



## 8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

### CONVERSÃO DIRECTA E INDIRECTA DE MODELOS OBTIDOS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA EM PEÇAS METÁLICAS POR “INVESTMENT CASTING”

F. Jorge Lino\*, Teresa P. Duarte\*, Rui J. Neto<sup>o</sup>, Ricardo M. Paiva<sup>o</sup>

\* FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, R. Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal,  
<sup>o</sup>INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Rua do Barroco 174, 4465-591 Leça do Balio,  
Portugal

\*e-mail: falves@inegi.up.pt

#### RESUMO

Actualmente, as empresas para se tornarem mais competitivas no mercado global necessitam de desenvolver novos produtos em prazos cada vez mais reduzidos. Para atingir este objectivo é fundamental que sejam utilizados processos inovadores que encurtem o tempo de desenvolvimento na fase de design e de produção dos primeiros protótipos.

Utilizando processos de prototipagem rápida para a produção de modelos, nomeadamente a estereolitografia convencional e com modelos ocos (“quick cast”), tecnologias de conversão (moldes em resina e em silicone) e o processo de investment casting (fundição de precisão utilizando modelos perdidos) é possível produzir, em prazos extremamente curtos, protótipos funcionais ou pré-séries metálicos, que podem ser utilizados em testes reais para optimização do componente, permitindo desta forma detectar erros de concepção e encurtando assim significativamente o tempo de lançamento de novos produtos no mercado.

O processo de investment casting permite produzir peças em diversas ligas metálicas (aços, ligas de alumínio, ligas de cobre, ligas de titânio, etc.), na forma final (não são necessárias operações significativas de maquinaria), com grande liberdade de formas, elevada precisão dimensional, excelente qualidade superficial e de reprodução de texturas e pormenores, que as torna adequadas para as mais variadas aplicações; nomeadamente indústria automóvel, aplicações domésticas, artísticas, implantes, etc.

O objectivo desta comunicação é apresentar os resultados obtidos em termos de metodologia de rápido desenvolvimento de novos produtos, qualidade e custos relativos dos protótipos e pré-séries fundidos, em comparação com os processos convencionais.

**Palavras-Chave:** Tecnologias de conversão, protótipos, investment casting, prototipagem rápida

## INTRODUÇÃO

Hoje em dia é inegável a importância da prototipagem rápida (RP) no desenvolvimento de novos produtos. A competição no mercado global exige tempos de resposta às solicitações das empresas com prazos cada vez mais reduzidos, sendo por isso necessário desenvolver metodologias e processos de produção que permitam encurtar significativamente o “time-to-market”. Para satisfazer este requisito, é necessário detectar os erros de concepção o mais cedo possível, para desta forma otimizar design, desempenho, propriedades, custos, etc., do novo produto [1-4]. Um dos sectores em que os autores têm colaborado de uma forma intensa é no desenvolvimento automóvel, onde pré-séries de bombas de água, bombas de óleo e outros componentes têm sido produzidos em prazos extremamente curtos, permitindo às empresas realizar testes funcionais para otimizar o desempenho do novo produto antes de produzirem o molde metálico final onde serão injectadas as peças definitivas [5-7].

O primeiro sistema de prototipagem rápida foi comercializado em 1987 pela 3D Systems, e desde essa altura, diferentes sistemas de RP têm vindo a ser desenvolvidos e utilizados nos mais variados sectores industriais para reduzir o “time-to-market” e aumentar a competitividade. A prototipagem rápida é já comum no desenvolvimento de novos produtos em países desenvolvidos, com protótipos a serem utilizados para fins de demonstração, ajuda visual, testes simples, etc. [1, 2]. Contudo, muitas vezes o protótipo tem que ser produzido no mesmo material da peça final para possibilitar a realização de testes funcionais. Devido a este facto, em muitos casos torna-se necessário converter os modelos obtidos nos diferentes materiais utilizados nas máquinas de RP em metal, utilizando processos tais como o investment casting [8].

