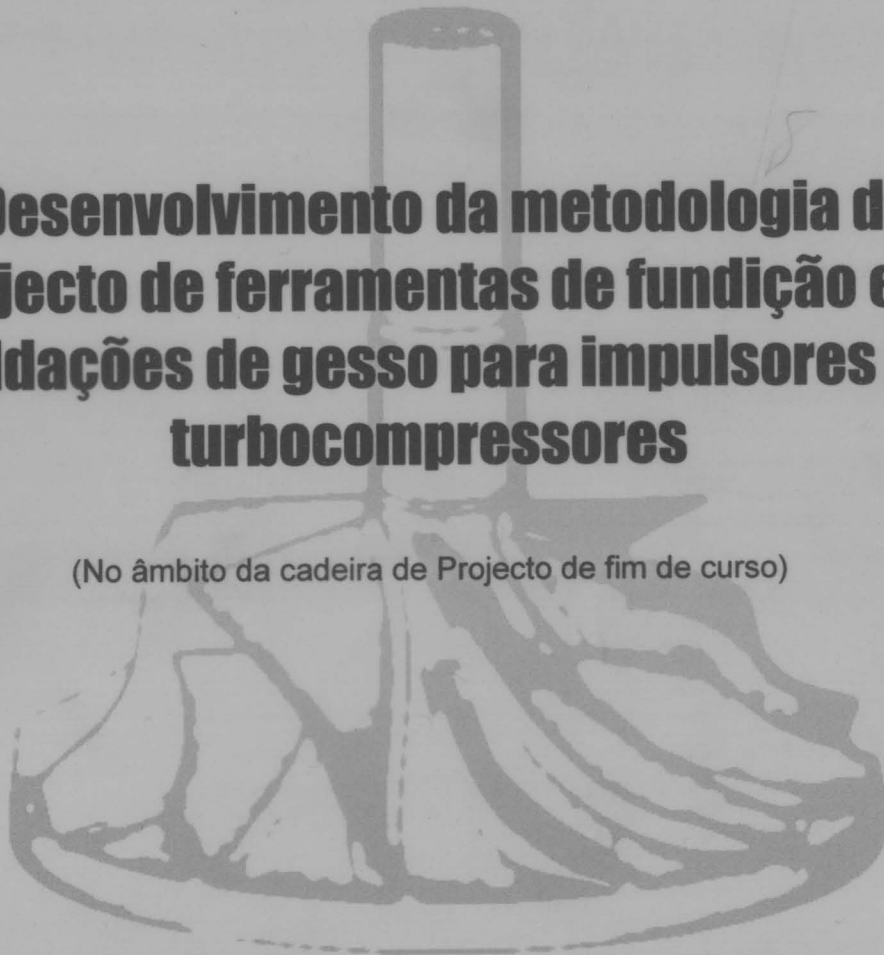


Desenvolvimento da metodologia de projecto de ferramentas de fundição em moldações de gesso para impulsores de turbocompressores

(No âmbito da cadeira de Projecto de fim de curso)



Elaborado por:
Bruno Miguel Matos Alves

Orientado por:
Eng.º Rui Jorge de Lemos Neto

Supervisionado por:
Eng.º António Monteiro Batista
Eng.º José Duarte Marafona

621(047.3)
LEM 2003/ALVb

621(047.3)/LEM 2003 / ALV &

Universidade do Porto Faculdade de Engenharia Biblioteca //
Nº <u>88356</u>
CDU _____
Data <u>20 / 4 / 2004</u>



Agradecimentos

Desde já quero expressar a minha gratidão para com o Prodep III, que disponibilizou apoio financeiro para me ajudar nas despesas durante o tempo estágio.

Agradeço desde já a toda a equipa do INEGI, que me acolheu de uma forma exemplar, nomeadamente:

- O Eng.º Rui Neto, pela amizade, ajuda, apoio e oportunidade que me confiou tornando possível o desenvolvimento deste projecto;
- O Eng.º Bártolo Paiva, pela amizade, auxílio e pelos conhecimentos que me concedeu durante a realização do projecto;
- O Eng.º Pedro Ala, pela amizade, ajuda, orientação e troca de conhecimento para comigo;
- O Eng.º Ricardo Paiva, pela amizade e fornecimento de conhecimentos técnicos;
- O Sr. Sertório Lares, pela amizade e disponibilidade em ajudar e partilhar os seus conhecimentos sempre que lhe foi solicitado;
- O Eng.º Rui Félix, pela amizade e ajuda e partilha de informação a nível de desenho de ferramentas.
- O Sr. Fernando Moreira, o Sr. Nuno Azevedo, a Sr.ª Maria do Carmo, o Eng.º Rui Félix, Sr.ª Armanda Teixeira e o Sr. Pedro Ferreira, pela amizade, simpatia e ajuda durante o decorrer deste projecto;

Agradeço igualmente aos meus Supervisores do Projecto de Fim de Curso, nomeadamente:

- O Eng.º António Monteiro Baptista, pela amizade, simpatia e sua disponibilidade para me ajudar durante todo o decorrer deste projecto;
- O Eng.º José Duarte Marafona, pela amizade, simpatia, ajuda e disponibilidade para o desenvolvimento deste projecto;



Agradeço também toda a equipa de trabalho da empresa M.J.Amaral, pelo modo como me recebeu nas suas instalações, e pela forma como me ajudaram na resolução de problemas relacionados com o fabrico de ferramentas.



Índice

1 Introdução	pág. 7
2 Pesquisa bibliográfica	pág. 13
2.1 Fundição em moldações de gesso	pág. 13
2.1.1 Caracterização geral do processo	pág. 13
2.1.2 Tipo de gesso utilizado	pág. 16
2.2 Prototipagem rápida	pág. 19
2.2.1 Fabricação de objectos por camadas – LOM	pág. 19
2.2.2 Processo de estereolitografia	pág. 20
2.2.3 Tecnologias de conversão por fundição a partir de protótipos rápidos	pág. 23
3 Trabalho experimental	pág. 25
3.1 Ferramentas de fundição	pág. 25
3.1.1 Modelo original ou “Master”	pág. 25
3.1.2 Placas molde e caixas de moldação	pág. 28
3.1.2.1 Ferramentas exploratórias para impulsores	pág. 28
3.1.2.2 Ferramentas em alumínio/resina para impulsores	pág. 30
3.1.2.2.1 Concepção de uma estrutura rígida para os impulsores em silicone	pág. 35
3.1.2.3 Ferramenta em resina/resina para impulsores	pág. 41
3.1.2.2 Ferramenta em alumínio/resina	
3.1.2.3 Ferramenta em resina/resina	
3.1.2.4 Ferramentas em alumínio/cobre (níquel)	pág. 46
3.1.2.5 Ferramenta para o revestimento da placa de molde	pág. 50
3.1.2.6 Estudo de uma nova disposição para os impulsores na placa molde	pág. 54



7 Bibliografia

pág. 110

8 Anexos

pág. 112



1 Introdução

Os motores de automóveis mais recentes, particularmente os motores 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.

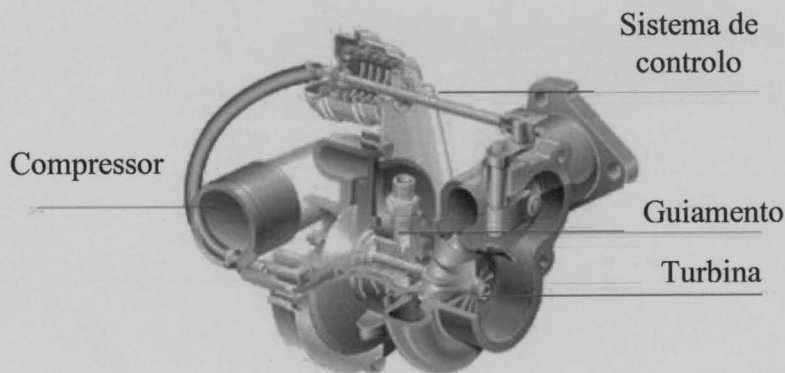


Figura 1. 1 - Turbocompressor em corte.

Um turbocompressor para motor de automóvel basicamente é constituído por 2 volutas, uma para a turbina que recebe os gases quentes do escape e outra para impulsor que vai comprimir o ar de admissão. A turbina e compressor estão solidários através de um veio com lubrificação sob pressão [i1].

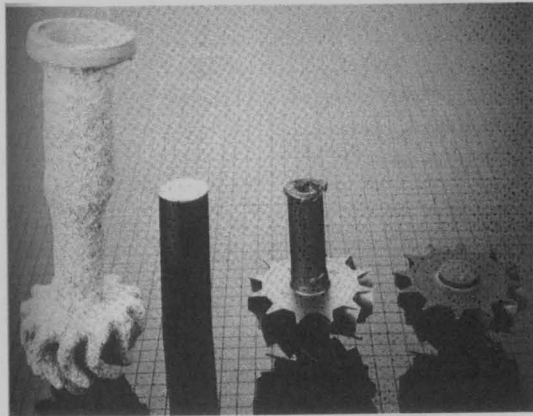


Figura 1. 2 - Turbinas obtidas pelo processo de cera perdida.

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 podem ser fabricados em ligas de alumínio de alta resistência por fundição de precisão. Como a geometria dos impulsores mais recentes é extremamente complexa, figura 1.3, sendo 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 é muito elevado. De facto o valor comercial de um impulsor de $\varnothing 40 - 60$ mm não passa de 2-3€.

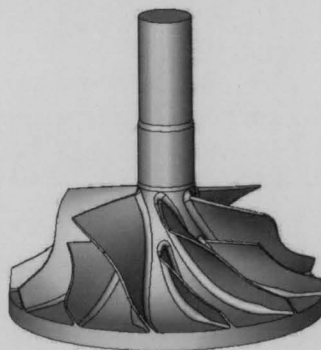
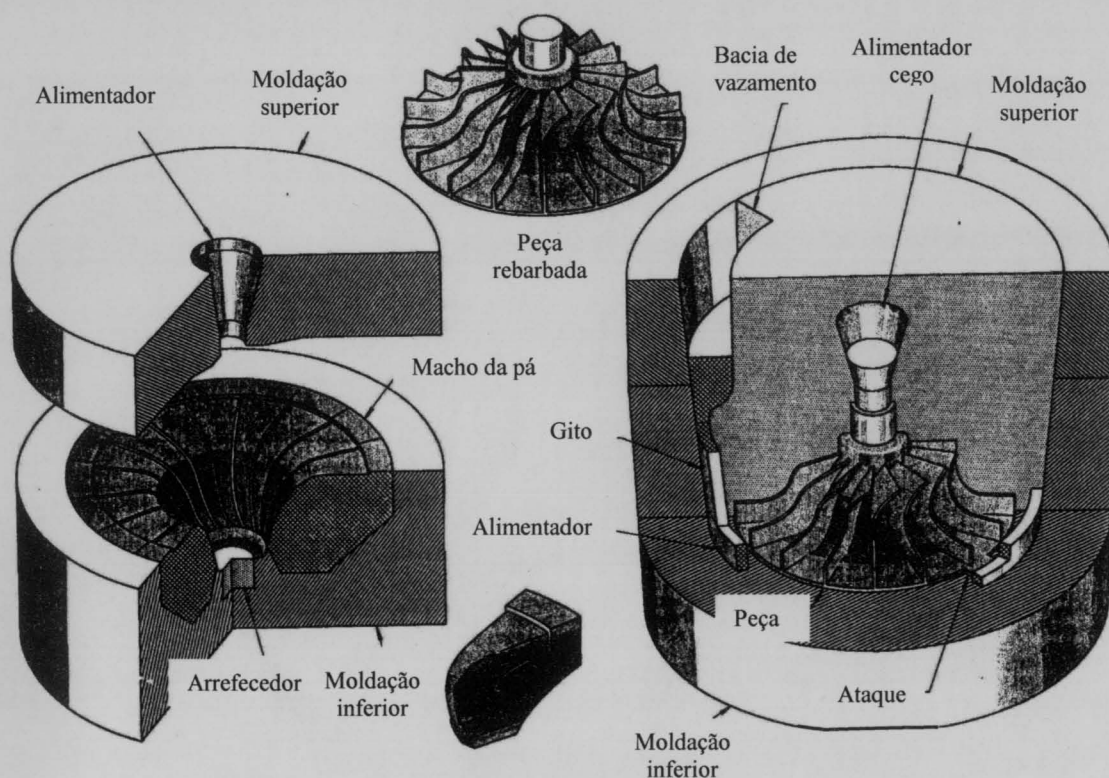


Figura 1. 3. - Modelo em CAD 3D de um impulsor

Assim sendo, 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 [i1]. Deste modo se se usarem elastómeros suficientemente elásticos e suficientemente resistentes à degradação por fluência, pode-se garantir impulsores com tolerâncias dimensionais no estado bruto de vazamento de $\pm 0.3\text{mm}$. É frequentemente referido na literatura que o processo para obtenção destes impulsores é o processo das moldações em gesso. Na figura 1.4 podem observar-se algumas figuras e esquemas ilustrativos destes processos [ASM 1990].



**Figura 1. 4 - Métodos de obtenção de impulsores de grande dimensão
a - original b - moldurado [ASM 1990]**

Só que, como o gesso é um material pouco permeável, para se poder obter espessuras baixas na ordem dos $0.4 - 0.5\text{mm}$ é necessário forçar o enchimento das moldações com auxílio de pressão ar comprimido, processo de baixa pressão, ou por vácuo.

De momento existem indicações que o processo industrial tipicamente utilizado para a produção destas peças é um processo de fundição por vácuo em contragravidade, tal como se pode verificar na figura 1.5, com a parte das



moldações que definem as pás em gesso e com a parte das moldações que definem o topo do impulsor em coquilha de cobre. Desta forma garante-se por uma lado o enchimento de paredes muito finas na moldação de gesso e uma microestrutura muito fina pela acção do arrefecedor em Cobre, o que por seu lado também vai garantir uma maior resistência estática do componente e uma maior resistência à fadiga.

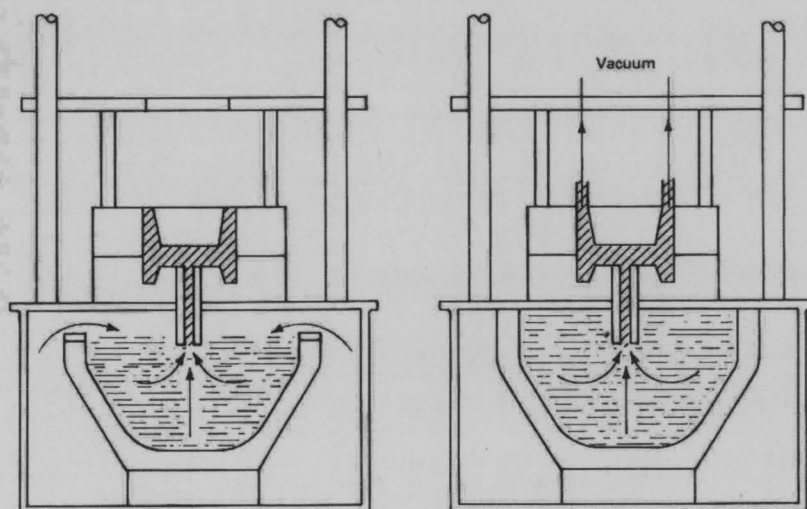


Figura 1.5 - Tipos de vazamentos possíveis para o processo de obtenção de impulsores [ASM 1990].

No caso concreto todo o trabalho foi desenvolvido no sentido de materializar um processo de vazamento por vácuo segundo o esquema apresentado na figura 1.6.

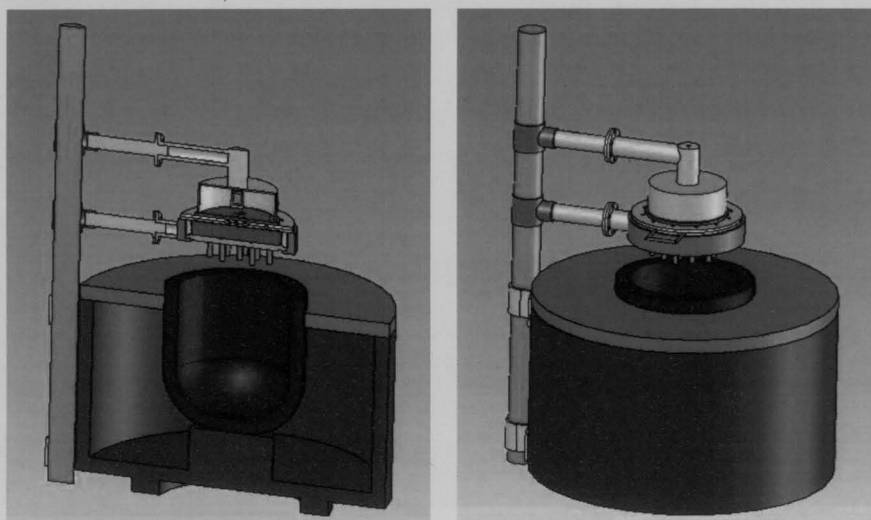


Figura 1. 6 – Esquema proposta do INEGI em modelação de CAD 3D de um posto de vazamento assistido por vácuo.

Para a materialização do processo de fundição esquematizado na figura 8 foi necessário desenvolver um conjunto de metodologias e de processos diferentes, nomeadamente:

1. Obtenção do modelo original do impulsor com as contracções do processo de fundição.
2. Obtenção das placas molde, e das caixas de moldação.
3. Fabrico das moldações.
4. Secagem, calcinação, e pré-aquecimento das moldações.
5. Vazamento das peças.
6. Abate, corte e limpeza.
7. Controlo dimensional.
8. Controlo da qualidade.

De entre todas estas componentes envolvidas na tecnologia de fabrico dos impulsores, este trabalho incide essencialmente sobre os seguintes fases:

Fase 1 – Obtenção do modelo original do impulsor;

Fase 2 - Obtenção das placas molde e das caixas de moldações;



Fase 5 – Vazamento das peças;

Fase 7 – Controlo dimensional com vista à melhoria das ferramentas.



2 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica incide essencialmente sobre duas áreas diferentes que estão relacionadas com o trabalho que foi desenvolvido. Assim é feita uma introdução ao processo de fundição em moldações de gesso, porque todo o projecto de ferramentas e equipamentos se destinam à produção de peças por fundição em moldações de gesso. Por outro lado, como as ferramentas de fabrico de ferramentas, placas molde e caixas de moldação, necessitam do uso de tecnologias de prototipagem rápida, como o processo de LOM e SLA. Também modo foi feita uma pequena pesquisa bibliográfica sobre estes temas e as suas aplicações.

2.1 Fundição em moldações de gesso

2.1.1 Caracterização geral do processo

A fundição em moldações em gesso é um processo especializado para a produção de peças em ligas não ferrosas. Ao contrário da fundição em areia, a fundição em moldações em gesso permite obter peças com uma grande precisão dimensional, superfícies de baixa rugosidade e paredes mais finas.

A obtenção de peças fundidas por moldações em gesso, é um processo mais dispendioso que a moldação em areia. Contudo, as moldações em gesso são apenas usadas quando nenhum dos outros processos consegue responder à precisão e rugosidade necessárias. Turbinas de geometria complexa, componentes electrónicos e moldes para pneus de borracha, são alguns exemplos de peças que são feitas por moldações em gesso.

Resumidamente, as vantagens da fundição em moldações de gesso, são:

- Facilidade de obter peças com paredes finas e de geometria complexa, usando moldes de borracha flexível;
- Possibilidade de obter baixa rugosidade, $Ra \leq 3 \mu m$;



- O rigor dimensional é muito bom, i.e. da ordem de $\pm 25 \mu\text{m}$ para 75 mm.
- Como normalmente os fundidos arrefecem muito lentamente, este processo permite obter paredes finas, i.e. da ordem de 0,6 mm;
- O arrefecimento lento minimiza as deformações e promove uma uniformidade da microestrutura e das propriedades mecânicas;
- Este processo permite o uso de sistemas de arrefecimento, para que se possa controlar os gradientes térmicos das moldações.

As principais desvantagens, são:

- 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;
- Este processo requer muitos mais equipamentos em relação aos outros processos de fundição;
- A permeabilidade das moldações em gesso é muito baixa;
- É necessário que cada fase do processo seja muito bem controlada independentemente, para que haja uma boa reprodutibilidade.

Os moldes das peças a obter são normalmente feitas de metal (ligas de alumínio, bronze ou zinco). Borrachas flexíveis de silicone ou poliuretano são também muito usadas na produção de peças com geometria complexa, sem saídas ou com contrasaídas.

Tendo em conta que os moldes vão estar em contacto com o gesso no estado líquido, não é conveniente que os moldes sejam feitos de madeira, a não ser que sejam impermeabilizados, evitando deste modo a absorção de água.

As caixas de moldação, são normalmente feitas de aço-carbono. Variam no seu tamanho em função do tamanho e do número de peças a obter por moldação.



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 diversos tipos de peças diferentes.

A nível de preparação e de composição da mistura, pode-se dizer que é comum realizar-se misturas de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) comercial 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. 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 [ASM 1990].

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:

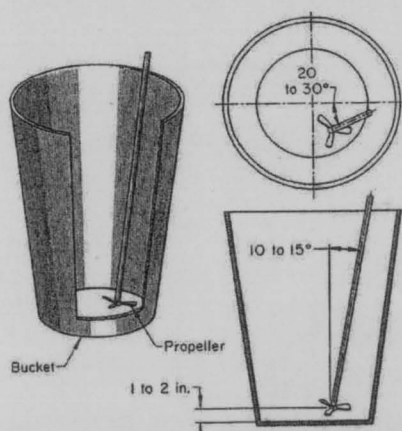


Figura 2. 1 - Dimensão do balde e posição do misturador [ASM 1990].

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 [ASM 1990].

Quanto aos parâmetros relacionados com o vazamento da mistura de gesso na caixa de moldação, convém salientar a importância da criação de canais de saída através da penetração de arames ou tubos no gesso, imediatamente após o seu vazamento na caixa de moldação. Estes canais têm duas funções, uma de permitir o escape de vapor e outros gases de dentro da moldação e a função de desmoldagem entre a caixa de moldação e a própria moldação, através da injeção de ar comprimido para dentro dos canais [ASM 1990].

Em relação à secagem das moldações, é aconselhado 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 [ASM 1990].

Quanto ao modo de vazamento de metal fundido para dentro da moldação, é comum usar-se o processo por contra-gravidade a baixa pressão assistido por vácuo. Ou seja, com a utilização deste processo, temos a entrada do metal em estado líquido na moldação em gesso no sentido ascendente, que é provocado pela pressão existente no forno, quanto ao vácuo, este vai ter como função principal, permitir a extracção do ar, obrigando a que o espaço vazio deixado por ele, seja preenchido por metal, deste modo, garante-se um enchimento completo da peça [ASM, 1990].¹

2.1.2 Tipos de gesso utilizados no processo

Normalmente os gessos utilizados neste processo de fundição, baseiam-se em:

- Gesso estuque, que consiste em sulfato de cálcio semi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) obtido por desidratação do minério à pressão

¹ Texto retirado do livro "ASM Metals Handbook – Forging and casting", 8ª edição, volume 5, 1990.



atmosférica, correspondendo ao gesso mais económico e corrente, gesso β (0,1 €/kg);

- Gesso α desidratado em auto clave de muita mais resistência mecânica que o gesso β e de preço mais elevado (aproximadamente 0,5 €/kg)

Normalmente os gessos de fundição contêm materiais refractários como:

- Sílica;
- Sílicoaluminatos;
- Talco;
- Cimento

Para além disso, no sentido de aumentar a permeabilidade e baixar o custo, existem ainda gessos com agentes espumantes, conhecidos por gessos espuma e gessos com cargas poliméricos, conhecidos por gessos poliméricos. Nestes casos as densidades das moldações, em lugar de atingirem valores normais de 1,5 – 1,6, atingem densidades de 0,3 – 0,5, o que embaratece o processo substancialmente e aumenta dramaticamente a sua permeabilidade, diminuindo no entanto a sua resistência mecânica e obviamente, a sua condutibilidade térmica.



2.2 Prototipagem Rápida

2.2.1 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 térmico 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 descubicagem. No final obtêm-se um paralelepípedo de papel, com a consistência semelhante à da madeira, no interior do qual existe uma ou várias peças.

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 epoxy 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 descobagem 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.

Noutros sectores como os das indústrias de fundição, de ferragens, de torneiras e de construção metalomecânica para o ramo automóvel, o LOM poderá ser muito interessante para a obtenção de protótipos não funcionais das ferramentas protótipo [Neto, 18-19].²

² - Texto de um artigo da revista "O Molde", criado por Eng^o Rui Neto, Ano 12, N^o 39, Março de 1999, da página 18 à 19.



2.2.2 Processo de estereolitografia

A estereolitografia (SL – “Stereolithography”) é o processo de prototipagem rápida mais utilizado e mais antigo [Alves et al., 2001], tendo sido disponibilizado comercialmente em 1989 por intermédio da empresa *3D Systems Inc.* [Camacho, 1999], 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 [Osório, 2000].

Este processo é (à semelhança dos restantes processos de prototipagem rápida) um processo automático de fabrico de objectos pela adição sucessiva de camadas [Alves et al., 2001], baseando-se no princípio da fotopolimerização de uma resina epoxy 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 [Camacho, 1999].

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 [Camacho, 1999].

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 2.2 [Camacho, 1999].

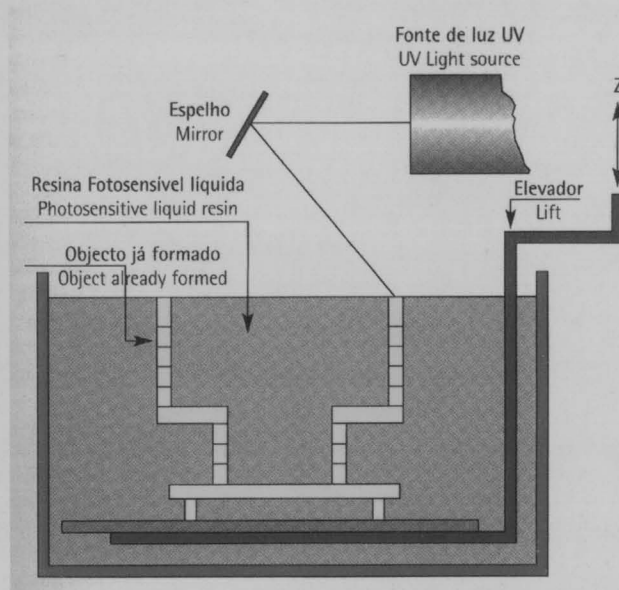


Figura 2. 2 – Esquema de funcionamento do processo de estereolitografia [Camacho 1999].

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 [Alves et al., 2001]. Tais suportes sólidos são gerados automaticamente, recorrendo a software próprio [Camacho, 1999].

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 [Alves et al., 2001].

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 [Alves et al., 2001], o qual passa pela exposição do referido modelo a uma intensa luz ultravioleta de maneira a completar a reacção de polimerização [Camacho, 1999].

Exemplos de modelos de peças em estereolitografia podem ser observados na figura 2.3.

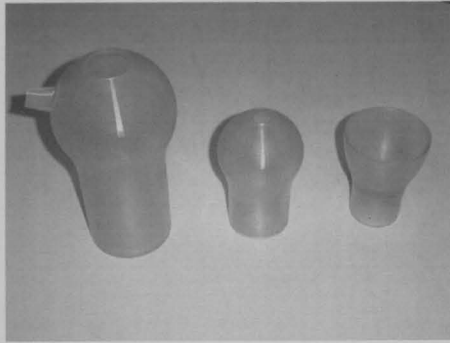


Figura 2.3 - Peças obtidas pelo processo de estereolitografia.

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 [Alves et al., 2001].



2.2.3 Tecnologias de conversão por fundição a partir de protótipos rápidos

As tecnologias de conversão ou modelos perdidos permitem:

- Passar a metal, sob a forma de ferramenta protótipo ou modelo funcional, um modelo não metálico obtido por protótipagem rápida ou por qualquer outro processo;
- Multiplicar o modelo ou produzir a ferramenta um número limitado de vezes;
- Produzir um número limitado de peças (protótipos ou pré-séries).

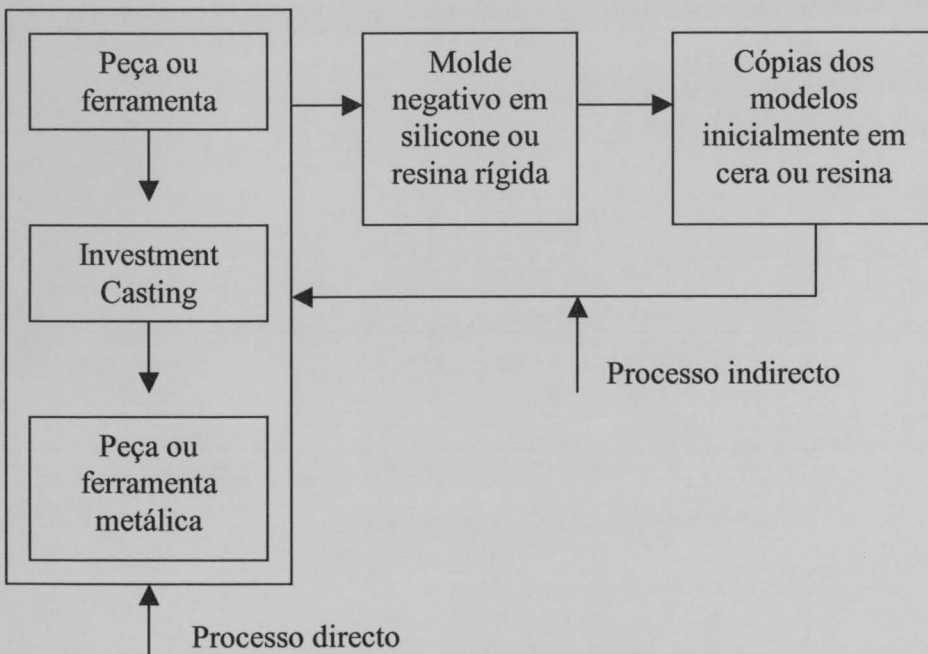


Figura 2. 4 - Esquema de utilização das tecnologias de conversão por fundição com métodos de cera perdidos.

Basicamente existem dois processos que podem ser usados para fazer essa conversão, a directa e a indirecta. No directo o modelo em polímero, normalmente com estrutura interna tipo ninho de abelha (quick Cast ou Skin and Core) é usado como modelo perdido tal como é usada a cera no processo de cera perdida ou “Investment Casting”. Esse modelo pode ser obtido or SL, SLS de preferência em poliestireno, por FDM em cera, ou por LOM em papel. Neste



caso o processo de conversão é tipicamente semelhante ao processo de “Investment Casting” ou Cera Perdida, só que em lugar de descerificação em autoclave, a eliminação do modelo em papel ou plástico é feita até à carbonização deste, seguida da combustão do carbono até à completa transformação em CO₂.

Este processo inclui as seguintes fases:

- Construção de um molde em resina epoxídica ou poliuretano ou num elastómero de silicone, a partir de um modelo obtido por prototipagem rápida ou de uma peça existente;
- Injecção de cera, seleccionada em função das características da peça a obter, utilizando parâmetros diferentes dos que são tradicionais em “Investment Casting”, atendendo ao material do próprio molde;
- Definição e fabricação dos gitos e alimentadores e sua ligação aos modelos (construção do cacho);
- Fabricação da carapaça com recurso a barbotinas de sílica coloidal ou de silicato de etilo;
- Eliminação do modelo por fusão e calcinação;
- Destruição da carapaça, limpeza da peça e corte de gitos e alimentadores [Neto 24-25].³

³ - Texto de um artigo da revista “O Molde”, criado por Eng^o Rui Neto, Ano 12, N^o 39, Março de 1999, da página 24 à 25.



3 Trabalho experimental

3.1 Ferramentas de fundição

3.1.1 Modelo original ou “Master”

Estes modelos normalmente devem ser obtidos por maquinagem de alta velocidade em máquinas de 5 eixos, com ligas de alumínio da mais alta resistência possível, o que normalmente corresponde à utilização de ligas do tipo AA 7075.

Tabela 3. 1 - Descrição de algumas propriedades mecânicas de duas ligas de alumínio.

Composição	Designação	Alongamento (%) (1.6 mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Mod. Elast. (Mpa)	Dureza HB (a)
AlZn5.5MgCu	7075	17	230	72	145
AlMg1SiCu	6061	25	125	69	95

Dada a elevada complexidade geométrica dos impulsores só é possível maquinar estes modelos com centros de maquinagem de 5 eixos. A alta velocidade é imprescindível pela necessidade de exercer baixíssimas forças de corte sobre as peças, usando incrementos muito baixos para assim garantir uma precisão de 0,02-0,03mm, um acabamento final quase polido e uma grande vivacidade nas esquinas, sendo intolerável qualquer acabamento por lixagem ou polimento pelo carácter aleatório que apresenta para estas complexidades geométricas. O grande perigo destas maquinagens é a elevada fragilidade das pás dos impulsores cuja espessura é muito baixa (0,5 mm) e que com esforços de maquinagem facilmente empenam. A necessidade de ligas de alumínio de alta resistência é também justificada pelos factos apontados. Idealmente as superfícies cilíndricas devem ser torneadas e não maquinadas por interpolação. Note-se que para além da precisão da maquinagem, a falta de precisão pode afectar o futuro equilíbrio dinâmico dos impulsores que irão rodar a mais de 40.000 rpm, os quais se tiverem defeitos provocarão ruídos e vibrações



indesejáveis. Ainda idealmente durante a maquinação dever-se-ia fazer um recozido de distensão de tensões e usar com matéria-prima varão extrudido por causa da assimetria das tensões residuais existentes nos semi-produtos paralelepípedicos.

Nos modelos usados neste trabalho, fornecidos pela Zollern e maquiados numa empresa Suíça fabricante de ferramentas para relojoaria, o controlo dimensional permitiu chegar aos valores apresentados na tabela 3.2, onde é possível verificar-se que a amplitude das cotas maquiadas e da ordem de $\pm 0,015\text{mm}$. Num modelo adquirido pelo Inegi numa empresa Portuguesa os valores são apresentados na tabela 3.3, onde se verifica uma precisão de $+0,058$ a $-0,015$.

Tabela 3. 2 - Dimensões das alturas das pás de um impulsor maquiado numa empresa Suíça.

<i>Original maquiado na Suíça</i>	
<i>Pá</i>	<i>a (mm)</i>
1	15,430
2	15,422
3	15,420
4	15,415
5	15,422
6	15,418
Média	15,421 $\pm 0,015$

Tabela 3. 3 - Dimensões das alturas das pás de um impulsor maquiado numa empresa Portuguesa.

<i>Original maquiado em Portugal</i>	
<i>Pá</i>	<i>a (mm)</i>
1	15,058
2	15,009
3	14,985
4	15,000
5	15,027
6	15,042
Média	15,020 $\pm 0,073$

No sentido de testar a possibilidade de usar como “masters” modelos obtidos por PR, fabricaram-se no Inegi por estereolitografia de alta definição com camadas de 0,025mm, alguns impulsores que apresentaram precisões de



+0,0349 +0,317, mas o efeito de escada na base das pás dos impulsores não permite a sua utilização como masters.

A elevada precisão que se exige a estas madres baseia-se no facto de ser necessário efectuar uma série de reversões para obter as placas molde em silicone e de cada reversão estar sujeita a uma contracção inevitável, pelo que no total são expectáveis contracções globais de 2,5% ou mais. Quanto maior for a imprecisão de partida maior é a probabilidade de a peça final não respeitar as exigências do utilizador, que no caso da altura das pás é de $\pm 0,3\text{mm}$ em 15 mm. De um modo geral as reversões são as seguintes e as contracções inevitáveis teóricas das ligas de alumínio de 1,2% (minga ou contracção linear do alumínio) [i1].

Modelo →

- Negativo elastómero de Poliuretano →
- Positivo silicone →
- Negativo em resina carregada →
- Positivo em silicone →
- Negativo em gesso (moldação) →
- Peça fundida

ou

Modelo →

- Negativo em cobre ou níquel →
- Positivo silicone →
- Negativo em gesso (moldação) →
- Peça fundida

Ficando assim apenas 1,3% para o total das restantes contracções.

Como 2,5% de 15mm são 0,375mm e existe a probabilidade de introduzir desvios em cada reprodução, apenas um desvio de $0,375/2 = 0,1875\text{mm}$ é admissível no total das 5 reproduções inevitáveis, já que o resto é a contracção da liga de alumínio.



3.1.2 Placas molde e caixas de moldação

Este trabalho tem como objectivo a futura implementação de uma unidade para produzir num turno, 1.000.000 de peças ano, usando placas molde de 12 ou 19 impressões, o que representa a necessidade de produzir em aproximadamente 220 dias úteis, 5000 peças dia, ou seja 400 moldações por dia, o que equivale a 50 moldações por hora. Com um tempo médio de desmoldagem das moldações em gesso de 30 minutos serão necessárias para estas produções cerca de 30 placas molde de cada referência, o que equivale a 360 modelos em silicone, 30 placas molde e 30 caixas de moldação.

Neste enquadramento neste processo de desenvolvimento todas as metodologias foram desenvolvidas a pensar na futura realidade industrial, embora obviamente com as características laboratoriais correspondentes ao desenvolvimento.

Nesta perspectiva, neste trabalho desenvolveram-se e fabricaram-se 3 tipos diferentes de ferramentas para reprodução dos impulsores, correspondentes a 3 metodologias diferentes a saber:

1. Obtenção de modelos em silicone a partir de negativos em silicone.
2. Obtenção de modelos em silicone a partir de negativos em resina epoxídica ou de poliuretano carregados com pó de alumínio.
3. Obtenção de modelos em silicone a partir de negativos em metal, cobre electrolítico e níquel electroless sobre modelo original.

3.1.2.1 Ferramentas exploratórias para impulsores

No processo 1 a metodologia 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 como desmoldante vaselina.
4. Obtenção de 8 reproduções individuais e construção por colagem de negativo de placa molde em resina rígida de poliuretano carregado com pó alumínio sem utilização de desmoldante.
5. Vazamento de 3 placas molde integralmente em silicone para vazamento de moldações em gesso.

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 porque a sua distribuição é difícil nestas geometrias complexas, cria espessuras inadequadas e introduz portanto irregularidades superficiais inadmissíveis nas cópias.
- O primeira 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 conclui-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 dimensões, planeza das placas e perpendicularidade entre as bases e os eixos dos modelos nas placas molde.



