

Desenvolvimento de protótipos metálicos para a indústria automóvel por fundição injectada

F. Jorge Lino^{1*}, Rui J. L. Neto², Ricardo Paiva² e Bártolo Paiva²

¹FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DEMEGI – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal. Tel.: 225081704 (42), falves@fe.up.pt

²INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, CETECOFF – Unidade de Fundição e Novas Tecnologias, Rua do Barroco, 174-214, 4465-591 Leça do Balio, Porto, Portugal. Tel.: 229578714, Fax: 229537352, cetecoff@inegi.up.pt

* falves@fe.up.pt

RESUMO

Os processos de prototipagem rápida são hoje em dia de utilização comum na produção directa e indirecta de protótipos metálicos destinados ao desenvolvimento de produtos tais como ferragens, torneiras, peças fundidas em areia e em coquilha e em particular peças que se destinem à produção por fundição injectada.

Pretende-se com esta comunicação divulgar as vantagens e inconvenientes da utilização das tecnologias envolvidas na obtenção de protótipos completamente funcionais para produtos a serem obtidos por fundição injectada. Abordam-se as técnicas de produção indirecta, através do uso de tecnologias que envolvem a utilização de modelos perdidos em “LOM”, “Thermojet” e “Quick Cast”, e tecnologias de reprodução de modelos com moldes de silicone e de resina, complementados com o processo de cera perdida ou Investment Casting.

Palavras-chave: Prototipagem Rápida, processos de conversão, modelos perdidos, fundição injectada.

1. INTRODUÇÃO

Na fase de desenvolvimento de novos produtos para serem obtidos por fundição injectada, há a necessidade imperiosa de existirem protótipos funcionais, os quais não sendo obtidos pelo processo produtivo definitivo, permitem simular o avançamento e funcionalidade das peças finais, no sentido de não existirem grandes erros que mais tarde se vão transformar em elevados prejuízos e em alargamento dos prazos de entrega.

Tradicionalmente, a nível mundial, o processo mais defendido para a materialização desses protótipos, tem sido o processo de fundição em areia verde ou areia de machos. Esta metodologia obriga a fazer dois projectos simultaneamente; o projecto da peça injectada em si, com definições de superfícies de apartação, gavetas, distribuição racional de espessuras e o projecto das ferramentas de fundição em areia com outras saídas, outras superfícies de apartação, impressos e caixa de machos. Estes factos criam o grave dilema de comprometerem a qualificação das peças, os prazos de entrega dos protótipos, os prazos de execução dos moldes de injeção e os prazos de entrega das peças injectadas.

Com a introdução no mercado, em 1987 da Estereolitografia (SL), primeiro processo de Prototipagem Rápida a ser comercializado [1, 2] e posteriormente a Sinterização Selectiva por Laser (SLS), a Deposição por Extrusão de Plástico (FDM), a Fabricação de Objectos por Camadas de papel (LOM) e o Thermojet, abriram-se novas perspectivas que permitem muito rapidamente a materialização de protótipos metálicos, desde que se conjuguem as tecnologias de Prototipagem Rápida com as tecnologias de fundição pelo processo de cera perdida, ou mais genericamente dos modelos perdidos. A grande vantagem destas novas metodologias consiste exactamente na rapidez e na possibilidade de se obterem peças fundidas com características dimensionais, geométricas e de acabamento superficial, muito semelhantes às futuras peças injectadas. Os custos associados à produção de protótipos e pré séries por estes processos são efectivamente mais elevados, no entanto os prazos de entrega são muito mais curtos, permitindo assim aumentar a competitividade das empresas [3-6].

Basicamente existem duas alternativas para a produção de protótipos metálicos quase completamente funcionais por conversão metálica: os processos directos e os processos indirectos [1, 2]. Embora exista a possibilidade de se obter directamente protótipos funcionais numa gama limitada de materiais metálicos por prototipagem rápida, tais como o SLS de metais e o processo de sinterização directa de metais por laser (DMLS) [1, 2, 7], nesta comunicação abordam-se apenas os processos de conversão de protótipos obtidos por prototipagem rápida.

