

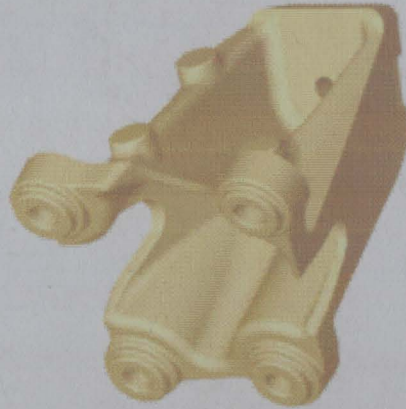
# ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO

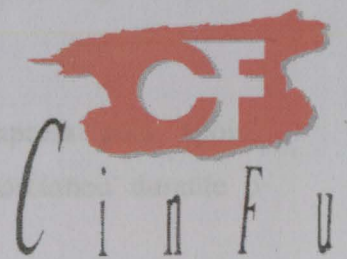
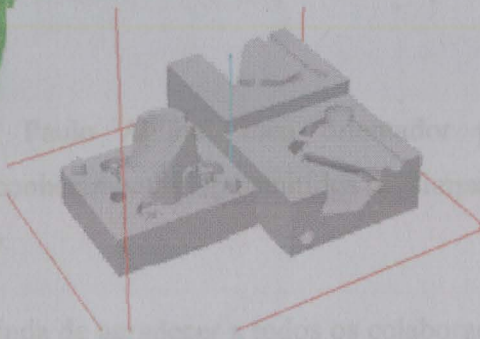
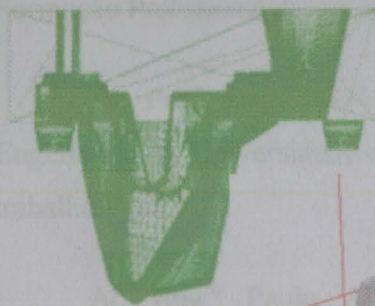
JULHO 2004



Universidade  
do Porto  
Faculdade de  
Engenharia  
**FEUP**



### *DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA FUNDIÇÃO ATRAVÉS DE TÉCNICAS CAD 3D E PROTOTIPAGEM RÁPIDA SLS – PROCESSO SANDFORM*



Trabalho realizado por:  
**Tiago Soares**

Trabalho Orientado por:  
**Prof. C. Silva Ribeiro – FEUP**  
**Eng.º Paulo Aguiar – CINFU**

669(047.3)  
LEMM 2003 SOAt



Projet III  
Estágio  
2003-2004  
20 LEMM

ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

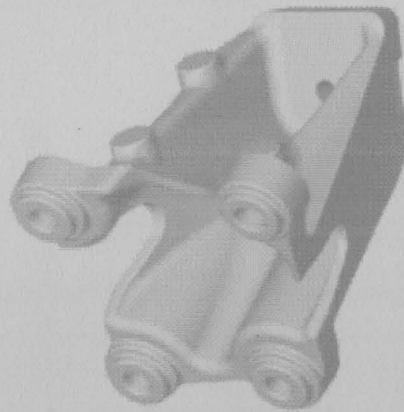
JULHO 2004



Universidade  
do Porto

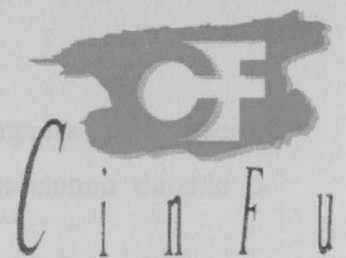
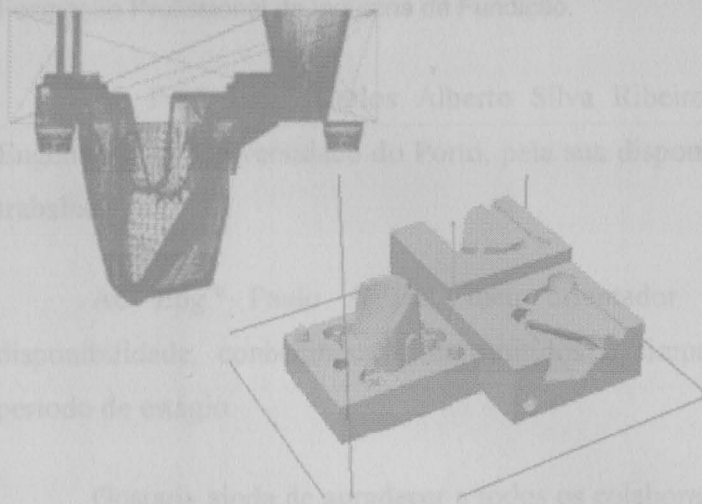
Faculdade de  
Engenharia

**FEUP**



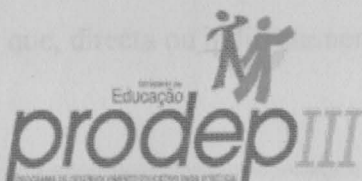
**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA FUNDIÇÃO  
ATRAVÉS DE TÉCNICAS CAD 3D E PROTOTIPAGEM**

**RÁPIDA SLS – PROCESSO SANDFORM**



Trabalho realizado por:  
**Tiago Soares**

Trabalho Orientado por:  
**Prof. C. Silva Ribeiro – FEUP**  
**Eng.º Paulo Aguiar – CINFU**



665(047.3) / LEM 2003 SOAT

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca η	
Nº	91344
CDU	
Data	12/09/2007

## **Agradecimentos**

Quero apresentar os meus mais sinceros agradecimentos à Eng.<sup>a</sup> Helena Oliveira pela oportunidade que me concedeu de realizar este trabalho de estágio no CINFU – Centro de Formação Profissional da Indústria da Fundição.

Ao Prof. Eng.º Carlos Alberto Silva Ribeiro, meu orientador pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela sua disponibilidade e atenção ao longo de todo o trabalho.

Ao Eng.º Paulo Aguiar, meu orientador por parte da empresa pelo apoio, disponibilidade, conhecimentos transmitidos e simpatia que me proporcionou durante o período de estágio.

Gostaria ainda de agradecer a todos os colaboradores da empresa nomeadamente à Sr.<sup>a</sup> Rita Sousa Pinto, ao Sr.º Domingos Taborda e ao Sr.º Reinaldo Pinto por toda a disponibilidade e ajuda prestadas.

Aos meus pais, família, a todos os amigos e colegas, principalmente à minha namorada que, directa ou indirectamente, me deram o seu mais sincero contributo.

## **INDÍCE**

PRÓLOGO.....	4
1. OBJECTIVO.....	4
2. INTRODUÇÃO.....	5
3. MODELAÇÃO.....	7
3.1 POWERSHAPE.....	8
4. PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	10
4.1 SINTERIZAÇÃO SELECTIVA POR LASER – SLS.....	11
DESCRISÃO DO PROCESSO.....	12
OS MATERIAIS.....	14
4.2 SANDFORM.....	15
5. CONTROLO DIMENSIONAL.....	18
6. SISTEMAS DE CAD 3D.....	19
7. APLICAÇÃO PRÁTICA.....	21
7.1 A MODELAÇÃO.....	21
7.2 O PROTÓTIPO.....	23
7.3 O VAZAMENTO.....	27
8. DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	28
9. CONCLUSÃO.....	29
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

## **PRÓLOGO**

O presente trabalho foca a importância da utilização da técnica de prototipagem rápida no desenvolvimento de produtos de fundição.