3.1.2.2 Ferramentas em alumínio/resina para impulsores

Tendo em conta as conclusões tiradas do primeiro processo, no 2º processo tinha que se conseguir encontrar um elastómero que fosse auto desmoldante em relação ao modelo original de alumínio e auto desmoldante em relação ao silicone. Após uma série de testes, os materiais foram identificados comercialmente (tabela 3.4) e a metodologia desenvolvida foi a seguinte:

1. Maquinagem CNC de alta velocidade em máquina de 5 eixos do original.
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.

A ferramenta que se desenvolveu para materializar esta metodologia antes do início deste trabalho foi fabricada por maquinagem em liga de alumínio 7075 para ser leve e facilmente manipulável e simultaneamente ser algo resistente a eventuais choques e maus tratos durante a manipulação nesta fase de desenvolvimento, particularmente nas superfícies tolerânciadas e de referencia que asseguram a perpendicularidade e as cotas das base do impulsor. O esquema da ferramenta desenvolvida pode observar-se na figura 3.1 e o seu aspecto final na figura 3.2.

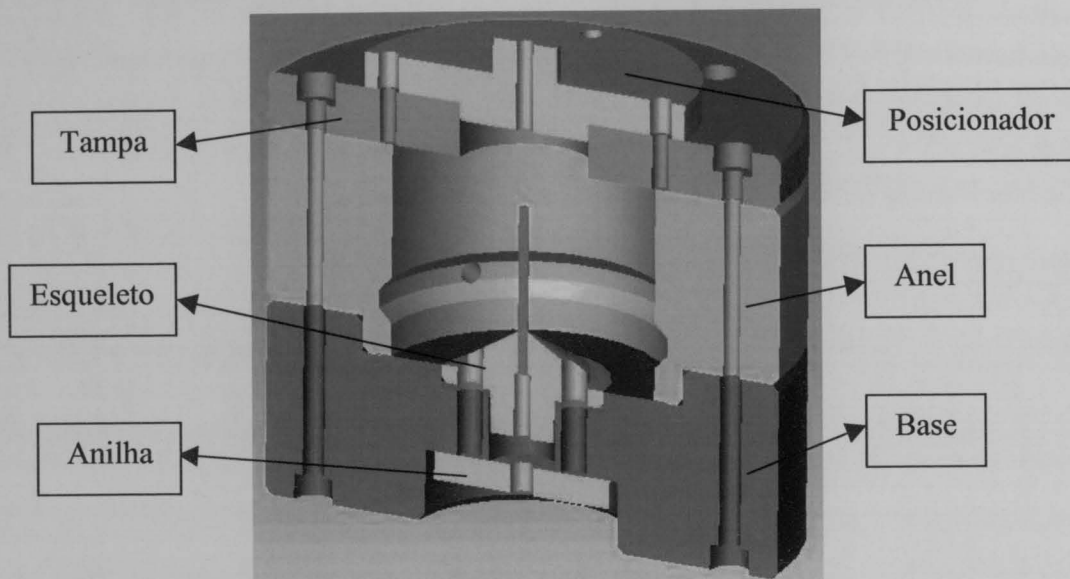


Figura 3. 1 - Ferramenta para fabricação de impulsores em CAD 3D.



Figura 3. 2 - Aspecto final da ferramenta em trabalho.

Esta ferramenta permitiu ultrapassar uma boa parte dos problemas existentes com as ferramentas anteriores, mas ainda se continuaram a verificar os seguintes problemas:

Fazendo todas as reversões a frio, i.e. a 20°C, o tempo que demora a ter um conjunto de 20 modelos para as placas molde desde que se possui o original é extremamente elevado e incompatível com a introdução em fabrico no futuro processo industrial, sendo:



1. 1 dia a 20°C para a reversão do original para o 1º negativo em borracha de poliuretano
2. 1 dia a 20°C para a reversão do 1º negativo em borracha de poliuretano para o 1º positivo de silicone
3. 1 dia a 20°C para a reversão o 1º positivo de silicone para o negativo de resina carregada
4. 1X 20 dias a 20°C para vazar e curar os 20 modelos das placas molde ou 1X300 dias para as placas molde necessárias para o processo industrial

A utilização do 1º negativo em borracha de poliuretano não é industrialmente possível porque as borrachas de poliuretano não são estáveis dimensionalmente ao longo do tempo necessário para produzir 200-300 modelos em silicone, sendo esta instabilidade extraordinariamente diminuída para o caso das resinas rígidas carregadas com pó de alumínio.

Como estes tempos são perfeitamente exagerados para a fabricação das placas molde, no futuro existem 3 alternativas:

- Ou o fabrico dos modelos para as placas moldes tem que ser feito a quente para se poder fazer 3 a 4 modelos em silicone por dia
- Ou existem 3-4 negativos e por dia poder-se-ão fazer 3-4 modelos
- Ou existem 3-4 negativos e as conversões fazem-se a quente, o que pode dar origem a 16 modelos por dia.

No entanto, devido à quase inevitável necessidade de podermos ter que usar conversões a quente, existem uma série de problemas que se tem que contornar devido ao facto de termos uma ferramenta em alumínio com partes em elastómero e mais tarde em resina rígida. Para uma melhor compreensão desta



problemática deve observar-se da tabela 3.4 que contem os coeficientes de dilatação dos vários materiais utilizados no fabrico da ferramenta.

Tabela 3. 4 - Apresentação das propriedades dos materiais usados durante a realização deste projecto

Material	Designação	Coefficiente de dilatação $\times 10^{-6} \text{m}/^\circ\text{C}$	Mod. De elasticidade	Tensão de ruptura	Dureza	Viscosidade	Contração
Elastomero poliuretano	Rencast 6073	150			38 Shore A	266,2 poise	
Elastomero silicone	Dow corning Silastic J	300		900 Psi	56 Shore A	900 poise	0,1
Elastomero silicone	Dow corning Silastic rtv	300			38 Shore A	1900 poise	0,1
Elastomero silicone	Dow corning silastic E	300		800 Psi	37 Shore A	500 poise	0,1
Cobre puro electrolítico		17	115 Gpa	235 Mpa	26 - 60 HRB		
Níquel	270	7,4	207 Gpa	345 Mpa	30 HRB		
Resina poliuretano	F19		1200 - 4100 Mpa	41 - 50 Mpa	72 - 79 Shore D1		0,07
Resina poliuretano	F50	50	5200 - 9700 Mpa	60 - 80 Mpa	83 - 86 Shore D1		0,07
Resina estereolitografia	SI40						
Resina estereolitografia	SI10						

Para a obtenção do primeiro negativo, como o alumínio tem uma dilatação de $25 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ e a borracha de poliuretano $150 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, para não existir desde logo uma contração assinalável a cura tem que ser a frio, caso contrário o negativo como não deforma o alumínio ficaria mais pequeno $125 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, o que a 60°C em 15mm daria uma contração de $125 \times 40 \times 0,015 = 75 \mu\text{m}$ na altura das pás e de $250 \mu\text{m}$ para o diâmetro, o que é um valor muito elevado atendendo à precisão de $\pm 0,3\text{mm}$ no fundido metálico.

Para a obtenção do 1º Positivo em silicone, como o silicone tem um coeficiente de dilatação de $300 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ e o poliuretano de $150 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, a cura



também não pode ser a quente, senão o silicone iria ficar mais pequeno 100 μm na altura das pás e 300 μm no diâmetro.

Para a obtenção da resina rígida podia-se realizar a cura a quente o que teoricamente daria origem a um negativo maior do que o positivo já que o silicone dilata muito mais do que a resina rígida. Assim com a cura da resina a 60 °C ganharíamos $(300-50) \cdot 40 \cdot 0,015$ na altura das pás, ou seja 150 μm . No entanto a ligação da interface alumínio/ silicone consolidada a 20 °C poderia sair prejudicada e o problema não é linear porque os impulsores são basicamente constituídos por um esqueleto em alumínio com uma pequena pele de 1,5mm e apenas a integralidade das pás com contrasaídas em silicone.

Para obter os modelos para montar nas placas molde o processo de cura deveria ser a quente para possibilitar produzir um grande número de modelos por unidade de tempo, mas esse procedimento dá origem a modelos com grandes contracções porque o silicone cura a quente e contrai muito mais do que a resina de poliuretano ao arrefecer, mais propriamente a diferença de coeficientes de dilatação á a seguinte:

- Resina carregada 50 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$
- Silicone 300 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$
- Diferença 250 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$

- Diferença nos 15mm das pás $250 \times 0,015 \times 40 = 150 \mu\text{m}$
- Diferença nos 50mm da base $250 \times 0,050 \times 40 = 500 \mu\text{m}$

Com a ferramenta em alumínio este problema agrava-se porque a 60°C a resina ao dilatar 50 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ e portanto mais 25 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ do que o alumínio que dilata 25 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, como é menos rígida que o alumínio vai originar uma compressão no diâmetro de 25 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, o que em 50 mm equivale a 50 μm , ficando o diâmetro do impulsor diminuído em 50 μm . Por seu lado as pás saem mais altas o que até podia ser benéfico. Estes factos levaram-nos a optar por construir uma segunda ferramenta em resina carregada.



3.1.2.2.1 Concepção de uma estrutura rígida para os impulsores em silicone

O suporte, ou “esqueleto” dos impulsores em silicone, tem as seguintes funções principais:

- Aumentar a rigidez dos impulsores a silicone;
- Controlar possíveis expansões e contracções da resina e silicone;
- Facilitar o enchimento da própria turbina em silicone.

Após a realização de medições aos impulsores de silicone e suas comparações, verificou-se que estes contraíam durante a cura que se realiza para a sua obtenção. Concluiu-se que estas variações dimensionais eram significativas e para fazer face a este problema, sugeriu-se a modificação do suporte das turbinas de modo a que a quantidade de silicone fosse a menor possível, minimizando a contracção durante o processo. Como se pode ver a seguir o esqueleto inicialmente desenvolvido tem uma estrutura muito mais delgada que a estrutura bruta do impulsor, existindo uma espessura média de silicone entre 3 – 5 mm.

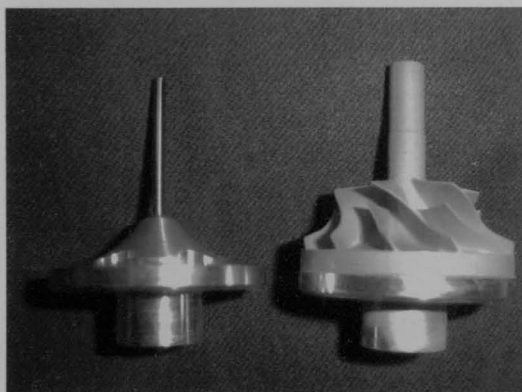


Figura 3.3 - Comparação da estrutura do esqueleto antigo com a do impulsor final.

Acordou-se que a realização da nova estrutura iria, em termos dimensionais, ter paredes médias em silicone com espessuras na ordem de 1 –



1.5 mm. Em termos globais esta alteração originou uma diminuição da quantidade de silicone de aproximadamente 5 gramas.

A imagem seguinte, apresenta o “offset” efectuado ao contorno da estrutura bruta do impulsor (assinalado a vermelho), em alguns casos que necessitam de uma atenção especial, para a melhor compreensão da sua geometria:

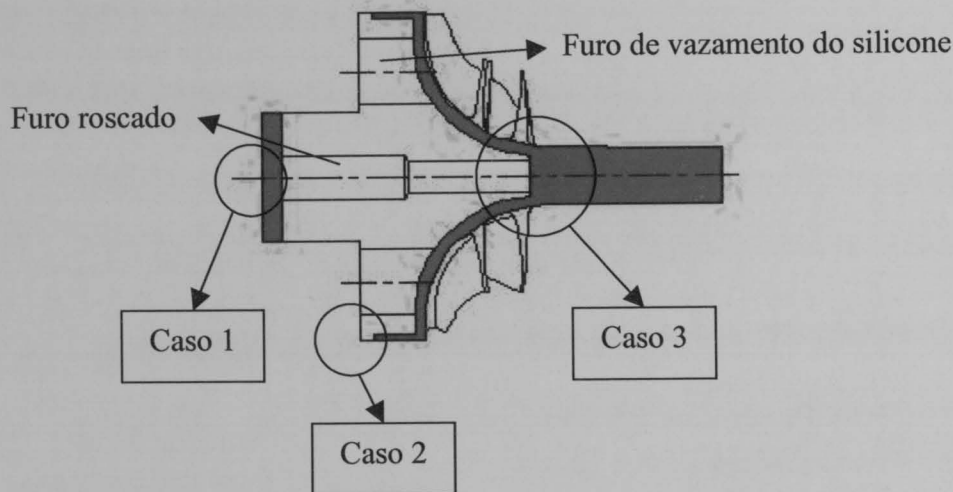


Figura 3. 4 - Estruturação do suporte para impulsores em silicone.

- **Caso 1** – Esta modificação foi realizada porque o tamanho dos furos da placa de moldação que foi concebida, tem apenas uma altura de 13 mm, logo o comprimento da saliência em questão está limitado a um valor dimensional igual ou menor a 13 mm, mas tendo em atenção que é necessário haver espaço suficiente para introduzir um furo roscado. Por outro lado esta parte da peça serve também de ajuda ao guiamento ou ajustamento, na ferramenta de enchimento de silicone e na placa de moldação do gesso, respectivamente, e para a realização desta função não se justifica um comprimento tão grande. Ainda podemos ter em conta o factor económico, já que o alumínio usado para esta estrutura é relativamente dispendioso (liga AA-7075T6). Optou-se então por dimensionar esta parte da peça com 12 mm de comprimento.



- **Caso 2** – Esta zona foi criada a pensar em duas necessidades, uma é a de ajustamento da parede lateral do veio com o furo da placa de moldação, em que para isso, é mais fiável o ajustamento realizado por alumínio pelo menos por um dos lados. A outra necessidade é a de colocar uma parede de silicone, de modo a assegurar que quando a turbina de silicone for encaixada na placa de moldação, vai existir silicone na zona em questão, para garantir contacto com o gesso.

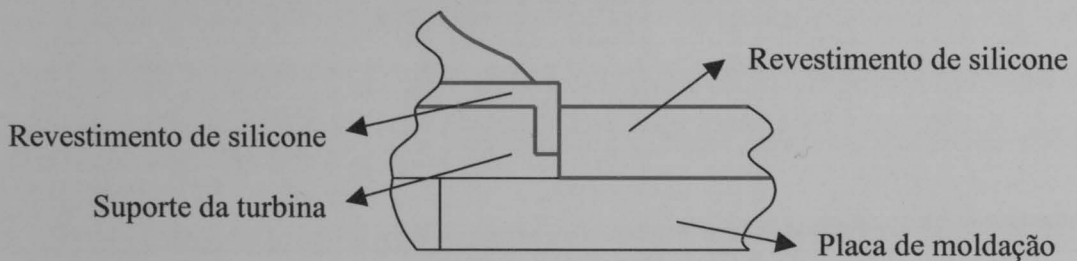


Figura 3. 5 - Pormenor do encaixe dos impulsores de silicone na placa molde.

- **Caso 3** – Este caso serve apenas para alertar, que o espaço vai ser preenchido no centro, por meio de um extractor normalizado de 5mm de diâmetro, ficando apenas uma parede fina envolvente de silicone com 2 mm de espessura. O facto do extractor ser de 5 mm, deve-se à relação entre este valor e o diâmetro da cabeça do extractor, já que o extractor vai ser montado pelo furo roscado que à partida será um M8, logo a cabeça do extractor tem de ter menos de 7 mm, visto que o diâmetro interior do furo vai ter um valor próximo.

Como se pode verificar, na peça descrita anteriormente, tal como foi abordado no caso nº 3, essa peça por si só não enche por completo a massividade do impulsor, por isso se faz referência ao uso de um extractor de 5 mm de diâmetro.

Para simplificação e qualidade desta ferramenta, decidiu-se usar um extractor normalizado. Esta opção, fez com que se realizasse um estudo para uma melhor combinação entre diâmetros do extractor (cabeça e corpo), e os diâmetros do esqueleto (furo roscado e furo para corpo da cavilha).



Partindo dos nossos objectivos principais, que se baseiam em diminuir o mais possível a quantidade de silicone e tendo em conta, tal como foi dito anteriormente, que a espessura de silicone deveria rondar os 1 e 1,5 mm, foi-se discutindo o uso de determinadas dimensões para o esqueleto do tarugo, daí retiraram-se as seguintes conclusões:

- O diâmetro do “tarugo” do impulsor tem cerca de 8,5 mm, se for para cumprir a espessura de 1 mm, temos de ter um extractor com cerca de 6.5 mm, o que implica uma cabeça com cerca de 8 mm de diâmetro, o que implicava um furo roscado no esqueleto, maior que um M8. Esta opção não é muito desejada, visto não se justificar um furo roscado tão grande.

- Se analisarmos a hipótese de usar uma espessura de 1,5 mm, era necessário o uso de um extractor de 5,5 mm, o que implicava um diâmetro na cabeça de 7 mm, o que mais uma vez nos levava ao uso de um furo roscado com excessivo tamanho, já que um furo M8 possui um diâmetro interior de cerca de 6,8 mm, provando-se assim uma opção incompatível.

- Depois de analisados os casos anteriores, deparamo-nos com a necessidade do não cumprimento da espessura de silicone estabelecida anteriormente, já que o único caso disponível, de modo a poder aplicar um furo roscado M8, será o extractor com diâmetro de 5 mm, que contém uma cabeça com 6,5 mm, permitindo a existência de folga necessária entre esta e o furo roscado.

Para que se garanta as mínimas variações dimensionais e ao mesmo tempo um guiamento correcto na placa molde, é de extrema importância garantir uma correcta tolerância de ajustamento.

Das superfícies que têm a função de encaixe, salienta-se a superfície lateral, localizada na base (superfície de maior diâmetro), isto porque, esta é a superfície que vai garantir o encaixe na placa de moldação (em específico no furo em silicone), e para este facto temos de garantir que não vai existir uma folga



excessiva ou de maneira nenhuma aperto, daí a necessidade de definir uma tolerância de ajustamento.

Após a realização de algumas propostas para o valor ideal da tolerância, tais como o IT6 e IT7, decidiu-se que para este caso, seria justificável o IT8, já que temos de ter em consideração que a ligação é feita entre alumínio e silicone, caso em que é mais difícil obter rigor dimensional, além disto tem de se ter em consideração o factor económico, ou seja, quanto mais apertada a tolerância, maior será o seu custo. Quanto ao ajustamento, inicialmente propus o uso de um h8 ou um g8, mas devido aos factores já referidos anteriormente, seria arriscado o seu uso, já que podemos ter folgas na placa de moldação, até aproximadamente $300 \mu\text{m}$, evitando assim a entrada de gesso na zona de folga, devido à sua consistência. Decidiu-se então que, o ajustamento mais fiável seria um f8, valor que tem de ter em consideração com a aplicação de uma tolerância de ajustamento no furo da placa de moldação H8.

Temos então o seguinte efeito:

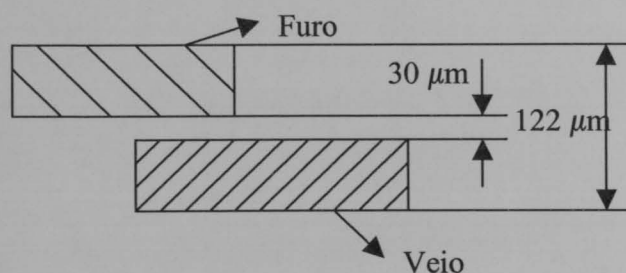


Figura 3. 6 - Efeito da aplicação das tolerâncias especificadas.

Como se pode verificar pela imagem, a folga é menor ou igual a $122 \mu\text{m}$, não pondo em risco a geometria da placa de gesso, e ao mesmo tendo garantimos que não existe aperto, já que existe uma folga mínima de $30 \mu\text{m}$.

Rugosidade:

Apesar de este não ser uma assunto muito crítico para esta peça, achei que seria razoável obter um estado de superfície específico na superfície onde se realizou o ajustamento, tendo em conta que esta, pertence a uma zona de



encaixe e sobretudo é realizado num furo de silicone. É normal que queiramos que este encaixe se realize de forma suave, de modo a que a rugosidade não danifique principalmente as arestas na zona do furo da placa de moldação.

Após a análise do facto anterior, decidi aplicar um estado de superfície N8, que representa um $Ra = 3,2$.

Após a análise pormenorizada realizada anteriormente, em que se tentou abordar pelo menos aqueles temas que exigiram um maior estudo e houve maior dificuldade na tomada de decisão, obteve-se uma peça com o seguinte aspecto:

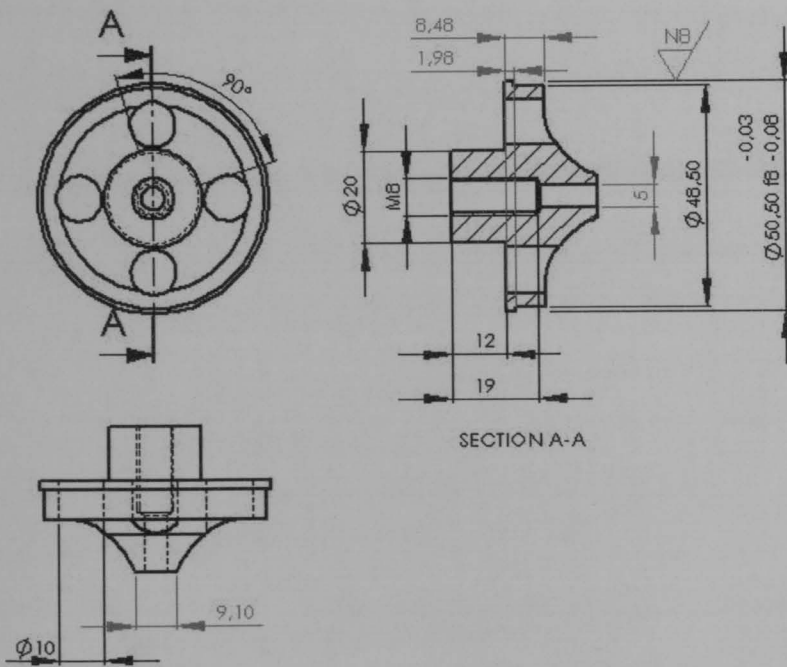


Figura 3. 7 - Desenho 2D do esqueleto modelado.

De seguida podemos visualizar a peça em pormenor, em 3D:

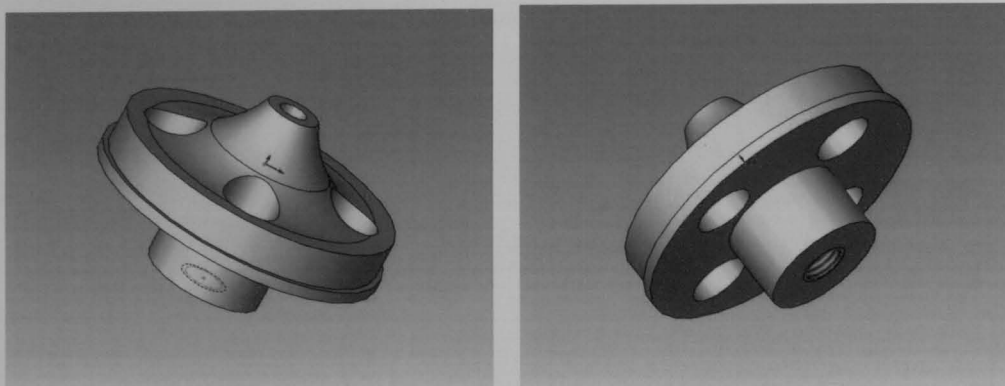


Figura 3. 8 - Modelo em CAD 3D do esqueleto.

3.1.2.3 Ferramenta em resina/resina para impulsores

Como já foi referido, esta ferramenta tem como objectivo evitar a compressão do alumínio sobre a resina do inserto que reproduz os impulsores, tal como a figura 3.9 documenta:

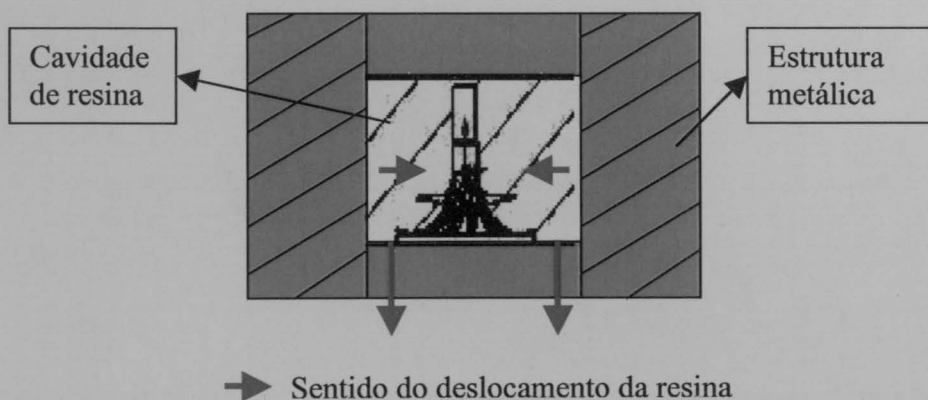


Figura 3. 9 - Indicação do sentido da deformação da resina dentro da estrutura metálica.

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

- a) Através do processo de maquinagem de resina;
- b) Através de um processo de vazamento de resina.



Como já foi explicado, futuramente no processo industrial vai haver necessidade de aquisição de várias ferramentas iguais, o que significa que se as ferramentas forem maquinadas, o custo de fabricação vai ser extremamente elevado. Sendo assim, optou-se por adquirir essas mesmas ferramentas por vazamento de resina epoxídica carregada com pós de alumínio, sobre três ferramentas (com a geometria inversa da base, do anel e da tampa). Deste modo, apenas necessitamos de três ferramentas maquinadas, que por sua vez permite obter um elevado número de ferramentas para obtenção de impulsores em silicone a baixo custo.

Cada uma da ferramenta vai ser constituída por uma parte superior, uma parte média e uma parte inferior, fixadas entre si através de um sistema de aparafusamento. O guiamento e as cavidades para futura passagem de parafusos pelas peças são realizados por guias normalizados.



Figura 3. 10 - Aspecto final da ferramenta em resina para o fabrico de silicones.

Com o fim de ajudar a desmoldação, decidiu-se que todas as paredes verticais tivessem um pequeno ângulo de saída, assim como as partes superiores e as partes inferiores, contêm furos roscados M6 colocados de forma homogénea, para que através de um parafuso se possa fazer pressão na resina e no anel, permitindo uma separação de toda ferramenta de forma suave.

Tal como se pode ver pela imagem seguinte, para a realização da base em resina é necessário possuir ferramenta apresentada.

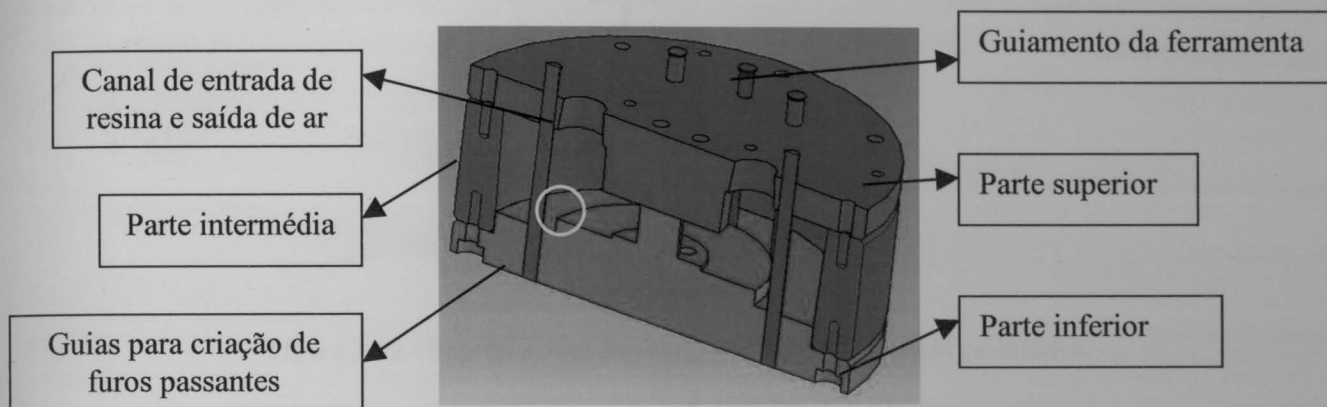


Figura 3. 11 - imagem em corte da ferramenta de concepção da base em resina.

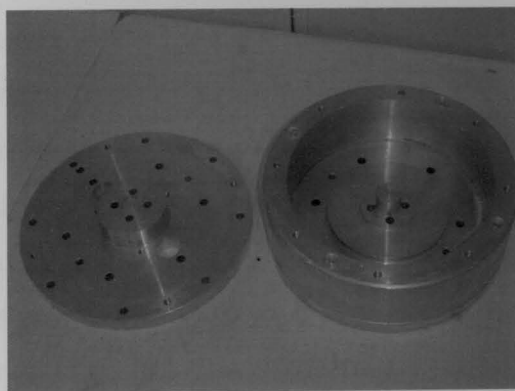


Figura 3. 12 - Aspecto final da ferramenta em alumínio para a fabricação da base em resina.

Todas as zonas que se destinam a realizar encaixe, ou possuem folga ou encontram-se devidamente tolerânciadas.

Como as peças obtidas em resina vão ter de encaixar umas com as outras, e tratando-se de uma ferramenta que exige um rigor dimensional considerável, decidiu-se que seria importante garantir o paralelismo entre as duas superfícies assinaladas a amarelo na imagem anterior. Para o efeito nos respectivos desenhos 2D da ferramenta, efectuou-se a indicação do tolerânciamento geométrico:

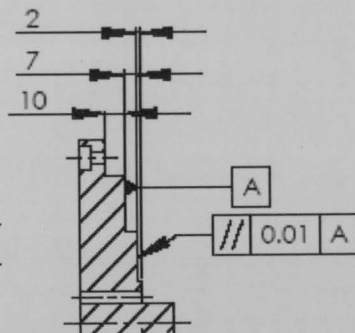


Figura 3.13 - Representação da cotação de tolerânciamento geométrico.

Em relação à ferramenta para a fabricação do anel, esta segue a mesma estrutura da ferramenta para fabricação da base, contendo uma parte superior, outra do meio e outra inferior. Tem um sistema de guiamento é idêntico ao apresentado anteriormente.

Uma particularidade desta ferramenta, é o facto de ser necessário criar zonas roscadas (ou uma caixa roscada) no interior da resina, mas de forma que sejam resistentes. Este factor obriga a que a zona roscada seja feita de um material metálico resistente. Assim sendo, surgiu a ideia de posicionar nos locais desejados uma “porca” com um rasgo maquinado em seu redor ou então umas buchas de latão expansíveis, para que deste modo ao ser envolvido pela resina, fique aprisionado.

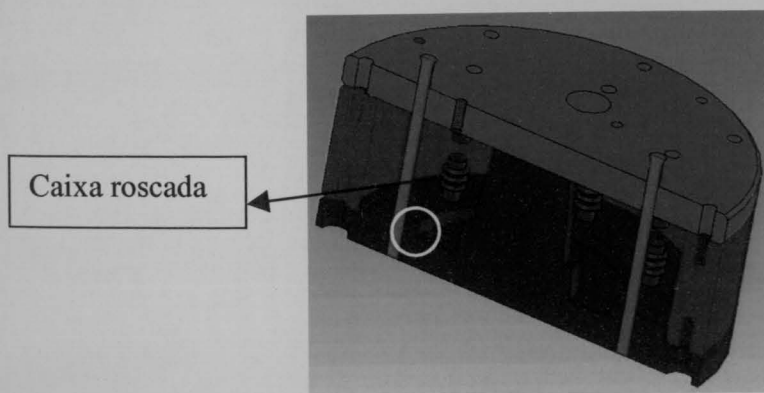


Figura 3.14 - Imagem da ferramenta de concepção do anel em resina.

Mais uma vez o paralelismo tem de ser garantido, mas agora nas superfícies assinaladas na imagem anterior.



Em relação à tampa obtida por uma ferramenta específica, esta além da função a que se destina, vai possuir também a função de posicionador, evitando deste modo a fabricação de mais uma ferramenta.

A nível de estrutura, esta ferramenta vai ser idêntica, possuindo uma parte superior, um meio e uma parte inferior. Contém um sistema de fixação por parafusos, um sistema de guiamento e um sistema de extracção da resina, tal como se pode verificar na imagem seguinte:

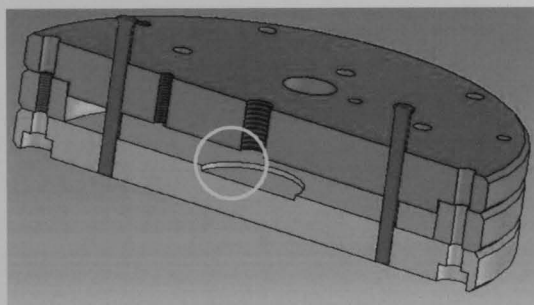


Figura 3. 15 - Imagem da ferramenta de concepção da tampa em resina.

Para o correcto funcionamento da ferramenta, é necessário colocar uma porca M12 com 12 mm de altura, com um ou mais rasgos maquinados radialmente, para que deste modo a resina vazada envolva a porca e a aprisione. O posicionamento da porca antes de ser vazada a resina é realizado por um parafuso, que por sua vez passa pelo furo roscado localizado no centro da parte superior da ferramenta.



A imagem seguinte ilustra bem o resultado da ferramenta concebida, após ter realizado a respectiva cura.

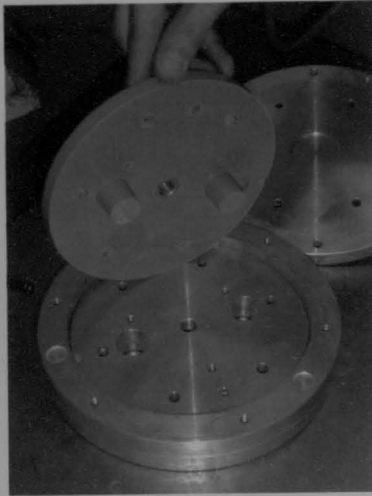


Figura 3. 16 - Extracção de uma tampa em resina de dentro da sua ferramenta após a realização da respectiva cura.

Pode-se concluir que estas ferramentas, apesar de terem funcionado relativamente bem, foi necessário efectuar ajustes a nível de alturas das ferramentas. Outro pormenor que merece uma correcção, é a existência de folgas em alguns dos encaixes entre bases e anéis.

3.1.2.4 Ferramentas em alumínio/cobre (níquel)

Como já foi referido os primeiros impulsores em silicone, foram obtidos a partir de moldes de resina inseridos em estruturas de alumínio ou também em resina. Este processo, apesar de funcional, têm demonstrado falta de rigor a nível dimensional, devido em grande parte às expansões e contracções que a resina sofre durante as sucessivas “curas” dos impulsores em silicone. Deste modo, decidiu-se estudar e desenvolver o processo de obtenção de impulsores em silicone a partir do negativo em cobre, com o objectivo de minimizar as variações dimensionais. Deste modo dá-se início ao processo 2, que ainda se encontra numa fase embrionária do desenvolvimento e onde a sua metodologia é a seguinte:



- a) Modelo obtido por HSM de 5 eixos.
- b) Revestimento com cobre electrolítico ácido ou níquel "electroless".
- c) Dissolução do original de alumínio em solução de soda cáustica (NaOH).



Figura 3.17 - Cavidade em cobre de um impulsor.

Durante a realização do estudo referido anteriormente, um dos assuntos de maior complexidade foi a deposição da camada de cobre. Nas primeiras experiências utilizaram-se algumas das melhores peças obtidas por nós em fundição, evitando assim usar impulsores maquinados, que como se sabe têm um custo extremamente elevado.

Um dos problemas de maior relevância neste processo, foi o facto de o revestimento de cobre não ser efectuado de um modo homogéneo. Assim verificou-se que as zonas de geometria mais complexa, nomeadamente a zona de fronteira entre as pás e a zona de massividade do impulsor, quase não se encontravam revestidas. As zonas mencionadas encontram-se indicadas na figura 3.18:

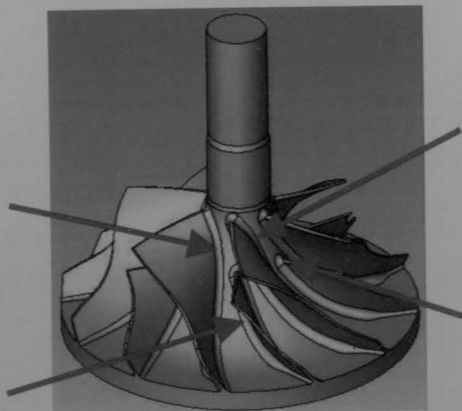


Figura 3.18 - Indicação das zonas propícias a mau revestimento de cobre.



A falta de revestimento em certas zonas da peça foi razão suficiente para que estas possuíssem uma baixa resistência, assim seria fácil a sua deformação ou mesmo ruptura.

A obtenção de um revestimento não homogéneo deve-se ao facto de o fluxo de iões de cobre direccionar para a periferia, uma vez que aqui a intensidade da corrente é maior. Deste modo obtêm-se zonas na parte exterior com grande massividade de cobre, contrariamente, as zonas mais próximas do núcleo onde apenas se depositam uma fina camada do mesmo material.

Na tentativa de minimizar o problema referido, 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 3.19.

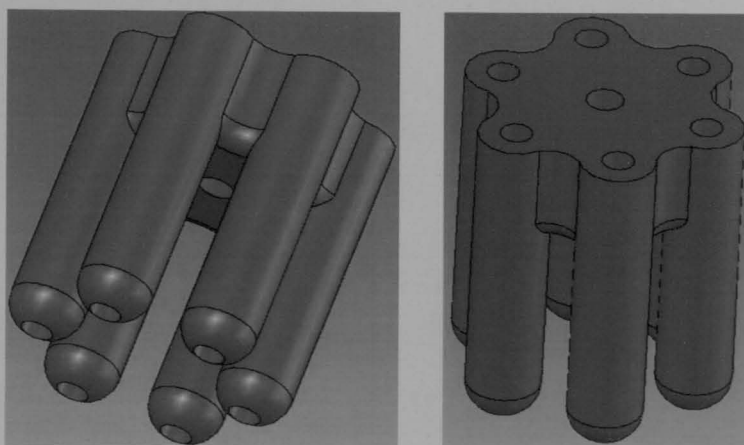


Figura 3. 19 - Estrutura para suporte dos eléctrodos.

