer a produção de moldações de gesso, tendo em conta a geometria da peça;
- Para o estudo não se tornar extenso e complexo, encontram-se apresentados apenas os valores médios da altura das alhetas das peças que durante toda a produção nunca foram substituídos;
- A medição da altura das alhetas, foi realizada em duas zonas diferentes, uma entre a periferia do topo da alheta e a base da peça (“Altura Pp”), e outra entre um ponto médio no topo da alheta e a base da peça (“Altura Pm”), tal como descreve a figura 3-97.

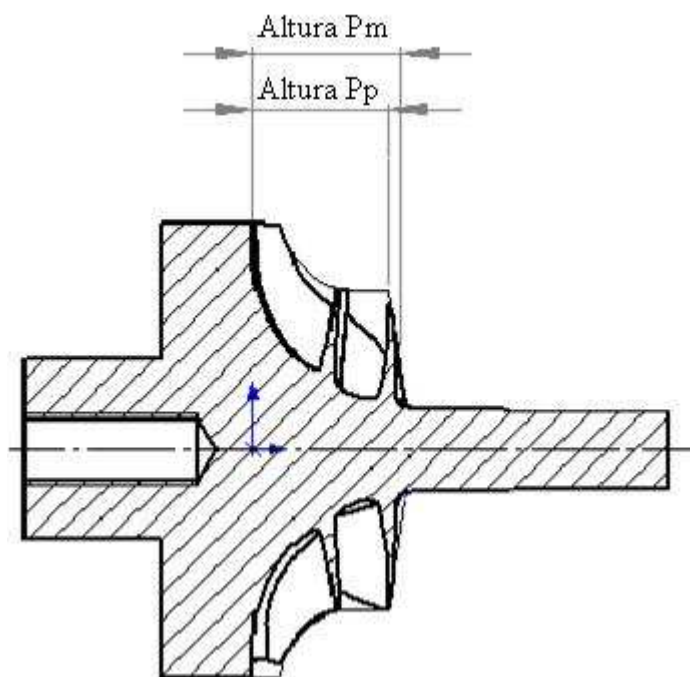


Figura 3-97 – Definição das cotas controladas no estudo de durabilidade dos modelos de silicone em produção.

Os resultados encontram-se apresentados na tabela seguinte:

Tabela 3-20 – Valores médios da altura das alhetas em função do número de moldações fabricadas.

	Nº de moldações fabricadas							
	0	7	14	21	28	86	100	230
Pp (mm)	14,985	14,953	14,949	14,953	14,957	14,937	14,921	14,906
Pm (mm)	15,028	15,034	15,021	15,040	15,014	15,012	14,995	14,982

Os valores apresentados anteriormente na tabela, podem ser traduzidos através do gráfico da figura 3-98.