2. PROCESSOS DE CONVERSÃO METÁLICA

2.1. PROCESSOS DIRECTOS

Nos processos directos, em lugar do tradicional modelo em cera injectado num molde, usam-se protótipos obtidos por [1, 4, 5]:

- Estereolitografia oca;
 - “Quick Cast” da 3D Systems;
 - “Skin and Core” da EOS;
- SLS em poliestireno infiltrado com cera (“Cast Form” da DTM);
- FDM em cera;
- Thermoject em cera;
- LOM em papel.

A estes modelos, eventualmente sem planos de apartação ainda definidos e sem saídas, mas com sobressessuras para acabamento, são soldados sistemas de gitagem e alimentação em cera. Seguidamente, usando o processo das moldações cerâmicas em carapaça ou moldações de gesso em bloco, o conjunto completo é sujeito a um ciclo de calcinação de 1 - 2 horas para a cera (FDM e Thermoject) ou de 12 - 24 horas para o papel (LOM) e resinas epoxídicas (3D Systems e EOS) ou plásticos (DTM), vazando-se seguidamente o metal nas cavidades cerâmicas. A grande vantagem deste processo é a rapidez e a desvantagem é o preço total do protótipo bem como o elevadíssimo risco da peça fundida não sair bem à primeira. Estes processos só se usam para a produção de 1 - 3 protótipos metálicos e permitem obter peças com um prazo total de entrega de 3 - 7 dias.

2.2. PROCESSOS INDIRECTOS

Neste caso os modelos obtidos por técnicas de prototipagem rápida SL, SLS, FDM, LOM ou outros são usados para a obtenção de um molde para injeção de cera [1, 2, 6].

Os moldes para injeção de cera podem basicamente ser de dois tipos [1, 2]:

- Flexíveis em silicone ou em elastómeros de poliuretano;
- Rígidos em resinas epoxídicas ou de poliuretano.

Os moldes flexíveis podem ser usados mesmo que as peças ainda não tenham definidos os planos de apartação e as saídas. Normalmente podem ser obtidos em 1 - 2 dias, com muito pouca mão de obra. Embora se possam injectar as ceras nestes moldes com pressões de 1 - 3 bar, a pressão de injeção distorce as peças, que vêm assim comprometidas as suas tolerâncias dimensionais e geométricas. Para uma melhor eficiência do processo, deve-se vaziar a cera em câmaras de vácuo, projectadas especificamente para o efeito, apenas com a acção da gravidade. A precisão dos modelos obtidos é muito melhor do que no caso anterior. De ± 2 mm pode-se passar a obter precisões de $\pm 0,5$ mm. Uma grande desvantagem deste processo é que sem pressão, e apesar do vácuo, é difícil obter peças isentas de bolhas de ar. A outra desvantagem é que o tempo de solidificação e de arrefecimento da cera nos moldes flexíveis é elevado, na gama de 1 - 3 horas, o que faz com que nalguns casos se possa apenas produzir 2 - 3 peças por dia. Por estes motivos, estas tecnologias usam-se correntemente para a produção de 1 - 5 protótipos, com prazos de 4 - 8 dias úteis, podendo ser competitivas com os processos da conversão directa já referidos.

Para usar moldes rígidos torna-se necessário que a peça a produzir já tenha definidos os planos de apartação, saídas específicas para o processo de injeção de cera e bases de posicionamento para as peças. Neste caso, o projecto do molde para injeção de cera tem grandes semelhanças com o projecto do próprio molde de injeção de metal, exigindo um apurado trabalho de CAD 3D ou mão de obra manual muito especializada.

O molde é fabricado em tantas fases quantas o número de partes móveis do molde (molde fixo + molde móvel + n.º gavetas) e normalmente demora, para moldes complexos, 3 - 7 dias a fabricar. Com este tipo de moldes, fabricados com resinas carregadas com pó de alumínio para aumentar a condutividade térmica, é possível injectar 12 - 30 peças por dia. Esta metodologia permite ainda uma precisão dimensional muito superior à que se consegue com os moldes de silicone, podendo atingir-se $\pm 0,2$ mm utilizando modelos originais em estereolitografia.