Após a modelação desta peça e tendo em consideração que ela não necessita de muita resistência, decidiu-se realizar este componente em estereolitografia. O material usado para obtenção de peças por este processo (resina epoxídica) não permite o depósito electrolítico, na sua superfície.

Tal como se pode verificar, existem seis tubos na parte exterior da estrutura referida anteriormente, 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 roscado. Por este varão vai ser introduzido a estrutura, através do seu furo central, juntamente com os eléctrodos. Por fim todo este conjunto é apertado a partir de uma porca, na posição pretendida e os eléctrodos de titânio ligados em paralelo por cabo de cobre flexível.

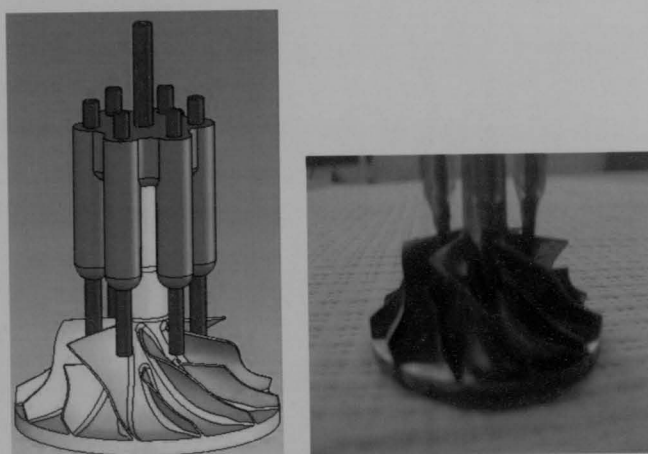


Figura 3. 20 - Aspecto final do conjunto em esquema e respectivo aspecto real.

Após a realização do revestimento de cobre sobre o impulsor de alumínio, é necessário retirar o alumínio, para que assim se obtenha a cavidade do negativo em cobre.

A eliminação do alumínio (Al) foi realizada através da acção de uma solução de “Soda Caustica” ($\text{NaOH} \rightarrow$ Hidróxido de sódio) a uma temperatura controlada. Depois da dissolução da “Soda caustica” na água e da colocação do impulsor de alumínio revestido na solução, verifica-se que os iões de hidróxido se ligam aos iões de alumínio, formando-se o hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Por outras palavras, como o alumínio reage com o hidróxido de sódio e o cobre não, conseguimos remover o alumínio, obtendo-se uma carapaça em cobre, com a geometria pretendida.

Com o decorrer de algumas experiências, observamos que quanto mais alta a temperatura da reacção, maiores as deformações nas paredes mais finas do revestimento. Mas mesmo a baixas temperaturas, em certas ocasiões ocorreram pequenas deformações. Face a este problema, decidiu-se que este tipo de processo, exige uma camada de revestimento muito espessa, de forma a evitarmos qualquer tipo de deformação.



A nível de conclusões pouco se pode adiantar, tendo em conta que este assunto encontra-se em fase de estudo.

3.1.2.5 Ferramenta para o revestimento da placa de molde

Pelos motivos já apontados para os impulsores, tanto as placas molde como as próprias caixas de moldação devem ter superfícies de contacto com o gesso da moldação em elastómero de silicone para a superfície ser auto desmoldável e uma estrutura metálica rígida para garantir a rigidez e a planeza do conjunto. Neste contexto foi necessário projectar ferramentas para revestir a silicone, quer as placas molde em alumínio, quer a caixa de moldação, também em alumínio.

Face à necessidade de melhoramento de algumas das ferramentas existentes no processo de obtenção dos impulsores de alumínio, foi necessário idealizar e construir uma nova ferramenta, com a função de revestir a placa molde de alumínio a silicone.

A primeira ferramenta produzida para a criação deste revestimento, era constituída por elevado número de componentes, que realizavam uma sequência de processos, que como é previsível torna o método lento e pouco rigoroso. Basicamente, a utilização da primeira ferramenta podia ser dividida em 4 processos:

1ª Etapa

Placa molde de Alumínio →

2ª Etapa

→ Neg. em borracha de PU e resina PU →

3ª etapa

→ Maq. da placa de Alumínio →

4ª etapa





→ Revestimento com silicone da placa maquinada

Ambos são realizados na mesma ferramenta mas em etapas diferentes:

2ª Etapa - Criação do negativo da placa molde, em resina elastomérica:

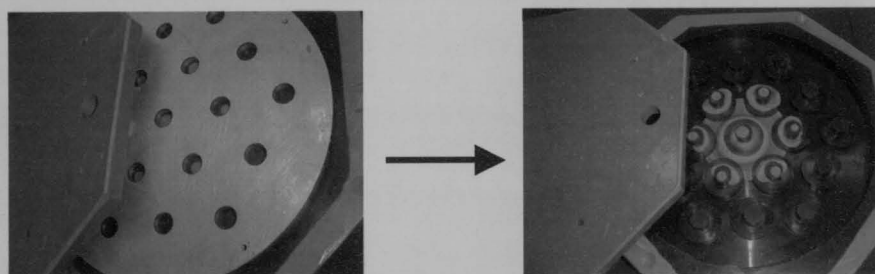


Figura 3. 21 - Ilustração da ferramenta de revestimento de silicone para a placa de molde.

Para a criação do negativo em PU, é aparafusada uma placa de alumínio com as dimensões finais desejadas para a placa de molde (compreende o conjunto de alumínio mais silicone), de seguida é fechada a ferramenta (tampa e base) e vazada pelos orifícios da tampa, visíveis nas imagens, a resina no estado líquido. Depois de solidificada a resina, é retirada a placa de alumínio, obtendo-se assim a cavidade com a forma desejada.

4ª Etapa – Depois de termos a ferramenta concluída, tivemos que introduzir a parte da placa de moldação feita em alumínio, que apenas diferencia da placa usada para fazer o molde de resina na altura dos furos e diâmetro exterior, isto porque, como queremos que parte da placa de moldação seja feita em silicone, a diferença de dimensões entre as duas placas referidas, equivale ao espaço que vai ser preenchido pelo silicone, que neste caso ronda os 4 mm.

A placa de molde é introduzida da mesma maneira que é introduzida a placa que serviu para moldar a resina, ou seja, é aparafusada na tampa da ferramenta.

Como conclusão deste processo, pode-se dizer que não é muito rigoroso, já que ao trabalharmos com resinas e silicones, estamos logo à partida, a sofrer



ligeiras variações dimensionais devidas a expansões e contracções. Ainda se pode salientar a dificuldade e complexidade de todo o processo, facto que torna o fabrico da placa de molde lenta e dispendiosa.

Tendo em conta problemas anteriores, decidiu-se conceber uma ferramenta mais prática e rigorosa. Para isso pensou-se no seguinte:

- Realizar uma ferramenta integralmente em alumínio, evitando assim grandes variações dimensionais;
- Realizar uma ferramenta que possibilitasse o correcto guiamento na montagem;
- Realizar uma ferramenta que seja tão económico quanto possível, em termos de fabricação e com flexibilidade suficiente para servir para mais do que uma referencia de impulsores;

Com base nestes pressupostos, numa primeira fase, idealizou-se uma nova ferramenta, em alumínio, trocando a zona antigamente fabricada em resina, por pinos metálicos que encaixam na base e em que dois deles possuem um “tarugo” para cima, de modo a permitir o guiamento e não rotação da placa de moldação, os restantes pinos são lisos de modo a encostarem na tampa da ferramenta, tal como se pode ver na figura 3.22:

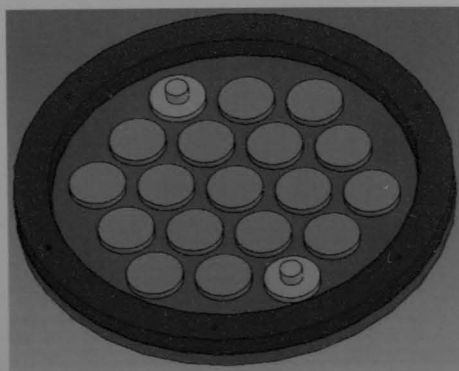


Figura 3. 22 - Disposição dos pinos na base da ferramenta.



Para evitar arestas redondas na placa molde, foi necessário optar por dividir a ferramenta em três zonas: a base, a tampa e o anel central. Por fim obteve-se o seguinte:

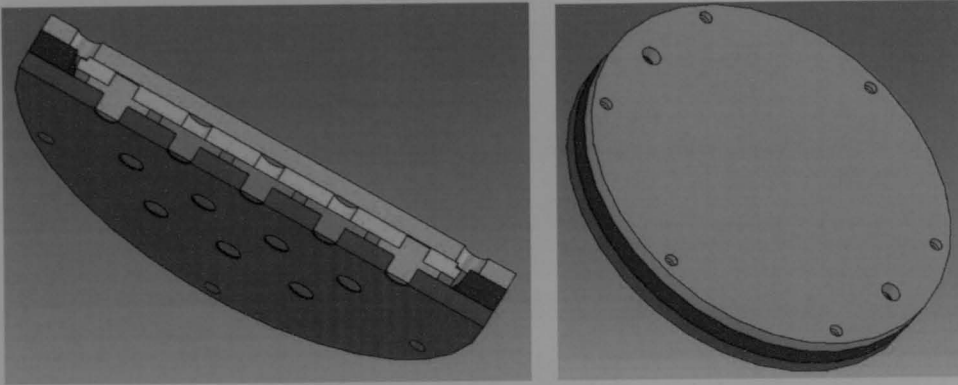


Figura 3. 23 - Aspecto final da ferramenta de revestimento da placa de moldação.

A amarelo – Placa de moldação a revestir;

A Branco – Tampa da ferramenta;

A azul – Base da ferramenta;

A roxo – Anel central;

A rosa – pinos lisos;

A cinzento – Pinos de guiamento.

Após um estudo mais profundo da fabricação desta ferramenta, verificou-se que o modo como esta é fixada, poderia não ser suficiente para garantir o seu correcto funcionamento. Esta observação foi fundamentada, no possível risco de penetração de silicone nas superfícies de contacto dos pinos com a base e a tampa, tendo em consideração que normalmente as peças como os pinos, que são maquinadas, possuem entre si mesmas pequenas variações dimensionais, logo mesmo que as superfícies de contacto da base e da tampa estejam perfeitamente planas, vai existir zonas onde a folga permanece. Para fazer face a este possível problema decidiu-se abrir furos roscados nos pinos, na zona que encaixa na placa base, sendo estes posteriormente apertados, com o auxílio de um parafuso M6 e uma anilha, realizada especialmente para este caso.



Para uma análise mais aprofundada, recomenda-se a visualização dos desenhos 2D, de toda a ferramenta.

Após a construção e funcionamento desta ferramenta, pode-se concluir que em parte se conseguiu atingir os objectivos a que nos propusemos, apesar de se ter verificado que está em falta um sistema de guiamento mais eficaz do que o existente. A nível dimensional está em curso uma análise de verificação.

3.1.2.6 Estudo de uma nova disposição para os impulsores na placa de moldação

No início da investigação deste projecto, optou-se pela criação de moldações em gesso com dezanove impulsores e com a sua distribuição pela moldação, do modo como tem vindo a ser apresentada. Esta opção não se baseou em qualquer tipo de estudo, servindo apenas como ponto de partida, tendo apenas em conta a necessidade de maximizar o número de peças vazadas. Este facto, mostrou mais tarde ter sido causador de baixa resistência nas moldações de gesso, que combinado com a força de compressão a que fica sujeita durante o vazamento, de modo a evitar a fuga de material pelo topo da moldação, foi razão suficiente para provocar fissuras e consequentemente obtenção de impulsores em alumínio defeituosos.

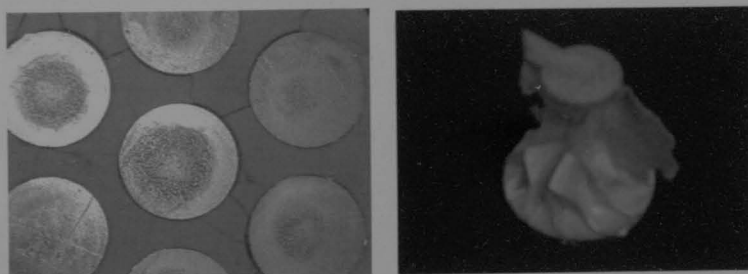


Figura 3. 24 - Imagens demonstrativas das fissuras provocadas pela força de aperto durante o vazamento.



Visto esta conclusão, é obvio que numa situação destas é necessário aumentar a área de resistência, e para isso é inevitável reduzir tanto o número de impulsores por moldação como encontrar uma disposição optimizada para eles. De modo a encontrar uma solução viável, decidiu-se realizar um estudo que abordasse os temas referidos anteriormente, tal como se pode ver de seguida:

Escolha do número de impulsores – Este assunto, teve apenas em conta a quantidade mínima de impulsores que num vazamento é conveniente obter. Por necessidade de produção, numa moldação de gesso e para este tipo de impulsores, é aconselhável o uso de doze impulsores ou um valor aproximado. Como a redução no número de impulsores é considerável, à partida a secção de resistência vai ser maior, dependendo este da distribuição dos mesmos na moldação.

Disposição dos impulsores na moldação de gesso – Este caso de estudo, mereceu uma atenção especial, já que existe inúmeras combinações possíveis, e cada uma com problemas específicos.

Para esta análise, tem-se em conta algumas considerações, tais como:

1. O diâmetro da placa mantém-se o mesmo;
2. A distância entre impulsores, deve ser a maior possível;
3. Evitar a disposição de impulsores em linhas rectas e principalmente, com passagem pelo centro da moldação;
4. Não colocar os impulsores muito juntos à periferia da moldação, evitando-se assim zonas fracas;

Após um levantamento de hipóteses possíveis, (tendo em conta o número de impulsores a distribuir por diâmetros, pela ordem do mais pequeno para o maior) surgiram sugestões como por exemplo, “5 – 7”, “4 – 8”, “4 – 4 – 4” e “6 – 6”. De todas optou-se pela escolha daquelas que seriam mais credíveis, tais como:

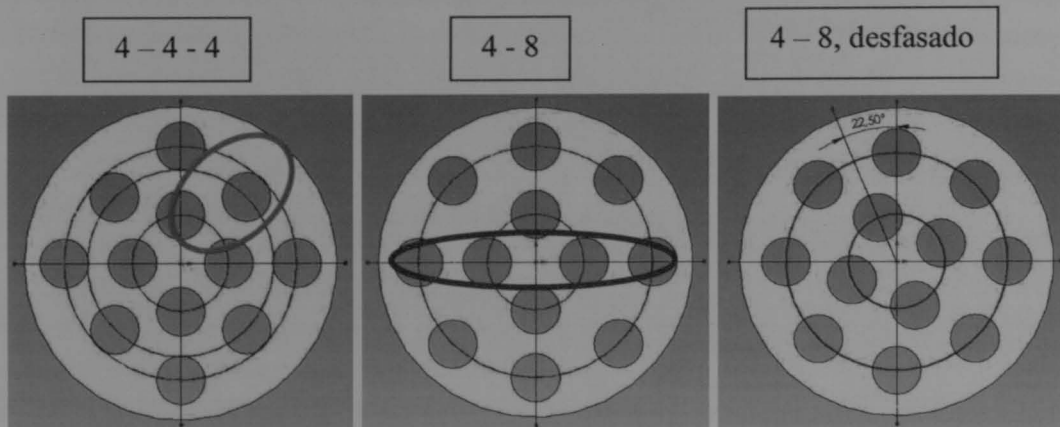


Figura 3. 25 a), b) e c)- Esquema demonstrativo das possíveis distribuições de impulsores.

Apesar desta selecção era necessário escolher apenas uma delas, e sobretudo aquela que melhor concretizasse as nossas exigências.

O exemplo da *figura 3.25 a)* (4 – 4 – 4), apesar de estar distribuída de uma forma homogénea, contém certas inconvenientes, tais como, o posicionamento de impulsores em linha recta com passagem pelo centro da moldação, o que pode proporcionar áreas de secção bastante frágeis, pondo em risco a resistência da mesma. Outro factor, muito prejudicial é o facto de existir uma proximidade dos impulsores com centro na circunferência do meio, para com os impulsores com centro na circunferência de menor diâmetro, originando zonas desnecessárias de grande massividade na periferia da moldação, ao contrário do seu núcleo, que fica mais frágil (esta zona em questão, encontra-se assinalada a vermelho).

O exemplo da *figura 3.25 b)* (4 – 8), apresenta uma solução alternativa à apresentada anteriormente, diminuindo a zona de grande massividade, que consequentemente aumenta a resistência no núcleo. Apesar desta alteração, continua a existir o posicionamento de impulsores em linha recta, com o agravamento da passagem dessa recta pelo centro da moldação (caso assinalado a azul), o que continua a pôr em causa a sua rigidez.

Com a sucessiva análise de todos estes factores, surgiu a ideia de realizar um desfasamento de $22,5^\circ$ entre os impulsores da periferia e os do interior, tal como se pode observar na *figura 3.25 c)*. Esta distribuição, consegue ser



relativamente homogénea, inclusive a maioria dos impulsores conseguem estar equidistantes em relação aos seus vizinhos.

Outra vantagem desta escolha, é o facto de não existir um grande número de impulsores posicionados em linha recta, e que sobretudo evita a passagem pelo centro da moldação, existindo apenas alinhamentos com curvatura, que muito dificilmente origina fissuração com uma geometria igual.

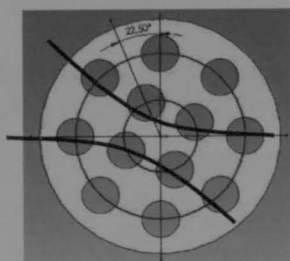


Figura 3. 26 - Indicação do alinhamento mais crítico, existente na moldação, com alinhamento curvilíneo.

Deste modo conseguimos obter uma moldação com uma resistência aceitável, em função do número de impulsores escolhido.

Como se pode verificar no assunto abordado anteriormente, existe agora uma considerável alteração na moldação, facto que vai obrigar à modificação de algumas partes de certas ferramentas, tais como a placa revestida a silicone, onde se vai encaixar os impulsores de silicone, as placas de cobre refrigeradas e a própria placa de aço inox, colocada sob as placa de cobre, que é denominada por "coroa".

Convém relembrar, que um dos objectivos a que nos propusemos, foi a concepção de ferramentas que fossem o mais flexíveis possível, mas agora em confronto com esta necessidade de sucessivas alterações, a flexibilidade deixa de ter sentido. Por isso, pensou-se numa maneira de, pelo menos parte das ferramentas que têm de ser novamente projectadas, serem de modo a permitir o seu uso para qualquer que seja a necessidade. Foi então que se concluiu que as placas de cobre e a placa para encaixe dos silicões têm de ser inevitavelmente reconstruídas, mas a coroa de aço inox, poderia ser tornada mais flexível,



permitindo o seu uso em qualquer que fosse o caso de distribuição de impulsores.

Para uma melhor compreensão é essencial dizer, que alterando a disposição dos impulsores, o mais provável é haver um desencontro entre as saídas dos canais de refrigeração na placa de cobre, com as saídas de água da coroa. Logo, como não se pode alterar a localização dos bicos de saída de água que encostam na coroa, só resta a hipótese de criar um sistema de canais, na mesma, de modo a realizar uma ligação com os canais de saída de água das placas de cobre.

Após um estudo mais preciso, ficou acordado que de um modo simples, bastaria abrir um rasgo largo na zona de fronteira com a placa de cobre, de modo a se adaptar a qualquer tipo de situação.

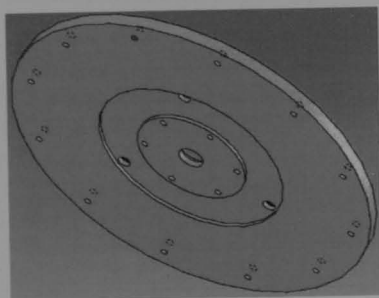


Figura 3.27 - Nova geometria da "Coroa".

3.1.2.7 Ferramenta para o revestimento da caixa de moldação

Ao longo do estudo de todo o processo de fabricação de impulsores em alumínio, deparamo-nos com defeitos e fraquezas em algumas das ferramentas já existentes. Durante a realização de vazamentos, nem sempre obtínhamos peças consideráveis boas e devido à falta de identificação do posicionamento destas na moldação em gesso, nunca conseguimos associar os impulsores de alumínio ao impulsor de silicone de que era proveniente. Isto levou-nos à necessidade de modificar a caixa de moldação, de modo a permitir a realização de uma marca no gesso, que identificasse cada cavidade da turbina existente.



Decidiu-se então, que a identificação poderia ser realizada por uma cavidade arredondada com cerca de 10 mm de raio na moldação de gesso, que ao mesmo tempo serviria para o guiamento do gesso, onde este for vazado. Para isto foi necessário criar uma modificação nas suas ferramentas de fabrico, que iriam conter o inverso da cavidade na moldação.

Inicialmente, surgiu a ideia de criar um postigo revestido a silicone que era colocado em toda a altura do anel da caixa de moldação, o que obrigava a modificar a placa de moldação onde iria possuir uma cavidade idêntica à que o gesso iria ter, ficando esta com o seguinte aspecto:

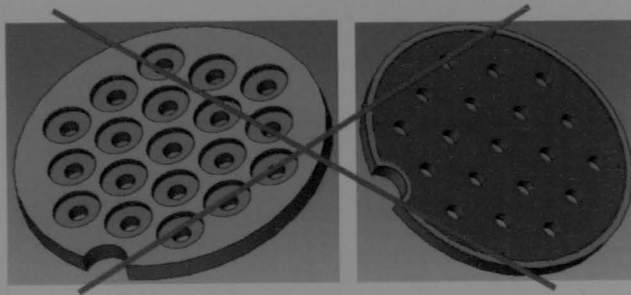


Figura 3. 28 - Proposta de fabrico rejeitada.

Após uma análise mais profunda, concluiu-se que esta opção não era viável, já que implicava custos elevados em maquinagem de ferramentas e montagens mais complexas e demoradas.

Sendo assim partiu-se para outra solução, que consistia essencialmente em criar uma saliência em silicone no anel da caixa de moldação, com 10 mm de raio, que apenas iria ter a altura igual à da moldação em gesso e na zona onde se realiza a moldação. Deste modo a placa de moldação não sofre qualquer alteração, ou seja, esta solução iria permitir que a saliência encostasse na placa de moldação, alterando o revestimento do anel da caixa de moldação.

O facto de haver necessidade em produzir uma nova ferramenta, foi razão para aproveitar e também optimiza-la a nível dimensional, o que originou algumas ideias diferentes, tais como, o sistema de aperto da caixa de moldação, o sistema de encaixe do anel na base, entre outras, que em seguida estão descritas sucintamente:

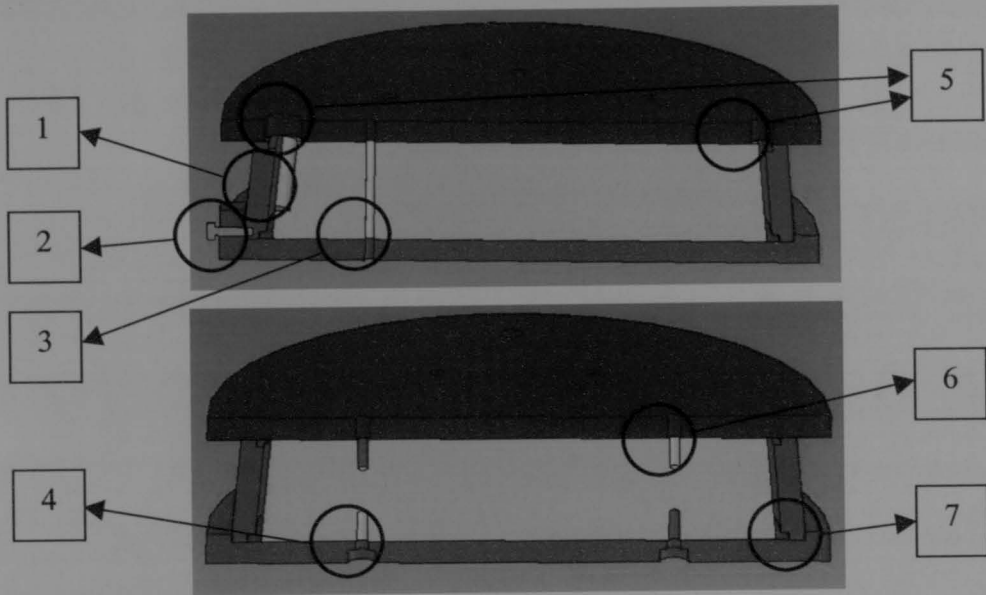


Figura 3. 29 – Imagens 3D em corte a salientar pormenores importantes.

A azul – Tampa da ferramenta de revestimento da caixa de moldação;

A verde – Anel que se pretende revestir a silicone;

A vermelho – Base da ferramenta;

A amarelo – Macho da ferramenta;

A branco – Perno de fixação do anel da caixa de moldação.

Caso 1 – Tal como se pode ver na imagem em corte da ferramenta completa, esta zona corresponde à cavidade que vai criar a saliência em silicone, para a realização da marca na moldação de gesso, que serve para guiamento, tal como foi dito anteriormente.

Caso 2 – Sistema fixação e posicionamento do anel da caixa de moldação. Este sistema é necessário, já que temos de garantir que o anel não tem liberdade de movimento rotacional e que tenha uma posição específica. Este conjunto, é constituído por um perno metálico, um furo na base da ferramenta e outro no anel da caixa de moldação. Devido à falta de espaço na base da ferramenta, foi criado uma borda mais alta que o resto da placa, para aí se realizar o furo, tal como se pode ver pela figura 3.30:

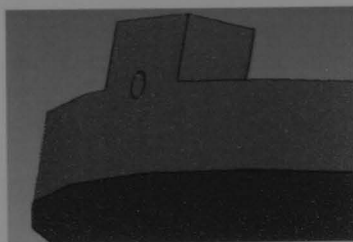


Figura 3. 30 - Furo da base da ferramenta para introdução do pino de fixação do anel.

Caso 3 – Furo para introdução da cavilha, que serve para não permitir a deslocação do macho, garantindo assim a correcta montagem e posição de toda a ferramenta. Tal como se pode ver nas imagens em corte, o furo é realizado na tampa, no macho e na base, realizando assim um ajuste entre todos.

Caso 4 – Cavidades para introdução dos parafusos de aperto e fixação da base ao macho. Existem 6 furos iguais ao apresentado, separados entre si com o mesmo ângulo em relação ao centro ferramenta, permitindo assim maior homogeneidade na sua montagem. Um pormenor que convém salientar, é a importância da existência da caixa para introdução da cabeça do parafuso, já que a base tem de assentar numa face plana, nada pode influenciar a horizontalidade, logo os parafusos não podem ficar salientes relativamente aos limites do contorno da base.

Caso 5 – Canais para o vazamento do silicone e saída de ar da ferramenta. Como se pode ver na imagem em corte, existe um furo de maior dimensão que serve para a introdução do silicone líquido, este furo está posicionado em cima da zona onde vai ser realizada a saliência de guiamento e posicionamento, isto porque, é uma zona de maior massividade e temos de garantir que esta enche completamente e não fica com ar preso. Do outro lado, temos um furo com menor diâmetro, que serve apenas para a expulsão do ar, logo não se justifica ter um diâmetro muito grande.

Caso 6 – Furo para introdução de parafusos, que realizam o aperto e fixação da tampa ao macho. Existem 6 furos, separados entre si com a mesma



distância, que tal como os furos da base permitem um aperto forte e homogéneo. Neste caso, não se justifica a realização de caixas para a cabeça dos parafusos, já que a superfície de cima não é “funcional” e não necessita de ser completamente plana.

Caso 7 – Calha que serve para encaixe do anel da caixa de moldação. Esta calha garante o posicionamento do anel com uma folga ligeira, entre a base e o anel, já que este último é maquinado lateralmente até uma altura de 10 mm, como se pode ver a seguir:

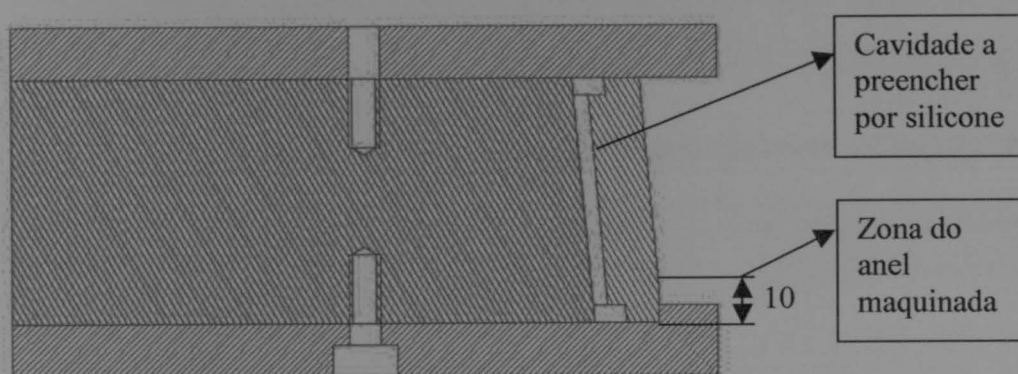


Figura 3.31 - Vista em corte do conjunto da ferramenta.

A nível conclusivo pode-se referir que a ferramenta, após ter sido fabricada e ensaiada, concretizou os objectivos a que se destinava, apesar de existir deficiências no que diz respeito ao guiamento. A nível dimensional, está a ser realizado análises, sem que de momento existam dados conclusivos.



3.2 Equipamento de moldação

3.2.1 Protótipo de uma linha de fabricação de moldações

A realização de um protótipo de uma linha de fabrico de moldações, tem como objectivo principal a futura optimização de uma linha de produção industrial.

A linha de produção é constituída por três postos porta moldações, tal como se pode ver na figura 3.32. Um posto corresponde à zona onde as caixas de moldação é limpa e preparada para receber o gesso, um segundo posto onde é vazado o gesso e realizado a respectiva vibração, e por fim um terceiro posto onde se processa a cura do gesso e desmoldação.

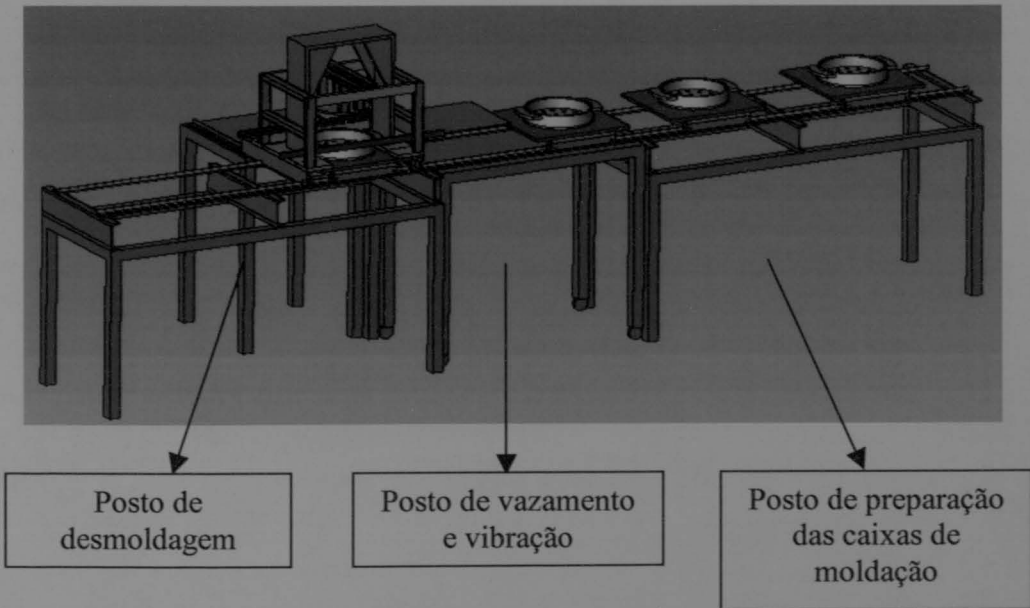


Figura 3. 32 - Protótipo de uma linha de fabrico.

O posicionamento das caixa de moldação é realizado numa estrutura específica que se pode ver na figura 3.32, por sua vez rola por uns carris que estão assentes sobre as mesas da linha de moldação.

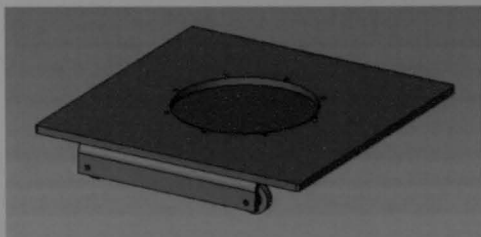


Figura 3. 33 - Estrutura de deslocação da caixa de moldação.

Uma das dificuldades que surgiu a quando da sua realização, foi a realização do posto de desmoldação, que devido ao seu complexo atravancamento, esforços elevados e quantidade de movimentos, levou à concepção de inúmeros projectos, tornando-se um projecto moroso e um pouco complicado.

Convém ainda salientar o sistema de ligação entre carris, para o avanço da máquina de desmoldar para a mesa onde se encontram as caixas de moldação. Para que a máquina de desmoldação assentasse completamente na estrutura das caixas de moldação, foi necessário realizar ranhuras no fim do curso de todo as rodas, para que assim quando a máquina avança, esta parte pousa suavemente no posto de molodação com o mínimo de deslizamento relativo.

3.2.2 Posto de vazamento e vibração

Como já foi referido anteriormente, o posto de vazamento situa-se entre a mesa de preparação e a mesa de desmoldação, Basicamente este posto tem de realizar duas funções a de vazar a mistura de gesso líquida para dentro da caixa de moldações e vibrar todo o conjunto, de forma a eliminar a possível existência de bolhas de ar das zonas mais difíceis e promover um enchimento completo (por exemplo, na zona localizada debaixo das pás dos impulsores).

A mesa de vibratória contém um motor com excêntricos acoplados, que ao iniciar o seu funcionamento provoca vibração na mesa, que se encontra colinear com os carris por onde circula a caixa de moldação e a sua respectiva estrutura suporte.



O processo de vazamento do gesso, neste momento é realizado atmosféricamente, mas já foi iniciado um estudo para a concepção de um mecanismo de vazamento automático com auxílio de vácuo, caso seja necessário para garantir a reprodutibilidade do processo.

3.2.3 Posto de desmoldagem

Após a presa hidráulica do gesso, é necessário efectuar a desmoldação entre a moldação e a placa molde. Em confronto com esta necessidade decidiu-se conceber um posto de desmoldagem, de forma a garantir que a desmoldação seja feita de um modo controlado, garantindo uma perpendicularidade perfeita entre a direcção de desmoldagem e o plano da placa molde.

Espera-se que o processo realize as seguintes tarefas:

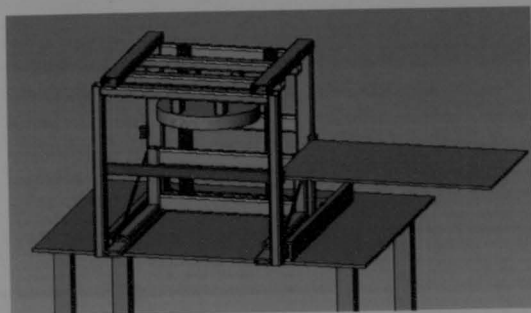
- 1 Desmoldagem da caixa de moldação com a moldação e a placa molde, garantindo o paralelismo entre superfícies de contacto, admitindo-se uma deformação máxima de 0,02 mm;
- 2 Desmoldagem entre a moldação e a caixa de moldação;
- 3 Retiro da moldação de dentro do equipamento de desmoldação;

Todos os movimentos realizados neste equipamento, à excepção do retiro da moldação através dum tabuleiro, são feitos por um sistema hidráulico.

Em funcionamento é necessário que o equipamento efectue o seguinte ciclo de trabalho (a máquina apresentada nas ilustrações de seguida, não corresponde à geometria da máquina final esperada, devido a este não se encontrar concluída. Como o ciclo de trabalho tem de ser igual para qualquer dos casos, optei pela apresentação da única versão existente, para uma melhor compreensão):

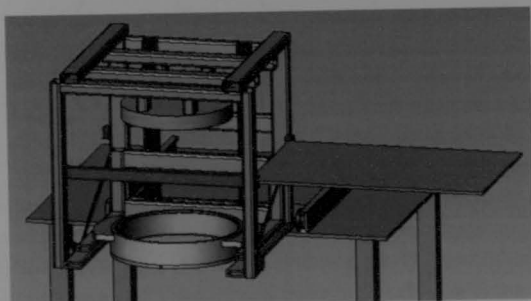


1º Passo



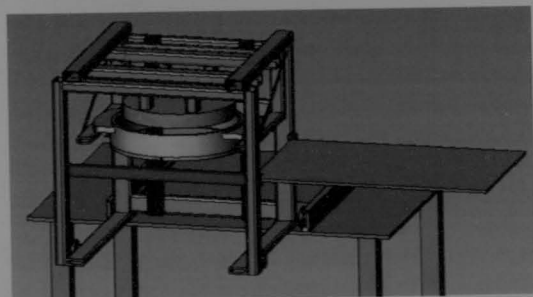
- O mecanismo encontra-se recuado;

2º Passo



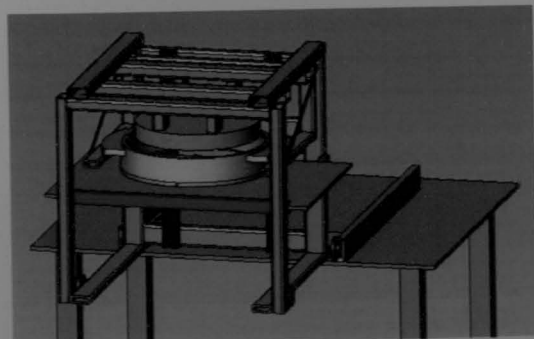
- A estrutura de desmoldagem avança;
- Os dois grampos encontram-se entre a caixa de moldação e a mesa da placa de moldação;

3º Passo



- A estrutura móvel sobe, de modo a provocar a separação entre a placa molde e a caixa de moldação com gesso;
- A caixa de moldação e a respectiva moldação em gesso param um pouco antes de encostarem no extractor;

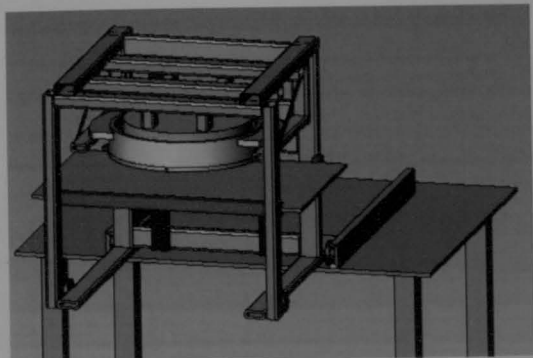
4º Passo



- O tabuleiro de transporte das moldações entra lateralmente, e posiciona-se sob o extractor.