A produção directa de protótipos funcionais metálicos tem vindo a crescer nos últimos tempos, contudo utiliza equipamentos e materiais extremamente dispendiosos (por exemplo o DMLS da EOS, o SLSm da 3D Systems ou o processo da Arcam), que na maior parte dos casos não permitem produzir protótipos nas ligas metálicas especificadas pelos clientes, mas apenas em ligas patenteadas pelos fabricantes dos equipamentos de RP e RT (fabrico rápido de ferramentas) [1-3].

A conversão directa de protótipos, utilizando o processo de “investment casting” permite a produção de protótipos metálicos e pré-séries, utilizando equipamento menos dispendioso, mais facilmente disponível, e com um pequeno acréscimo no tempo de resposta. Apesar de parecer uma alternativa bastante interessante, existem alguns problemas inerentes ao processo que devem ser tidos em consideração. O protótipo é perdido durante a conversão (sendo indicado apenas para 1-5 peças), o que significa que não são tolerados erros, todas as cinzas têm que ser completamente removidas do interior da carapaça e as variações dimensionais têm que ser previstas [7-9]. A conversão indirecta permite contornar o problema da perda do modelo, uma vez que utilizando moldes flexíveis, em resinas rígidas ou mesmo metálicos, permite a injeção de um significativo número de protótipos em cera, possibilitando a produção de pré-séries com custos extremamente competitivos, embora exija também um bom controle das variações dimensionais (especialmente em peças técnicas).

O INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) tem vindo a utilizar, desde 1987, o processo de “investment casting” com modelos em cera (injectados em moldes de resina ou de silicone), “quick cast” (estereolitografia oca), Thermoject (cera) e papel (LOM), para produzir em prazos extremamente curtos, protótipos funcionais e pré-séries para os mais variados sectores industriais.

Neste trabalho pretende-se apresentar a metodologia de desenvolvimento rápido de novos produtos que tem vindo a ser utilizada na produção de protótipos e pré-séries fundidos para os mais variados sectores industriais.

## TRABALHO EXPERIMENTAL

Os exemplos de protótipos funcionais apresentados são o resultado de trabalhos realizados ao longo dos últimos 10 anos para empresas operando nos mais variados sectores industriais. Na produção destes protótipos funcionais foram utilizados processos de conversão directa e de conversão indirecta de modelos obtidos por diferentes tipos de processos de RP.

### Conversão directa

A conversão directa com modelos obtidos pelos processos de Thermoject e LOM foi testada mas desde cedo abandonada, uma vez que estes dois tipos de modelos originam alguns problemas no processo de conversão. No processo Thermoject, os locais de onde são removidos os suportes ficam sempre com alguma rugosidade que afecta a qualidade final dos protótipos técnicos. No processo LOM, é bastante difícil garantir que todas as cinzas resultantes da queima do protótipo são completamente removidas do interior da carapaça cerâmica, originando, na maior parte dos casos, protótipos com defeitos. Além disso, este tipo de modelos tem o problema da estabilidade dimensional

(absorção de humidade) com o tempo, pelo que se torna necessário a sua infiltração com resina, a qual se torna um factor extra de dificuldade na queima do modelo [10]. As figuras 1 e 2 mostram algumas das etapas complementares que são necessárias realizar para conseguir eliminar as cinzas resultantes dos modelos em LOM. A figura 3 apresenta exemplos da conversão de protótipos de Thermoject e LOM Mais pormenores sobre a utilização destes dois tipos de modelos podem ser encontrados nas referências [1, 7, 10].