Recorrendo às técnicas existentes no Cinfu para este tipo de desenvolvimento, deu-se uma maior relevância à utilização de software CAD 3D de modelação de superfícies (PowerShape) para reprodução do modelo pela técnica de prototipagem rápida – SandForm.

O estudo da fabricação de cavidades pelo processo da Sinterização Selectiva por Laser, utilizando SandForm, foi o principal “alvo”.

Modelação de superfícies, e sua utilização para a criação de um modelo 3D, aplicável, no fabrico directo de cavidades em areia tipo shell e assim associá-la à complexidade do fundido, rapidez de execução e controlo dimensional.

O trabalho implementado no CINFU assentou num estudo relativo à sinterização do SandForm para a construção de cavidades. Desde a modelação 3D, estudo dos parâmetros de sinterização.

## **1. OBJECTIVO**

Desenvolvimento de modelos 3D para fundição através de software de modelação de superfícies – PowerShape. Estudo de técnicas aplicadas ao desenvolvimento rápido de produtos de fundição, com relevância para o fabrico de protótipos, usando a técnica de prototipagem rápida SLS SandForm.

## **2. INTRODUÇÃO**

Num sector industrial em que as fundições têm que fazer face a uma concorrência internacional, cada vez mais intensa e agressiva, o binómio “tempo-custo” adquire a maior importância. A redução do tempo de lançamento em produção de novos produtos obtém-se, na actualidade, utilizando meios computacionais. [1]

Tais preocupações resultam do facto da competitividade das empresas ser resultante da sua capacidade em lançar no mercado produtos de elevada qualidade, com melhores desempenhos ou com funcionalidades acrescidas relativamente a produtos similares postos à disposição dos consumidores pela concorrência. Por outro lado, a globalização dos mercados veio reduzir significativamente a vida útil dos novos produtos e impor aos seus fabricantes novos desafios que, em última análise, se resumem em saber responder, de modo adequado e em tempo útil, aos ataques comerciais da concorrência. [2]

Isto exige que sejam, à partida, usadas ferramentas de fundição que permitam, além de uma obtenção rápida do lote pretendido, uma consistência a nível qualitativo, no que toca a propriedades metalúrgicas e dimensionais. A resposta encontra-se nas diferentes técnicas de prototipagem rápida, que permitem produzir os modelos de engenharia directamente a partir do modelo CAD. [3]

No entanto, o conceito de prototipagem rápida constitui, apenas, uma evolução, em termos de materiais utilizados e do seu processamento, relativamente à obtenção de protótipos em máquinas CNC, a partir do projecto CAD. [3]

A obtenção de moldes metálicos por CNC constitui, ainda, um processo nobre de prototipagem rápida. Contudo, a sua utilização e o seu custo tornam-se proibitivos se o molde que se pretende obter é de formas muito complexas. É aqui que encontram utilidade os diversos processos de prototipagem rápida, que permitem a obtenção de formas mais complexas e com menor tempo de processamento. [3]

Todas as técnicas de prototipagem rápida visam, além da evidente rapidez na obtenção dos modelos, diminuir a necessidade de mão-de-obra tradicional, substituindo-a por novas

tecnologias, neste caso, por combinação de sistemas CAD com tecnologia laser (usada na maioria dos processos) aplicada ao processamento de materiais. [3]

Se bem que o objectivo final seja a redução dos tempos de desenvolvimento ou de custos, é hoje reconhecido que o tempo e o dinheiro gasto na execução de protótipos é justificado face às economias que permite realizar nas fases mais avançadas do desenvolvimento de produto ou do fabrico das ferramentas de produção definitivas. No entanto, o interesse de um protótipo depende da informação que se pretende obter com ele e, consequentemente, da fase de desenvolvimento em que nos encontramos. [2]

Hoje em dia, recorre-se cada vez com mais frequência, à produção de modelos ou protótipos, cuja principal função é ajudar a analisar, com maior ou menor profundidade, a funcionalidade e, por vezes, o efeito estético do produto projectado, ou apresentar esse produto de forma imediatamente compreensível, por exemplo, num gabinete de projectos ou numa exposição. [4]

As tecnologias de prototipagem rápida, no seu sentido mais abrangente, não substituem outras tecnologias já actualmente utilizadas e dominadas pela indústria. Elas aparecem sim como alternativas que têm que ser devidamente ponderadas de modo a identificar, quer as suas potencialidades quer o modo como devem ser incorporadas nas cadeias de desenvolvimento de produtos ou de produção das empresas. [2]

É o caso da utilização de prototipagem rápida na fundição. Este processo de fabrico rápido, não se deve ficar, apenas, pela execução de protótipos a partir do modelo CAD 3D, mas sim, constituir-se como um processo de fabrico rápido de ferramentas de fundição, de modo a fornecer ao cliente uma pequena série de peças no material pretendido. [5]

Num dos processos largamente utilizados, e actualmente disponível no CINFU, é a Sinterização Selectiva por Laser (vulgarmente conhecida por SLS), onde as partículas, que poderão ser de um polímero, de areia ou pó metálico, são parcialmente fundidas por acção de um feixe de laser, unindo, deste modo, as partículas de pó uns aos outros, camada a camada, até à construção da peça em causa. [3]



### 3. MODELACÃO

As tecnologias de prototipagem rápida pressupõem a existência de um modelo CAD 3D das peças que se pretendem fabricar por prototipagem rápida. O modelo CAD tem que representar de facto um volume fechado, de modo a que se possa obter a partir dele um ficheiro em formato STL [2], no qual todas as superfícies do modelo são convertidas em triângulos [6], (o formato SL representa o formato neutro de acesso a todas as tecnologias de prototipagem rápida disponíveis comercialmente). [2] A sigla STL deriva da palavra “stereolitography”, por a estereolitografia ter sido o primeiro processo de prototipagem rápida a ser comercializado. [6]

Existem, hoje em dia, no mercado softwares CAD 3D que dispõem de interfaces para SLS próprias; nestas condições é fácil integrar as tarefas de desenvolvimento do produto, de prototipagem rápida e de fabrico de ferramentas de produção, quer se recorra às tecnologias de maquinação convencionais (CNC) quer às mais recentes tecnologias de prototipagem rápida e de fabrico rápido de ferramentas. [2]

Assim podem ser obtidas peças directamente a partir do ficheiro CAD 3D com superfícies ou interiores complexos, sem necessidade de execução de molde ou caixas de machos, por obtenção do negativo da peça, em areia, na máquina da prototipagem. [5]. O ficheiro STL ao ser introduzido no equipamento de sinterização é convertido num ficheiro SLI (do inglês “slice” – fatia), através do software da máquina, que divide o modelo em várias camadas de construção (figura 1). [6]

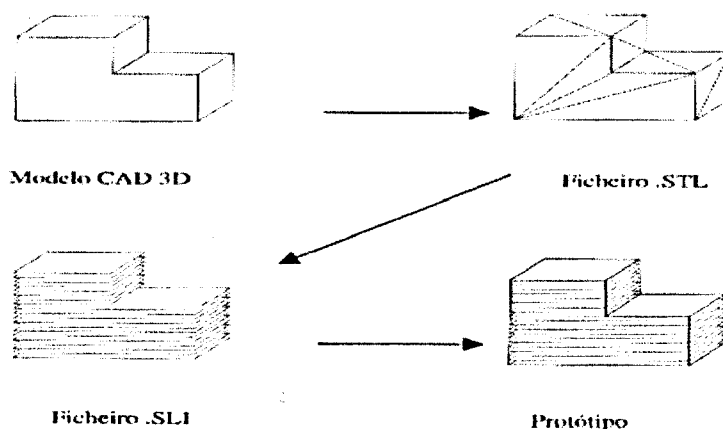


Figura 1 – Evolução do modelo CAD 3D até à obtenção do protótipo.