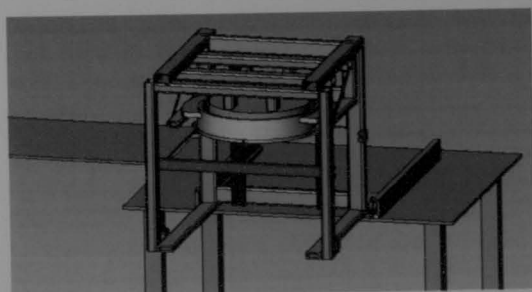


5º Passo



A estrutura móvel, efectua um novo movimento ascendente (lentamente), até que a moldação em gesso cai no tabuleiro;

6º Passo



- Após a moldação estar sobre o tabuleiro, este desloca-se para o exterior da estrutura, pelo lado oposto ao da entrada;
- Posteriormente, retira-se a moldação do tabuleiro, finalizando-se o ciclo de desmoldação.

O equipamento vai ser dimensionado para suportar esforços de desmoldação de cerca de 20000 N, e o movimento da estrutura móvel é realizado através de guias lineares de alta precisão.

Numa primeira fase, optou-se por conceber uma ferramenta tal como está representada na imagem 3.30, que basicamente é constituída por uma parte móvel fixa por apenas de um dos lados, que efectua o movimento de desmoldagem. Para a sua concepção efectuaram-se as várias análises estruturais, como se pode constatar no capítulo 3.2.4.

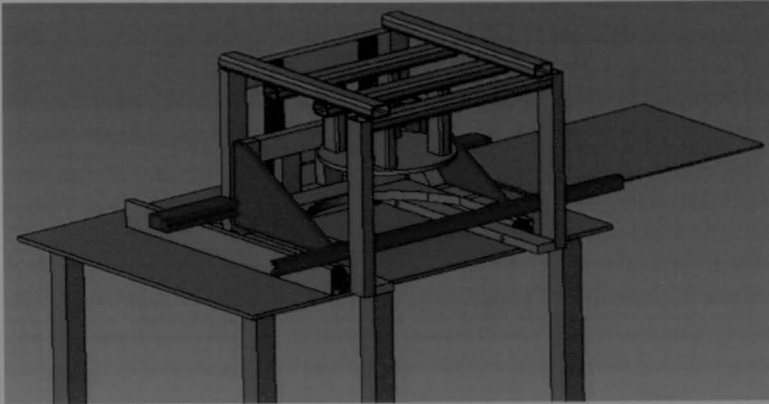


Figura 3. 34 – Projecto CAD 3D de uma máquina de desmoldar.

Em função dos resultados das simulações estruturais, verificou-se que esta proposta seria uma solução inviável, partindo-se para uma segunda proposta rígida e que se espera que cumpra os objectivos com mais eficácia. Neste momento esta estrutura encontra-se em fase de concepção, impossibilitando deste modo a sua apresentação completa.

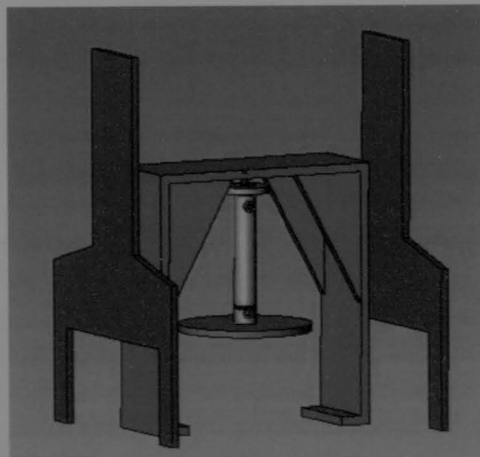


Figura 3. 35 - Projecto em fase de estudo.

3.2.3.1 Primeira proposta para a máquina de desmoldação

O equipamento apresentado pela figura 3.34, apenas serviu como ponto de partida para a concepção de uma máquina que satisfizesse as nossas necessidades em termos de atravancamento e funcionalidade.



O atravancamento foi realizado de forma a concretizar as seguintes especificações:

- a) As zonas de contacto, onde se exerce a força de desmoldagem situam-se nas asas da caixa de moldação e a placa molde;
- b) O deslocamento vertical da moldação com caixa, corresponde à soma da altura da moldação, quando esta está encostado na placa molde, mais a altura da moldação quando esta está a encostar no extractor, mais a altura da moldação necessária para que a própria possa sair do equipamento, usando um tabuleiro de recolha. Por fim, deve somar-se a altura da calha por onde a chapa desliza. Esta soma totaliza um valor de aproximadamente 170 mm.

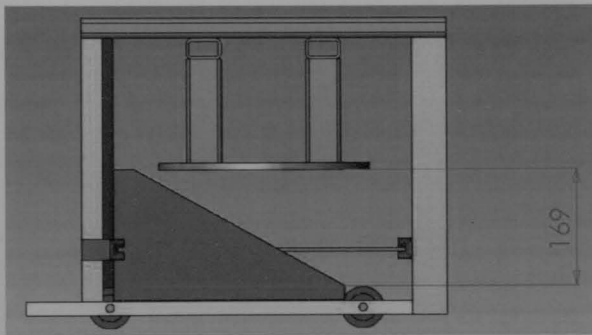


Figura 3. 36 - Vista lateral da máquina de desmoldar e o seu atravancamento.

A nível de dimensionamento, foi necessário realizar uma simulação estrutural para análise de tensões e deslocamentos, de modo a garantir uma flecha máxima de 0,02 mm. Esta análise foi realizada recorrendo ao software de FEA específico ("Cosmos Works"), por questões de disponibilidade. De início decidiu-se que seria vantajoso, sempre que possível perfil standard tubulares, mas devido às dimensões reduzidas do equipamento e os esforços elevados (20000 N), essa escolha tornou-se impossível, obrigando ao uso de barras maciças.

A análise incidiu apenas na estrutura móvel visto ser esta aquela que tem de suportar esforços mais elevados e tem de garantir parte do paralelismo. Deste modo obteve-se os seguintes resultados:

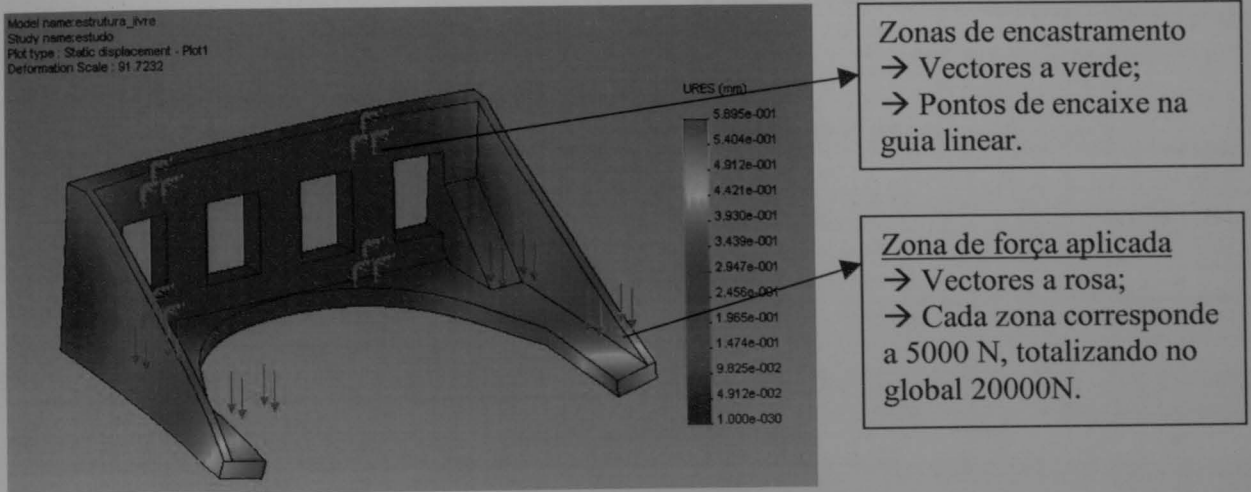


Figura 3. 37 - Analise de deslocamentos da estrutura móvel.

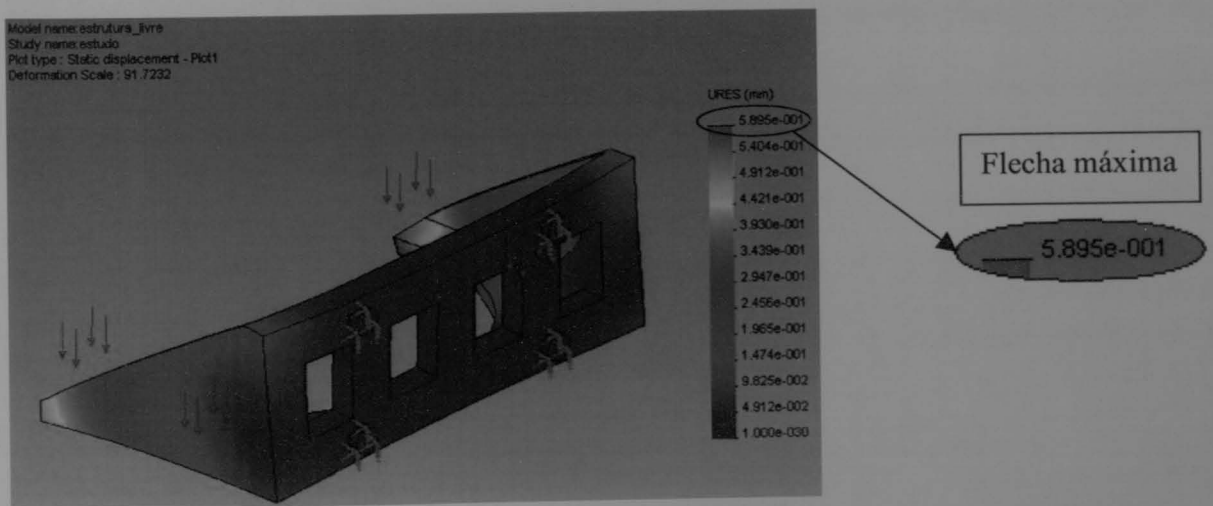


Figura 3. 38 - Analise de deformação da estrutura móvel.

Tal como se pode ver pela imagem anterior, o mínimo valor da flecha a que se conseguiu chegar é ligeiramente superior à que se pretendia. Convém ainda salientar que o software usada parte do principio que a estrutura analisada, se encontra numa situação ideal, coisa que na realidade nunca se consegue obter. Esta razão levou-nos a optar por conceber um equipamento diferente, de tal modo que se consiga ultrapassar este problema, ou seja substitui-se a estrutura móvel em balanço por uma estrutura móvel biapoada.





3.2.3.2 Segunda proposta para a máquina de desmoldação

Tendo em conta que a primeira proposta apresentada, não satisfazia os objectivos pretendidos, foi necessário repensar num novo mecanismo. Surgiu então uma ideia de realizar um equipamento que funciona-se como pórtico, ou seja, em vez de existir um mecanismo que estivesse apoiado de um dos lados, optou-se por criar um sistema que estivesse fixo por dois pontos opostos na estrutura, evitando o aparecimento de momentos flechas elevado.

Mesmo na ocorrência de flechas ligeiramente superiores a 0,02 mm (que é o caso), não existe problemas para a desmoldagem, visto a deformação estar disposta de uma forma simétrica, sem comprometer o paralelismo exigido.

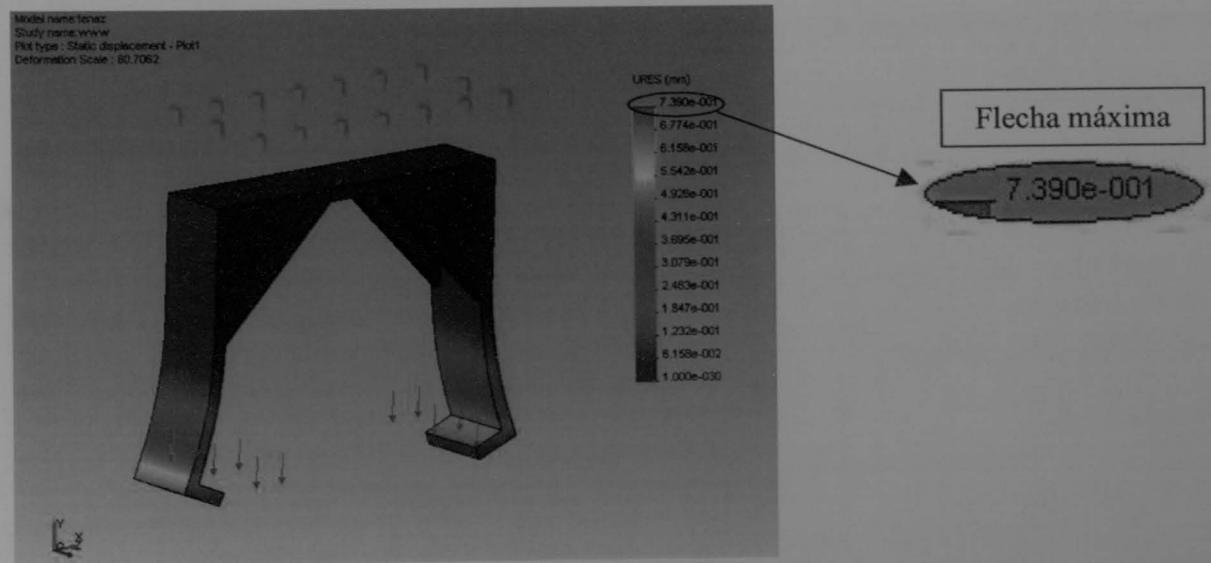


Figura 3. 39 - Análise de deformação da estrutura móvel do novo projecto ainda em fase de estudo.

Neste momento esta estrutura foi aprovada, mas a sua geometria final foi determinado pelo seu fabricante, incluindo análises dimensionais, sistemas de guiamento e sistema hidráulico.



O seu aspecto final pode ser visualizado pela imagem 3.40, estando a decorrer as montagens finais em conjunto com a linha de fabrico.



Figura 3. 40 - Aspecto real do equipamento de desmoldagem.



3.3 Vazamento

Como já se referiu, para garantir o enchimento dos impulsores na zona das pás, i.e. nas moldações de gesso, é necessário que a operação de vazamento seja feita por vácuo e em contrapartida para diminuir a turbulência e inclusões de óxidos.

Como está referido no capítulo 4, na fase inicial deste trabalho (experiências exploratórias) os vazamentos foram feitos da seguinte forma:

- Vazamento por gravidade assistido por vácuo;
- Vazamento por aspiração sob vácuo em contragravidade;
- Vazamento sob baixa pressão.

Resultado da pesquisa bibliográfica e de reuniões com consultores decidiu-se que o processo industrial o vazamento iria ser efectuado sob acção de vácuo em contragravidade com sistemas individuais de gitagem, conforme se ilustra na figura 3.36. Este sistema obriga à utilização de um tubo por impulsor e consequentemente esse tubo tem que ser barato para viabilizar o processo.

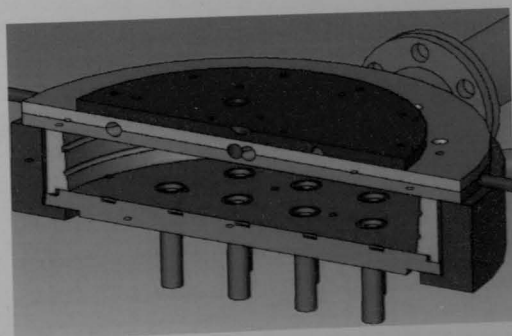


Figura 3. 41 - Imagem em corte da câmara de vazamento e os seus tubos cerâmicos para a realização dos vazamentos.

Após vários contactos com fornecedores conseguiu-se obter tubos em silicato de cálcio maquinados. Mas o seu preço era demasiado elevado (aproximadamente 4€/tubo). Como o valor de cada impulsor é de 2 – 3 €, foi necessário architectar um processo de fabrico de tubos de uma forma muito mais



económica. Fora do âmbito deste trabalho obtiveram-se tubos em ferramentas projectadas e construídas no INEGI em gesso, a custos abaixo dos 0,2 €.

3.3.1 Câmara de aspiração

Após um melhor entendimento do funcionamento de todo o processo, incluindo o conhecimento de todas as fases do processo, optou-se por dar início à idealização e concepção da câmara de vazamento e mecanismos auxiliares que se aproximem o mais possível, de uma futura linha de fabrico industrial, que permita a realização de vazamentos de uma forma reprodutível.

Decidi considerar os mecanismos auxiliares, todos aqueles que servem de apoio ao funcionamento da câmara de vazamento e aqueles que contêm funções auxiliares, tais como montagem e desmontagem das moldações de gesso e acessórios complementares da câmara de vazamento.

Tendo em conta a diversidade de acessórios e conseqüentemente as suas funções, foi então que decidi, que para uma melhor compreensão de todo o mecanismo, seria conveniente explicar cada acessório separadamente, tal como se verifica de seguida:

Câmara de vazamento:

Basicamente a câmara de vazamento, consiste num conjunto de componentes que permitem o alojamento da moldação de gesso, onde posteriormente se irá realizar a aspiração de metal fundido para o seu interior e respectivo arrefecimento.

Todos os componentes identificados na figura 3.42, encontram-se explicados sucintamente, sendo o objectivo principal de indicar as suas funções em relação ao processo global.

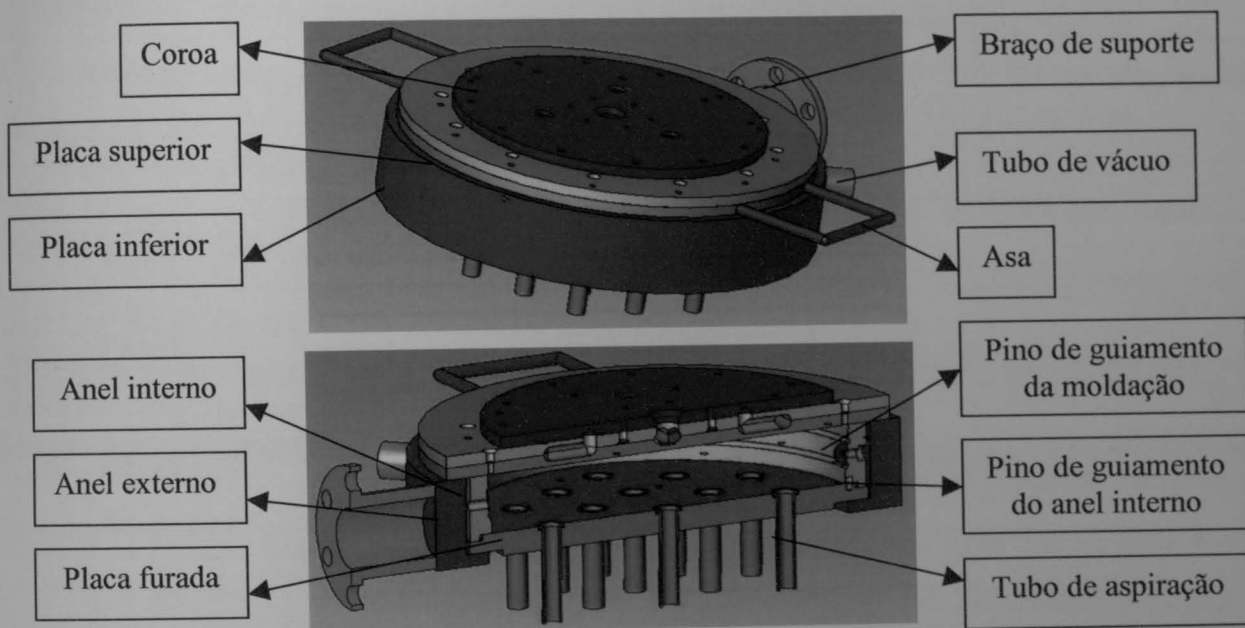


Figura 3. 42 –Esquema CAD 3D da câmara de vácuo para vazamento dos impulsores.

- Coroa – Placa situada no topo da câmara de vazamento que tem como função principal a união de dois a dois, dos seis canais existentes de arrefecimento na placa superior e inferior. Esta união conduz à existência de três furos de saída de água, onde vai posteriormente encostar os bicos apropriados, para se proceder ao retiro da água.

Esta placa ainda contém um furo central, que tem como função principal a injeção de água para dentro dos canais de arrefecimento, através da acção de um bico de encosto. Quanto à fixação desta placa, decidiu-se colocar doze parafusos na sua periferia e seis mais próximos da zona central. O número de parafusos e as suas disposições, justificam-se pelo facto dos canais de arrefecimento, poderem estar sujeitas a altas pressões, havendo em conjunto o risco de criação de vapor de água, daí a importância de garantir um aperto seguro.

Para se entender melhor a geometria da placa em questão, apresenta-se de seguida uma imagem em transparente:

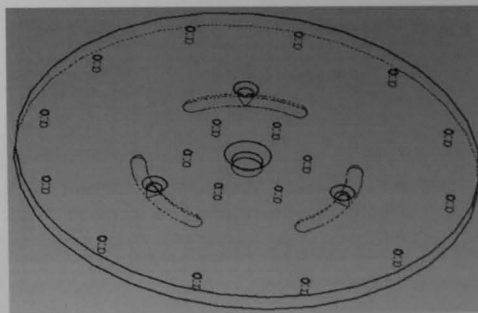


Figura 3. 43 - Pormenor da coroa em transparente.

- Placa superior – Esta placa tem como função principal proporcionar o arrefecimento, através de canais específicos que se formam em conjunto com a placa inferior, para um arrefecimento bem sucedido, optou-se pelo seu fabrico em cobre, já que este material contém um valor de condutibilidade térmica muito alto.

Quanto à geometria dos canais de arrefecimento, estes apesar de aparentemente serem complexos, têm a função de passar pelo centro de cada turbina, proporcionando um arrefecimento homogéneo e eficaz.

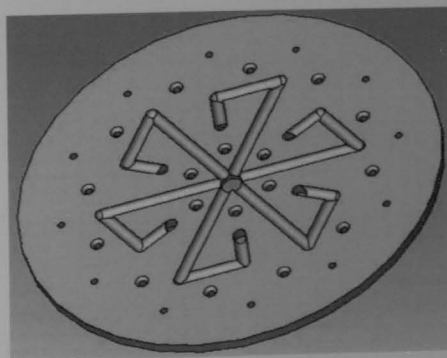


Figura 3. 44 - Tampa de refrigeração superior.

A disposição e número dos parafusos, é quase idêntica à coroa e à placa inferior, estando todas estas peças em sintonia, no que diz respeito a fixação.



- Placa inferior – Esta placa pertence também ela ao conjunto de arrefecimento, onde como se pode ver, pela figura XXX, esta placa é quase idêntica à placa superior.

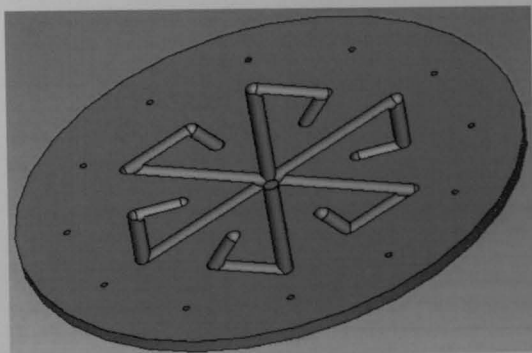


Figura 3. 45 - Placa de refrigeração inferior.

Uma particularidade desta placa, é o facto de caso seja necessário que a base do impulsor possua uma geometria específica, essa geometria pode ser obtida através da realização da cavidade com a geometria inversa na placa de cobre⁴.

- Pino de guiamento da moldação – Esta peça tem como objectivo principal permitir o guiamento da moldação de gesso, de forma e garantirmos que a disposição da cavidade da turbina no gesso, coincide com a localização dos tubos de aspiração e canais de arrefecimento.
- Pino de guiamento do anel interno – Sabendo que a moldação de gesso está guiada em relação ao anel interno, e que os tubos de aspiração estão solidários com a placa furada, para existir um guiamento entre a moldação e os tubos, basta introduzir um pino para o efeito, entre o anel interno e a placa furada.
- Anel interno – Esta peça tem como função principal o alojamento da moldação de gesso, que além das cavidades já referidas que têm

⁴ Quando se diz que a geometria da base do impulsor pode não ser plana, significa que existe impulsores que possuem bases com perfis específicos. Estes perfis podem ser adquiridos, através da maquinagem do seu negativo na placa de cobre inferior, comprovando-se mais uma vez a sua flexibilidade.



como função o guiamento com outras peças, o anel interno contém também três furos laterais associados a rasgos que circundam o anel, tal como se pode ver na imagem seguinte, e têm a função de ajudar a acção do vácuo.

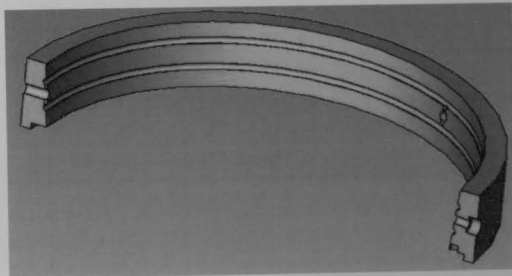


Figura 3. 46 - Aro interno.

- Anel externo – Esta peça é o suporte para todas as peças referentes à câmara de vazamento, ele garante o isolamento da zona de alojamento da moldação, de modo a realizar o vácuo eficazmente. O anel externo, contém uma abertura na sua base para permitir o encaixe da placa furada, contém um furo
- Placa furada – Esta peça permite o encaixe dos tubos de aspiração do metal líquido, que devido ao seu sistema de posicionamento cria uma concentricidade entre os seus furos e a cavidade da moldação, possibilitando deste modo um escoamento directo e seguro.
- Tubo de aspiração – Esta peça é colocada em cada furo da placa furada de maneira a conduzir o metal fundido para dentro da moldação sob a acção do vácuo. É esperado que este tubo seja impermeável, para que acção do vácuo seja realizada de forma eficaz.
- Tubo de vácuo – Para a realização do vácuo, é necessário que exista uma ligação da câmara de vazamento com a câmara de vácuo, através de um tubo flexível e resistente. Para isso, é



necessário que exista uma forma de encaixe desse tubo na câmara de vazamento.

- Asa – Esta peça tem como função, permitir o manuseamento e transporte das placas de cobre e coroa, manualmente.
- Braço de suporte – O braço de suporte tem como função principal suportar a câmara de vazamento e permitir o seu deslocamento radial e axialmente em relação a um veio central, que por sua vez vai servir de base de suporte à câmara de vazamento. O movimento vertical vai ser garantido hidraulicamente e o movimento radial mecanicamente nesta fase.

Sistema de montagem da moldação:

O sistema de montagem é constituído apenas por uma peça de perfil tubular fino, que tem como função principal promover a colocação do conjunto formado pela placa furada, a moldação em gesso e o anel interno, e a placa de refrigeração.

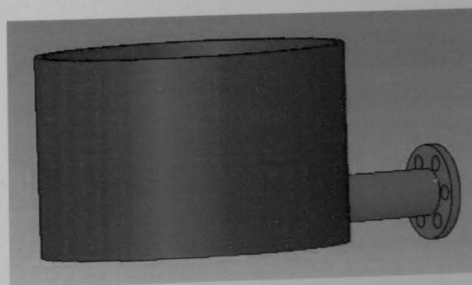


Figura 3. 47 - Extractor e o seu braço de apoio.

Esta peça é fixa, ficando o encaixe do conjunto assegurado pela elevação e sustentação desta peça, são realizados através do braço de apoio, que se pode identificar através da imagem 3.47, que por sua vez se encontra ligado ao mesmo veio que sustenta a câmara de vazamento.



Sistema de apoio e deslocação da câmara de vazamento:

O sistema de apoio e deslocação da câmara de vazamento, é constituída basicamente por um veio central rígido, onde vai permitir que a câmara de vazamento e o extractor possam ambos deslocar-se na direcção axial e radial, tal como se apresenta de seguida:

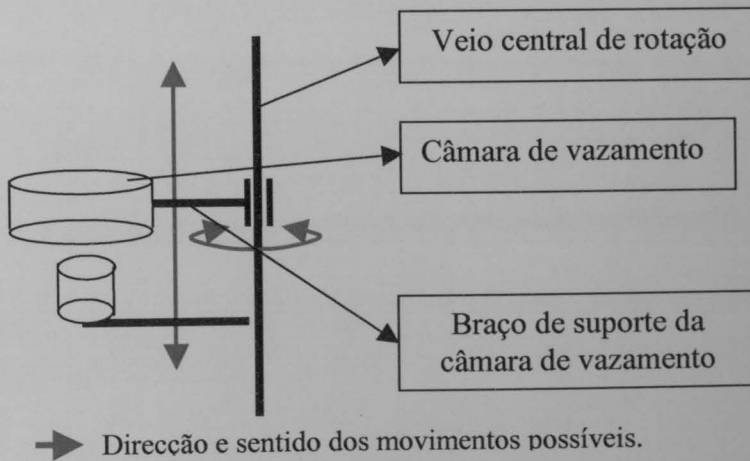


Figura 3. 48 - Ilustração da liberdade de movimento da câmara de vazamento.

De seguida podemos visualizar o aspecto do conjunto da câmara de vazamento e o forno após a sua fabricação.

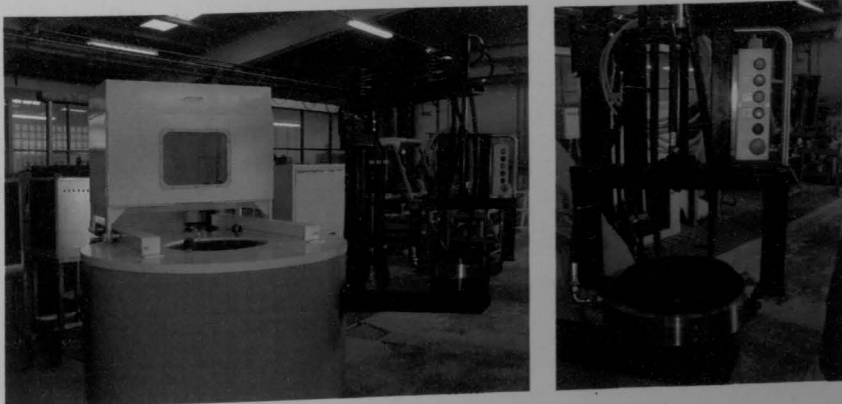


Figura 3. 49 - Aspecto final da câmara de vazamento em conjunto com o forno.



Apesar de todo este mecanismo não ter sido testado por completo já existem conclusões que podem ser retiradas, mais concretamente no que diz respeito à parte de montagem, onde existem problemas de encaixe e guiamento. A nível dimensional todo o equipamento concretizou plenamente os objectivos propostos.

3.3.2 Tubos de aspiração

Tal como já referimos no capítulo anterior, é necessário obter tubos cerâmicos que a permitiam a aspiração do metal líquido para dentro da moldação. Como se pode verificar no capítulo referente às primeiras técnicas usadas para efectuar vazamentos, estes necessitavam da preparação de tubos de sílica ou fibra, que apesar de barato, torna-se num processo muito moroso e complicado, ao contrário do uso de tubos cerâmicos, que apesar de terem um custo elevado, a sua aplicação é simples e rápida. Após a verificação desta controvérsia, decidiu-se que seria uma boa aposta a aquisição destes tubos, mas a um custo mais baixo.

Em confronto com a necessidade de aquisição de tubos para aspiração do alumínio fundido a um custo reduzido, julgou-se que seria vantajoso, a realização de um estudo com o objectivo de desenvolver um método económico de fabrico dos tubos.

Sendo assim começou-se por projectar uma geometria de tubo que cumpri-se as funções pré-determinadas, que se encontram descritas de seguida:

- a) O tubo tem de possuir uma gola, de modo a que permita o seu encaixe na placa furada;
- b) O tubo tem de ser o mais robusto e resistente possível, mas de modo a que possibilite um caudal e velocidade de enchimento ideais;
- c) As paredes dos tubos têm de ter ângulos de saída, tanto no interior como no exterior, de modo a permitir a sua desmoldagem da ferramenta que os produz;



d) O tubo deve ter aproximadamente 60 mm de comprimento.

Para a determinação do valor do diâmetro ideal para a extremidade oposta à gola do tubo, efectuaram-se cálculos específicos, mais concretamente considerou-se que o módulo do tubo tem de ser maior que o módulo da turbina, tal como está apresentado de seguida:

$$M_{\text{tubo}} \geq M_{\text{turb.}}$$

$$M_{\text{turb.}} = \frac{V}{A} = \frac{14074,64}{9548,25} = 1,47405 \text{ mm}$$

$$M_{\text{tubo}} = \frac{V}{A} = \frac{\pi \times r^2 \times 60}{2\pi r \times 60 + 2\pi r^2}$$

$$r \geq 3,1 \text{ mm}$$

Por fim, e após o cumprimento de todas as especificações descritas, obteve-se o seguinte resultado:

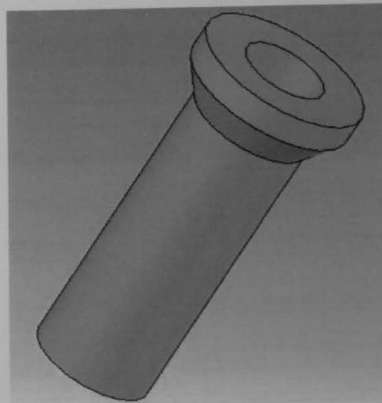


Figura 3. 50 - Modelo em CAD 3D do tubo a obter.



3.3.2.1 Ferramenta para o fabrico de tubos de aspiração

Após ser conhecido o tipo de material ideal para se realizar os tubos (este estudo encontra-se apresentado no capítulo 4.6, foi necessário conceber uma ferramenta para vaziar o gesso no estado líquido. Decidiu-se que numa primeira fase do estudo, seria prático realizar um modelo da ferramenta em resina epoxídica, feita pelo processo de estereolitografia, para posteriormente se vaziar silicone.

Tal como se pode ver pela imagem seguinte, a ferramenta desta primeira fase ficou com o seguinte aspecto:

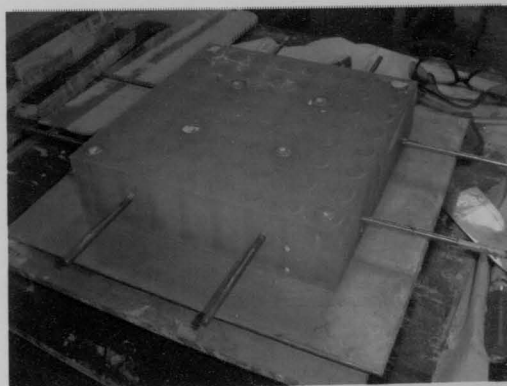


Figura 3. 51 - Ferramenta totalmente em silicone para a fabricação de tubos de gesso.

A concepção desta ferramenta teve como base as seguintes especificações:

- Todas as paredes dos tubos têm de conter pequenos ângulos de saída (na ordem do $0,5^\circ$ a 1°), para assim permitir uma extracção fácil;
- O material a vaziar sobre a estereolitografia deveria ser silicone, porque deste modo a estrutura possuiria flexibilidade, ajudando o processo de extracção dos tubos de gesso;
- A ferramenta deverá ter quatro varões, que atravessam a ferramenta de silicone, para aumentar a rapidez do conjunto;



- A moldação em silicone deverá ser constituída em duas partes separadas, uma que molda a parte interior e outra que molda a parte exterior dos tubos, sendo possível a sua montagem guiada, a partir de pernos guias;
- Entre as duas partes de silicone irá existir uma chapa, que vai funcionar como placa de extracção se os tubos ficassem preso aos machos.

Inicialmente, um dos problemas que a concepção desta ferramenta demonstrou, foi o facto de ter de se fragmentar a resina para se poder retirar a cavidade em silicone.

Após a realização da ferramenta, efectuaram-se alguns vazamentos de gesso para o seu interior. Apesar de todo o cuidado, verificou-se que durante o acto de extracção, muitos dos tubos fracturaram. A explicação para este acontecimento, reside no facto da ferramenta ser integralmente em silicone e não possuir um suporte rígido interno, pelo que a força de extracção não é aplicada de uma forma homogénea por toda a estrutura da ferramenta, provocando flexões excessivas nas paredes dos tubos.

Devido aos problemas referidos, decidiu-se que seria vantajoso a construção de uma nova ferramenta, dando-se assim início à segunda fase deste estudo, mas agora com base em especificações diferentes.

- O ângulo de saída das paredes dos tubos aumentou para 1° a 2°, para assim facilitar a desmoldagem;
- A parte moldante do exterior dos tubos, deverá ser feita em resina rígida, evitando deste modo flexões das paredes dos tubos;
- O molde em estereolitografia desta vez, tem de ser realizado por partes, ou seja, os tubos e a placa de encaixe dos mesmos, são realizados independentemente. Deste modo, após o vazamento do silicone sobre a resina, a separação entre ambos é feita de uma forma mais fácil, evitando a fragmentação da resina, possibilitando que os modelos dos tubos sejam reaproveitados;



Tendo em conta as especificações referidas anteriormente, obteve-se uma ferramenta onde a cavidade é fabricada em resina e a parte moldante do interior dos tubos (macho), é realizada em silicone com reforço metálico interno. Ambas as partes podem ser identificadas pelas imagens seguintes:

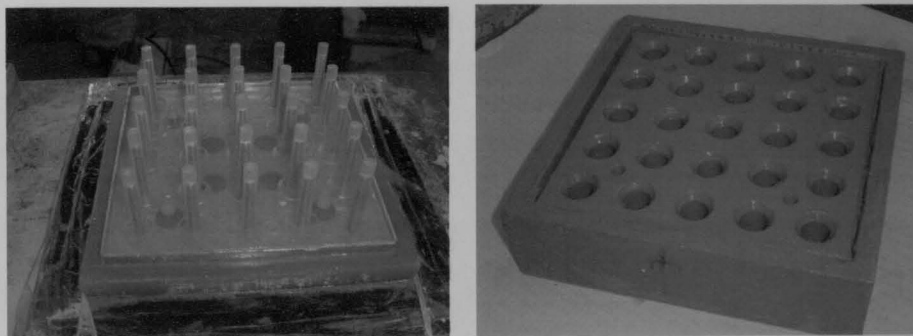


Figura 3. 52 - À esquerda encontra-se a parte moldante da zona interna dos tubos. À direita encontra-se a cavidade da ferramenta.