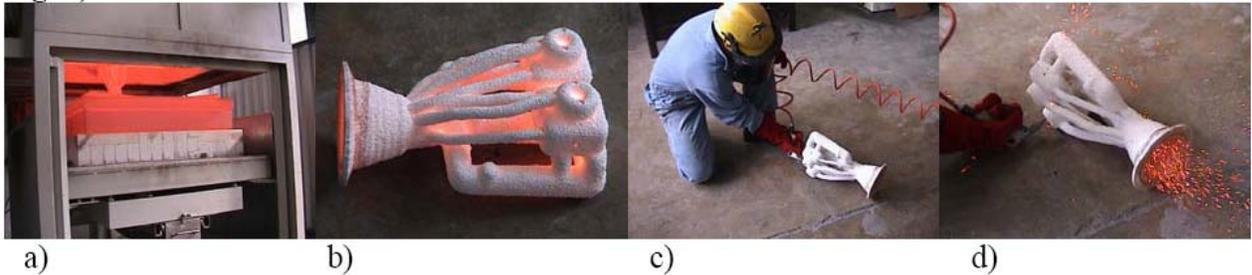


Figura 1: Conversão directa com LOM, a) calcinação do modelo em LOM, b) arrefecimento, c) remoção de cinzas com ar comprimido, d) ejeção de cinzas do interior da carapaça.



Figura 2: Eliminação das cinzas, a) introdução da carapaça na água, b) sopro das cinzas com ar comprimido, e c) resto de cinzas do modelo em LOM.

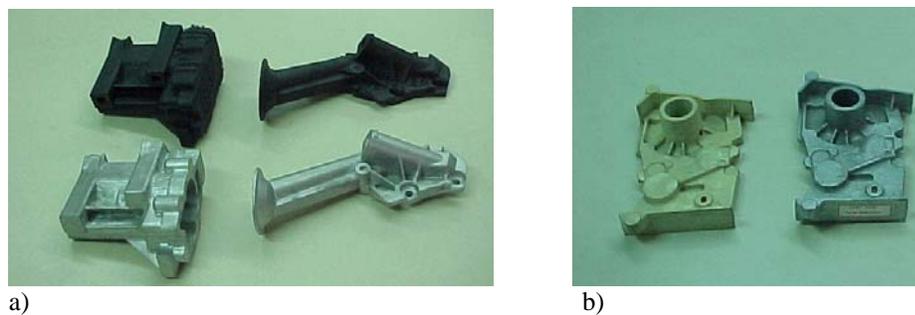


Figura 3: Conversão directa de protótipos de prototipagem rápida em protótipos metálicos; a) protótipos em Thermoject; b) protótipo em LOM.

A estereolitografia produz protótipos através da fotopolimerização de uma resina epoxy líquida nas zonas onde incide o feixe laser de raios ultravioleta. O equipamento VIPER da 3D Systems utilizado actualmente na produção dos protótipos representa a última geração de equipamentos de estereolitografia, contendo um laser de estado sólido do tipo Nd: YVO<sub>4</sub>, comprimento de onda de 354,7µm e uma potência de 100mW, permitindo fabricar modelos com quatro tipos de resolução, produzindo em alta resolução uma espessura de camada de 0,025mm [2]. Os protótipos obtidos apresentam excelentes características ao nível do acabamento superficial e precisão dimensional, podendo ser utilizados em:

- Protótipos para verificação de novos projectos;
- “Masters” para moldes em silicone;
- “Masters” para moldes em resinas monolíticas;
- “Masters” para moldes em ligas de baixo ponto de fusão;
- “Masters” para projecção de pós metálicos;
- Modelos em “quick cast” para utilização no processo de cera perdida;
- Moldes protótipo para injeção de termoplásticos;

A capacidade que este equipamento possui para o fabrico de modelos em “Quick Cast” torna-o extremamente interessante para o fabrico rápido de protótipos metálicos. Neste processo, os modelos obtidos são parcialmente ocos. O software do equipamento define uma estrutura tridimensional oca (“ninho de abelha” ver fig. 4), ficando os modelos com cerca de 30% de densidade relativa, mas com paredes exteriores e interiores lisas. Desta forma, os modelos tornam-se mais económicos, uma vez que consomem menos resina e menos tempo de processamento. Contudo, a grande vantagem na utilização dos modelos em “quick cast” está na sua utilização directa, como modelo perdido, na conversão directa em metal pelo processo de “investment casting”. A utilização da estrutura oca facilita o processo de eliminação, por calcinação, da resina do modelo que se encontra dentro da carapaça cerâmica. Este processo é viável para prototipagem metálica de muito pequenas séries (até 5 unidades) devido ao impacto do custo da execução dos modelos com o aumento do número de protótipos. Tem a grande vantagem de dispensar o projecto e execução do molde (para injeção de ceras) e a grande rapidez de fabrico dos protótipos metálicos (tipicamente 1 semana). Na figura 4 é apresentado um modelo em “Quick cast”, o pormenor da estrutura em “ninho de abelha” e o protótipo metálico a que deu origem, obtido numa liga de alumínio de fundição. A figura 5 mostra diferentes exemplos de protótipos metálicos obtidos por este processo.