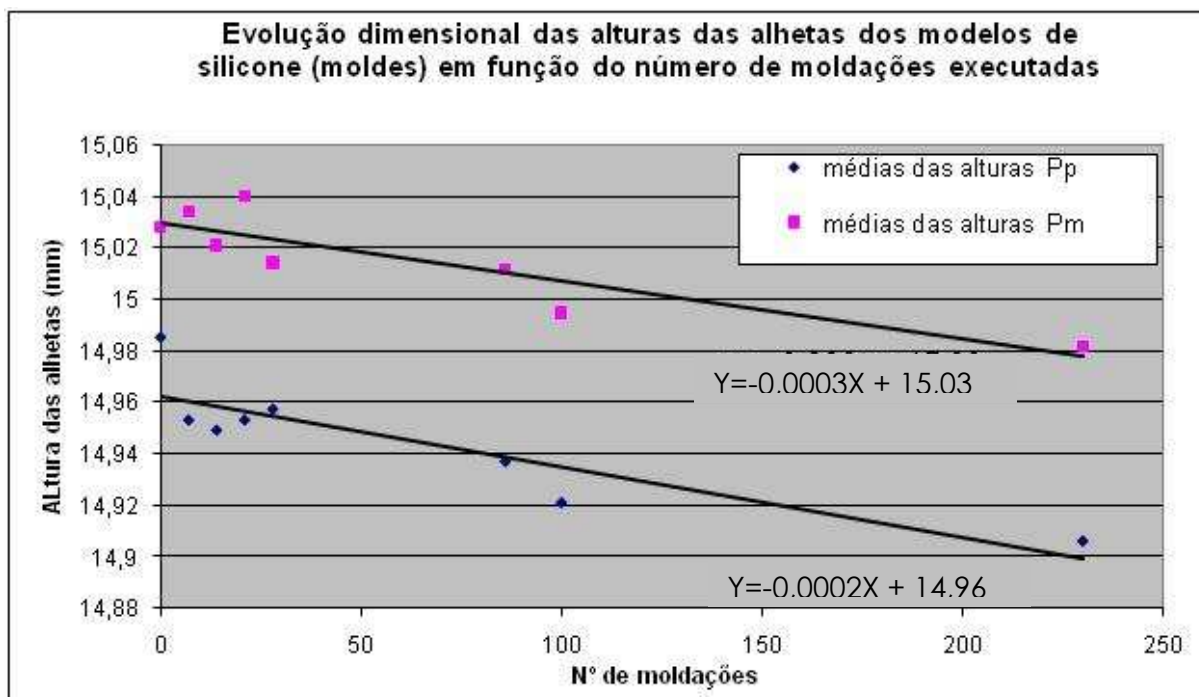


Figura 3-98 – Evolução dimensional da altura das alhetas dos modelos de silicone (moldes).

Como se pode verificar, pela figura anterior, é bem notório o declínio dimensional ao longo do tempo. Desde o início da produção até cerca das 230 moldações executadas, houve em média uma flexão das alhetas, que se traduziu numa perda dimensional na ordem dos 50 a 70µm. Se considerarmos que o valor inicial corresponde exactamente ao valor nominal que a peça deveria ter e que, segundo a tolerância especificada no desenho de fundido do cliente, o limite inferior para esta cota é de 0,3mm, ou seja 300µm, então significa que é possível continuar com a utilização destes modelos de silicone, porque se encontram dimensionalmente aceitáveis.

Pelo paralelismo entre as rectas apresentadas, percebe-se bem que existe uma tendência de deformação geométrica. A pequena diferença entre os declives da recta (-0,0003 e -0,0002) justifica-se pelo facto de o ponto Pp estar mais afastado da zona rígida da peça do que o ponto Pm, o que significa que se encontra influenciado pela flexibilidade do material. Este facto representa também que quanto maior o comprimento da alheta e menor a sua espessura, maior será a flexibilidade e consequentemente a sua deformação na zona periférica.

Sem dúvida que a verdadeira intenção deste estudo foi a procura do limite máximo de utilização dos modelos de silicone em produção de moldações de gesso, mas tal só vai ser possível quando houver um numero suficiente de moldações executadas com a mesma placa

molde. Contudo, acreditando que a tendência de deformação segue as linhas de tendência traçadas anteriormente, podemos calcular o fim de vida dos modelos de silicone.

Sendo o limite de tolerância inferior de -0,3mm e considerando o pior caso de deformação, temos:

$$-0,3 = -0,0003 \times X$$

onde $X = 1000$ moldações de gesso

Isto significa que só ao fim da produção de 1000 moldações de gesso é que teríamos fundidos fora do limite inferior da tolerância imposta pelo cliente.

Muito provavelmente nenhuma peça conseguirá executar este número de moldações, porque o desgaste superficial originado pela abrasão do gesso torna-se bastante crítico para números mais baixos de moldações executadas (pela experiência de outros estudos executados). No entanto convém ter em conta, que estes valores são apenas indicativos e que dependem muito da geometria da peça, da qualidade do silicone, do tipo de gesso e se durante a sua utilização existe contacto com outros produtos que possam influenciar as características do silicone, como é o caso dos desmoldantes e detergentes de limpeza.

4. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Relativamente à concepção das ferramentas de reprodução de modelos de silicone (moldes), à que referir que o caminho percorrido para chegar à quarta geração, foi essencial para perceber a influência, na funcionalidade e durabilidade da ferramenta, das diferentes escolhas de materiais, como o alumínio, aço e resinas epoxídicas, e regras de projecto, como os sistemas de guiamento e exigências de planezas e concentricidades em superfícies críticas.

Pode-se afirmar, que a ultima versão de ferramenta de reprodução, desempenhou em pleno a sua função. O facto do custo de fabricação ser relativamente alto, é facilmente compensado com a não necessidade de manutenção a curto e médio prazo, tendo em conta a excelente resistência ao desgaste, graças aos revestimentos superficiais (anodizações e niquelagens) e ao seu funcionamento muito prático, que demonstrou ao longo dos últimos meses de trabalho contínuo.

A nível de processos de conversão, há que referir que definitivamente o processo da cavidade de poliuretano, não tem robustez suficiente para ser aplicado neste tipo de peças, principalmente pelo uso da borracha de poliuretano e devido à execução da cavidade de resina rígida sobre um Master em silicone flexível, que provocam deformações consideráveis.

A nível do processo da cavidade de silicone, podemos referir mais uma vez que em comparação com o processo poliuretano, apresentou dimensões mais estáveis, significando que pode ser usado para obtenção de peças com menor exigência a nível dimensional e geométrico. De salientar a extrema dificuldade na execução de cavidades rígidas a partir do Master em resina, cuja aplicação de desmoldante se apresenta como uma operação sem robustez.