### 3.1 POWERSHAPE

O Software PowerSHAPE é um sistema CAD para modelação de formas complexas da família PowerSOLUTION da Delcam.

Com o PowerSHAPE, os utilizadores podem criar modelos conceituais, projectar um produto ou ainda manipular produtos criados em outros sistemas, e adicionar detalhes complexos tais como, raios de concordância variáveis, superfícies de saída ou de acabamento necessárias para garantir uma manufactura livre de problemas.

O PowerSHAPE oferece ao utilizador todas as ferramentas necessárias para produzir um molde complexo a partir de um desenho 2D ou de um modelo 3D incompleto em sólido ou em superfícies.

O PowerSHAPE possui todas as capacidades para modelação que o utilizador necessita: geometrias de construção 3D flexíveis e técnicas de modelação "high end" de alta qualidade; geração automática de linhas e superfícies de acabamento, além de separação automática das superfícies macho/matriz de qualquer modelo.

Modelos incompletos ou mal definidos (ausência de raios, por exemplo), que normalmente criam problemas na manufactura, podem ser facilmente corrigidos.

O PowerSHAPE garantirá que os modelos são precisos e completos, para produzir machos e matrizes da mais alta qualidade. [7]

#### **Vantagens:**

Rápido, Flexível e Simples de usar.

A facilidade de uso está no coração do produto, a interface é limpa, e mostra somente os comandos aplicáveis a cada item seleccionado. O cursor inteligente indica linhas de construção, pontos de intersecção, e outras informações importantes na criação dos modelos.

O PowerSHAPE automatiza muitas operações comuns de modelação, tarefas que muitos outros sistemas de CAD/CAM ignoram. [7]

### **Produtividade com robustez:**

Procedimentos de alta qualidade, lançamentos de novas versões constantes, e 20 anos de experiência na produção de produtos robustos, fazem do PowerSHAPE um programa de grande potencial.

Este programa CAD está especialmente vocacionado para a modelação de cavidades de moldes, ou seja, apresenta ferramentas próprias para a execução e verificação de ângulos de saída, criação de linhas de junta, etc. [7].

## 4. PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Uma das principais aplicações da prototipagem rápida é na verificação de novos projectos, quando estes se encontram numa fase embrionária ou mesmo avançada de concepção, e antes do elevado investimento de fabricar uma ferramenta para a sua produção. [3]

A grande vantagem deste processo, cada vez mais utilizado para obter protótipos ou pré-séries, é a rápida obtenção de peças funcionais em condições reais de produção permitindo uma análise expedita, isto é, poder testar um protótipo funcional nessa altura dá oportunidade de verificar erros de projecto e corrigi-los (observado na figura 2), quando os custos são ainda baixos. Permite, ainda, a obtenção de peças com formas muito complexas, difíceis de obter por outro processo. [3]

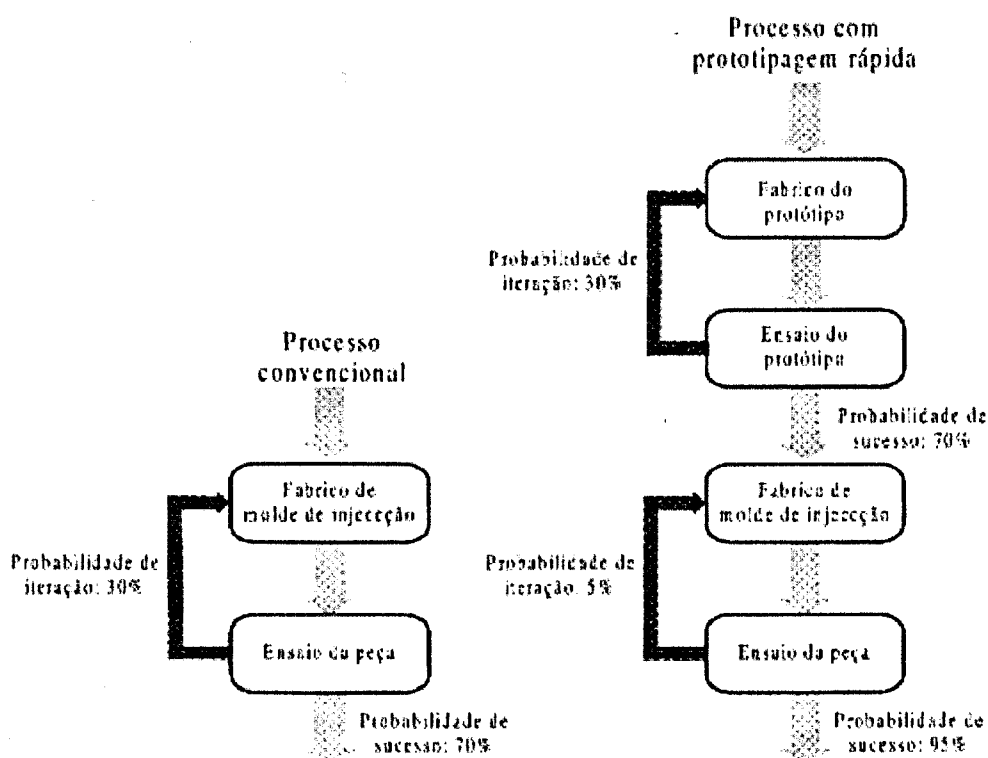


Figura 2 – Esquema comparativo da importância da realização de protótipos no desenvolvimento de novos produtos.

## 4.1 SINTERIZAÇÃO SELECTIVA POR LASER – SLS

A sinterização selectiva por laser (SLS) é um processo de prototipagem rápida comercializada desde 1992 pela DTM, nos E.U.A., e pela E.O.S., na Alemanha, desde 1994. Na figura seguinte (figura 3) apresenta-se o aspecto geral do equipamento de SLS do Cinfu. [2]

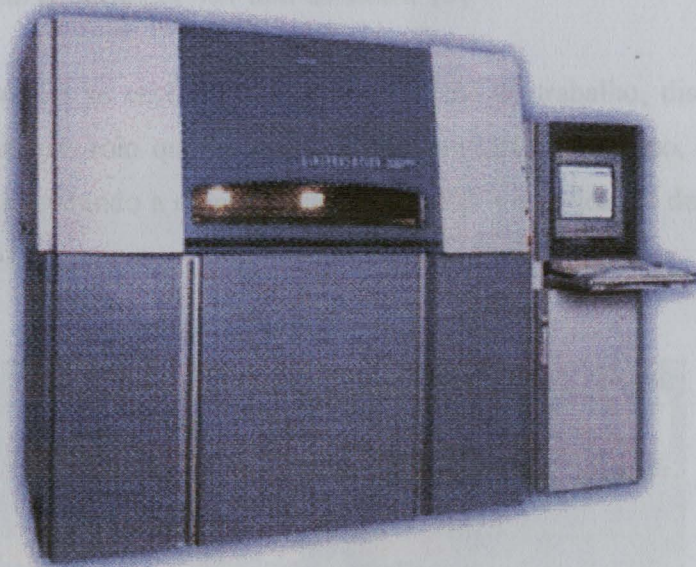


Figura 3 – Máquina de sinterização selectiva por laser do Cinfu.