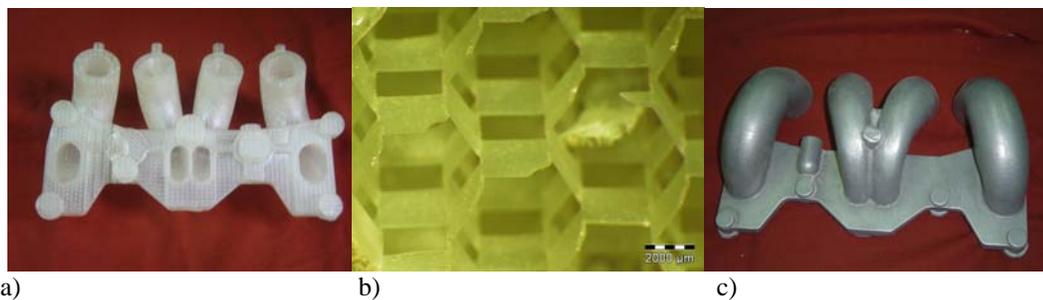


Figura 4: Conversão directa de modelos em quick cast; a) modelo de um coletor de escape, b) pormenor da estrutura “ninho de abelha”, e c) protótipo metálico em liga de alumínio AISiMg.



Figura 5: Conversão directa em aço de modelos em quick cast.

Os modelos obtidos pelos diferentes processos de prototipagem rápida, são colocados num cacho e depois de limpos são mergulhados por duas vezes numa barbotina cerâmica composta por água, sílica coloidal e silicato de zircónia (< 200mesh). Após esta fase são introduzidos num leito fluidizado (e por vezes num chuveiro) de areia de silicato de zircónio (100-120 mesh) para criação de duas camadas deste cerâmico. Posteriormente são realizadas mais 7 camadas de material cerâmico (o número de camadas pode variar de acordo com o modelo utilizado) composto à base de molochite (aluminossilicato com granulometria de 0.3-0.8mm). Entre cada camada há um período de secagem de cerca de 3horas. A figura 6 apresenta imagens destas etapas.

Após a produção das camadas necessárias para conferir resistência mecânica à carapaça cerâmica, esta é colocada num forno, a 1050°C durante 2+2 horas (no final de cada ciclo a carapaça é limpa com ar comprimido para garantir a completa remoção das cinzas) para calcinação do modelo (850°C para as ceras).

Para o vazamento da liga metálica, que na maior parte dos casos foi a liga de alumínio AlSi9Cu3 (vazada a 720°C), a carapaça foi pré-aquecida a 400°C para garantir uma boa fluidez do metal.