A obtenção de tubos em gesso a partir desta ferramenta, mostrou ser um processo fácil e eficaz, obtendo-se deste modo resultados bastante positivos. Os números de tubos danificados, em cada vazamento, são quase nulos, e a acção de extracção oferece menos resistência que o primeiro processo descrito.



Figura 3. 53 - Resultados obtidos a partir da última ferramenta processada.

A título de conclusão, pode-se dizer qualquer das ferramentas aqui descritas para o fabrico de tubos, têm que ser melhoradas em muitos pontos, principalmente a nível de guiamento, de extracção dos meios moldes e tubos e ainda a nível de rigor geométrico.



Foi com cerca de 200 tubos fabricados nesta ferramenta que se realizou a primeira experiência com a câmara de vazamento entretanto desenvolvida e fabricada



4 Metodologia experimental de fabrico de ferramentas desenvolvidas

4.1 Realização dos impulsores em silicone

A necessidade de aquisição de moldações em gesso com o formato inverso do impulsor final a adquirir, fez com que fosse essencial conceber impulsores num material flexível, de modo a que permitisse a sua extracção da moldação de gesso após a cura. A opção, foi a fabricação de impulsores em silicone, que como se sabe é um material elastomérico.

Apesar de haver uma grande variedade de silicones disponíveis no mercado, optou-se por aquele, que pensamos concretizar melhor os nossos objectivos. Mais especificamente, o silicone usado possui a máxima dureza e a menor flexibilidade de todos os silicones do mercado.

A realização das turbinas em silicone exige o uso de ferramentas específicas para o efeito. Numa primeira fase as turbinas de silicone foram concebidas através de uma ferramenta apresentada no capítulo 3.1.2.1. O processo, vai ser explicado em pormenor, de seguida:

1ª Fase – Inicialmente é necessário granalhar o suporte metálico dos impulsores de silicone, protegendo a superfície lateral com fita-cola, no sentido de garantir um bom acabamento superficial nessa zona, para realizar um encaixe suave e evitar folgas na ferramenta. Após a granalhagem das superfícies do suporte, é conveniente a passagem por elas de “um primário” que tem como objectivo principal garantir a adesão do silicone ao suporte. A ferramenta necessária à produção das turbinas de silicone, é colocada na máquina de vácuo, permanecendo ligado algum tempo de modo a ficar isenta de humidades ou outros voláteis.

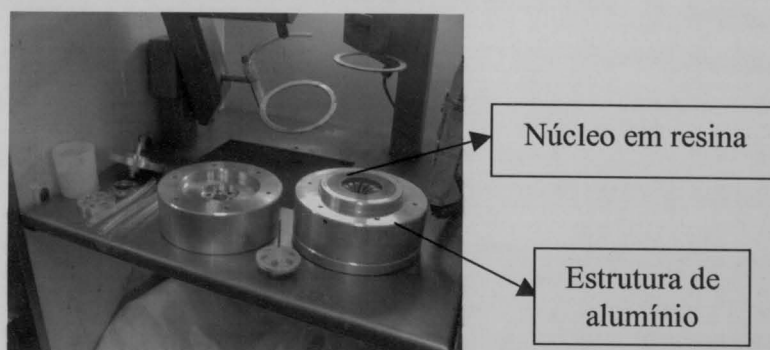


Figura 4.1 - Desgasificação do molde e seus acessórios na câmara de vácuo.

2ª Fase – Enquanto se realiza o vácuo de todos os acessórios, faz-se a preparação do silicone. A mistura é constituída por um catalizador (a verde) e um silicone (a branco), nas medidas apropriadas. As imagens seguintes demonstram a realização desta mistura, inclusive a agitação da resina antes da sua aplicação, para evitar a sedimentação no fundo dos recipientes, das cargas mais pesados.

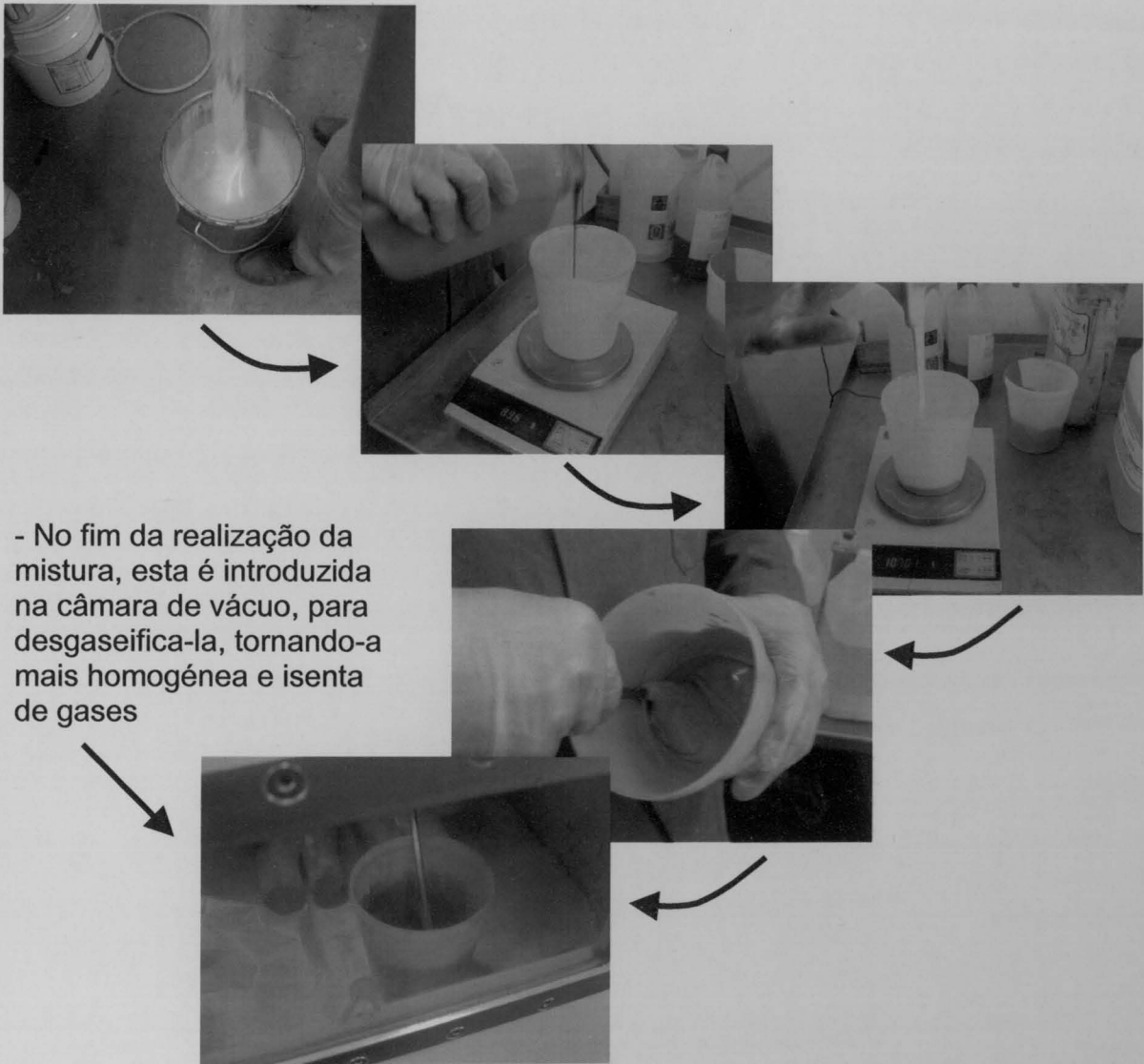


Figura 4. 2 - Demonstração do processo de preparação do vazamento das turbinas de silicone.

Convém salientar, que através de experiências realizadas, tanto a mistura do catalizador com o silicone como a presença de sujidade ou gorduras na ferramenta, pode provocar inibição do silicone, não proporcionando a sua correcta polimerização, pondo em risco a qualidade da peça.

3ª Fase – Nesta fase, é necessário ter um dos meios moldes montados, para se dar início ao vazamento do silicone. Este vazamento vai ser realizada em duas fases. Primeiro enche-se, aproximadamente metade da cavidade moldante



e introduz-se a mesma na câmara de vácuo. Pelas razões já referidas, só depois se dá início ao enchimento completo do molde, já com este todo montado, incluindo tubos para facilitar o escoamento do ar para fora do molde. De seguida apresentam-se imagens de todos os passos mais pormenorizados:

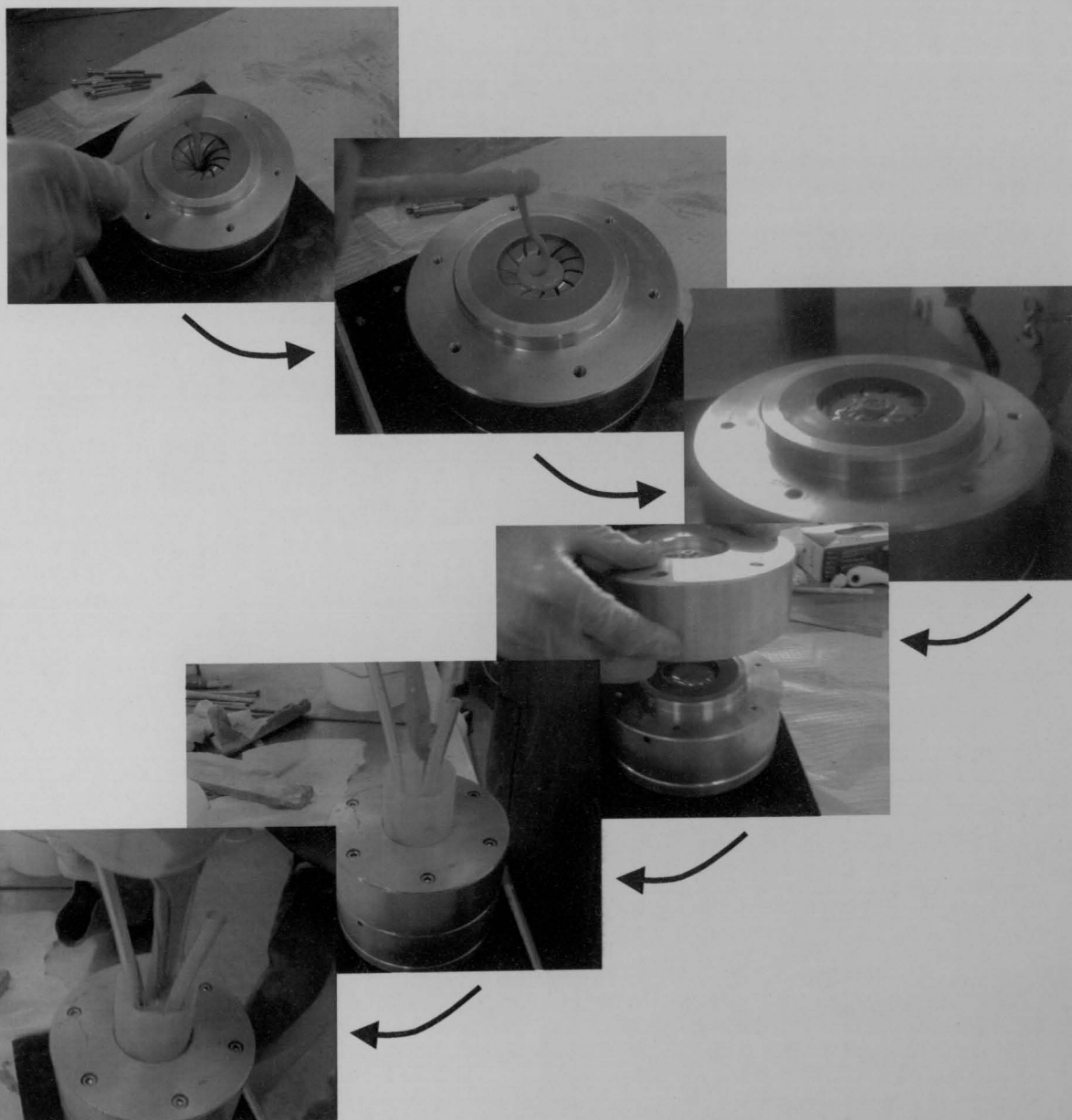


Figura 4.3 - Vazamento do silicone no molde.

4ª Fase – Realiza-se mais uma vez uma degasificação, para depois se realizar durante 24 horas à temperatura ambiente ou 4 horas a 60°.

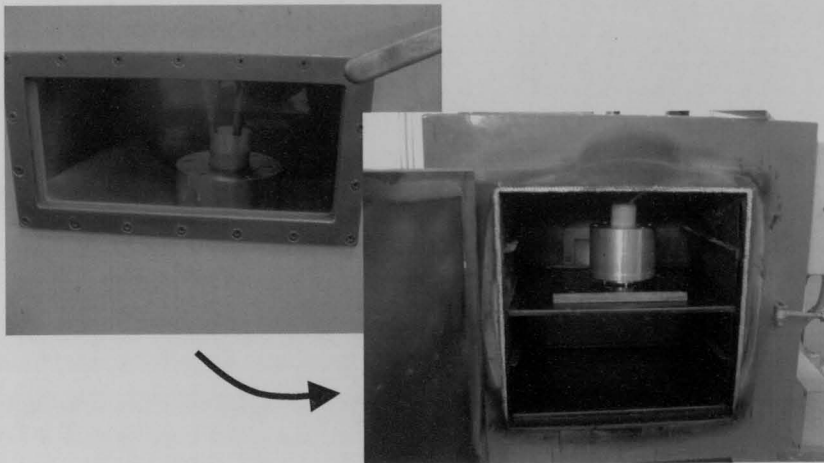


Figura 4. 4 - Cura dos impulsores em silicone.

Após a realização de todas estas operações, obtemos o impulsor final, que se pode observar na figura 4.5:

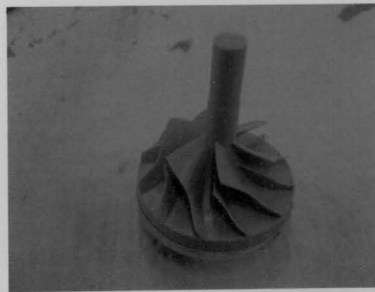


Figura 4. 5 – Aspecto final de um impulsor em silicone.

4.2 Fabricação e estudo das moldações em gesso

A criação das moldações em gesso, têm um papel muito importante em todo o processo de obtenção de impulsores em alumínio. Um mau rigor dimensional, ou mesmo, deformação durante a fabricação das moldações significa que no futuro vamos extrair delas peças defeituosas e sem qualidade, já que estamos a falar de tolerâncias impostas de ± 0.3 mm.

A fabricação das moldações em gesso, são provenientes da ferramenta criada para o propósito e que é denominada por caixa de moldação, que é constituída por:



- Placa de moldação, que como se sabe é revestida por silicone, e contém furo para encaixe dos impulsores também em silicone;
- Anel da caixa de moldação, que interiormente é revestida por silicone, e que após algumas alterações, consegue realizar uma marca na moldação de gesso que identifica a disposição dos impulsores vazados;
- Impulsores de silicone, que pelo processo atrás descrito, são obtidas em silicone, mas possuem um interior metálico, e têm o objectivo de criar uma cavidade que é o negativo do impulsor.



Figura 4. 6 - Aspecto da caixa de moldação montada.

4.2.1 Obtenção das moldações em gesso polimérico

A realização do preparado de gesso polimérico, consiste na mistura de todos os produtos dentro da câmara de vácuo, que além de misturar provoca uma desgasificação:



Figura 4. 7 - Mistura do gesso e sua desgasificação.



O vazamento do gesso é realizado enquanto a mistura se encontra no estado líquido, para o interior da caixa de moldação, onde é deixado a solidificar:

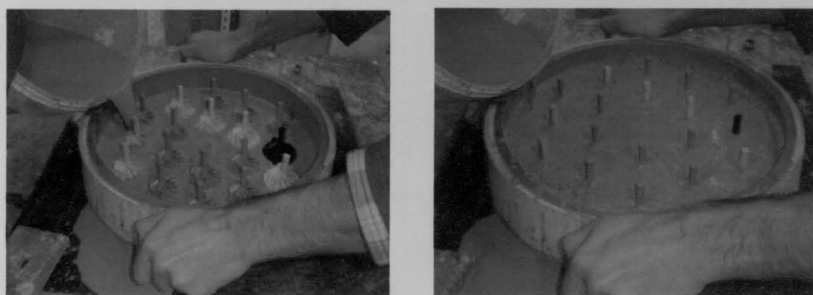


Figura 4. 8 - enchimento da caixa de moldação com a mistura de gesso.

Ligeiramente antes da solidificação completa da mistura de gesso, é necessário efectuar-se o alisamento da superfície superior, que significa o retiro de material em excesso da moldação, através de uma espátula, antes de a solidificação estar completa:



Figura 4. 9 - alisamento da superfície superior da moldação.

Em relação à extracção da moldação de dentro da caixa de moldação, esta acção é realizada com auxílio de uma prensa, onde se aplicam movimentos lentos e cuidadosos, para não danificar a moldação:



Figura 4. 10 - Extracção da moldação da sua respectiva caixa.

4.2.2 Obtenção das moldações em gesso espuma

Em relação à obtenção das moldações em gesso espuma, pode-se dizer que diferencia do processo de moldações em gesso polimérico, no facto de não se poder fazer vácuo durante a mistura e os tempos de manuseamento são muito mais reduzidos. Em contrapartida a qualidade do acabamento superficial da superfície exterior é ligeiramente inferior.

4.3 Vazamento do alumínio para obtenção de impulsores

Este capítulo, tem o objectivo de apresentar e explicar todo o processo que envolve o vazamento do alumínio para a obtenção dos impulsores, tal como todo o material envolvido, alterações e desenvolvimentos técnicos que o processo sofreu ao longo do tempo.

Todos os processos aqui demonstrados serviram essencialmente para a realização de estudos e análises de todo o processo e suas implicações. Logo, convém salientar que todos os mecanismos apresentados de seguida, servem apenas de ponto de partida para um estudo, não havendo qualquer tipo de compromisso com o resultado final.

A câmara de vácuo, que já se encontrava realizada, pode ser dividida em dois componentes, que se encontram de seguida descritas pormenorizadamente:



- Estrutura externa ou carcaça – Consiste numa estrutura completamente fechada e bem vedada, onde vai ser actuado o vácuo. Esta estrutura é dividida em duas partes, a parte de cima contém o furo por onde se faz ligação à máquina de vácuo e a parte de baixo contém o furo por onde vai ser realizada a sucção do metal líquido.

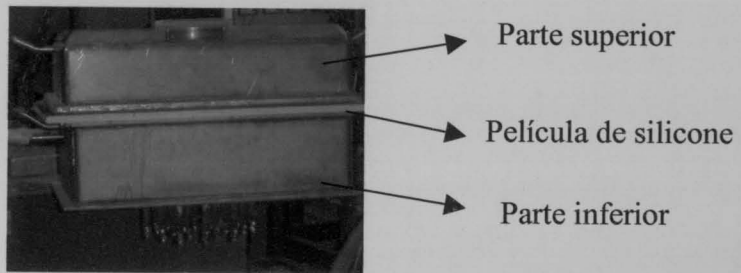
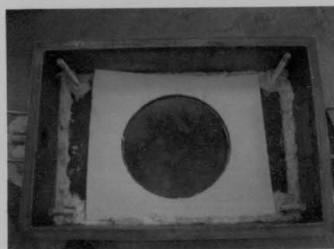


Figura 4. 11 - Apresentação do conjunto montado da estrutura externa.



- Estrutura de alojamento da moldação em gesso – Parte da caixa de vazamento onde se é posicionada e apertada a moldação em gesso, e que posteriormente é dirigido o metal líquido.



Tal como se pode verificar esta placa contém furos onde se pode encaixar os tubos que vão realizar a aspiração de metal para dentro da moldação.



Na placa inferior, colocamos a placa com os tubos de aspiração, separadas na zona de apoio por uma película de fibra.



Após montada a moldação e o respectivo anel de centragem, sobrepõe-se a este conjunto uma fina placa de cobre e posteriormente a placa de alumínio que por fim é aparafusada.

Figura 4.12 - Esquema de montagem da zona de alojamento da moldação.

Para melhor compreensão, apresenta-se de seguida uma imagem em corte da montagem da zona de alojamento da moldação.

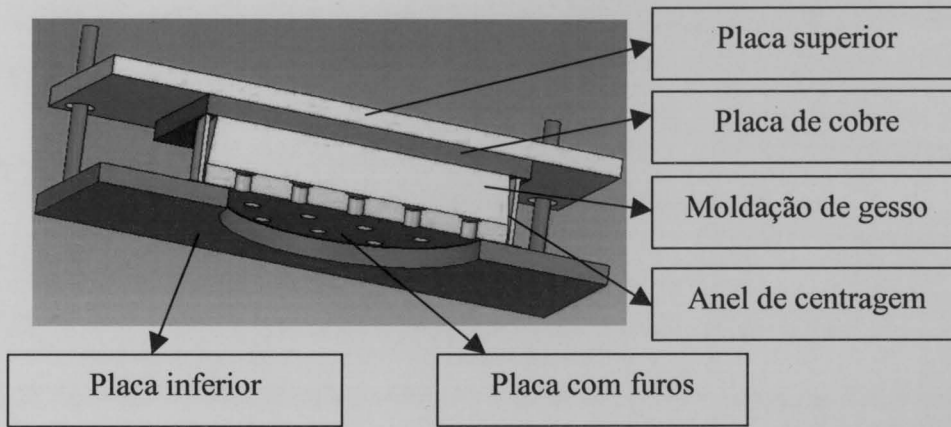


Figura 4.13 - Imagem em corte da zona de alojamento da moldação.

4.4 Alteração da câmara de vazamento para aquisição de impulsores em alumínio por gravidade com acção de vácuo

Face à necessidade de obtenção de diversos impulsores de alumínio para se proceder a estudos e análises dimensionais, pensou-se num método de realizar vazamentos, de modo a reduzir ou mesmo evitar o uso de qualquer tipo de tubos de aspiração de metal, reduzindo desta maneira o custo nos vazamentos.

Sendo assim surgiu a ideia de realização de vazamentos por gravidade assistido por vácuo. Este método implicou novas criações, tais como:

- **Um gito**, realizado por uma camisa de fundição com dimensão do diâmetro exterior, aproximada ao do furo existente na caixa de vazamento. O facto da dimensão da camisa ser inferior ao diâmetro do furo da caixa e ainda o facto de esta não ser impermeável, levou a que se aplica-se banhos, nas superfícies exteriores, de barbotina, seguidos sempre do respectivo banho de areia de zircónio, fazendo com que o diâmetro exterior da camisa aumentasse até ao ponto de este se ajustar no furo da caixa e ao mesmo tempo se tornasse impermeável. Convém salientar que o método da realização de banhos de barbotina e de areia de zircónio, foi ajustada com a realização de experiências,



até à obtenção de um equilíbrio do número de banhos necessários para um encaixe aproximadamente a meio da camisa, com o furo da caixa, concluindo-se então que três banhos seriam suficientes, tal como se pode ver nas imagens:

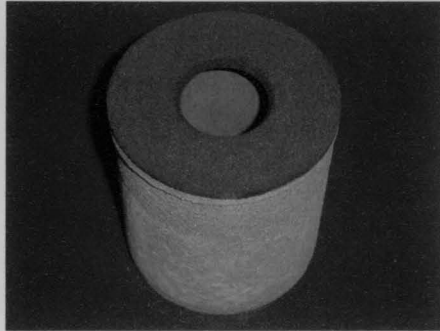


Figura 4.14 - Camisa já revestida exteriormente com barbotina e areia de zircónio.

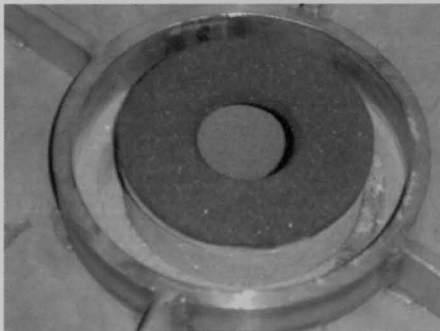


Figura 4.15 - Modo pretendido de encaixe da camisa no furo da caixa.

- **Uma nova placa metálica**, que vai apenas diferenciar da anteriormente usada na caixa de vazamento, num furo que possui no seu centro que vai servir para o encaixe da base da camisa revestida.
- **Um anel de centragem novo**, que vai diferenciar do anterior na sua altura, já que vai deixar de existir a placa com furos para encaixe dos tubos de aspiração, logo o anel de centragem apenas vai possuir a altura das moldações em gesso.



- **Criação de canais de alimentação**, que vão substituir os tubos de aspiração, existentes anteriormente. Em vez da existência de um tubo para fluir o metal fundido para cada cavidade da moldação de gesso, tal como é usado no vazamento por contra-gravidade assistido por vácuo, agora surgiu a ideia de criar canais que conduzam o metal para cada cavidade existente na moldação, realizados por rasgos numa película de fibra de vidro.

Apesar de à primeira vista, os canais de alimentação parecerem pequenos para realizarem a distribuição do metal, não nos podemos esquecer que como o vazamento é assistido por vácuo, existe pressão suficiente para obrigar o metal a encher a moldação por completo. Esta conclusão é baseada em experiências já realizadas, em que durante a realização de vazamentos deparamos, com enchimentos de moldações completos, que nem sequer possuíam canais directos para conduzir o metal.

Para a simplificação da realização de rasgos nas folhas de fibra de vidro, decidiu-se conceber uma matriz em chapa, com o formato do contorno desejado na fibra de vidro, de modo a que o corte manual seja fácil, rápido e o mais perfeito possível. Obteve-se o seguinte:

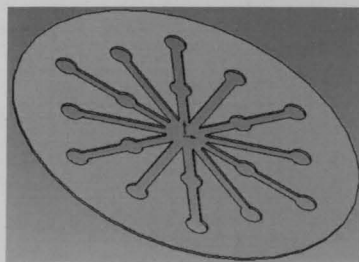


Figura 4. 16 - Apresentação do formato final da chapa e posteriormente da fibra de vidro.



O esquema apresentado pela figura seguinte, serve apenas para explicação da função da fibra de vidro durante o processo de vazamento.

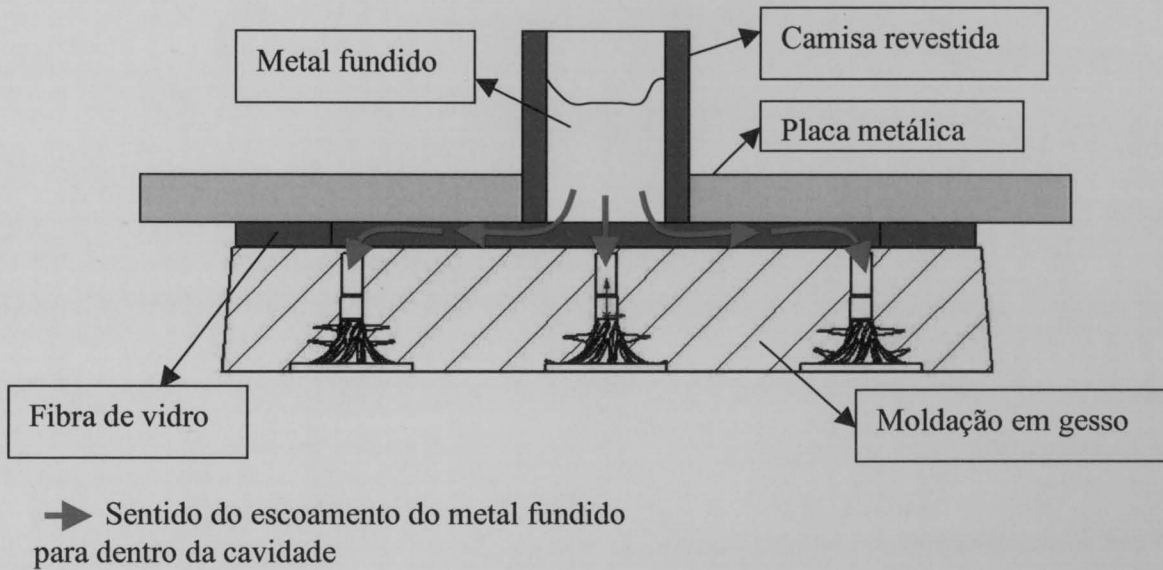


Figura 4. 17 - Esquema demonstrativo do escoamento do alumínio, através da fibra de vidro, para a moldação.

4.4.1 Resultados experimentais e conclusões da alteração da câmara de vazamento

Após a realização de todas as alterações relatadas anteriormente, efectuou-se diversos vazamentos, obtendo-se em quase todos eles, resultados bastante positivos, tendo em conta o fim a que se destinavam (obtenção de impulsores para a realização de estudos, análises dimensionais e revestimento com cobre).

Apesar dos bons resultados, concluiu-se que o uso de revestimento nas camisas era escusado, porque apenas o uso da camisa simples consegue cumprir perfeitamente as funções a que se destina. Por outro lado, a barbotina e a areia de zircónio em contacto com o alumínio fundido entra em combustão libertando fumos incomodativos e provocando a fragmentação da mesma.

Outra mudança imprevista para este processo, foi a introdução de um fino tubo metálico que envolveu a camisa, tornando-a deste modo mais resistente.





Além de proteger a camisa, o tubo evita a introdução de metal fundido para fora da caixa de moldação.

4.5 Estudo do material para a realização dos tubos

Se à partida, nós tentarmos obter tubos cerâmicos idênticos aos que se obtêm no mercado, seria lógico que eles fossem de Silicato de Cálcio, em contrapartida a possibilidade mais acessível para a sua utilização, seria a maquinaria de blocos do mesmo material, até à obtenção do formato desejado. Este método, como se pode imaginar, além de ser moroso, continua a ser de custo superior em relação ao desejado.

Uma outra possível solução, foi a utilização de gesso ou combinações de gesso com outros materiais, para a realização de vazamentos em negativos dos tubos a obter. Esta hipótese, tendo em conta que envolve custos e tempos de mão-de-obra muito reduzidos, mereceu um estudo mais aprofundado. Este estudo baseou-se nos seguintes itens:

- Possibilidade de adição de materiais específicos no gesso, para introdução de propriedades específicas;
- Quantidades ideais de gesso e outros materiais, em função da sua resistência e tempo de manuseamento;
- Resistência do gesso ou mistura de gesso, antes e após cura;

Após a utilização de alguns gessos disponíveis no mercado, houve dois deles (gesso Alfa e gesso Sc1), que pelas suas propriedades, mereceram um estudo mais exaustivo.⁵

A administração de resistência aos gessos pode ser feita através da adição de sílica coloidal no pó de gesso, durante o processo deste com a água. Quanto ao tempo de manuseamento da mistura de gesso, este pode ser alargado com a adição de ácido acético, com uma concentração aproximada de 5%. A partir da mistura de todos estes materiais, realizou-se inúmeras experiências,

⁵ Gesso “Alfa” e gesso “Sc1”, são os nomes comerciais dos gessos que nós usamos nestas experiências, encontrando-se as suas respectivas fichas técnicas em anexos.



variando entre si as suas quantidades e tempos de manuseamento, até que se obteve os seguintes resultados:

- O uso do gesso Sc1, foi posto de parte, já que em todas as experiências realizadas, nunca se obteve os resultados, a nível de resistência, que desejávamos;
- Quanto à quantidade ideal de água, que se deve juntar, é cerca de 40% da quantidade de gesso usado.
- A adição de sílica coloidal no gesso, faz com que este aumente consideravelmente a sua resistência;
- A aplicação de sílica coloidal, apesar de aumentar o número de operações, é mais conveniente ser realizada após a petrificação e respectiva cura, já que a introdução da sílica coloidal durante a fase líquida da mistura, faz diminuir drasticamente o tempo de manuseamento.
- Caso se pretenda aplicar a sílica coloidal durante a fase líquida, convém adicionar uma pequena quantidade de ácido acético, com o fim de aumentar o tempo de manuseamento. Este procedimento apesar de diminuir o número de operações, e conseqüentemente o tempo de mão-de-obra, a nível de propriedades, os tubos apresentam uma resistência mais fraca. Em relação ao outro método, devido ao facto da água ser retirada do tubo durante a sua cura, vão dar lugar a espaços vazios, que vão ser preenchidos por sílica coloidal. Devido a este facto, a quantidade de sílica vai ser muito superior em relação ao outro modo de fabricação, aumento deste modo a sua resistência.



5 Análises dimensionais

Uma das fases deste projecto consistiu realização de medições e análises dimensionais de ferramentas e impulsores provenientes de varias partes do processo.

As medições foram realizadas por uma técnica de medição sem contacto físico numa máquina de coordenadas com microscópio incorporado, que se encontra ilustrado na imagem 5.1.

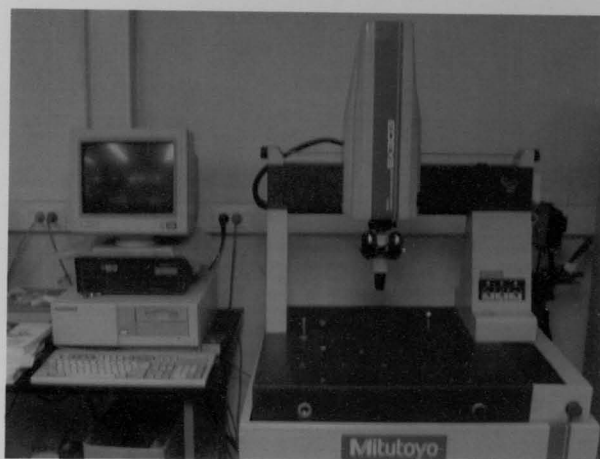


Figura 5.1 - Aparelho de medição por coordenadas sem contacto físico.

5.1 Comparação entre os valores das alturas das pás dos impulsores em silicone e os impulsores em alumínio

Face à inevitável variação dimensional na altura das pás, que pode existir entre os impulsores de silicone cor-de-rosa e os impulsores de alumínio, considerou-se necessário a realização de medições dos tipos de impulsores. A importância desta medição, deve-se essencialmente ao facto de os impulsores de alumínio derivarem dos impulsores de silicone e se existirem grandes variações dimensionais entre os dois, irá ser necessário realizar melhorias ou no processo de vazamento, e/ou no processo de obtenção dos moldes em gesso.



Para a realização das medições decidiu-se escolher 9 impulsores de alumínio, que apresentassem uma qualidade aceitável (pelo menos a olho nu). No que se refere aos impulsores de silicone optou-se por medir o número máximo de peças disponíveis, alargando o campo de medida com o sentido de aumentar a precisão. Os impulsores em que não foram apresentados os seus valores ou apresentam valores escritos a vermelho, são aqueles que, ou por razões de deformação, ou por falta de condições na realização da medição, não foram considerados, de modo a não aumentar o erro de medição:

Alturas das pás dos impulsores em silicone “cor-de-rosa”

Tabela 5.1 - Valores das medições efectuados a alguns impulsores em silicone.

Impulsor	H						Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
1	14,741	14,759	14,801	14,824	14,915	14,877	14,820
2	14,729	14,709	14,734	14,857	14,898	14,864	14,799
3	14,862	14,696	14,854	14,875	14,915	14,949	14,859
4	14,660	14,659	14,758	14,814	14,840	14,817	14,817
5	14,631	14,691	14,824	14,803	14,791	14,787	14,787
6	14,728	14,746	14,788	14,833	14,838	14,875	14,875
7	14,952	14,969	15,009	14,990	15,014	14,948	14,948
8	14,667	14,749	14,775	14,849	14,905	14,844	14,798
9	14,660	14,739	14,823	14,898	14,887	14,868	14,813
10	14,822	14,855	14,873	14,920	14,943	14,996	14,902
11	14,680	14,747	14,844	14,854	14,896	14,855	14,813
12	15,042	15,077	15,069	15,192	15,214	15,163	15,126
13	14,847	14,901	14,970	15,002	15,029	15,069	14,970
14	14,928	14,978	14,977	15,018	15,056	14,990	14,991
15	14,802	14,860	14,868	14,937	14,922	14,937	14,888

Altura das pás dos impulsores em alumínio:

Tabela 5.2 - Valores das medições realizados aos impulsores em alumínio vazados.

Impulsor	H						Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
21.7	---	---	---	---	---	---	---
23.1	14,105	14,145	14,215	---	14,302	14,244	14,202



23.2 ⁶	14,560	14,660	---	14,639	14,356	14,518	14,547
23.8	14,505	14,126	14,333	14,197	---	14,081	14,248
23.	14,152	13,981	14,117	14,212	14,075	14,189	14,121
22.4	14,299	14,261	14,336	14,284	14,416	14,303	14,317
22.5	14,194	14,288	14,275	14,360	14,364	---	14,296
22.9	14,311	14,264	14,102	14,283	14,316	14,302	14,263
23.3	---	---	---	---	---	---	---

Para se poder discutir a grandeza dos valores medidos, decidiu-se calcular a média para cada impulsor, como se verifica nas tabelas anteriores, de seguida calculou-se a média do conjunto dos impulsores, obtendo-se os seguintes resultados:

- Impulsores em silicone = 14,853 mm
- Impulsores em alumínio = 14,285 mm

A partir destes valores pudemos retirar o valor da contracção, ou variação dimensional, desde o fabrico das moldações em gesso até ao vazamento do alumínio e respectivo arrefecimento. Temos então:

$$\left(\frac{14,853 - 14,285}{14,853} \right) \times 100 = 3,82 \%$$

Numa primeira análise a este valor, verificamos que nesta fase possuíamos contracções muito altas, e julgávamos que as possíveis razões para poderem justifica-las seriam:

- Expansão do gesso polimérico após a sua desmoldação e possivelmente após os processos de cura;
- Contracção do alumínio excessivamente alta.