A sinterização selectiva a laser é baseada na fusão de materiais particulares através de uma fonte de calor fornecida por um feixe de laser. Uma das vantagens deste processo de prototipagem rápida é a possibilidade de utilizar diversos materiais como metais, cerâmicos e polímeros. [2]

Segundo Volpato (2001), existem duas abordagens para a sinterização por laser: directa e indirecta. A directa é quando o material é sinterizado pela acção directa do laser e a indirecta (somente para metais e cerâmicos) ocorre quando um material ligante é utilizado para dar forma ao objecto fabricado que posteriormente será sinterizado num forno.

Os sistemas disponíveis de sinterização a laser são similares. O equipamento funciona com uma plataforma onde são depositadas camadas de pó e, para cada camada de pó depositada, um scanner de espelhos galvanométricos direccionam um feixe – laser sobre a superfície de pó, fazendo com que o pó seja sinterizado e unido à camada anteriormente feita. [2]

## DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Os modelos a construir, são transferidos para o sistema através de ficheiros STL, formato standard no campo da prototipagem rápida. [5]

A zona de construção das peças está situada no centro da máquina e tem um volume máximo de 381x330 mm de base por 457 mm de altura. [5]

Assim que o material se encontra sobre a superfície de trabalho, distribui-se sobre o pistão central através de um rolo que gira em sentido contrário ao avanço, para aplicar uma camada de pó uniforme, evitando a compactação do mesmo e a aplicação de esforços sobre a peça em construção. [5]

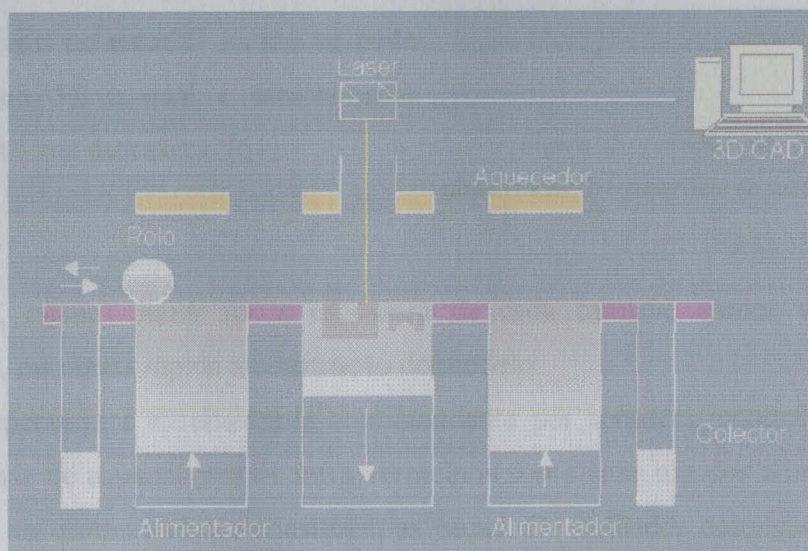


Figura 4 – Esquema de funcionamento da máquina de sinterização selectiva por laser.

É utilizado um laser industrial de CO<sub>2</sub> sobre a superfície de pó, sinterizando-o e unindo-o à camada anterior, com uma potência de 50 Watt e um feixe de 420 µm de diâmetro. O laser é orientado por um conjunto de espelhos, que desenha a geometria da peça, guiado pela informação de cada secção do ficheiro CAD tridimensional. [5] Ao atingir a temperatura de fusão [2] este vai sinterizar camada a camada. [5]

A colocação de novas camadas de material em pó efectua-se mediante um mecanismo de pistões e um cilindro que espalha o material. [5]

Em camada é sinterizada uma nova secção transversal do modelo, sendo esta sustentada, quer pelas camadas já construídas, quer pelo material envolvente não sinterizado que se mantém em pó, dispensando-se deste modo a construção de suportes. [2]

À medida que a peça é construída o pistão vai descendo em passos sucessivos, segundo a espessura determinada de cada secção. A espessura pode variar entre 0,08 e 0,30 mm. [5]

Neste processo, como os modelos são obtidos por adição de material, camada a camada, as peças obtidas apresentam irregularidades na superfície, correspondentes à espessura de cada camada, “efeito de escada” (como se pode ver na figura 5), o qual é directamente proporcional à sua espessura. [6]

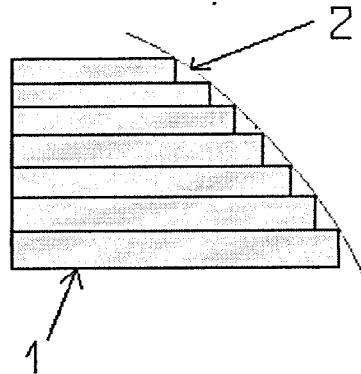


Figura 5 – Efeito de Escada; 1 - camadas sinterizadas; 2 – superfície do modelo CAD

Assim, quanto maior for a espessura de cada camada, menor vai ser a precisão dimensional, mas mais rápida a construção do modelo.

A temperatura é monitorizada continuamente por sensores, controlada rigorosamente com uma série de aquecedores de infra vermelhos sobre cada um dos alimentadores de pó e um terceiro no centro onde se constroem as peças. O ventilador consegue uma distribuição uniforme da temperatura. [5]

Quando a peça está terminada, o pistão eleva-se até à sua posição superior, permitindo aceder à peça. O protótipo é sujeito a uma operação de limpeza, na qual é removido o pó envolvente, isto é, o pó não sinterizado, o que requer algum trabalho após o processo. Este pó é crivado com um peneiro vibratório, sendo recolhido para posterior utilização [5], sem necessidade de qualquer operação de reciclagem adicional e sem sofrer qualquer alteração nas suas características físicas e químicas. [2] Logo, a quantidade de pó gasta no fabrico de um modelo é próximo ao seu volume. [6]

## OS MATERIAIS

Qualquer material que possa ser sinterizado por um processo controlado é um candidato em potência. [7] Teoricamente, qualquer material passível de ser pulverizado, e que tenha reacções térmicas dentro do campo de temperaturas do sistema, pode ser utilizado. [2]; um material que apresente características termoplásticas pode ser trabalhado com esta tecnologia. [5]

A vasta gama de materiais disponíveis permite que o SLS ofereça soluções para aplicações nos mais diversos ramos como protótipos e ferramentas metálicas ou para o processo de cera perdida. [7]

Tipo de material	3D Systems	EOS
Metais	<b>LaserForm</b> - ST-200: aço inox com revestimento polimérico .	DirectMetal 50 & 20: mistura de níquel, bronze e fosfato de cobre  DirectSteel 50 & 20: aço P20
Cerâmicas	<b>Sandform</b> : cerâmica revestida com um ligante polimérico.	LaserCron: areia especial para fabricar cascas para fundição.
Polímeros	<b>Duraform</b> : poliamida para protótipos. <b>Duraform</b> GF: poliamida com fibra de vidro para protótipos <b>Castform</b> : poliestireno para modelos de fundição.	PA 2200: poliamida para protótipos. PA 3200 GF: poliamida com fibra de vidro para protótipos PrimeCast: poliestireno para modelos de fundição.