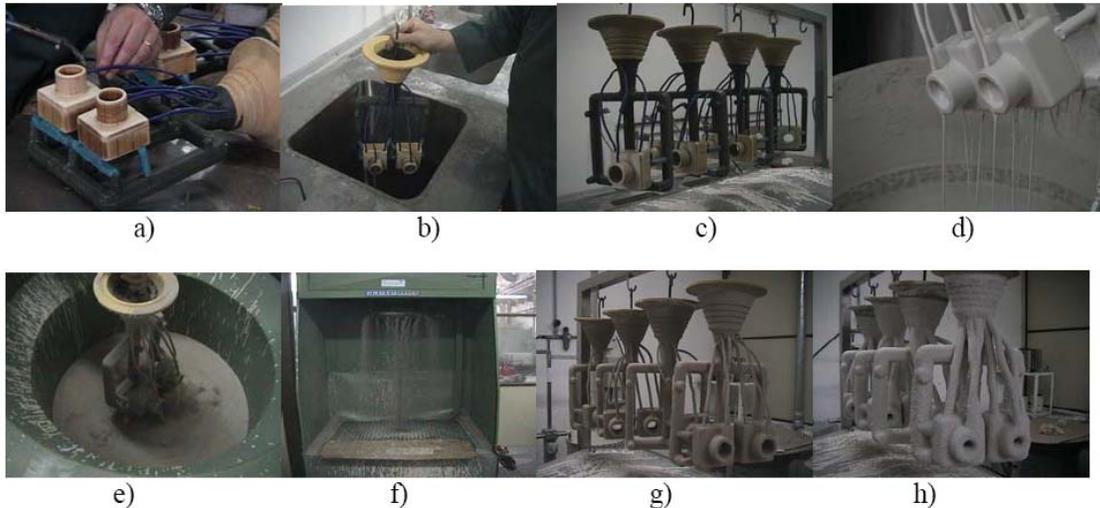


Figura 6: Produção de uma carapaça cerâmica; a) modelos em LOM com alimentadores e canal de vazamento, b) limpeza do conjunto com um solvente, c) secagem, d) barbotina cerâmica, e) pulverização de partículas cerâmicas, g) secagem da camada obtida, h) carapaça cerâmica final (após o fabrico de várias camadas).

### Conversão indirecta

A conversão indirecta de protótipos que tem vindo a ser realizada tem sido centrada na utilização de dois tipos de moldes:

- Moldes em silicone para injeção de cera;
- Moldes em resina carregada com pó de alumínio para injeção de cera

Utilizando moldes de silicone foram obtidas várias pré-séries de componentes, nomeadamente:

- Tampas de bomba(s) de óleo;
- Corpos de fechadura electrónica;
- Caixas de filtro de óleo;
- Estatuetas artísticas.

A fig. 7 mostra moldes de silicone com os protótipos em cera neles injectados e um protótipo final numa liga de alumínio.



Figura 7: Moldes em silicone com as peças em cera neles injectadas e protótipo final em liga de alumínio.

Com as peças “tampa de bomba de óleo” e “corpo de fechadura electrónica” a precisão dimensional obtida com injeção de cera a 3 bar foi de apenas  $\pm 3\text{mm}$ . Este facto deve-se à influência da pressão de injeção e da temperatura na distorção dos moldes de silicone, o que inviabiliza a sua utilização na produção de protótipos técnicos [6, 7].

Com a peça “caixa de filtro de óleo” a precisão dimensional aumentou para  $\pm 0,5\text{mm}$ , devido ao facto do vazamento das ceras ter sido realizado em câmara de vácuo.

Com as peças “estatuetas artísticas” os problemas de precisão dimensional normalmente não se colocam.

Tendo em conta questões técnicas, económicas, de risco e de prazos de entrega, o processo de conversão directa com moldes de silicone, em que a cera é vazada em vácuo, parece ser particularmente adaptado para a produção de pré-séries metálicas de 1 - 5 peças, contudo o seu uso para peças técnicas deve ser feito sempre com bastante prudência devido aos problemas de distorção do molde.

Usando resina carregada com pó de alumínio foram produzidas pré-séries de 10 a 150 peças com diferentes dimensões:

- Corpos e tampas de bombas de óleo;
- Bombas de água;
- Injectores, válvulas e distribuidores de gás;
- Chaminés de esquentadores

Com o domínio adequado das contracções das resinas, ceras e metal, é possível garantir tolerâncias dimensionais de  $\pm 0,6\text{ mm}$  e eventualmente até  $\pm 0,3\text{ mm}$  (em 100 mm).

Para este tipo de peças é possível, usando o modelo original em SL, entregar pré-séries de 10 peças em 3 semanas e de 20 peças em 4 semanas, com grande repetibilidade de prazos e pormenores, qualidade metalúrgica e dimensional.