Em relação às cavidades rígidas em resina epoxídica, tanto num processo como no outro, detectou-se a existência de alteração geométrica ao longo do tempo, que levou a ponderar a utilização das mesmas na produção de grandes séries de modelos de silicone.

Quanto ao processo da cavidade de cobre, definitivamente é aquele que apresenta melhores resultados dimensionais, possibilitando a obtenção de modelos de silicone que praticamente se apresentam como cópias fiéis do Master de alumínio maquinado. Este processo, permite ainda a utilização de diferentes temperaturas de cura do silicone, com a finalidade do aumento da cadência de produção e ajuste das dimensões desejadas. Contudo, convém salientar que para além do custo envolvido na sua obtenção, a cavidade de cobre

exige a destruição do Master, que em caso de falha não existe hipótese de reutilização, sendo por isso um processo de alto risco.

Tendo em conta a exigência associada à fabricação de componentes para a indústria automóvel, concluiu-se facilmente que o caminho para a obtenção de modelos de silicone, passa pela utilização do processo de conversão com cavidades de cobre. Apenas este processo, permite com robustez e segurança, atingir resultados dimensionais e geométricos dentro das tolerâncias especificadas.

A nível de placas molde, caixas de moldação e suas ferramentas de revestimento, em geral verificou-se que cumpriram a função a que se destinavam, apesar de permanecer alguma dificuldade no controlo das dimensões dos furos da placa molde para encaixe dos modelos de silicone e das dimensões dos diâmetros interiores das caixas de moldação, que em conjunto resultaram muitas vezes em aparecimento de folgas ou excesso de interferência, causando respectivamente lixo ou deformação nas moldações.

Em geral, este trabalho permitiu o domínio de tecnologias de conversão e projecto de ferramentas, essenciais para a aplicação do processo de fundição de ligas de alumínio em moldações de gesso, possibilitando ainda a escolha de diferentes soluções, mediante o tipo de geometria e exigências qualitativas das peças.

Como trabalho futuro, é conveniente a continuação da procura de novos materiais e definir melhor alguns procedimentos de trabalho, que ajudem a obter melhores resultados na utilização dos diferentes processos de conversão, de modo a ultrapassar alguns dos problemas apontados como, desvios e instabilidade dimensionais, defeitos superficiais, capacidade produtiva e dependência da acção humana.

A nível de ferramentas, não convém esquecer a necessidade de reduzir custos de fabricação, mantendo o mesmo nível de funcionalidade, robustez e durabilidade.

Com a finalidade de eliminar a ocorrência de folgas ou excesso de interferência na montagem entre modelos de silicone e placas molde e entre placas molde e caixas de moldação, é necessário rever o projecto de ferramentas de revestimento. O impacto destes defeitos na fabricação de moldações de gesso é extremamente negativo, provocando consequentemente um aumento de refugo de peças fundidas por aparecimento de problemas como as inclusões e deformações geométricas.

É necessário continuar o estudo de durabilidade dos modelos de silicone, já que este não foi possível ser concluído pelas razões anteriormente referidas, no capítulo 3.6, de modo a

identificar os defeitos provocados pelo desgaste e qual deles é que à partida define o fim de vida dos modelos.

5. Referências e Bibliografia

- [1] Michael Mayer, “Turbochargers – Effective use of exhaust gas energy”, 2nd edition, Verlag Moderne Industrie, Germany, 2001.
- [2] ASM Handbook, “Casting”, Volume 15, The material information company, 1992.
- [3] T. P. Duarte, F. Jorge Lino, R. L. Neto, “Ceramic Materials for Casting Metallic Molds”, Struers Journal of Materialography, Structure 34, pp. 9-11, 1999.
- [4] Teresa P. Duarte, F. Jorge Lino Alves, Rui J. L. Neto, “Utilização de Moldações Cerâmicas no Fabrico de Moldes Metálicos”, O Molde, Revista da Associação da Indústria de Moldes, Ano 12 N° 39, pp. 32-41, Março de 1999.
- [5] Teresa P. Duarte, F. Jorge Lino, Rui J. Neto, “Conversão de Modelos em Ferramentas Metálicas Utilizando Moldações Cerâmicas”, 1^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia, Auditório da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Leiria, 14 a 16 de Novembro de 2001.
- [6] K G Swift, J D Booker, “Process Selection – From Design to Manufacture”, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, UK, 2003.
- [7] www.3dchem.com
- [8] Harper Charles A., “Handbook of materials for product design” Technology Seminars, Inc., McGraw-Hill, third edition, Lutherville, Maryland, 2001.
- [9] ASM Handbook, “Surface Engineering”, Volume 5, The material information company, 1994.
- [10] Vilar W.D., “Química e Tecnologia dos Poliuretanos”, 2^a Ed., Pronor, Brasil, 1993.
- [11] www.silicones-science.com
- [12] www.wikipédia.org
- [13] www.wacker.com
- [14] A. Ciesielski, “Introduction to Rubber Technology”, Rapra Technology, 2001.
- [15] R. B. Simpson, “Rubber Basics”, Rapra technology, 2002.
- [16] S. K. De; J. R. White, “Rubber technologist’s Handbook”, Rapra technology, 2001.