Tabela 1 – Materiais utilizados nos vários processos de sinterização selectiva por laser.



## 4.2 SANDFORM

São hoje disponibilizados pela DTM, para uso nestes sistemas, vários materiais, permitindo cobrir um leque alargado de aplicações. A nível de moldes e machos para fundição em moldação em areia, estão disponíveis duas areias, nomeadamente de sílica e de zircónio [2] com um ligante. [5] O tamanho das partículas é de  $120\mu\text{m}$ . [8]

- SandForm SI – ( $\text{SiO}_2$ )
- SandForm ZR II – ( $\text{ZrSiO}_4$ )

A sinterização de areias, constitui o processo mais viável para a obtenção de peças únicas ou muito pequenas séries de peças fundidas, em que a peça é produzida sem haver lugar a construção de ferramentas de produção. As cavidades que vão originar protótipos são obtidas por sinterização de partículas de areia em sucessivas camadas por fusão do ligante contido na mistura de areia. [3]

### Parâmetros do Processo de Sinterização de SandForm

#### Temperatura

A temperatura na zona de construção deverá ser próxima de  $70\text{ }^\circ\text{C}$  e a temperatura de alimentação de  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . A temperatura na zona de construção deve ser diminuída para  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , a meio da construção.

#### Potência do Laser

A potência do laser é normalmente:

SandForm SI – ( $\text{SiO}_2$ ): 23 Watts

SandForm ZR II – ( $\text{ZrSiO}_4$ ): 30 Watts [9]

A areia é posteriormente submetida a um tempo de cura de algumas horas num forno, podendo, em seguida, ser utilizada à semelhança dos machos obtidos por processos tradicionais de preza técnica (Shell). [3]

## Cura

A peça deve ser totalmente curada de modo a aumentar a sua resistência e diminuir a libertação de gases.

### Procedimento:

1. Reparar qualquer fractura que tenha ocorrido durante o pós processamento ou quando se retira a peça. Usar uma cola pré-cura se possível e aplicá-la em ambos os lados da peça a reparar. Limpar os excessos de cola imediatamente. Manter as duas partes juntas pelo menos durante 1 minuto, ou até a cola segurar ambas as partes.
2. Colocar no mínimo 1 in (25.4 mm) de pó (pó de cura DTM 4100-013211) numa caixa, seguidamente centra-se a peça, e adiciona-se mais pó até cobrir a peça. Isto leva a uma maior dissipação de calor e funciona também como suporte durante a cura.
3. Pré-aquecer o forno até 160 °C e após a temperatura estabilizar colocar a caixa no forno. Após a cura, retirar a caixa do forno. Para que a cura total ocorra, a peça deve estar a esta temperatura, aproximadamente durante os seguintes tempos conforme, o tamanho da caixa:
  - Caixa pequena: 4 horas
  - Caixa média: 8 horas
  - Caixa grande: 18 horasEstes tempos sugeridos são baseados, considerando que as caixas para a cura estejam completamente cheias. Podem-se usar diferentes tempos.  
Os tempos sugeridos são relativos às caixas fornecidas pela DTM.
4. Depois da caixa já estar fria, retira-se o pó e a peça da caixa. Para peças delicadas, pode-se usar vácuo, para retirar lentamente o pó da caixa. Usa-se um pincel fino ou ar de baixa pressão para remover o resto do pó na peça. No final, a peça deve ter uma cor amarela escura a um castanho dourado. [9]

A maior parte da contracção ocorre durante o processo de cura e não é uniforme em todas as direcções. Há uma maior contracção no eixo vertical (na direcção da gravidade) que

nos outros eixos. Por isso a DTM recomenda, para assegurar uma concordância dimensional, orientar as peças igualmente em ambos os estágios construção e cura, ou seja, coloca-las na mesma posição.

Antes da peça ser colocada no forno de cura, deve-se queimar a superfície que vai estar em contacto com a peça, pois torna a superfície intacta e previne distorções durante o estágio de cura. Quando este passo é efectuado correctamente, a carapaça muda de cor, passa de um amarelo claro a um amarelo escuro. Se houver muito fumo ou se tostár, é porque se queimou demasiado a peça o que pode causar a sua fractura. [9]

Os suportes não devem ser retirados até a peça estar totalmente curada. Em casos extremos, as peças muito frágeis devem ser transportadas para a fundição ainda com os suportes. Isto torna a viagem mais segura para essas peças. [9]

Um dos aspectos que se deve ter em consideração quando se trabalha com o SandForm está relacionado com a libertação de gases. Durante o processo de fundição em areia, ocasionalmente o ligante da areia queima e liberta gás suficiente para causar defeitos nos fundidos. [9]

A libertação de gases pode ser reduzida de dois modos. Uma das maneiras é aumentar o tempo de cura, ou então, permitir à peça em areia uma saída de gás, em circunstâncias controladas. Uma das maneiras de se fazer isso é fornecer um caminho pré-definido com a menor resistência do fluido para a libertação de gases. De modo a ventilar a peça, é necessário que a peça esteja oca e com um furo de saída. O processo de tornar as peças ocas é conhecido por *shelling*. Isto é possível fazer nas peças de SandForm, alterando o modelo CAD em formato STL antes de o enviar, para a máquina. Para isto, a DTM recomenda o uso de softwares tais como o Materialise's Magics, também existente no Cinfu. [9]

Quanto maior for a espessura, menor será a cavidade disponível para a saída de gases. Isto significa que se deve tentar determinar a melhor espessura da peça de acordo com a sua geometria e processo de fundição. Uma espessura maior significa uma carapaça com maior resistência, tornando o seu manuseamento mais fácil, mas reduzindo a sua capacidade de ventilação, o que pode afectar a qualidade do fundido. Zonas de ventilação mais pequenas são também mais difíceis de limpar antes da cura. Se se está a fazer um *shelling* ao modelo com o

intuito de ventilar, deve-se remover a areia não sinterizada antes da cura. Este processo também pode ser usado para aumentar a velocidade de construção das peças em SandForm. Em alguns casos pode não ser necessário criar os furos de saída. [9]

## **5. CONTROLO DIMENSIONAL**

O uso do computador em operações de controlo na fundição está a ter uma maior aceitação à medida que a potência e utilidade do “hardware” e “software” disponíveis aumentam. [1]

Uma instalação típica para o controlo dimensional de peças de fundição consiste numa máquina de medição por coordenadas 3D ligada a uma interface para fornecer dados a um sistema informático directamente ligado a este via cabo directo e a um sistema de programa adequado.