Para a quase generalidade dos casos, pré-séries de 10-50 peças, este é o único processo testado verdadeiramente competitivo, e que tem tido grande sucesso e aceitação pelos clientes e parceiros do INEGI, tais como RENAULT, BOSCH, e as empresas portuguesas SONAFI (vende para a DAIMLER-CHRYSLER e FIAT), KUPPER & SCHMIDT (vende para a AUDI), CIFIAL, etc.

Na fig. 8 pode-se observar a fase de mistura da resina com o pó de alumínio, o vazamento da mistura na caixa de moldação (neste caso com canais de arrefecimento) e uma peça em cera injectada num molde sem sistema de arrefecimento. Mais pormenores sobre o fabrico e propriedades deste tipo de moldes (que podem também ser utilizados para a injeção de termoplásticos) podem ser encontrados nas referências [11-15].

A fig. 9 apresenta os dois tipos de moldes com protótipos de RP, ceras, carapaças cerâmicas e peças finais metálicas. Na figura 10 podem-se observar algumas das fases da produção dos protótipos em cera.



Figura 8: Mistura da resina com pó de alumínio, vazamento na caixa de moldação e injeção de cera no molde.



Figura 9: Mistura da resina com pó de alumínio, vazamento na caixa de moldação e injeção de cera no molde.



Figura 10: Mistura da resina com pó de alumínio, vazamento na caixa de moldação e injeção de cera no molde.

Como alternativa a este processo, eventualmente com reduções apreciáveis dos custos, mas com prazos mais dilatados, os únicos processos competitivos poderão ser o de obter moldes em ligas de baixo ponto de fusão, tipo Sn-Bi, ou eventualmente moldes maquinados integralmente em alumínio.

## CONCLUSÕES

Os processos de Prototipagem Rápida têm muitas limitações relativamente à produção de protótipos funcionais metálicos, porque os materiais disponíveis são poucos e o processo total é sempre extraordinariamente dispendioso. Utilizando os processos de conversão metálica para a produção de protótipos e pré-séries para diferentes sectores industriais é possível encurtar significativamente o tempo de desenvolvimento de novos produtos com custos competitivos, de forma a reduzir o “time-to-market”.

A associação da Prototipagem Rápida com o processo da “Cera Perdida” ou “Investment Casting” abriu claramente novas potencialidades para acelerar o desenvolvimento de novos produtos para diferentes sectores industriais.

A utilização das tecnologias de conversão metálica, permitiu concluir que o processo dos modelos perdidos, particularmente do “Quick Cast”, apesar de dispendioso, é o único processo que permite obter protótipos metálicos unitários quase completamente funcionais em prazos muito curtos, 3 - 4 dias.

Quando comparado com o processo dos modelos perdidos, o processo de cera perdida com moldes de silicone pode ser mais vantajoso, mas para a realização de 2 - 5 protótipos e não para um protótipo unitário. A principal vantagem deste processo reside na significativa redução dos custos, apesar de um aumento do prazo de execução.

Conclui-se que, para o fabrico de pré-séries superiores a 5 peças e particularmente para 10 - 50 peças, o processo mais interessante será o dos moldes em resinas carregadas com pó de alumínio.