- [17] André Colas, Jim Curtis, “Silicon Biomaterials: History and Chemistry & Medical Applications of Silicones”, 2nd Edition, Dow Corning Corporation, USA, 2005.
- [18] N. Nakajima, “Science and practice of Rubber Mixing (The)”, Rapra Technology, 2000.
- [19] Luís Veiga Cunha, “Desenho Técnico”, décima terceira edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, pp. 30-33, 2003.
- [20] Sérgio Da Cruz, “Moldes de injeção”, 2^a edição, Hemus SA, Brasil, 2002.
- [21] Thomas Childs, Katsuhiro Maekawa, Toshiyuki Obikawa, Yasuo Yamane, “Metal Machining – Theory and Applications”, Arnold Publishers, UK, 2000.
- [22] Revista “O Molde”; “Fabricação de objectos por camadas – LOM – INEGI – CETECOFF”; pp. 18-19; Ano 12; Nº 39; Março – 1999.
- [23] Fernando Jorge Lino; Braga, Fernando Jorge Sousa; São Simão, Manuel; Neto, Rui Jorge de lemos; Duarte, Teresa Margarida Guerra Pereira; “Protoclick – Prototipagem Rápida”; editado por Protoclick; Fevereiro 2001.
- [24] António Osório, “Projecto Mobilizador RNPR – Rede Nacional de Prototipagem Rápida – Que resultados?”, O Molde – Revista da Associação Nacional da Indústria de Moldes – Ano 13 – nº45, pp. 14, 2000.
- [25] José Camacho, “Estereolitografia (SL) – ITEC – UETA”, O Molde – Revista da Associação Nacional da Indústria de Moldes, Ano 12 – nº39, pp. 9-10, Março, 1999.
- [26] Ronald L. Hollis, “Better be Running! – Tools to drive design success”, CLSI, Atlanta, USA., 2007.
- [27] F. Jorge Lino, Pedro V. Vasconcelos, Rui J. Neto, “Indirect Rapid Tooling with Aluminium and Milled Fibre Reinforced Resins”, ICIT 2005, 5th International Conference on Industrial Tools, Velenje, Celje, Eslovénia, April 12th-15th, 2005.
- [28] F. Jorge Lino, Rui J. Neto, Ricardo Paiva, Ana Moreira, “Rapid Prototyping and Rapid Tooling in Product Development of Ceramic Components”, Materials Science Forum, Advanced Materials Forum II, Vol. 455-456, TTT Publications, Proceedings of the II International Materials Symposium, April 14-16 2003, Caparica, Portugal, Edited by Rodrigo Martins, Elvira Fortunato, Isabel Ferreira and Carlos Dias, pp. 835-838, 2004.

- [29] F. Jorge Lino, Pedro V. Vasconcelos, Rui J. L. Neto and R. Paiva, “Stereolithography, the Front Edge of Rapid Prototyping”, paper presented at Materiais 2007, FEUP, Porto, Portugal, 1-4 April 2007, submitted to Trans Tech Publications, April 2007.
- [30] F. Jorge Lino, “Processo de Fabrico rápido de ferramentas (Rapid Tooling)”, Apontamentos para a disciplina de Mestrado em Engenharia Mecânica da FEUP “Fabrico Rápido de Moldes e Outras Ferramentas” DEMEGI/INEGI (CETECOFF), Porto, Janeiro 1999. Revisto Abril 2000.
- [31] F. Doreau, C. Chaput e T. Chartier, “Stereolithography for Manufacturing Ceramic Parts”, Advanced Engineering Materials, N°8, pp. 493-496 (2000).
- [32] Jerry M. Fischer, “Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage”, Plastics Design Library, USA, 2003.
- [33] Krolikowski A., “Geometric Dimensioning and Tolerancing”, Delmar Learning, Clifton Park, N. Y. 1997.
- [34] J. M. S. Morais, “Desenho técnico Básico”, Porto Editora, 1990.
- [35] www.hrtrains.com
- [36] “Fluid Resistance Guide”, 2005, Dow Corning Corporation.