O sistema do programa deverá ser capaz de controlar as funções e armazenar os dados da máquina de medição em coordenadas, assim como de repescar os dados de modo a analisar eventuais desvios. O programa serve como elemento de controlo principal para a inspecção dimensional e elaboração de relatórios estatísticos dos resultados. [1]

Os equipamentos de medição em coordenadas 3D recebem, geralmente, informação segundo os deslocamentos lineares ao longo de três eixos de coordenadas ortogonais em que se terá de definir as origens dos referenciais. O cálculo de parâmetros nas construções de geometria complexa, tais como pontos de intersecção de linhas e de planos, ou a falta de circularidade, de perpendicularidade, ou de paralelismo podem ser facilmente programados. [1]

## **6. SISTEMAS DE CAD 3D**

O desenho CAD a duas dimensões ajuda sem dúvida o desenhador a ser mais produtivo e facilita-lhe o trabalho.

Contudo, manteve-se a dificuldade de visualizar um produto antes de o fabricar. Nem toda a gente sabe ler desenhos técnicos e a necessidade de visualizar um novo produto em três dimensões era enorme. Também, tal como o CAD 2D (figura 6) veio a facilitar as construções geométricas, o CAD 3D teria de facilitar o desenvolvimento de um produto.

O CAD 3D veio como ferramenta para o projectista. Este utiliza o CAD 3D para desenvolver o produto, estudar a sua geometria, proceder a alterações funcionais ou estéticas.

Os primeiros sistemas de CAD 3D funcionavam em “wireframe”, ou seja, a passagem de 2D para 3D não introduziu novas entidades, mas dotou as entidades existentes com uma terceira dimensão. Assim, uma recta que num CAD 2D era definida por dois pontos  $P_1(x, y)$  e  $P_2(x, y)$ , no CAD 3D por “wireframe” ficaria definida por pelos dois pontos  $P_1(x, y, z)$  e  $P_2(x, y, z)$ .

A vantagem desta implementação é a reduzida informação armazenada na base de dados de um desenho e o relativamente reduzido recurso à base de dados. As desvantagens são enormes: uma vez que se obtém apenas um “esqueleto”, não existe informação sobre o que se passa entre as diversas entidades. [7]

### **3D – SUPERFÍCIES – POWERSHAPE**

Para colmatar as deficiências do CAD 3D por wireframe, desenvolveu-se o CAD 3D por superfícies. Aqui, utilizam-se funções matemáticas tridimensionais do tipo:

$$Z=f(x, y)$$

É importante distinguir o seguinte: se no CAD 3D por “Wireframe”, passamos a ter três eixos a definir entidades bidimensionais (têm comprimento definido, mas área zero), no CAD 3D por superfícies passamos a ter entidades com áreas definidas, mas com volume zero.

No CAD 3D são essencialmente utilizados dois tipos de superfícies tridimensionais: as superfícies de Bézier e as superfícies nurbs. O powershape utiliza superfícies de Bézier. [7]

### Superfície de Bézier

Uma superfície de Bézier de grau (p, q) é definida por:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}}$$

em que  $N_{i,p}$  e  $N_{j,q}$  são as funções de B-spline,  $P_{i,j}$  são os pontos de controlo, e o peso de  $w_{i,j}$  de  $P_{i,j}$  é a última ordenada do ponto homogéneo  $P_{i,j}^w$ . [7]

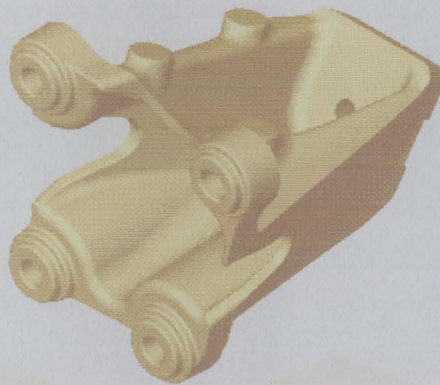
## **7. APLICAÇÃO PRÁTICA**

### **7.1 A MODELAÇÃO**

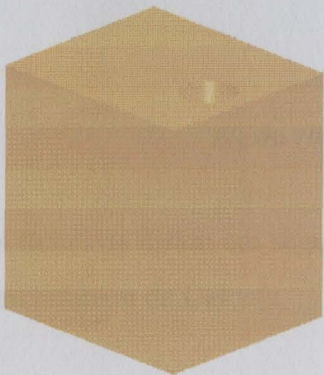
Para se atingir o desenvolvimento rápido de produtos, uma das primeiras tarefas é o desenho 3D, em computador, dos produtos na fase do projecto. A partir desse modelo é possível projectar, em 3D, os protótipos, utilizando novos programas computacionais adaptados às tecnologias de fabrico seleccionadas. [4]

Tendo o modelo CAD da peça final, foi necessário construir a cavidade de moldação, utilizando-se para tal o PowerShape.

Para a construção da cavidade foi também necessário, adicionar ao modelo o sistema de gitagem, e os devidos respiros.

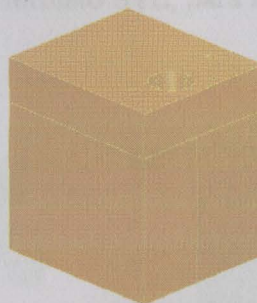


*Figura 6 – Modelo CAD da peça final*

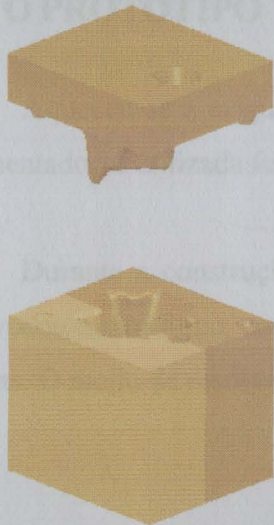


*Figura 7 – Modelo CAD da cavidade*

A cavidade de moldação foi dividida em três partes, para que antes de ser curada, fosse possível remover toda a areia não sinterizada.



*Figura 8 – Modelo CAD da cavidade.*



Na imagem ao lado pode-se visualizar a separação da cavidade em três partes. Em baixo observa-se cada uma parte individualmente.

Figura 9 – Modelo CAD da cavidade.

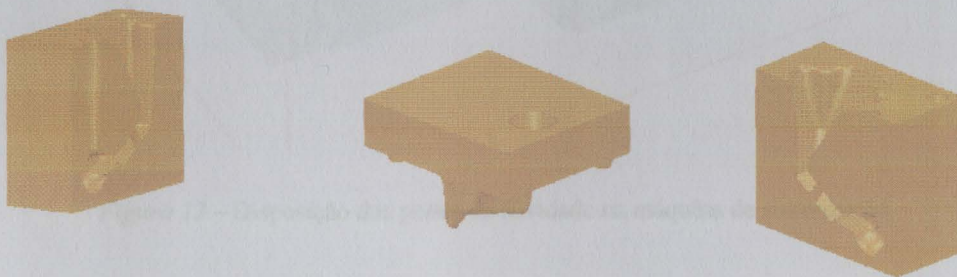


Figura 10 – Modelo CAD das três partes da cavidade.

Os ficheiros foram em seguida convertidos para o formato STL, para isso foi utilizado o CopyCad também da Delcam.