## REFERÊNCIAS

- [1] Fernando Jorge Lino Alves, Fernando Jorge Sousa Braga, Manuel São Simão, Rui Jorge de Lemos Neto, Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte, *PROTOCLICK - Prototipagem Rápida*, Editado Protoclick, INEGI, Porto, Fevereiro 2001.
- [2] T. Wohlers, *Rapid Prototyping & Tooling – State of the Industry*, 2006 Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, USA, 2006.
- [3] N. Hopkinson, R. M. Hague & P. M. Dickens, *Rapid Manufacturing – an Industrial Revolution for the Digital Age*, John Wiley & Sons, 2005.
- [4] M. Teresa Vasconcelos, P. V. Vasconcelos, F. Jorge Lino, Rui J. Neto, As Sinergias da Prototipagem Rápida e da Internet para um Design Optimizado, Tema 2: Valores, USER Design, Congresso Internacional, FIL, Lisboa, 27-30 Março 2003.
- [5] Rui J.L. Neto, A. Barbedo Magalhães, Mário J.A. Pinto, and Bárto A. C. Paiva, “A Prototipagem Rápida e a Produção de Protótipos Funcionais e Pré Séries em Fundição”, *Tecnometal*, Nº 112 Setembro/Outubro (1997).
- [6] F. Jorge Lino, Rui J. Neto, Ricardo Paiva, Bárto Paiva, “Metallic Prototypes for the Pressure Die Casting Industry”, RPD – Rapid Product Development – “Advanced Solutions and Development”, Semana de Moldes 2002, Centimfe, Marinha Grande, 7-11 Outubro 2002.
- [7] Rui Lemos Neto, F. Jorge Lino, A. Barata da Rocha, “Utilização da Prototipagem Rápida no Apoio ao Desenvolvimento de Novos Produtos Forjados e Fundidos”, XXVI Senafor, IX Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Hotel Centro de Convenções SESC, Porto Alegre/RS, Brasil, 18 e 19 Outubro 2006.
- [8] F. Jorge Lino, Pedro Ala, Rui J. L. Neto, Bárto Paiva, Ricardo Paiva, Rui Sousa, “Indirect Rapid Tooling with Investment Casting and Ceramic Moulding”, *Proceedings of VRAP 2003, 1<sup>st</sup> International Conference*

- on *Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp. 517-24, Published by Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Portugal, 1-4 de Outubro 2003.
- [9] Pedro Vasconcelos, F. Jorge Lino, Rui J. Neto, "The Importance of Rapid Tooling in Product Development", *Advanced Materials Forum I*, 1<sup>st</sup> International Materials Symposium, Coimbra, Portugal, April 9-11, 2001, *Key Engineering Materials*, Editado por Teresa Vieira, Vol. 230-232, pp. 169-72, 2002.
- [10]. F. Jorge Lino, Henry Camboa, Bárto Paiva, Rui J. Neto, "Direct Conversion of Rapid Prototyping Models", *MATERIAIS 2001*, 1<sup>st</sup> International Materials Symposium, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, 9-11 Abril 2001.
- [11] F. Jorge Lino, Pedro V. Vasconcelos, Rui J. Neto e Ricardo Paiva, "Produção de Moldes Compósitos para a Injecção de Termoplásticos Utilizando o Fabrico Rápido de Ferramentas", *CLME´ 2005 - ICEM - 4º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 1º Congresso de Engenharia de Moçambique*, Editores: Joaquim S. Gomes, Clito F. Afonso, Carlos C. António e António S. Matos, Edições INEGI, pp. 937-952, Maputo, 30 Agosto a 1 Setembro 2005.
- [12]. Pedro V. Vasconcelos, F. Jorge Lino, Rui J. L. Neto, "Estudo da Injecção de Termoplásticos em Moldes Produzidos em Compósitos de Base Epoxídica de Alta Temperatura", 4<sup>as</sup> Jornadas Politécnicas de Engenharia, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 17 e 18 Novembro 2004.
- [13] Pedro V. Vasconcelos, F. Jorge Lino, António Magalhães, Rui J. Neto, "Impact Fracture Study of Filled Epoxy Resins", 12 Convencion Científica de Ingenieria Y Arquitectura, V Congresso de Ingenieria de Materiales, CUJAE, Habana, Cuba, 30 Noviembre a 3 Diciembre 2004.
- [14] F. Jorge Lino, Pedro V. Vasconcelos, Ricardo Paiva, Rui J. Neto, "Rapid Tooling for Plastic Injection Moulding Using Indirect Rapid Tooling Processes", Thirteenth International Conference on Processing and Fabrication of Advanced Materials, PFAM XIII, Singapore, 6-8 December 2004.
- [15] F. Jorge Lino, Pedro V. Vasconcelos, Rui J. Neto, "Indirect Rapid Tooling with Aluminium and Milled Fibre Reinforced Resins", ICIT 2005, 5<sup>th</sup> International Conference on Industrial Tools, Velenje, Celje, Eslovénia, April 12<sup>th</sup>-15<sup>th</sup>, 2005.