Após um estudo para justificar os valores apresentados, verificamos que uma das razões principais para este acontecimento, para além das referidas, era a qualidade do silicone que foi usado no fabrico dos moldes de gesso. Com o

⁶ Impulsor em silicone, que ao contrário dos outros, contém uma base de 5mm, influenciando os valores das medições efectuadas.



tempo, este silicone (cor de rosa), fica demasiado flexível, causando deformação nas pás dos impulsores, provocados pelo peso do gesso no estado líquido, durante o seu enchimento.

5.2 Análise dimensional efectuada aos furos da placa de moldação em resina revestida a silicone

Para a correcta concepção de uma nova ferramenta para revestimento de placas de moldação a silicone, foi necessário analisar dimensionalmente uma placa já existente, cuja a sua fabricação está descrita no capítulo 3.2.1.2.

Cada furo foi medido três vezes, com o fim de minimizar o erro de medição, mas no caso onde os furos a medir se encontram danificados não é realizada a medição.

O desenho seguinte tenta descrever a posição de cada furo, sendo estes identificados por um número específico em relação a uma marca existente na placa (presente no desenho a azul).

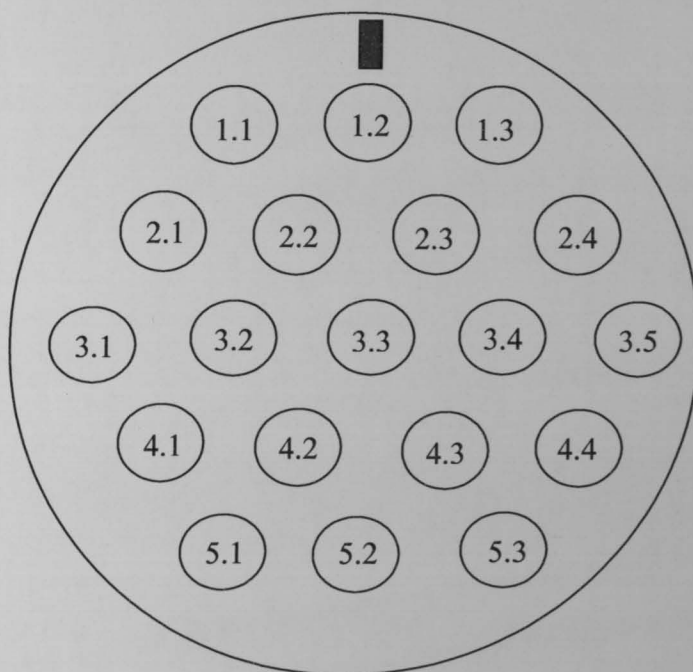


Figura 5.2 - Posicionamento dos furos medidos na placa de moldação.



Tabela 5.3 - Resultados das medições efectuadas aos furos da placa de moldação.

Referencia	1 ^a Medição	Erro	2 ^a Medição	Erro	3 ^a Medição	Erro	Médias
1.1	---	---	---	---	---	---	---
1.2	50,569	0,0156	50,577	0,0009	50,580	0,0082	50,575
1.3	50,530	0,0214	50,545	0,0142	50,558	0,0152	50,544
2.1	---	---	---	---	---	---	---
2.2	50,494	0,0405	50,565	0,0454	50,570	0,0332	50,543
2.3	50,585	0,0250	50,586	0,0037	50,574	0,0095	50,582
2.4	50,605	0,0027	50,585	0,0068	50,588	0,0024	50,593
3.1	50,638	0,0703	50,623	0,0465	50,610	0,0517	50,624
3.2	50,584	0,0043	50,547	0,0375	50,569	0,0127	50,567
3.3	---	---	---	---	---	---	---
3.4	50,599	0,0430	50,571	0,0524	50,592	0,0539	50,587
3.5	50,585	0,0183	50,617	0,0135	50,611	0,0070	50,604
4.1	50,701	0,0190	50,689	0,0133	50,694	0,0068	50,695
4.2	50,611	0,0116	50,611	0,0207	50,605	0,0057	50,609
4.3	50,598	0,0143	50,593	0,0069	50,575	0,0018	50,589
4.4	50,592	0,0170	50,596	0,0288	50,573	0,0250	50,587
5.1	50,665	0,0112	50,660	0,0107	50,637	0,0032	50,654
5.2	---	---	---	---	---	---	---
5.3	50,604	0,0295	50,616	0,0374	50,597	0,0311	50,606

■ Furos que contêm impulsores colados, impossibilitando a medição dos furos

Se realizarmos uma média geral dos valores adquiridos, obtemos um valor de 50,597 mm.

O ideal era que os furos das placas de moldações possuíssem um valor muito próximo dos 50 mm, tal facto não se confirma pelas medições, provando-se assim a existência de uma folga demasiadamente grande (a folga é ainda maior se tivermos em conta a contracção dos impulsores em silicone), que por sua vez origina rebarbas indesejáveis na moldação de gesso, a quando da sua fabricação.



Existência de folgas na interface do furo na placa de moldação e o impulsor em silicone

Figura 5. 3 - Placa de moldação montada com os impulsores em silicone.



6 Conclusão

Este projecto de desenvolvimento de ferramentas para fundição em moldações de gesso exigiu um aprofundamento de um vasto leque de técnicas e conhecimentos sobre processos relacionados com a fundição (técnicas de vazamentos, tipos de materiais, construção de moldes e moldações, ciclos de temperaturas, ferramentas de fundição, etc...) e técnicas relacionadas com o projecto de ferramentas e equipamentos (aplicação de tolerâncias, desenho de CAD 3D, desenho de CAD 2D, sistemas de fixação das ferramentas, sistemas de guiamento, sistemas de extracção, etc...).

A nível de ferramentas e equipamentos desenvolvidos, penso que em parte se conseguiu atingir os objectivos propostos. Apesar das ferramentas realizarem as funções para as quais foram projectadas existem factores que não ficaram perfeitos, tais como folgas, casos de falta de concentricidade, guiamento e por vezes dificuldades na realização de extracções.

No que diz respeito ao trabalho efectuado relacionado com a experimentação de ferramentas e mesmo a fabricação de ferramentas (por exemplo ferramentas em resina), pode-se dizer que participei de uma forma activa, já que para um bom projecto de ferramentas é essencial conhecer de perto os seus problemas e daí partir para regulares optimizações.

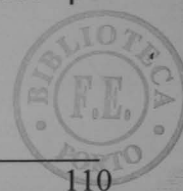
Um dos factores que achei ter sido uma boa experiência para mim, foi o relacionamento e interactividade com empresas externas ao INEGI, para a resolução de problemas e colaboração na concepção de ferramentas.

Em geral pode-se considerar que este projecto, apesar de ter exigido uma certa responsabilidade, foi extremamente lucrativo em termos de informação adquirida. Todo o trabalho desenvolvido por mim devo em grande parte ao espírito da equipa de investigação e desenvolvimento do INEGI e à colaboração dos engenheiros supervisores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



7 Bibliografia

- Alves et al., 2001 - 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.
- ASM, 1990 – "Forging and Casting"; ASM Metals Handbook; Volume 5; 8ª edição; 1990.
- Camacho, 1999 – José Camacho, "Estereolitografia (SL) – ITEC – UETA", O Molde – Revista da Associação Nacional da Indústria de Moldes – Ano 12 – nº39, pp. 9-10, Março (1999).
- "Properties and Selections: Nonferrous Alloys and Special purpose Materials"; ASM Metals Handbook; Volume 2; 10ª edição; 1992.
- Neto 18-19 – Revista "O Molde"; "Fabricação de objectos por camadas – LOM – INEGI – CETECOFF"; pág. 18-19; Ano 12; Nº 39; Março – 1999.
- Neto 24-25 – Revista "O Molde"; "Tecnologias de conversão por fundição a partir de protótipos rápidos – INEGI – CETECOFF"; pág. 24-25; Ano 12; Nº39; Março 1999.
- Osório, 2000 – 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, Setembro (2000).
- Scarato, Manfé Pozza; "Desenho Técnico Mecânico"; Editado por Hemus; Volume 1.





➤ i1 - www.turbodriven.com

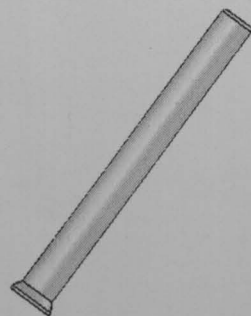
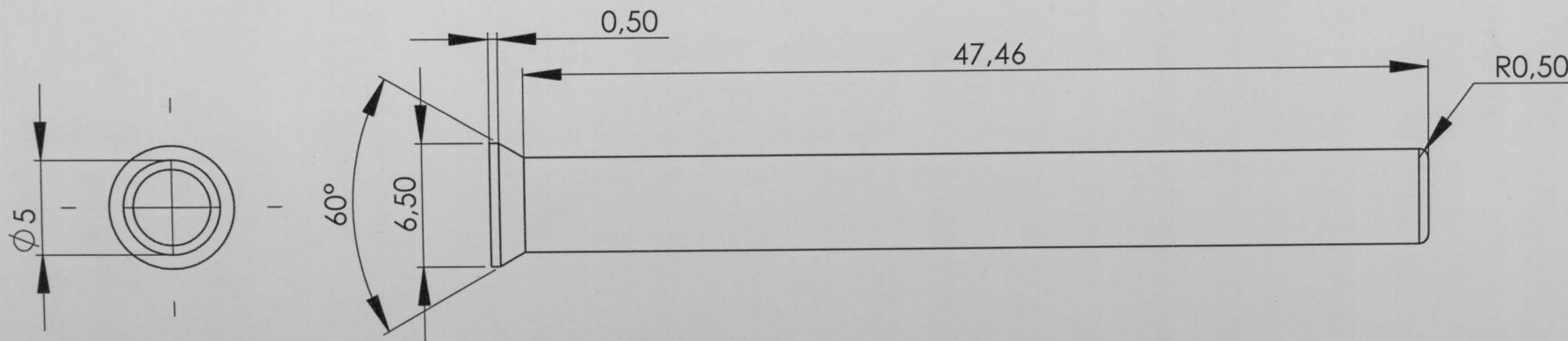
➤ www.ina.com


➤ www.minitec.de

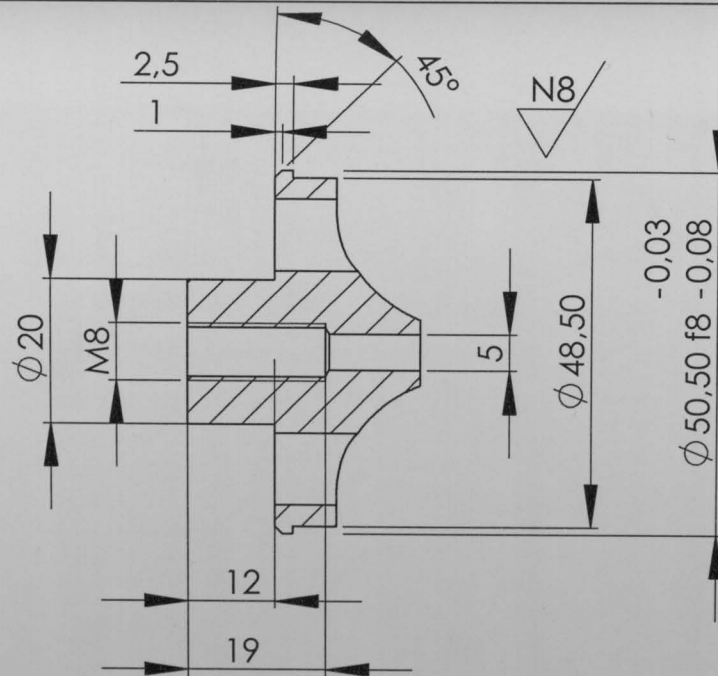
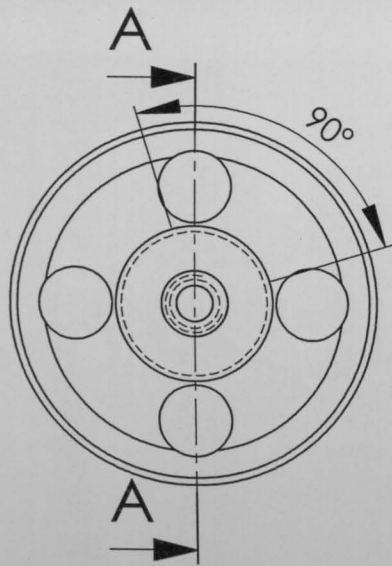


8 Anexos

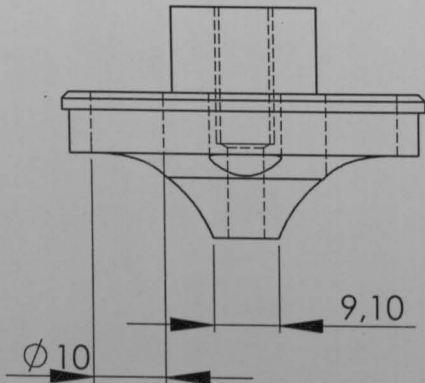
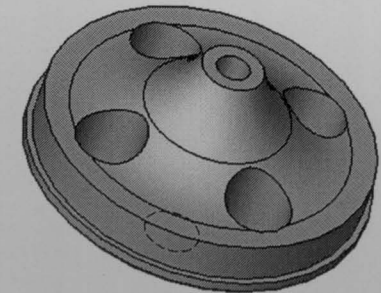
Estrutura rígida dos impulsores em silicone ou esqueleto
(impulsor de \varnothing 50 mm)



 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:
	Dimensões:	Substitui:
	Tratamentos:	Substituído por:
Escala: 3/1	Pino do esqueleto	Projectou:
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA 24-3-2004
		Verificou:
		Des. Nº 1



SECTION A-A



Material: AA - 7075T6
 Dimensões:
 Tratamentos:

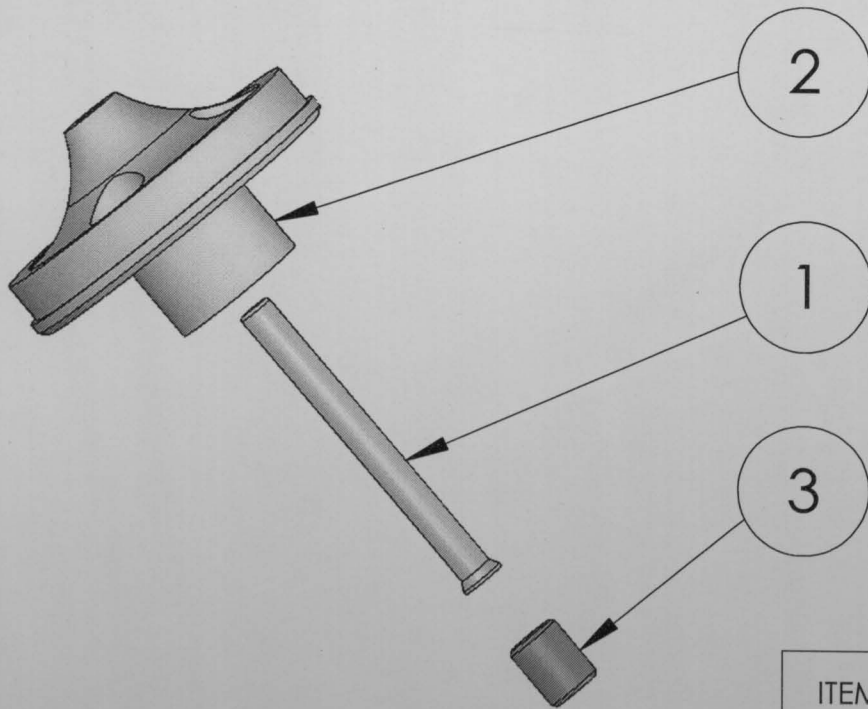
Quantidade:
 Substitui:
 Substituído por:

Escala:
 1/1
 Tol. Geral
 ISO 2768-mK

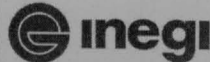
Esqueleto da turbina de silicone

Projectou:
 Desenhou: BA 24-3-2004
 Verificou:

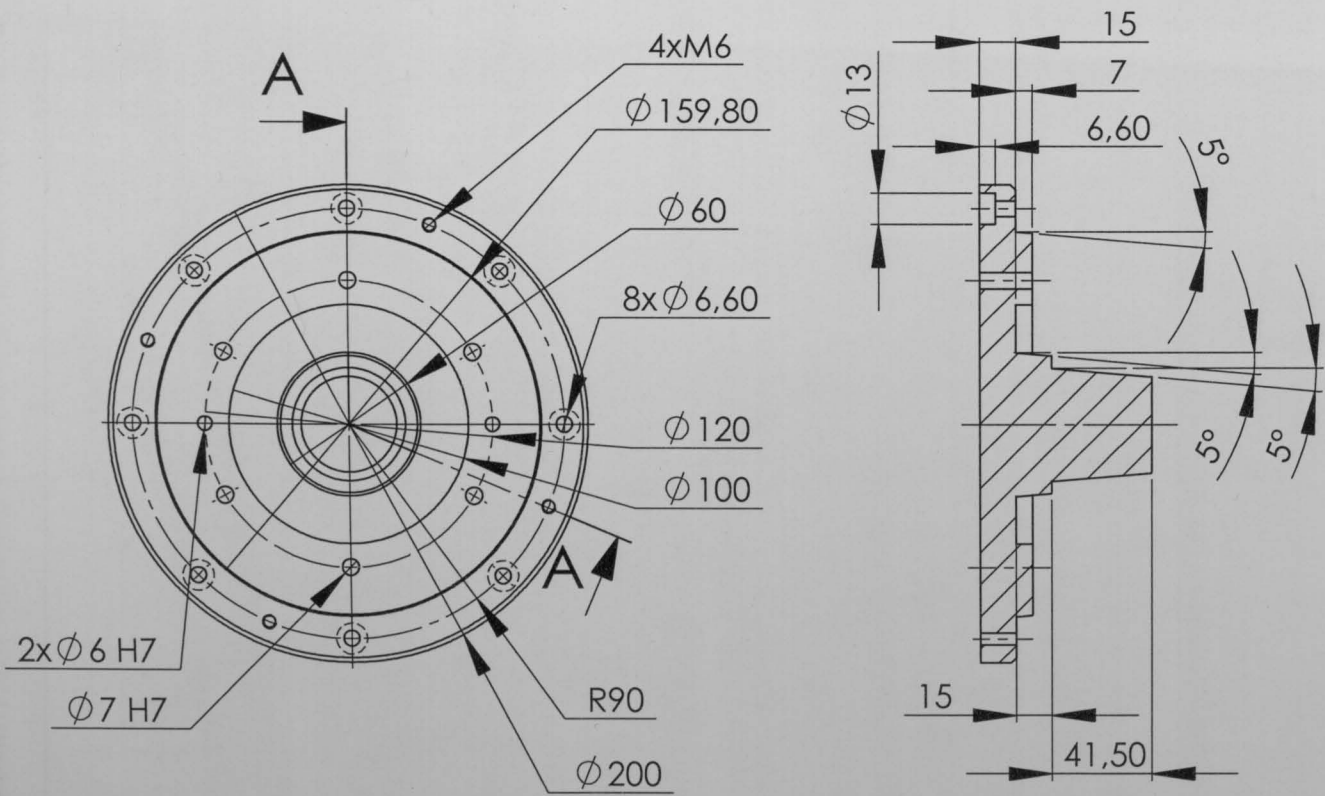
Des. Nº 2



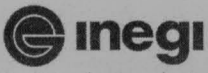
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Pino	DIN 9861	1
2	Esqueleto		1
3	parafuso	M8x10	1

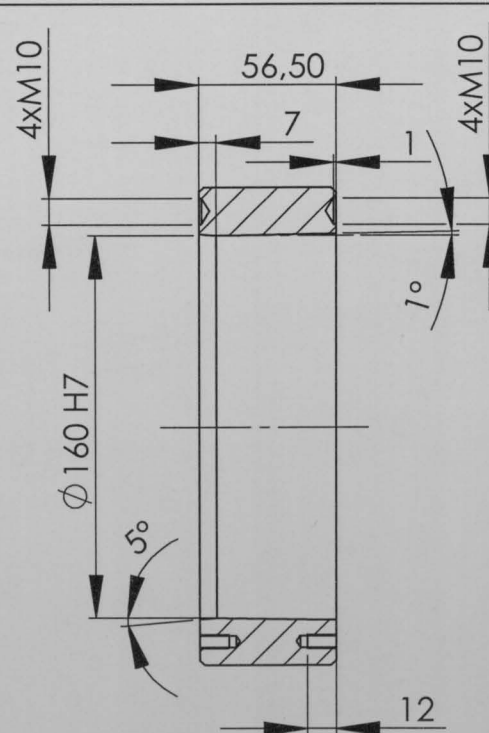
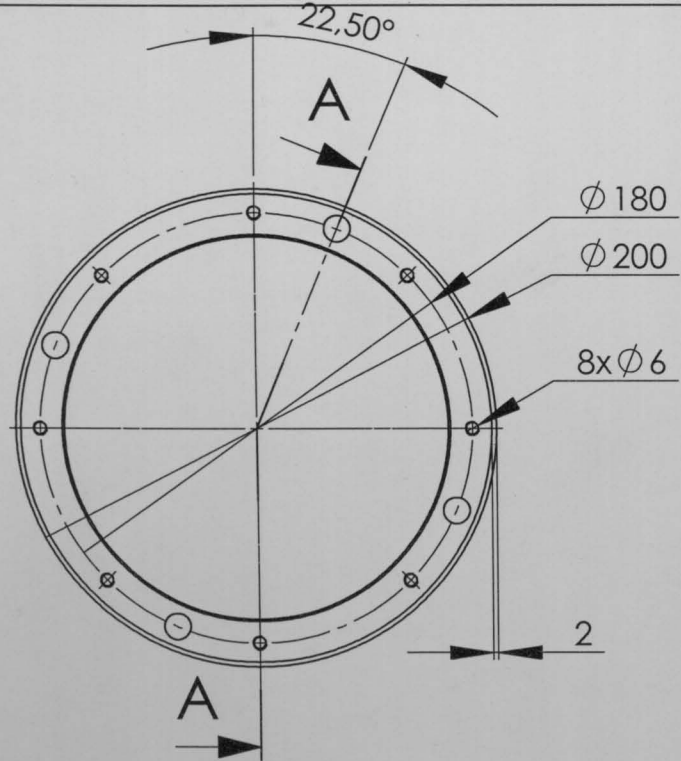
 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:			
	Dimensões:	Substitui:			
	Tratamentos:	Substituído por:			
Escala: 1/1	Desenho de conjunto		Projectou:		
Tol. Geral ISO 2768-mK			Desenhou:	BA	24-3-2004
			Verificou:		
			Des. Nº 3		

Ferramenta para obtenção da estrutura em resina para
fabrico de impulsores em silicones
(ferramenta resina/resina para impulsores)

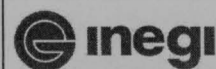


SECTION A-A
SCALE 1 : 3

 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:
	Dimensões:	Substitui:
	Tratamentos:	Substituído por:
Escala: 1/3	Base da ferramenta da parte média em resina	Projectou:
Tol. Geral		Desenhou: BA
ISO 2768-mK		Verificou:
		Des.Nº 1



SECTION A-A
SCALE 1 : 3



Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Material:

Dimensões:

Tratamentos:

Quantidade:

Substitui:

Substituído por:

Escala:
1/3

Tol. Geral
ISO 2768-mK

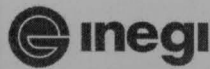
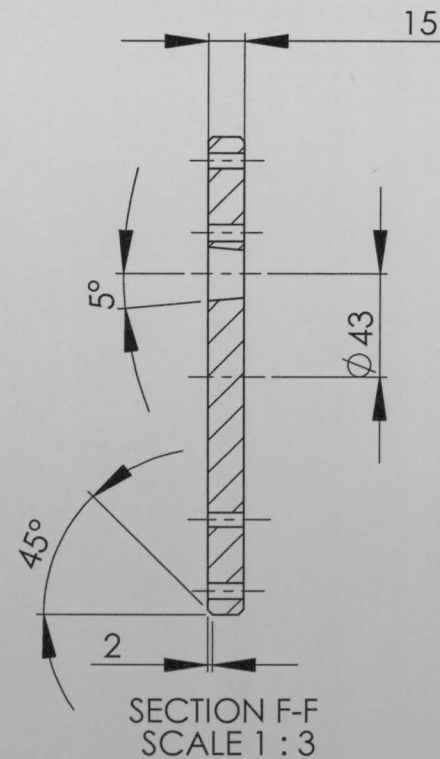
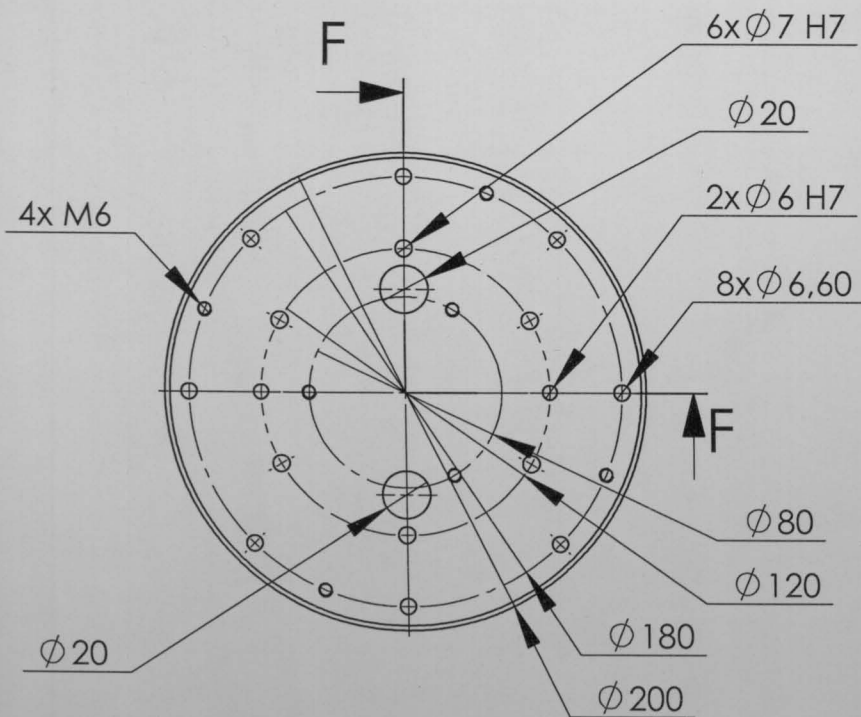
Anel da ferramenta da parte média
em resina

Projectou:

Desenhou: BA

Verificou:

Des.Nº 2



Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Material:

Dimensões:

Tratamentos:

Quantidade:

Substitui:

Substituído por:

Escala:
1/3

Tol. Geral
ISO 2768-mK

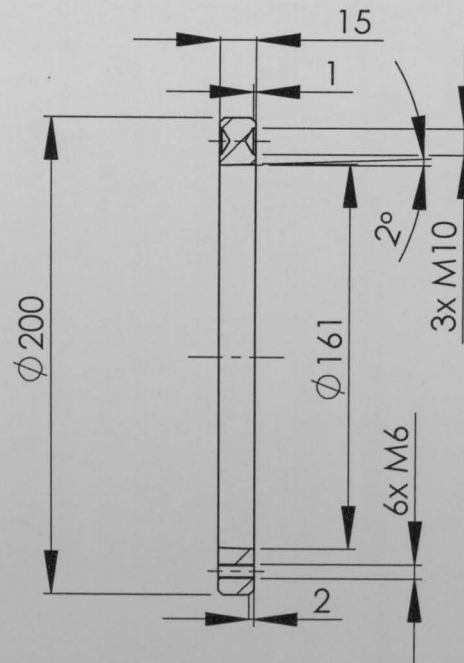
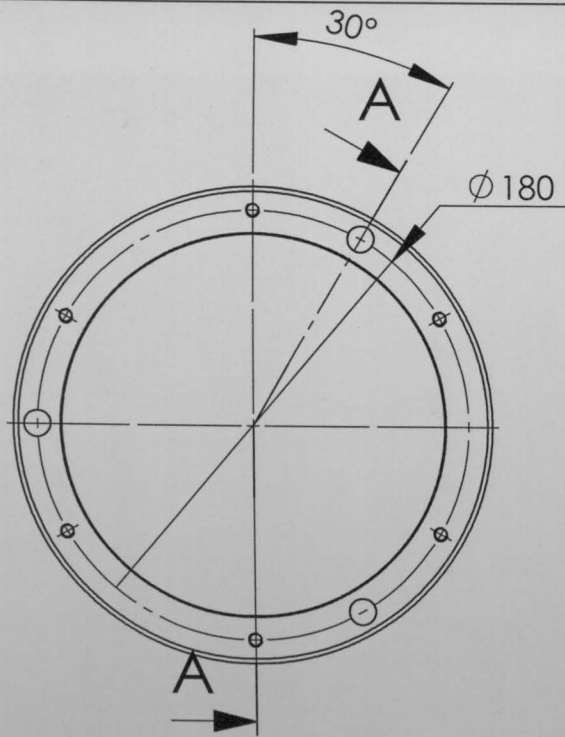
Tampa da ferramenta da parte média
em resina

Projectou:

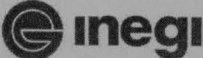
Desenhou: BA

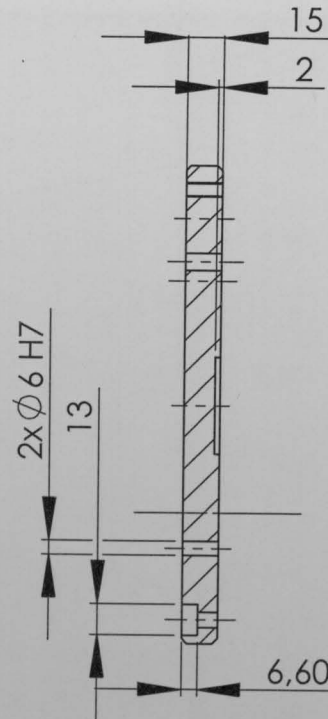
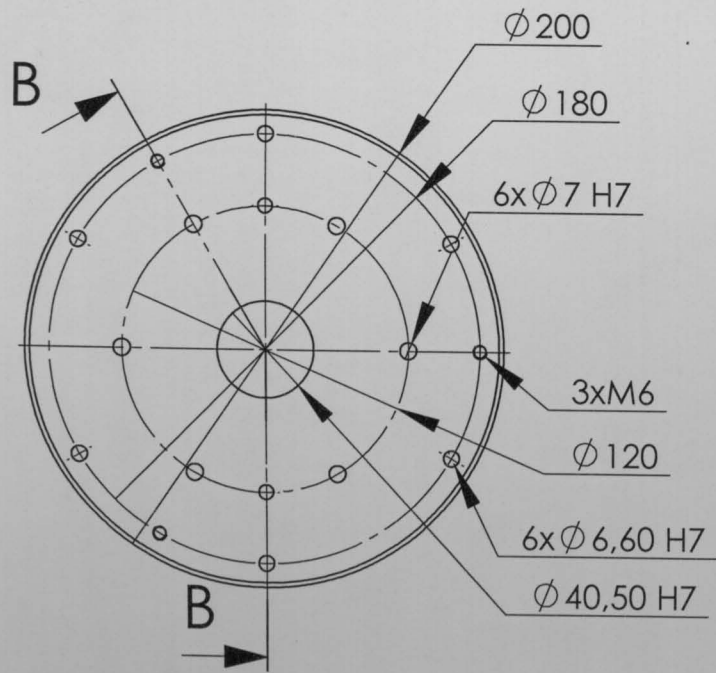
Verificou:

Des.Nº 3



SECTION A-A
SCALE 1 : 3

 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:	
	Dimensões:	Substitui:	
	Tratamentos:	Substituído por:	
Escala: 1/3	Anel da ferramenta da parte superior em resina	Projectou:	
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA	
		Verificou:	
		Des. Nº 1	



SECTION B-B
SCALE 1 : 3


 Instituto de Engenharia
 Mecânica e Gestão Industrial

Material:

Quantidade:

Dimensões:

Substitui:

Tratamentos:

Substituído por:

Escala:
 $1/3$

Base da ferramenta da parte superior
em resina

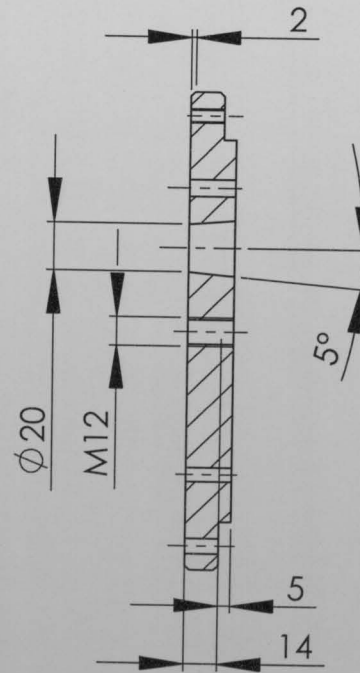
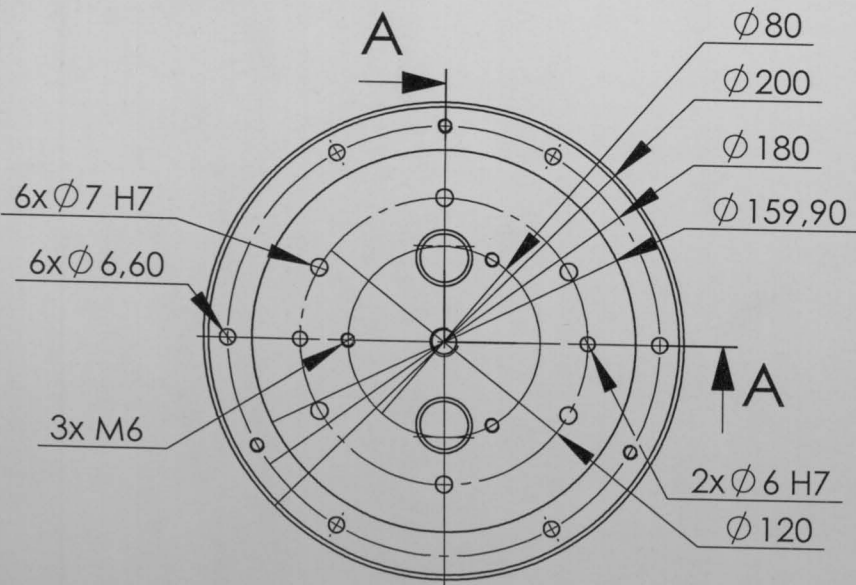
Projectou:

Desenhou: BA

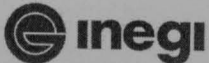
Verificou:

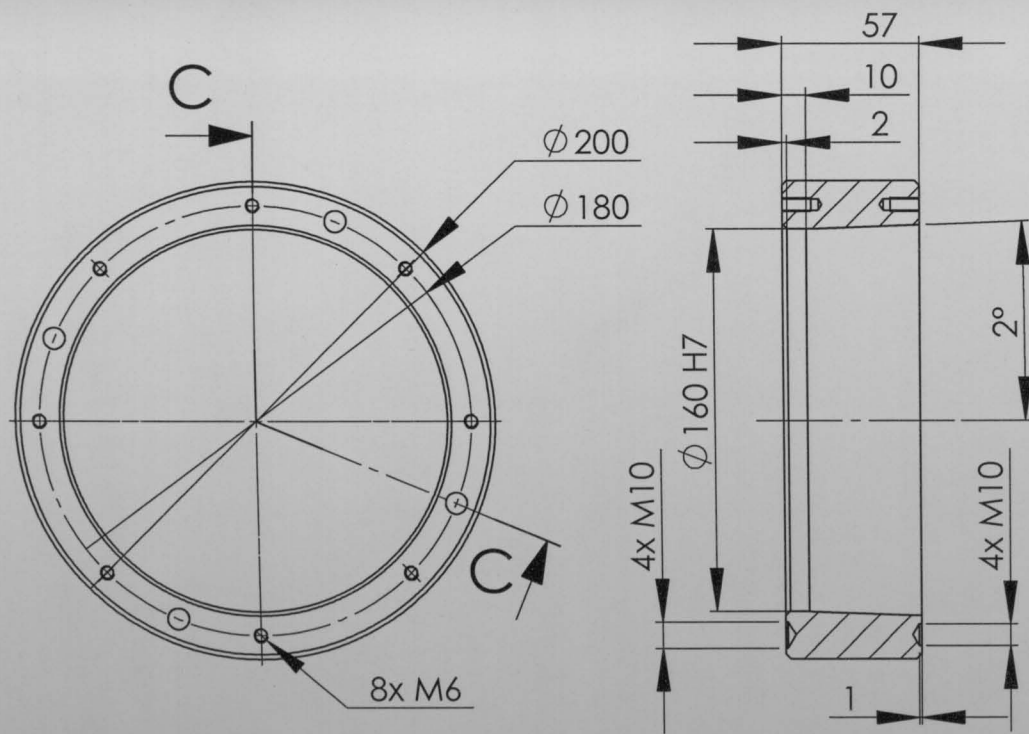
Tol. Geral
 ISO 2768-mK

Des. Nº 2

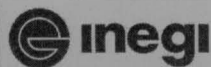


SECTION A-A
SCALE 1 : 3

 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:
	Dimensões:	Substitui:
	Tratamentos:	Substituído por:
Escala: 1/3	Tampa da ferramenta da parte superior em resina	Projectou:
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA
		Verificou:
Des. Nº 3		



SECTION C-C
SCALE 1 : 3



Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Material:

Dimensões:

Tratamentos:

Quantidade:

Substitui:

Substituído por:

Escala:

1/3

Tol. Geral

ISO 2768-mK

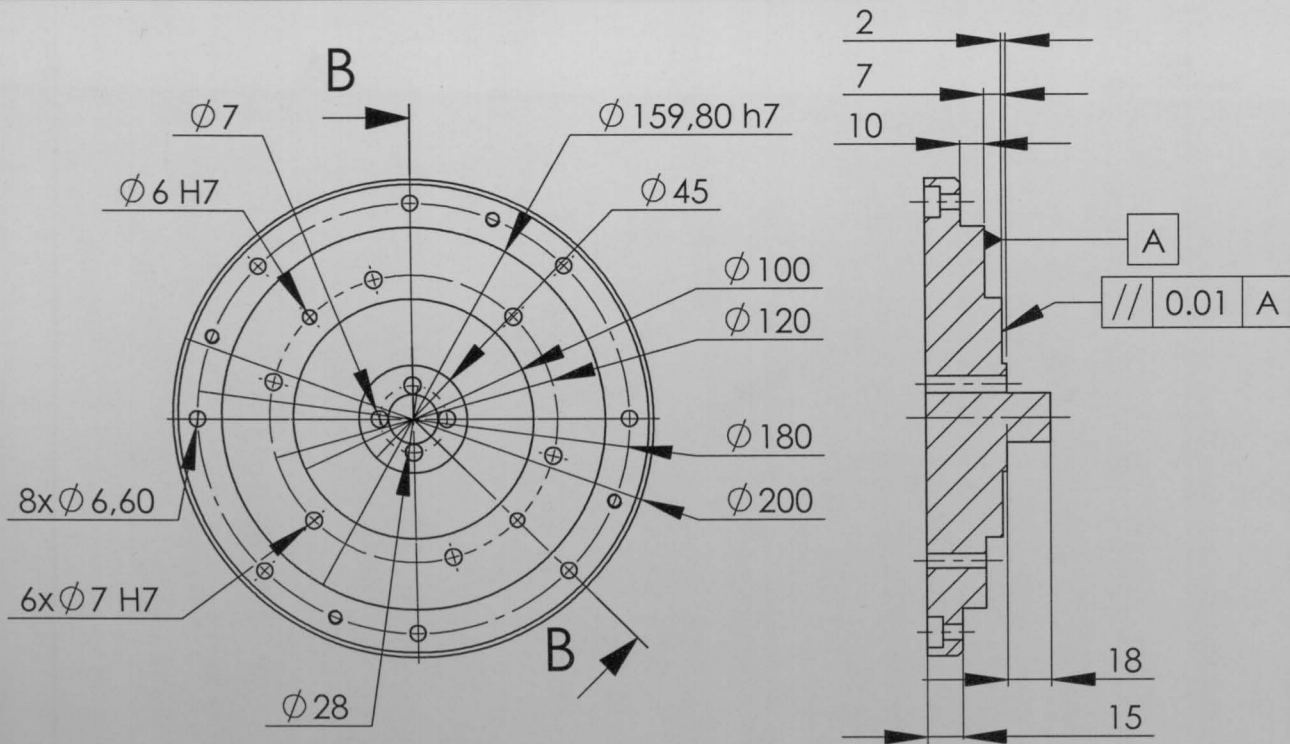
Meio da ferramenta da parte inferior
em resina

Projectou:

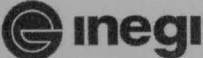
Desenhou: BA

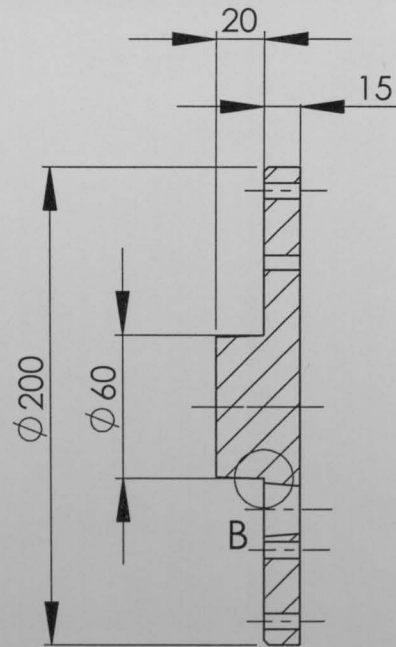
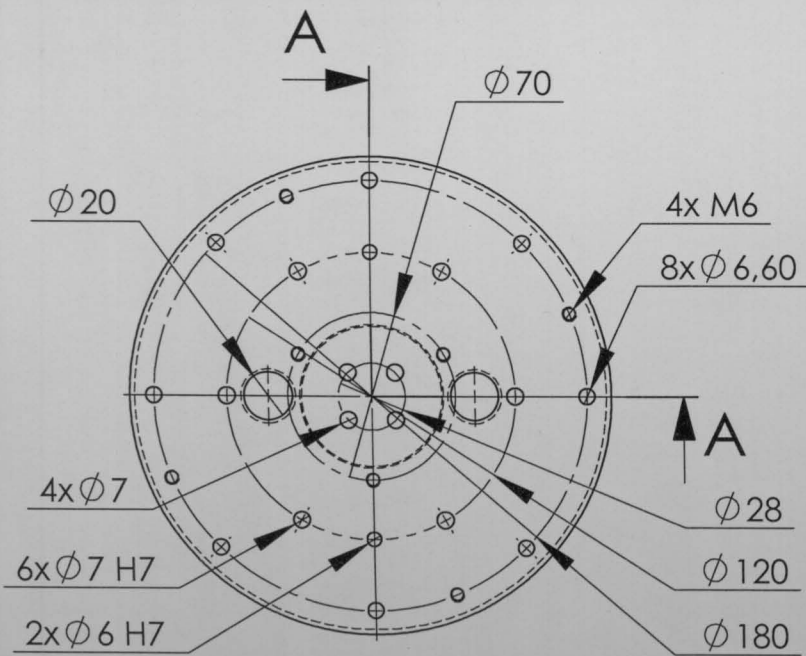
Verificou:

Des.Nº 2

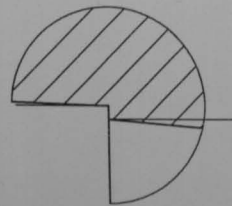


SECTION B-B
SCALE 1 : 3

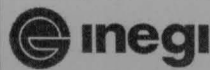
 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:
	Dimensões:	Substitui:
	Tratamentos:	Substituído por:
Escala: 1/3	Base da ferramenta da parte inferior em resina	Projectou:
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA
		Verificou:
		Des. Nº 3



SECTION A-A
SCALE 1 : 3



DETAIL B
SCALE 2 : 1.8



Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Material:

Dimensões:

Tratamentos:

Quantidade:

Substitui:

Substituído por:

Escala:

1/3

Tol. Geral

ISO 2768-mK

Tampa da ferramenta da partir inferior
em resina

Projectou:

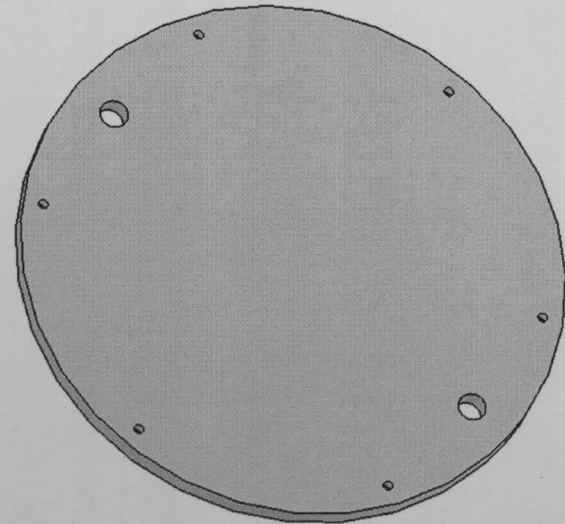
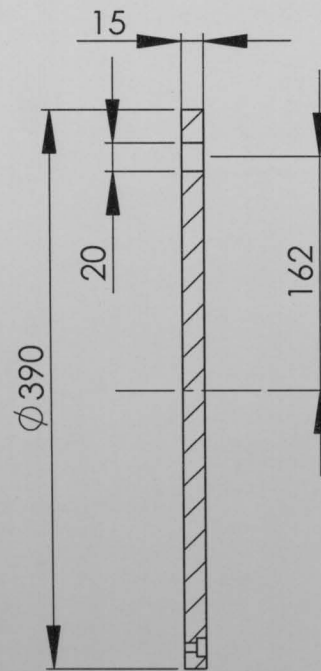
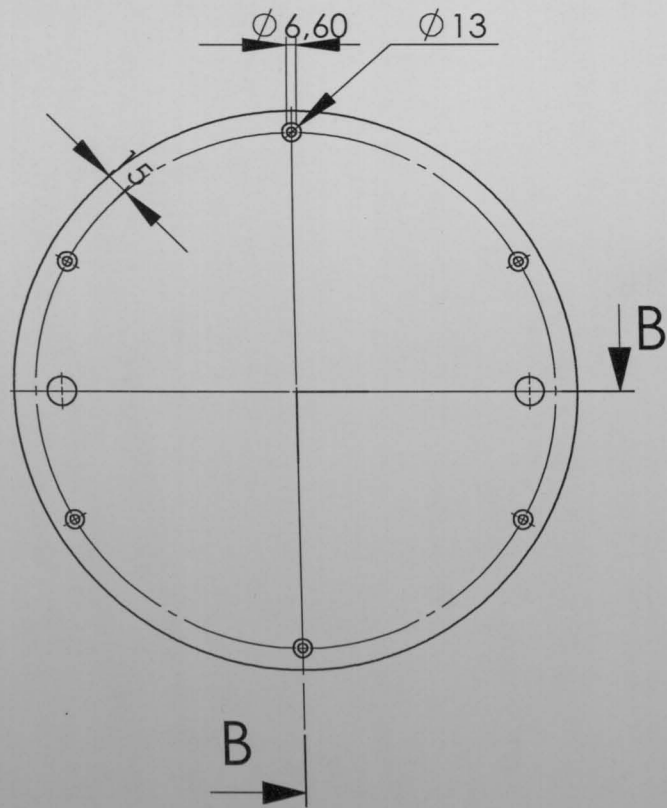
Desenhou: BA

Verificou:

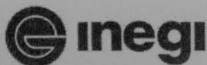
Des. Nº 4

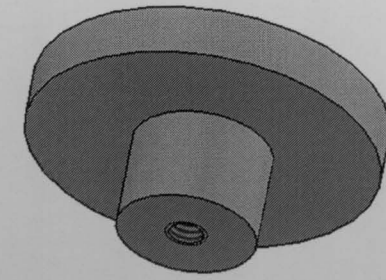
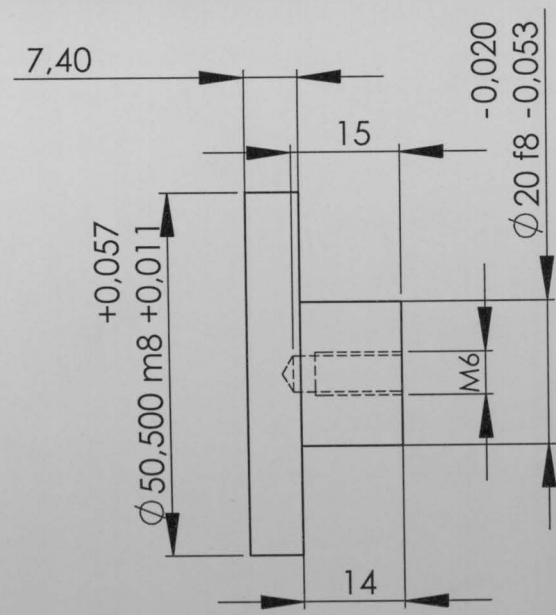
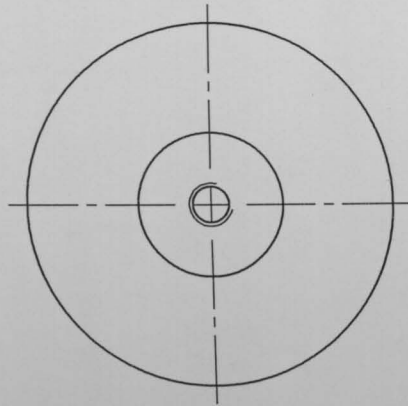
Ferramenta para revestimento da placa molde a silicone





SECTION B-B
SCALE 1 : 5

 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:
	Dimensões:	Substitui:
	Tratamentos:	Substituído por:
Escala: 1/5	Tampa da ferramenta de revestimento de silicone da placa de moldação	Projectou:
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA 29-3-2004
		Verificou:
		Des. Nº 1



Material:
 Dimensões:
 Tratamentos:

Quantidade:
 Substitui:
 Substituído por:

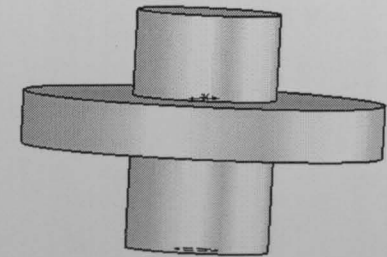
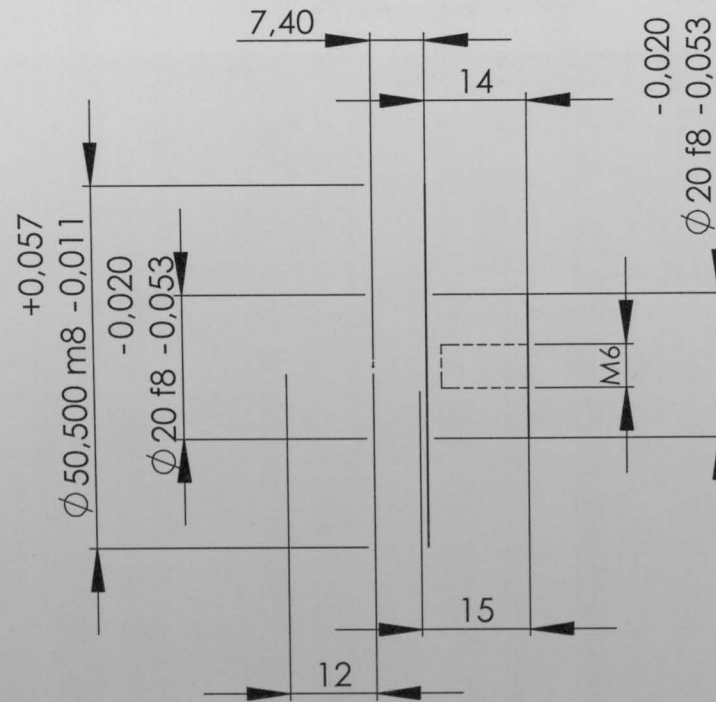
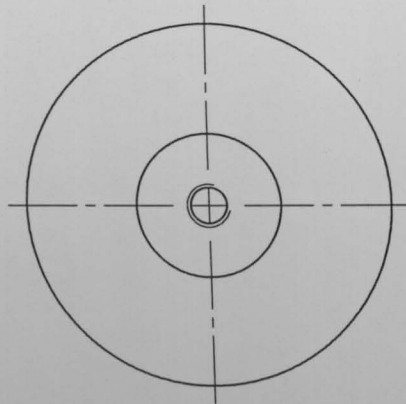
Escala:
 1/1

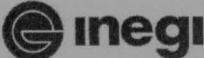
Tol. Geral
 ISO 2768-mK

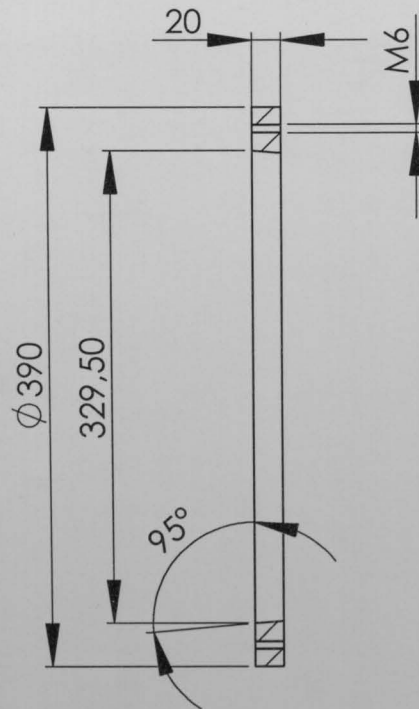
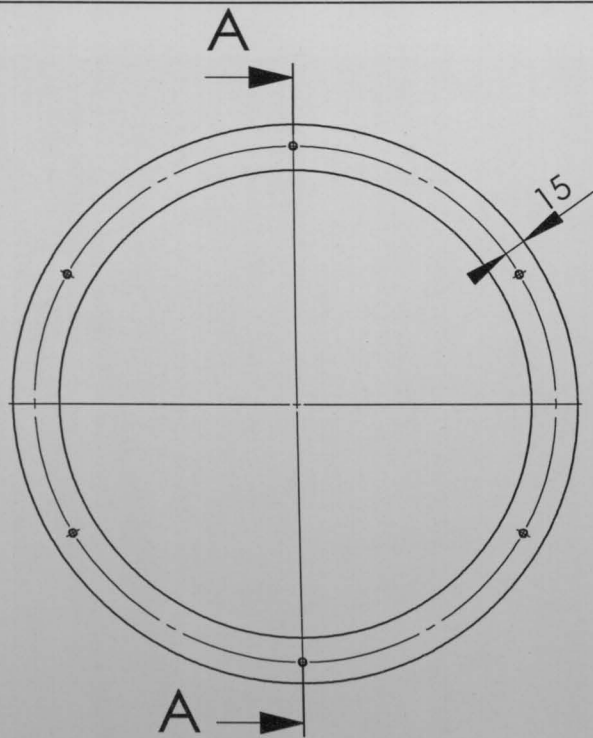
Postiço Liso

Projectou:
 Desenhou: BA 24-3-2004
 Verificou:

Des. Nº 2

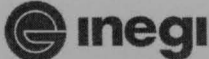


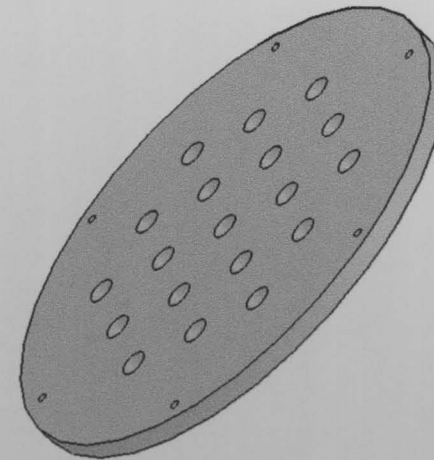
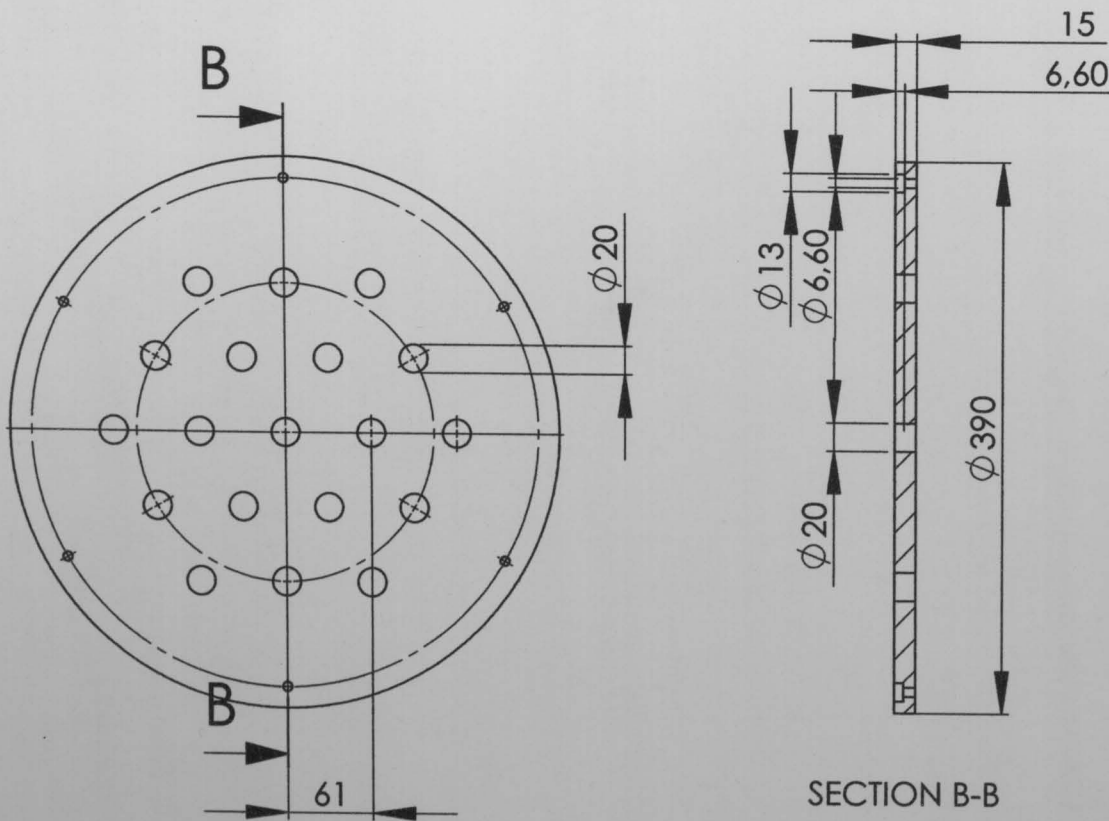
 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:		
	Dimensões:	Substitui:		
	Tratamentos:	Substituído por:		
Escala: 1/5	postição guia		Projectou:	
Tol. Geral ISO 2768-mK			Desenhou: BA	6-03-2004
			Verificou:	
		Des.Nº 3		




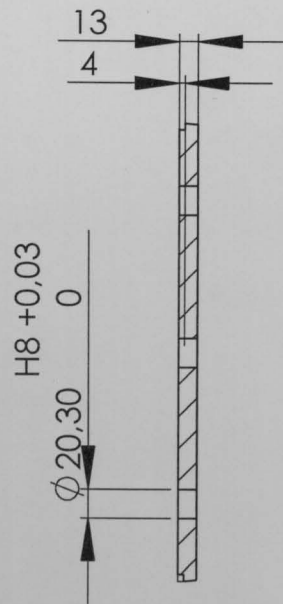
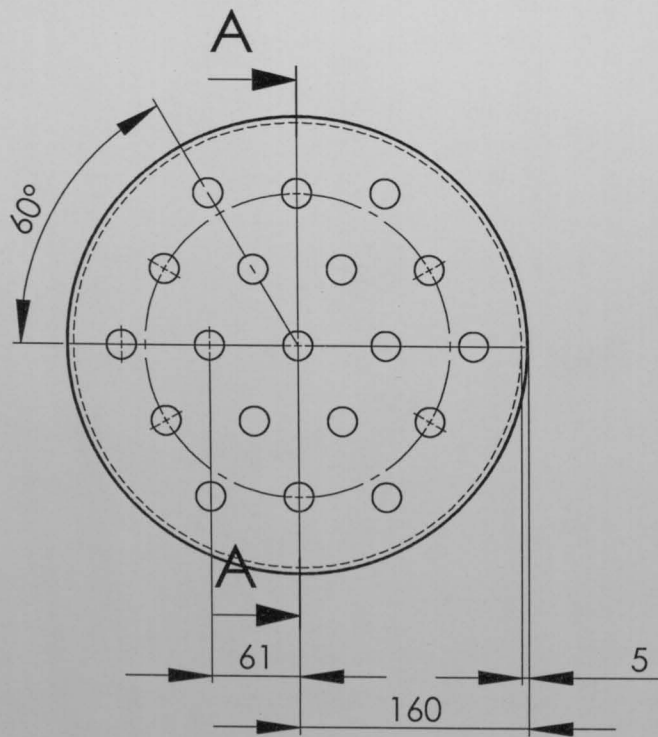
SECTION A-A
SCALE 1 : 5



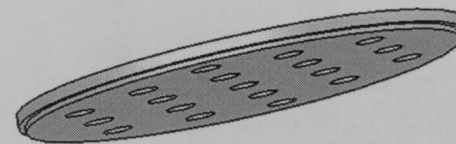
 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:
	Dimensões:	Substitui:
	Tratamentos:	Substituído por:
Escala: 1/5	Anel da ferramenta de revestimento da placa a silicone	Projectou:
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA 29-3-2004
		Verificou:
		Des. Nº 4

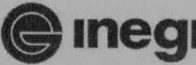


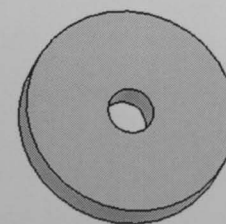
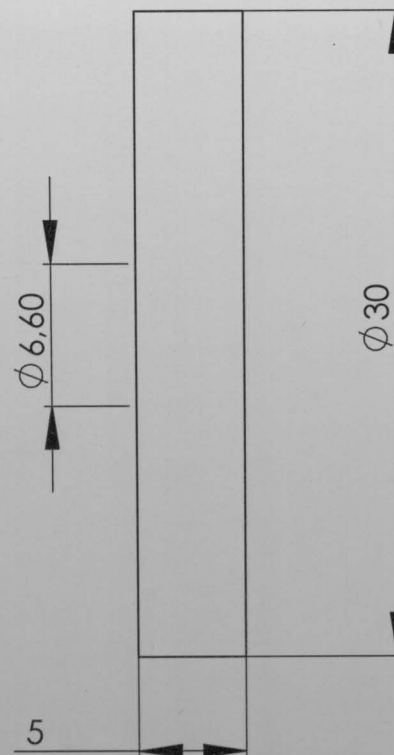
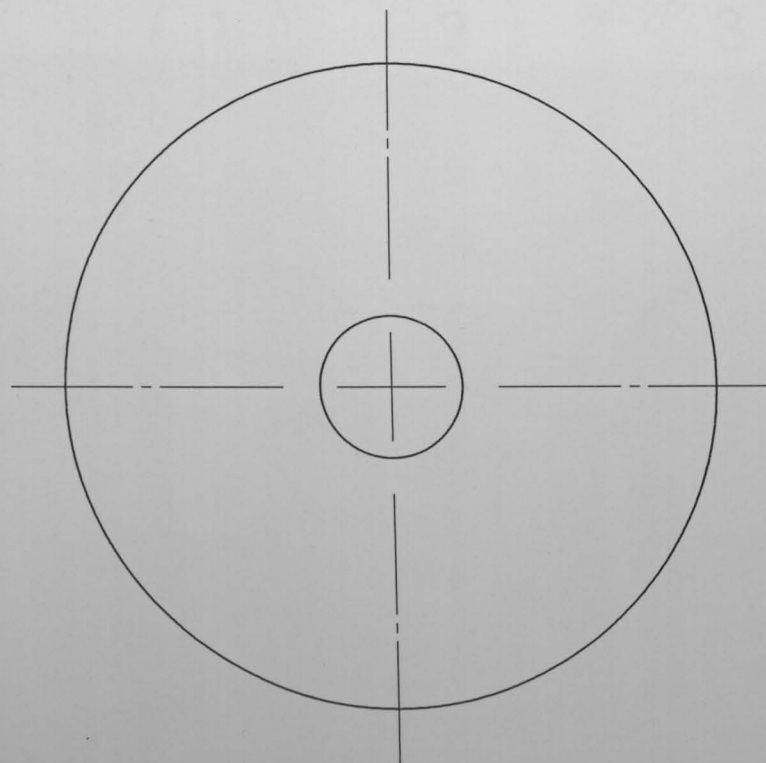
 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:	
	Dimensões:	Substitui:	
	Tratamentos:	Substituído por:	
Escala: 1/5	Base da ferramenta de revestimento da placa a silicone	Projectou:	
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou:	BA 29-3-2004
		Verificou:	
		Des. Nº 5	

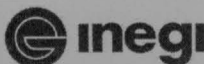


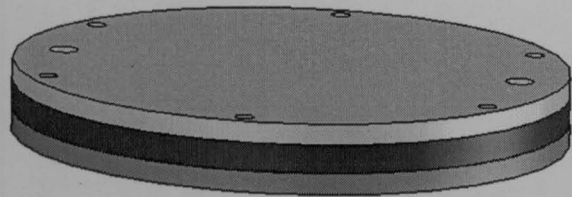
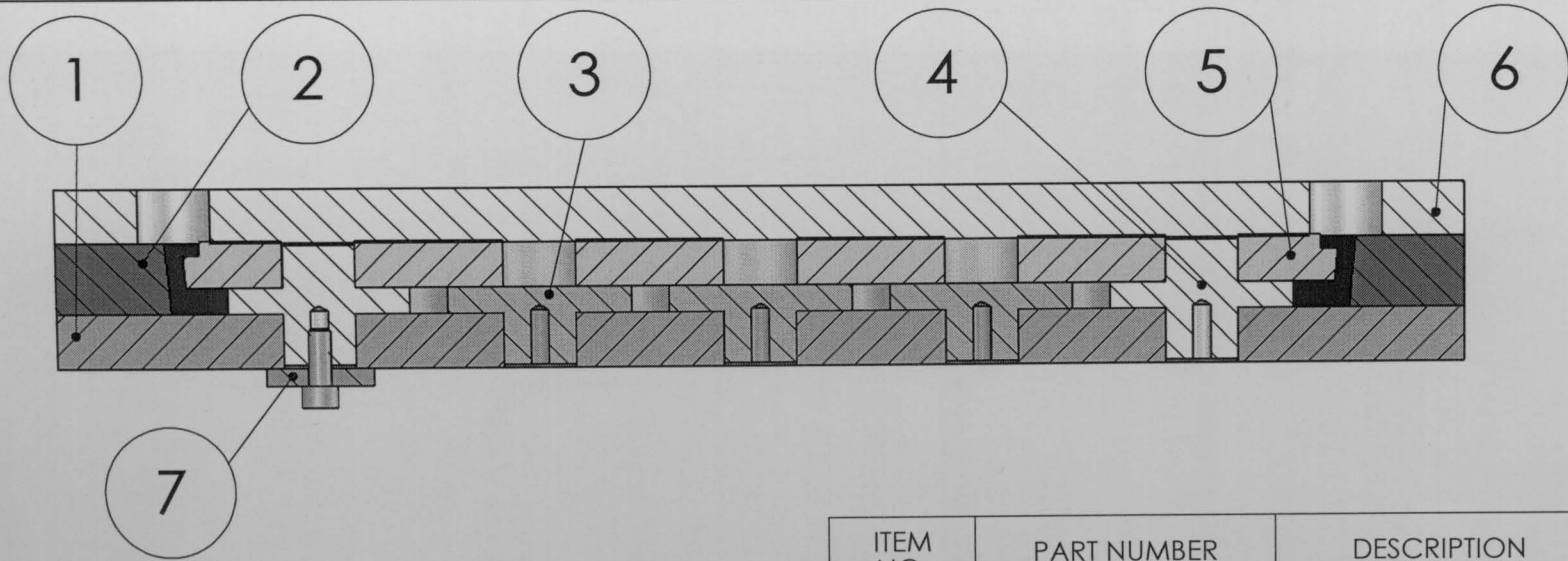
SECTION A-A



 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:	
	Dimensões:	Substitui:	
	Tratamentos:	Substituído por:	
Escala: 1/5	Placa para revestir de silicone	Projectou:	
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA	25-3-2004
		Verificou:	
		Des. Nº 1	



 Inegi Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade: 19	
	Dimensões:	Substitui:	
	Tratamentos:	Substituído por:	
Escala: 3/1	Anilha	Projectou:	
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA	6-03-2004
		Verificou:	
		Des. Nº 7	



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1		base da ferram.	1
2		Anel da ferramenta	1
3		Postiço liso	17
4		Postiço guia	2
5		Placa para revestir	1
6		Tampa da ferram.	1
7		Anilha	19

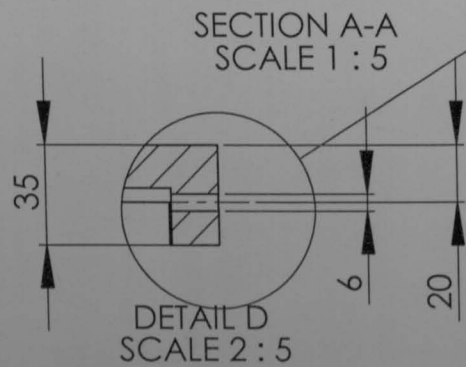
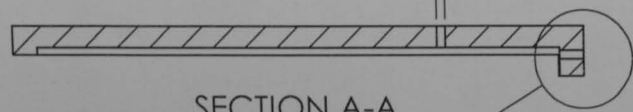
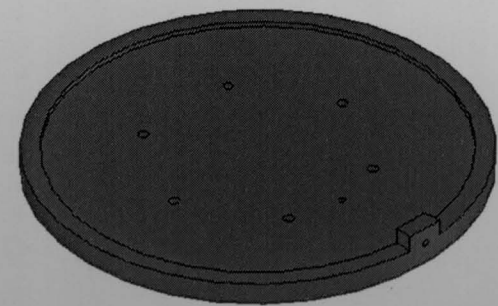
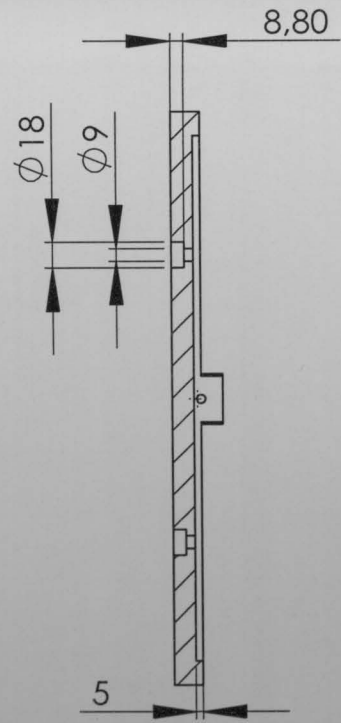
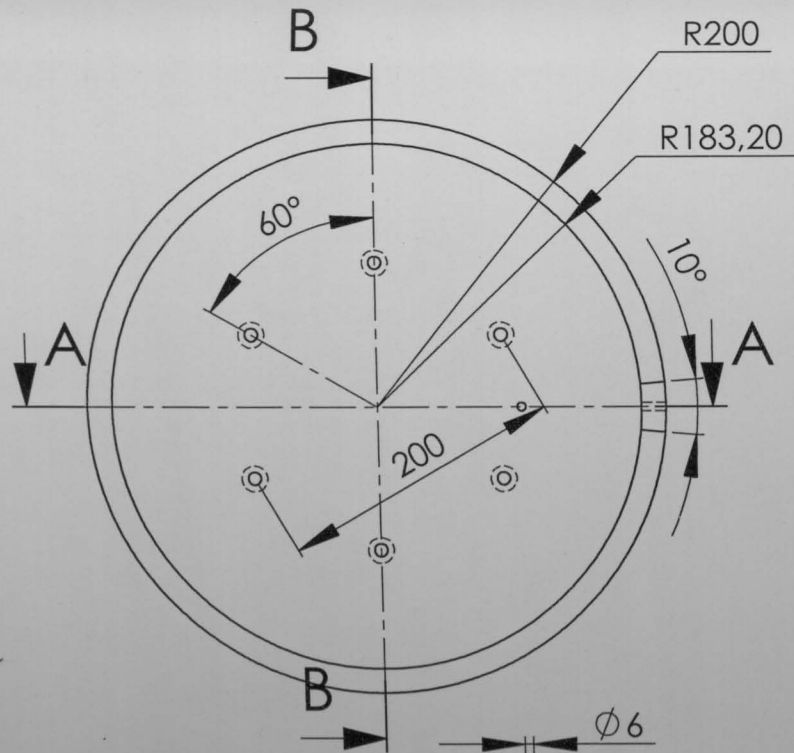


Material:	Quantidade:
Dimensões:	Substitui:
Tratamentos:	Substituído por:

Escala: 1/5	Desenho de conjunto da ferramenta de revestimento da placa de moldação	Projectou:	
Tol. Geral		Desenhou: BA	6-04-2004
		Verificou:	

Des. Nº 8

Ferramenta para revestimento da caixa de moldação a
silicone



SECTION B-B
SCALE 1 : 5

SECTION A-A
SCALE 1 : 5

DETAIL D
SCALE 2 : 5

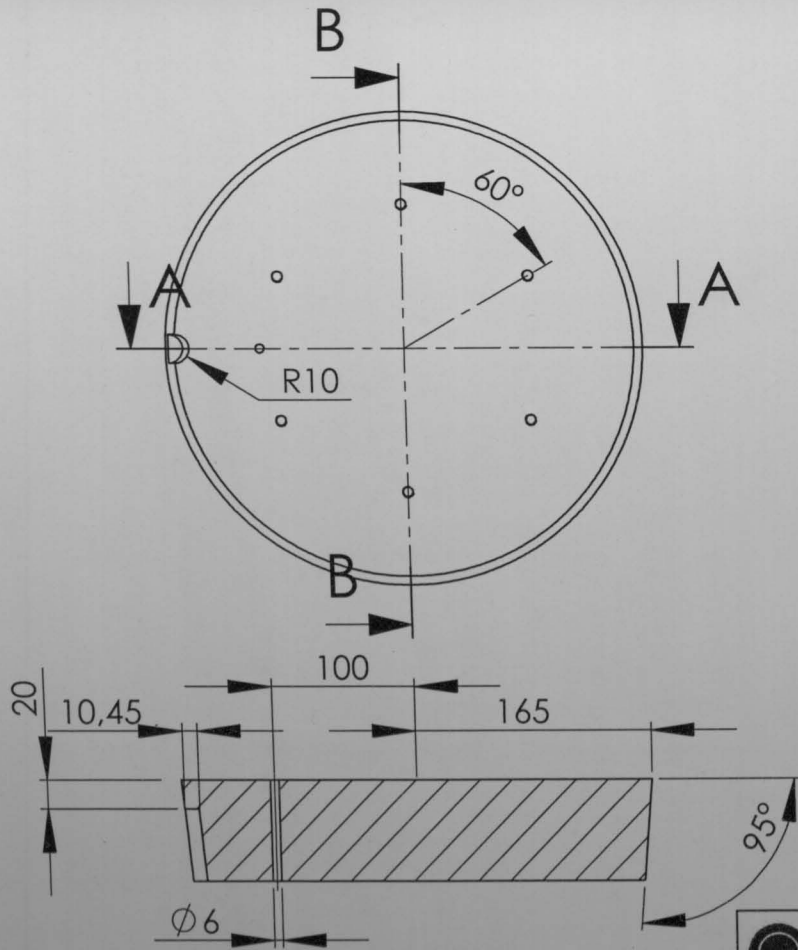


Material:	Quantidade:
Dimensões:	Substitui:
Tratamentos:	Substituído por:

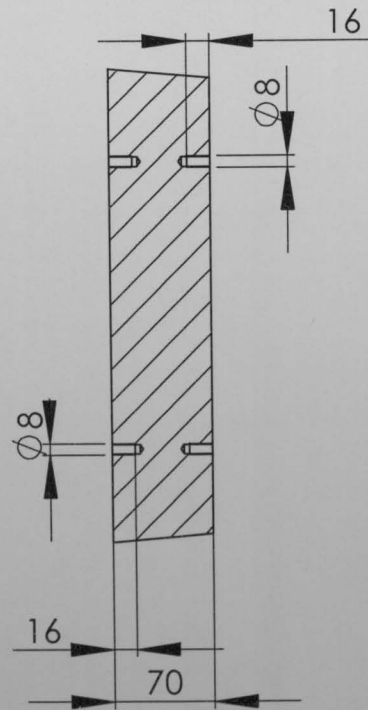
Escala: 1/5
Tol. Geral ISO 2768-mK

Base da ferramenta de revestimento
da caixa de moldação

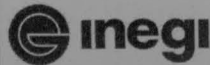
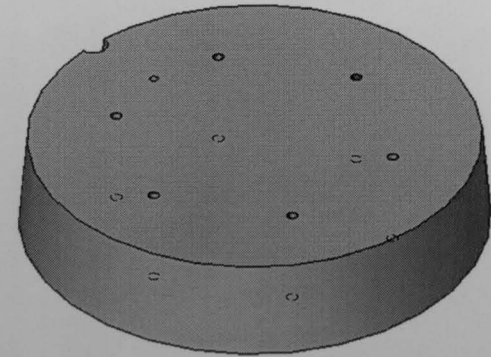
Projectou:		
Desenhou:	BA	25-3-2004
Verificou:		
Des.Nº 1		



SECTION A-A



SECTION B-B



Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Material:

Dimensões:

Tratamentos:

Quantidade:

Substitui:

Substituído por:

Escala:

1/5

Tol. Geral
ISO 2768-mK

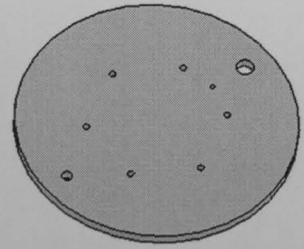
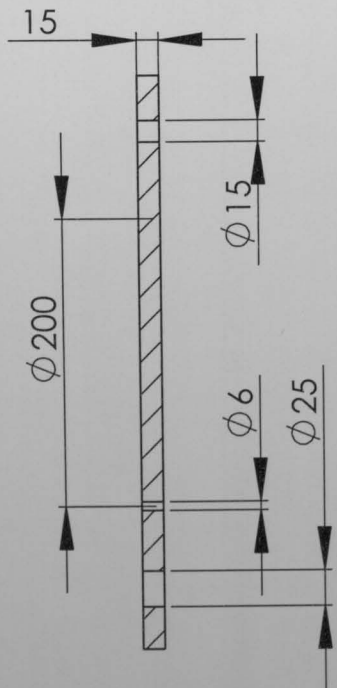
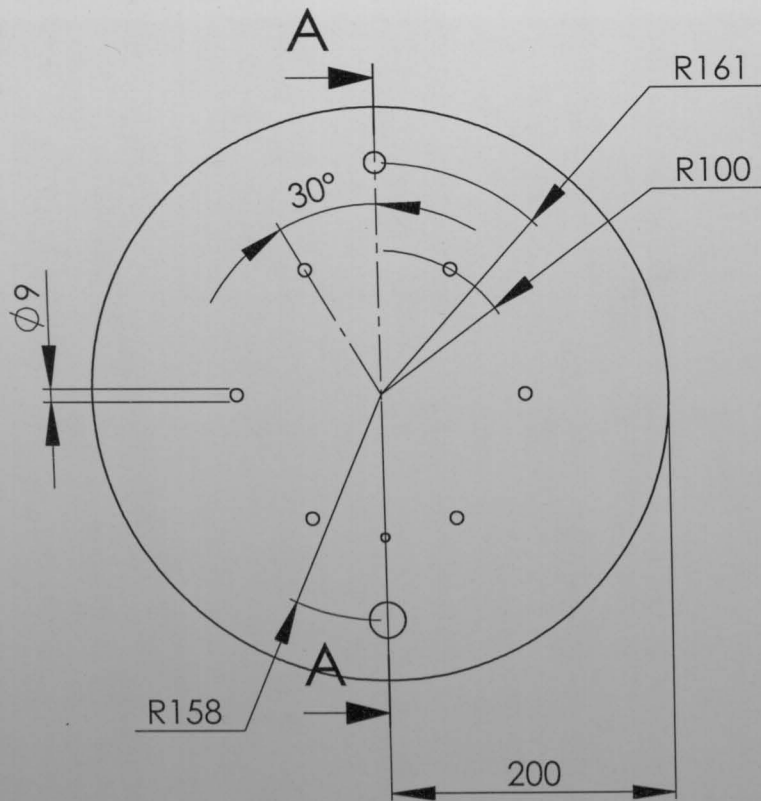
Macho da ferramenta de revestimento
da caixa de moldação

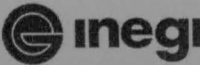
Projectou:

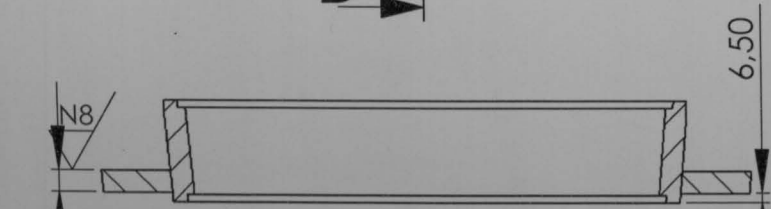
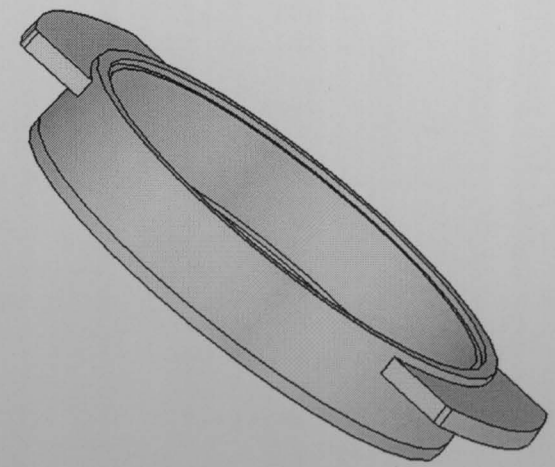
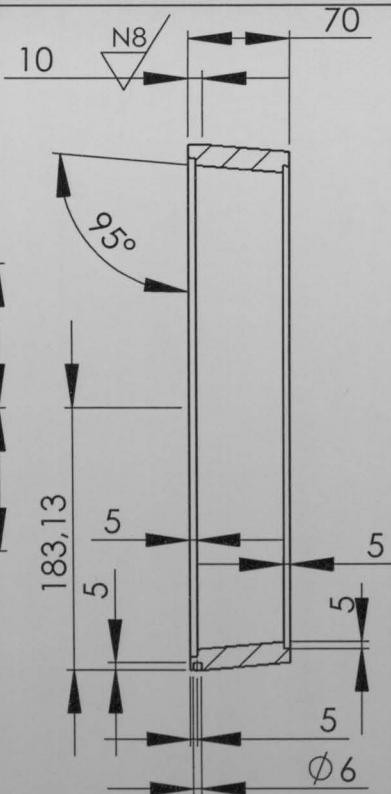
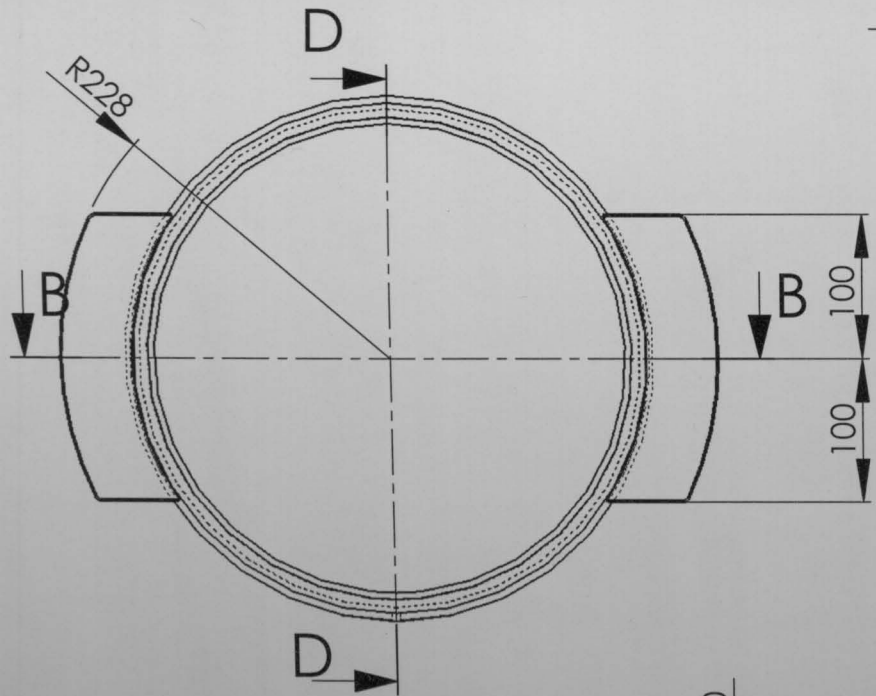
Desenhou: BA 24-3-2004

Verificou:

Des. Nº 2



 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:
	Dimensões:	Substitui:
	Tratamentos:	Substituído por:
Escala: 1/5	Tampa da ferramenta de revestimento da caixa de moldação	Projectou:
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA 25-3-2004
		Verificou:
		Des. Nº 3



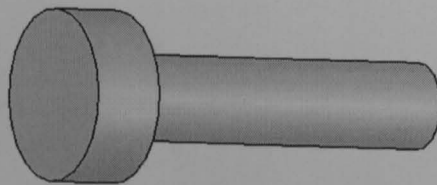
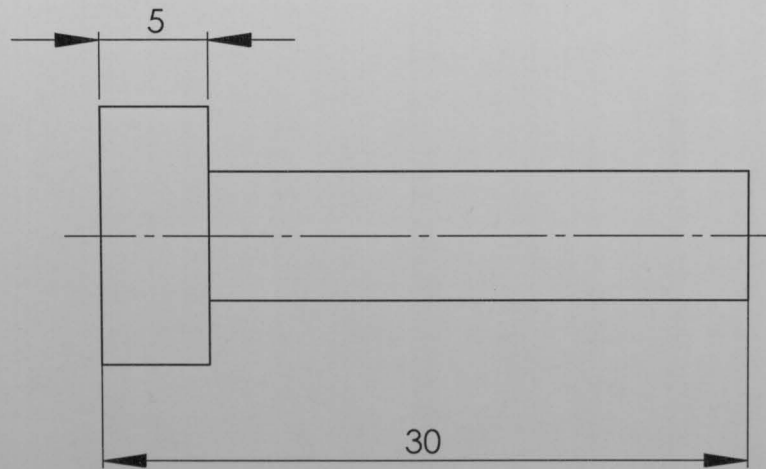
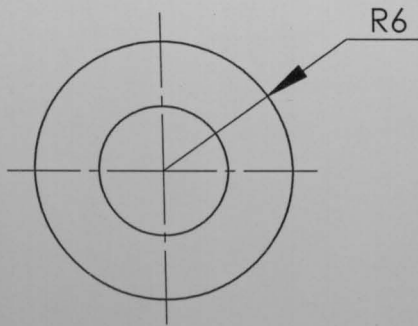
SECTION B-B
SCALE 1 : 5

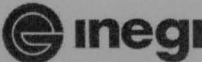
SECTION D-D
SCALE 1 : 5

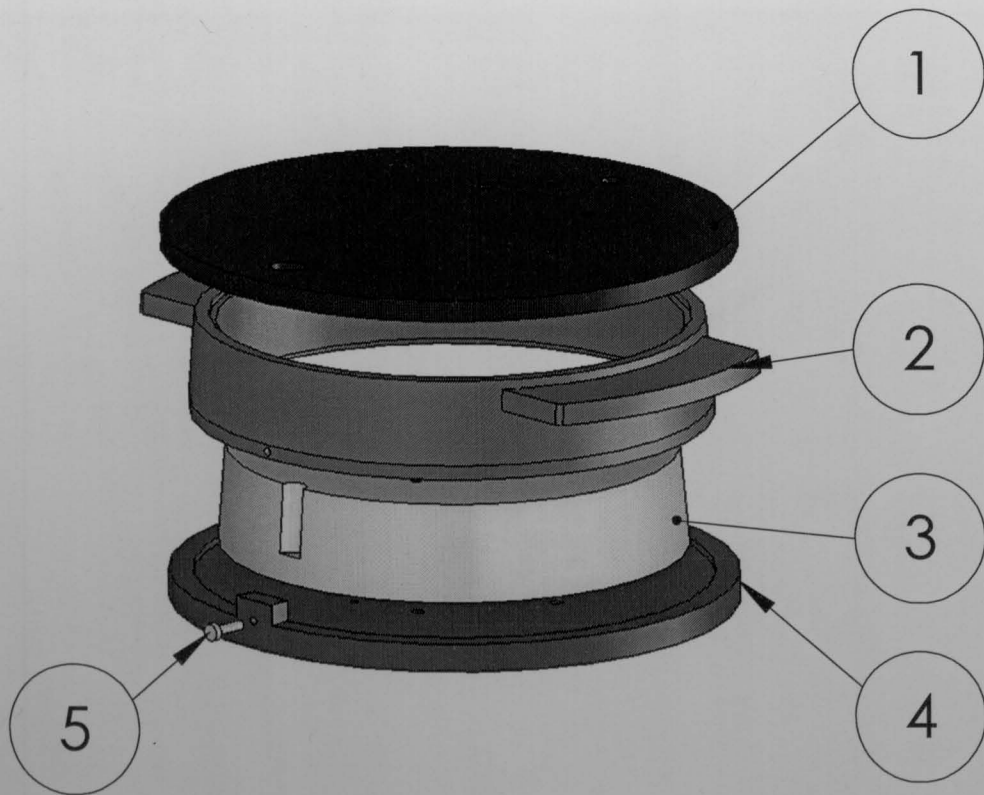
inegi
Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Material:	Quantidade:
Dimensões:	Substitui:
Tratamentos:	Substituído por:

<p>Escala: 1/5</p> <p>Tol. Geral ISO 2768-mK</p>	<p>Anel maquinado</p>	<p>Projectou:</p> <p>Desenhou: BA 5-04-2004</p> <p>Verificou:</p>	<p>Des.Nº 4</p>
--	-----------------------	---	-----------------



 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Quantidade:		
	Dimensões:	Substitui:		
	Tratamentos:	Substituído por:		
Escala: 3/1	Pino de posicionamento lateral		Projectou:	
Tol. Geral ISO 2768-mK			Desenhou: BA	25-3-2004
			Verificou:	
		Des. Nº 5		



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1		Tampa da caixa de revestimento	1
2		Anel maquinado	1
3		Macho da caixa de revestimento	1
4		Base da caixa de revestimenta	1
5		Pino lateral	1

inegi
 Instituto de Engenharia
 Mecânica e Gestão Industrial

Material:

Quantidade:

Dimensões:

Substitui:

Tratamentos:

Substituído por:

Escala:
1/5

Conjunto da ferramenta de revestimento
do anel da caixa de moldação

Projectou:

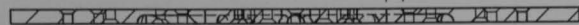
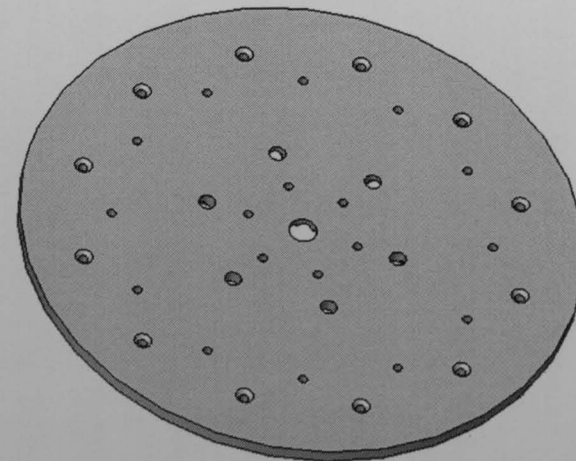
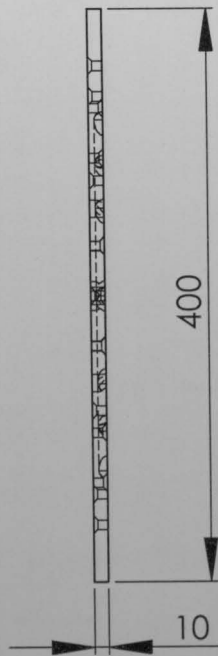
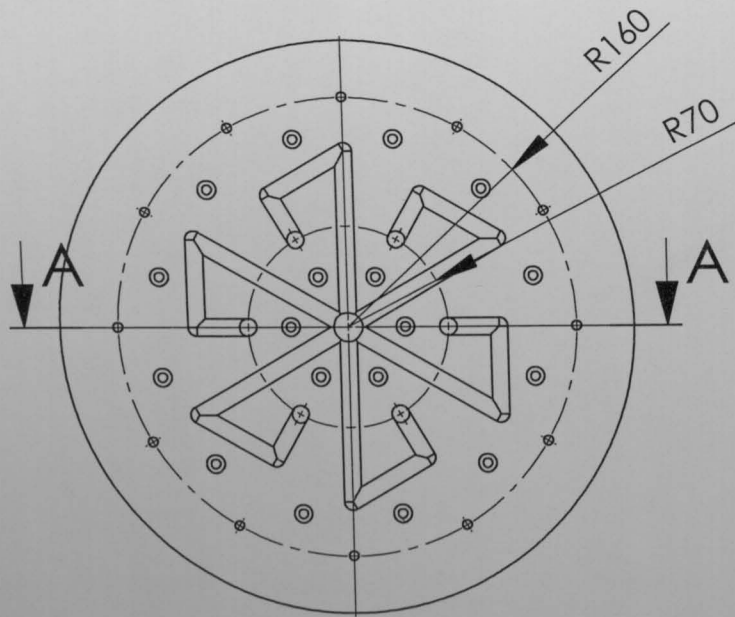
Desenhou: BA 5-03-2004

Verificou:

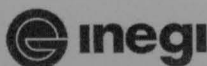
Tol. Geral
ISO 2768-mK

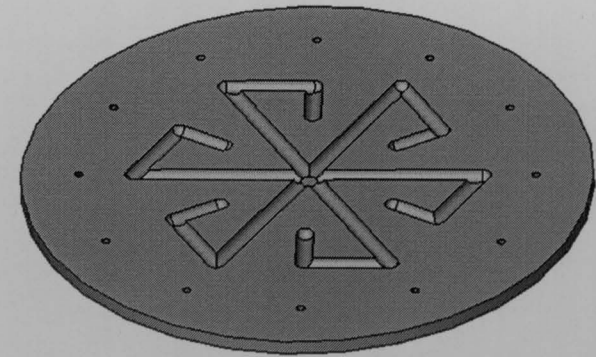
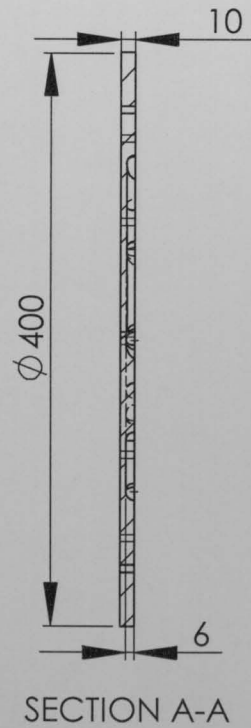
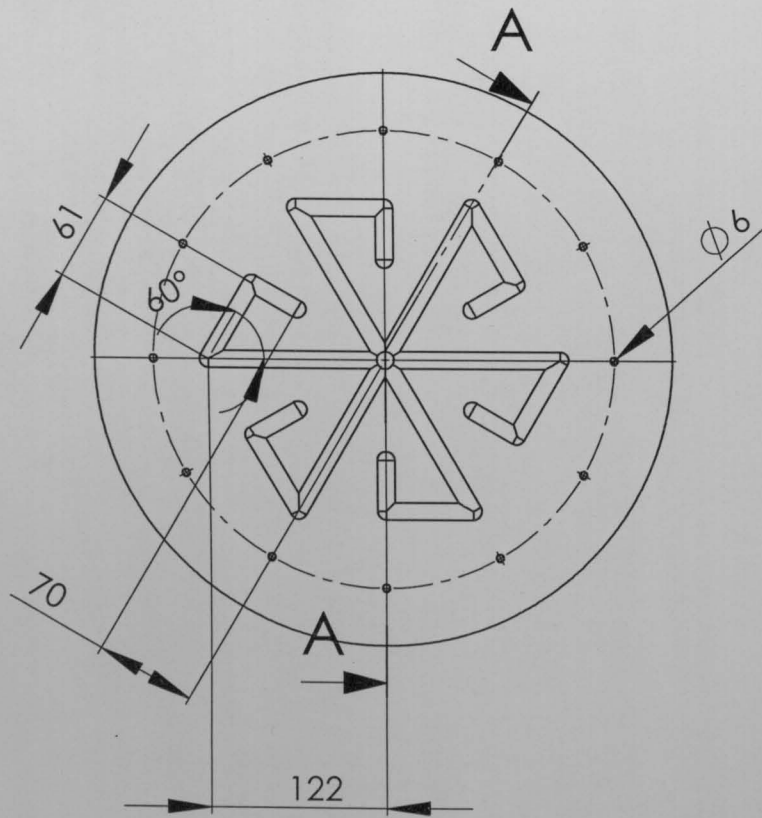
Des. Nº 6

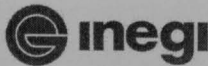
Câmara de vazamento

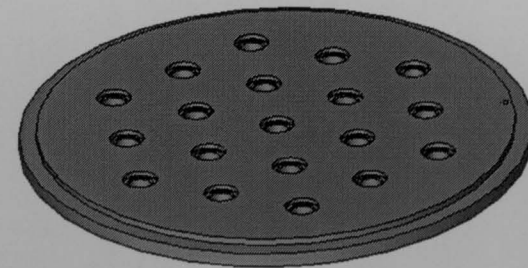
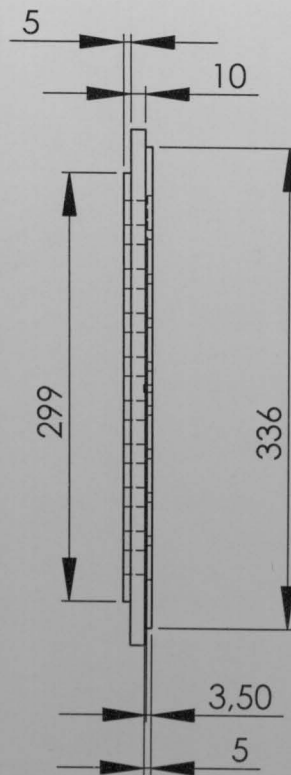
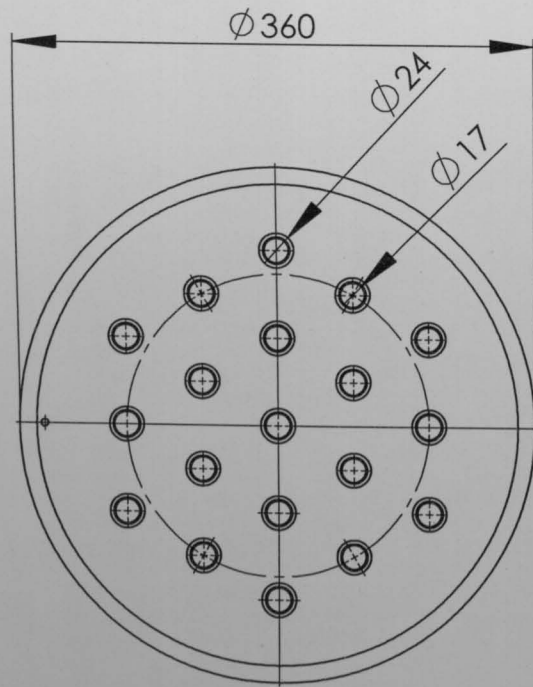


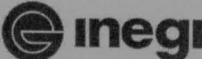
SECTION A-A
SCALE 1 : 5

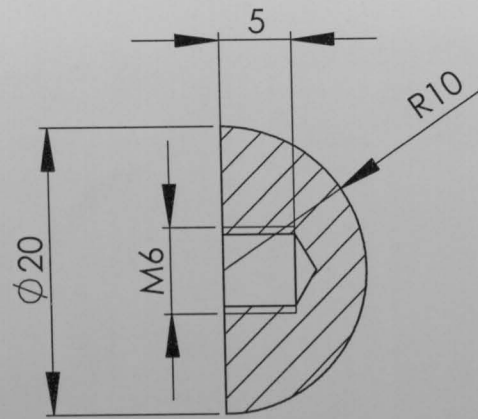
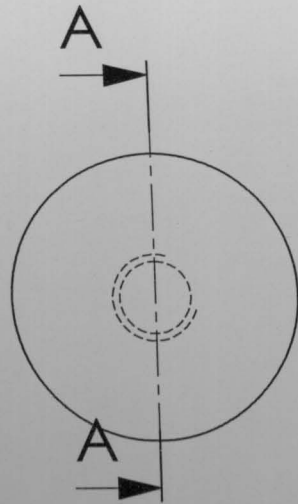
 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material:	Cobre	Quantidade:			
	Dimensões:		Substitui:			
	Tratamentos:		Substituído por:			
Escala:	Tampa superior			Projectou:		
1/5				Desenhou:	RF	16-4-2004
Tol. Geral				Verificou:		
ISO 2768-mK				Des. Nº 1		



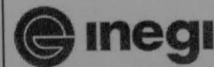
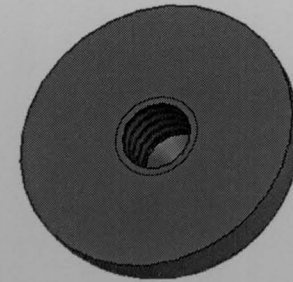
 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material: Cobre	Quantidade:
	Dimensões:	Substitui:
	Tratamentos:	Substituído por:
Escala: 1/5	Tampa Inferior	Projectou:
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA 15-04-2004
		Verificou:
		Des. Nº 1



 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material: AÇO	Quantidade:	
	Dimensões:	Substitui:	
	Tratamentos:	Substituído por:	
Escala: 1/5	Placa furada	Projectou:	
Tol. Geral ISO 2768-mK		Desenhou: BA	15-4-2004
		Verificou:	
		Des. Nº 1	



SECTION A-A



Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Material: AÇO

Quantidade:

Dimensões:

Substitui:

Tratamentos:

Substituído por:

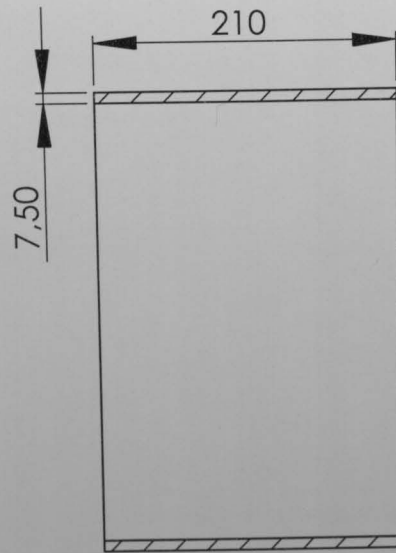
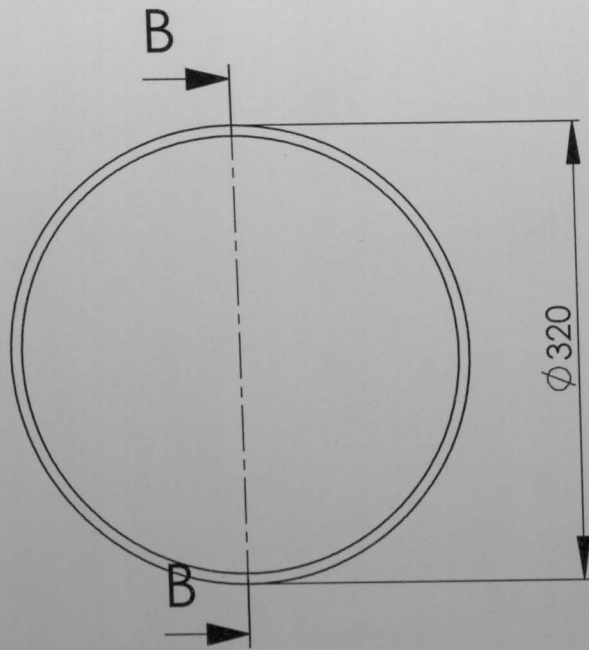
Escala:
2/1

Posicionador

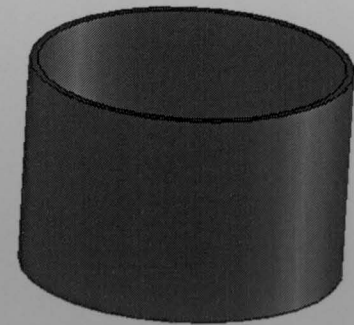
Projectou:		
Desenhou:	BA	16-4-2004
Verificou:		

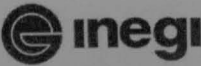
Tol. Geral
ISO 2768-mK

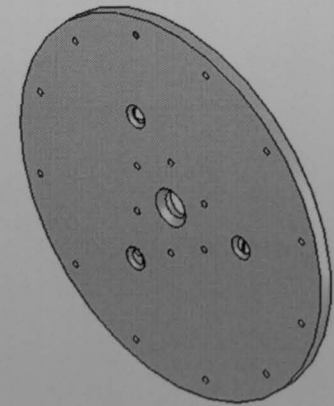
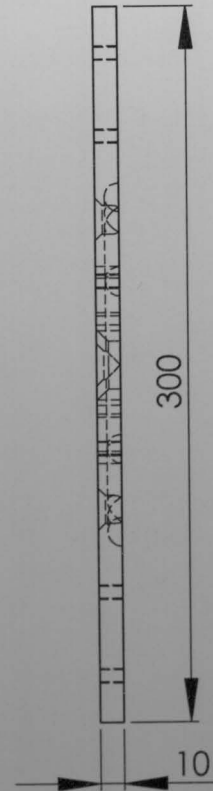
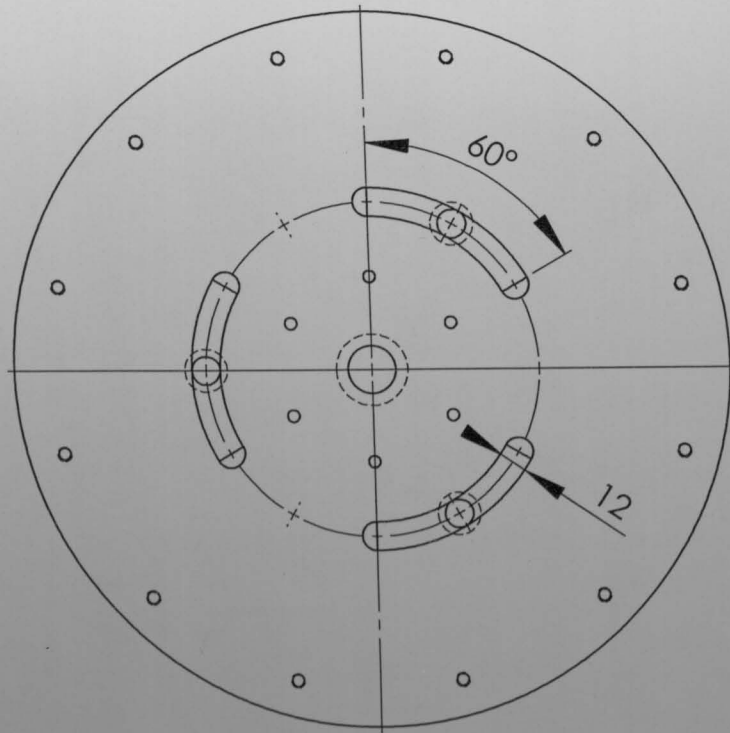
Des. Nº 1



SECTION B-B



 Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Material: Aço	Quantidade:	
	Dimensões:	Substitui:	
	Tratamentos:	Substituído por:	
Escala: 1/5	Anel extractor		Projectou:
Tol. Geral ISO 2768-mK			Desenhou: BA 16-4-2004
			Verificou:
		Des.Nº 1	



inegi
 Instituto de Engenharia
 Mecânica e Gestão Industrial

Material: Cobre

Quantidade:

Dimensões:

Substitui:

Tratamentos:

Substituído por:

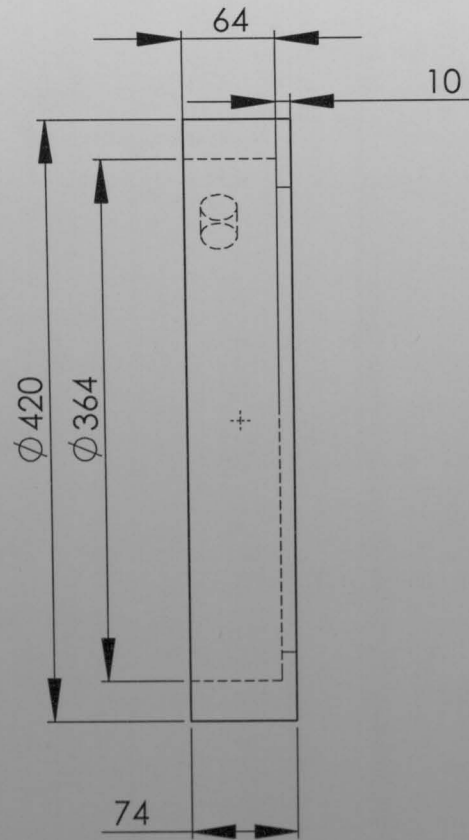
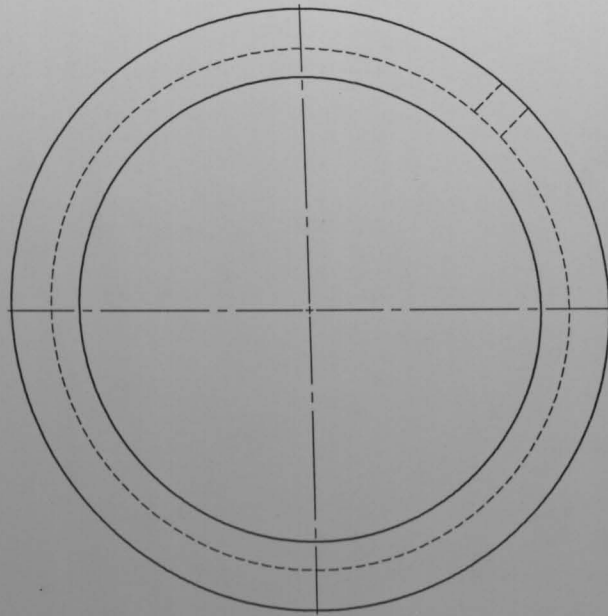
Escala:
 1/2

Coroa

Projectou:		
Desenhou:	BA	16-4-2004
Verificou:		

Tol. Geral
 ISO 2768-mK

Des.Nº 1



inegi
 Instituto de Engenharia
 Mecânica e Gestão Industrial

Material: AÇO

Quantidade:

Dimensões:

Substitui:

Tratamentos:

Substituído por:

Escala:
 1/5

Tol. Geral
 ISO 2768-mK

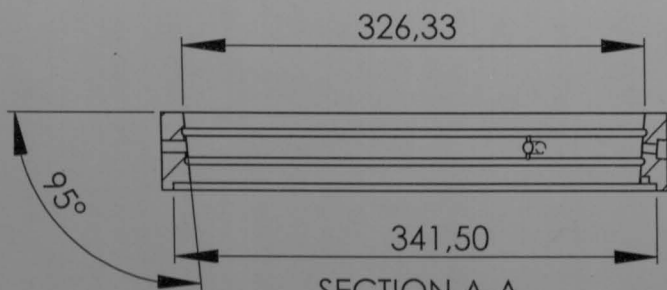
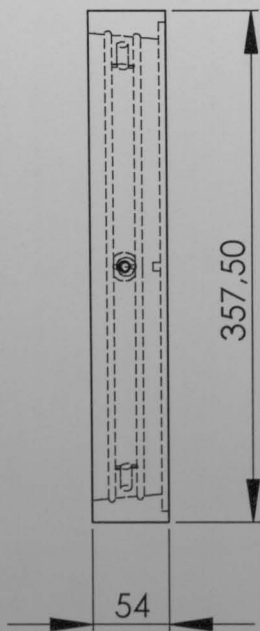
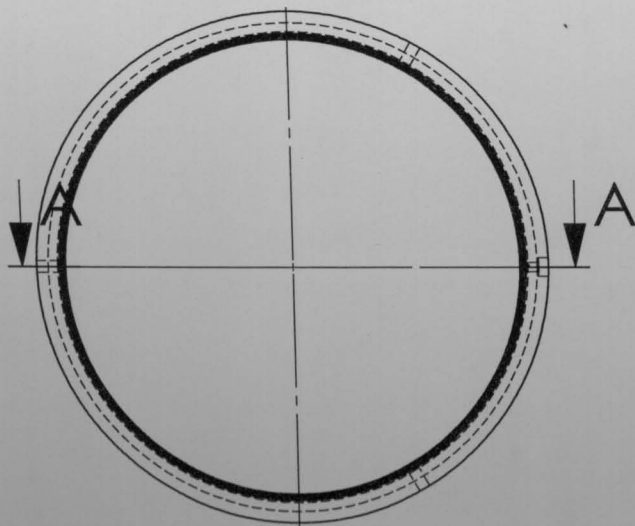
Anel exterior

Projectou:

Desenhou: BA 15-4-2004

Verificou:

Des. Nº 1



SECTION A-A
SCALE 1 : 5

inegi
Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Material: Aço

Dimensões:

Tratamentos:

Quantidade:

Substitui:

Substituído por:

Escala:
1/5

Tol. Geral
ISO 2768-mK

Anel interno

Projectou:

Desenhou: BA 15-4-2004

Verificou:

Des.Nº 1



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000088356