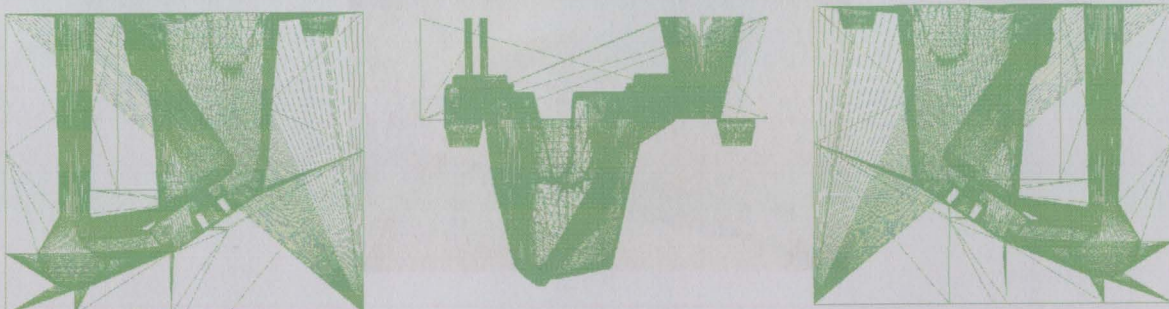


Figura 11 – Modelo CAD das três partes da cavidade em formato STL.



## 7.2 O PROTÓTIPO

Aqueceu-se a máquina de sinterização até a temperatura estabilizar. A temperatura dos alimentadores utilizada foi de 50°C e a temperatura na zona de construção de 70°C.

Durante a construção da escala utilizou-se uma potência de laser de 23 Watts. Como provocou muito fumo, comparado com outros materiais, baixou-se a potência do laser para 22 Watts. O modo de resolver o problema do fumo excessivo é baixar a potência do laser.

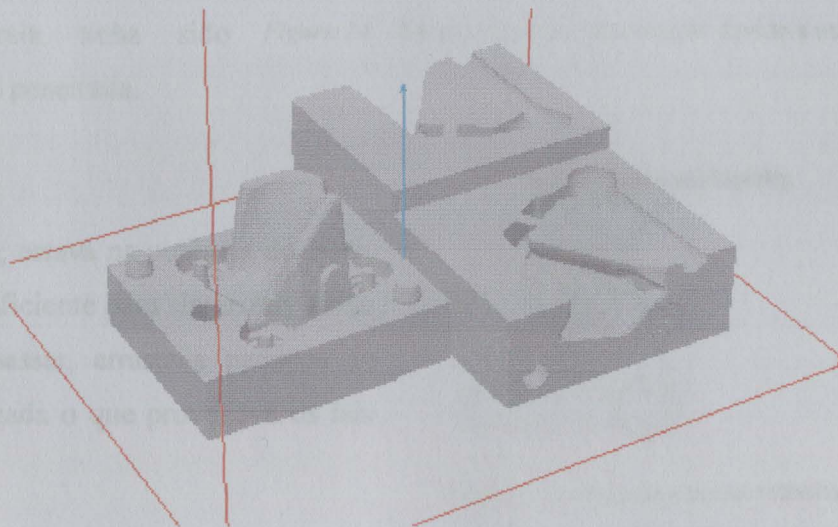


Figura 12 – Disposição das partes da cavidade na máquina de sinterização.

As primeiras camadas de construção da cavidade procederam-se de uma forma normal. Passado algum tempo de construção começaram a aparecer estrias na parte sinterizada e alguma falta de material, na forma de rasgos, na zona de alimentação.

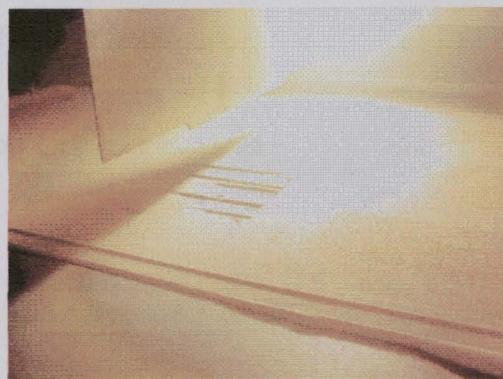


Figura 13 – Rasgos durante a sinterização devido a uma má peneiração.

Como se pode ver na figura, retirada do manual, este problema significa que a areia não foi bem peneirada, ou que haveria restos de uma construção anterior. Esta hipótese foi posta de lado pois toda a areia tinha sido devidamente peneirada.

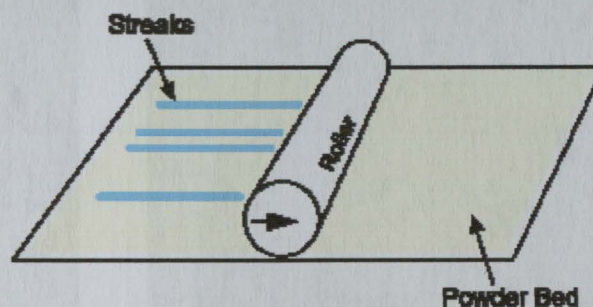


Figura 14 – Rasgos durante a sinterização devido a uma má peneiração. [9]

O erro, estava na potência do laser, pois era insuficiente para sinterizar, assim o rolo ao passar, arrastava pedaços de areia sinterizada o que provocava os tais rascos.

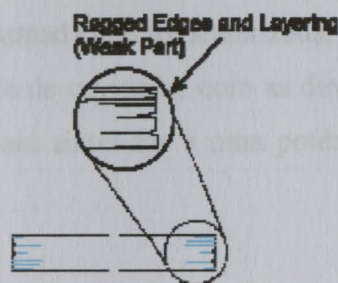


Figura 15 – Peça com pouca resistência devido a uma potência de laser insuficiente para sinterizar. [9]

A construção foi reiniciada, utilizando uma potência de laser de 26 Watts.

Por consulta bibliográfica, pode-se concluir que o excesso de fumo na sinterização de SandForm, comparado com outros materiais, não é excessivo. Considera-se fumo excessivo se, quando o rolo ao passar, para produzir uma nova camada, ainda haja fumo, o que não aconteceu usando esta potência de laser.

A construção demorou 12 h e 27 minutos.



Figura 16 – Parte de cavidade sinterizada a uma potência de laser de 22W.

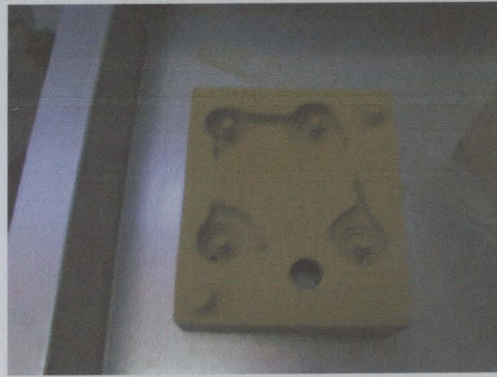


Figura 17 – Parte de cavidade sinterizada a uma potência de laser de 26W.

Devido a um erro do ficheiro CAD, uma camada não foi sinterizada, numa das partes de cavidade, o que teve de se fazer uma nova parte de cavidade, com as devidas correcções do ficheiro CAD. Juntou-se mais uma cavidade para sinterizar a uma potência de laser de 27 watts.

Nesta última cavidade, modificou-se o ficheiro CAD aplicando-se uma expansão (*Scale*) de 1.016, para compensar a contracção do alumínio, uma vez que a contracção da liga é de 1,6%.

$$Factor Escala = \frac{1}{1 - \frac{contracção (\%)}{100}}$$
$$Faactor Escala = 1.016$$

Antes de se iniciar a construção, voltou-se a peneirar a areia, e limpou-se o vidro do laser, os sensores que controlam a temperatura e o rolo.

A sinterização demorou 15 h e 46 min.

Após a construção a areia não sinterizada deve ser cuidadosamente retirada, para uma posterior reutilização.



Figura 18 – Remoção da areia não sinterizada.

No fim da sinterização, as partes da cavidade formam queimadas com uma tocha e de seguida introduzidas no forno, para curar, durante 10 h, seguindo o procedimento descrito anteriormente.

As partes constituintes da cavidade, foram colocadas na mesma disposição, quer na máquina de sinterização, quer no forno.



Figura 19 – Partes da cavidade antes da cura.



Figura 20 – Partes da cavidade cobertas com o pó de cura.

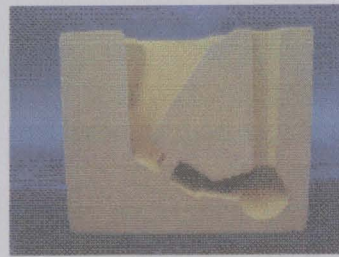
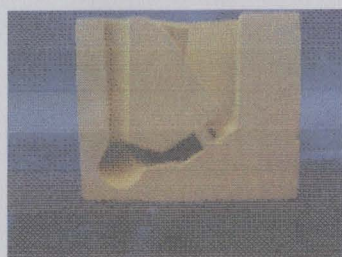


Figura 21 – Cavidade após a cura.

### 7.3 O VAZAMENTO

As três peças que constituem a cavidade foram fixadas com a ajuda de um grampo. Envolveu-se o conjunto em areia de moldação de modo a fixá-lo e caso houvesse alguma fuga não haveria problema. Também foi colocado um peso em cima da cavidade que o ajudou a fixar. Procedeu-se ao vazamento. Após a solidificação da peça, retirou-se a carapaça.

Nas imagens seguintes pode-se ver a sequência de todo processo.



Figura 22 – Sequência do processo de vazamento

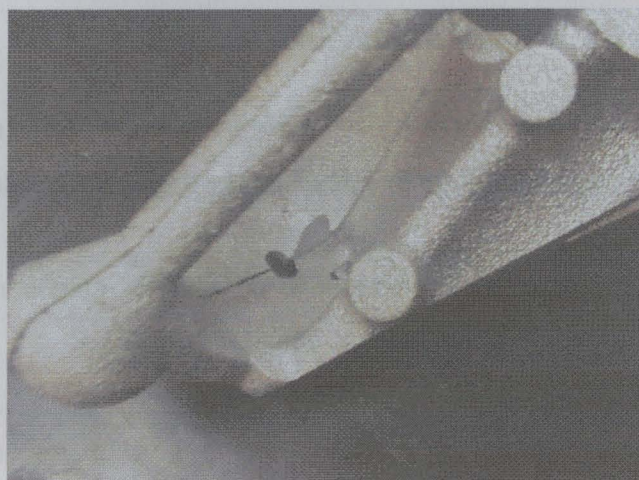
## **8. DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

Se a potência do laser for menor de 23 watts, há pouca probabilidade da areia sinterizar. Quanto maior for a potência do laser, mais escura é a cor da areia sinterizada.

A cavidade que demonstrou uma maior resistência e melhor manuseamento foi sinterizada com uma potência de laser de 27 watts.

As duas partes inferiores da cavidade não ficaram bem alinhadas, como se pode haver na imagem seguinte.

Seria necessário, recorrer a um sistema de encaixe, como foi efectuado na parte superior da cavidade para garantir um bom alinhamento.



*Figura 23 – Pormenor da peça.*

Este desalinhamento pode justificar algumas cotas que se encontram fora da tolerância pretendida.

A peça final, tem uma superfície rugosa, devido ao efeito escala que é bastante visível. Para diminuir esta rugosidade seria necessário diminuir a espessura das camadas de construção, no entanto o tempo de construção seria maior.

## **9. CONCLUSÃO**

Relativamente à sinterização do SandForm, é difícil encontrar a potência do laser à qual o SandForm melhor sinteriza, ou seja, que seja as cavidades obtidas sejam mais resistentes e de mais fácil manuseamento.

A principal desvantagem do processo é o tempo de pós processamento, ou seja, a natureza do material torna difícil remover a areia que não foi sinterizada das áreas mais delicadas das peças sem as danificar.

A relevância para a utilização de um *shell*, isto é, para tornar os protótipos ocos, pois diminui a libertação de gases durante o vazamento e torna mais fácil a remoção da peça da cavidade, após o vazamento.

Deve-se sempre tentar encontrar um melhor sistema de encaixe entre as partes que constituem a cavidade.

A característica mais atractiva, deste processo, é poder reproduzir a forma de um objecto, por mais complexo que seja a partir do modelo CAD 3D.

## **10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] – Ferreira, José M. G. de Carvalho, *Tecnologia da Fundição*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.
- [2] – Osório, António, *Projecto Mobilizador RNPR – Rede Nacional de Prototipagem Rápida*, revista O MOLDE, ano 12, nº29, Março 1999.
- [3] – Oliveira, Eng.<sup>a</sup> Helena, *Rapid Prototyping/Rapid Tooling em Fundição*, revista FUNDIÇÃO, Associação Portuguesa de Fundição, Nº 218, pág.12-14, 3º trimestre, 2000.
- [4] – Ferreira, J. M. G. C., *Métodos e Tecnologias para o Fabrico Rápido de Protótipos na Indústria de Fundição Portuguesa*, revista FUNDIÇÃO da Associação Portuguesa de Fundição, Nº 204, pág.6-9, 1º trimestre, 1997.
- [5] – Aguiar, Paulo, *Emprego de Técnicas de Prototipagem Rápida SLS à Indústria de Fundição*, 11º Congresso Nacional de Fundição, Porto, Novembro de 2001.
- [6] – Alves, Fernando Jorge; Braga, Fernando J.; São Simão, Manuel; Neto, Rui Jorge L.; Duarte, Teresa Pereira, *Protoclick! Prototipagem Rápida*, Fevereiro de 2001
- [7] – Martins Augusto, Vitor, apontamentos da disciplina: *Engenharia Assistida por Computador*, do curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, FEUP.
- [8] – Jost, Peter, *Selective Laser Sintering for Casting Applications*, DTM GmbH, Hilden, 4<sup>th</sup> European SLS Users Group Meeting, Lycee Diderot, Paris, Setembro 2000
- [9] – DTM<sup>tm</sup>, *The Sinterstation System, Guide to Materials: SandForm<sup>tm</sup> Family*, Fevereiro de 1998

Endereços consultados na Internet:

<http://www.sls-europe.net>

<http://www.castolutions.com>

<http://www.uclan.ac.uk>





FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000091344



UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Social Europeu



Mais Educação