3. TRABALHO EXPERIMENTAL REALIZADO

Desde 1998 que o Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) tem dedicado um grande esforço no desenvolvimento dos processos de conversão directa e indirecta, no sentido de garantir a oferta tecnológica nesta interessante área de serviços. As tecnologias desenvolvidas foram:

- Tecnologia de fabrico de moldes de injeção,
- Tecnologia de fabrico das carapaças cerâmicas (“investment casting”),
- Modelos perdidos, calcinação de papel, ceras, termoplásticos e termoendurecíveis.

Os projectos em que o INEGI esteve e está envolvido e que possibilitaram o desenvolvimento de todas estas tecnologias foram:

- RNPR – Rede Nacional de Prototipagem Rápida, projecto financiado pelo PEDIP II, em parceria com INETI, AGILTEC, CENTIMFE, IBEROMOLDES, FERESPE, FUNDIÇÃO DE ÉVORA, NOVODESIGN e UNINOVA [8, 9].
- DECOPOFI – Desenvolvimento Cooperativo de Protótipos de Alta Qualidade para Fundição Injectada, projecto ICPME, financiado pela Agência de Inovação, em parceria com a SONAFI.
- Venda de Serviços às Empresas – CACIA, VALSAN, CIFIAL, VULCANO, JULCAR, BRIEL, EFACEC ENERGIA, EFECÊ, TOPÁZIO, etc.

Neste contexto, foram fornecidos ao conjunto de parceiros e clientes cerca de 2000 peças, de aproximadamente 100 referências, obtidas pelo processo de cera perdida, e cerca de 2 dezenas de peças obtidas pelo processo dos modelos perdidos, nomeadamente “LOM” perdido, “Quick Cast” perdido e “Thermoject” perdido.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. CONVERSÃO DIRECTA

O processo de conversão directa utilizou modelos perdidos em papel (LOM), resina oca (SL) e cera (Thermoject).

Os resultados obtidos usando como modelos a perder protótipos fabricados em LOM, dependem do tipo de papel usado na fabricação dos protótipos [5, 10].

De momento é possível apenas aplicar dois tipos de papel: o papel da Helysis, actualmente comercializado pela empresa americana Cubic Systems Inc., e o papel comercializado pela empresa alemã BMT (Buss Modelling Technologies).

Com o papel da BMT é praticamente impossível de obter algum sucesso, uma vez que contem na sua constituição um produto mineral ignífugo, que dá origem, após 24 horas de calcinação a 1100°C, a uma grande quantidade de cinzas. Estas cinzas que originam grandes falhas de material metálico nas peças fundidas, inviabilizando a utilização deste tipo de papel na conversão directa de protótipos metálicos.

O papel da Helysis quase não tem cargas minerais, mas se as paredes dos protótipos tiverem dimensões inferiores a 4 mm também não permite obter protótipos metálicos isentos de defeitos. No entanto, nalguns casos, tais como bombas de óleo, carburadores de gás e bombas de água, conseguiu-se obter bons resultados. Na figura 1 pode observar-se o aspecto de alguns destes protótipos metálicos com qualidade aceitável obtidos pela tecnologia do “LOM” perdido, com os quais se conseguiram tolerâncias dimensionais de $\pm 0,4$ mm.

Usando como modelos a perder protótipos em SL “Quick Cast”, adquiridos na empresa CAD FORM, fizeram-se conversões de bombas de óleo, suportes de motor e caixas de filtros. Os resultados atingidos foram muito superiores aos do processo LOM perdido, tendo-se obtido peças metálicas com qualidade que permitiu a sua utilização industrial com uma precisão de $\pm 0,2$ mm. Alguns destes protótipos podem ser observados na figura 2.

Usando como modelos protótipos fabricados pelo processo Thermoject, oferecidos pela 3D Systems, obteve-se uma série de protótipos metálicos de corpos e de tampas de bomba de óleo. Os resultados da conversão foram excelentes, podendo os protótipos ser observados na figura 3. Os grandes problemas do Thermoject residem na fraca precisão dimensional ($\pm 0,6 - 0,8$ mm) destes protótipos em cera e na enorme dificuldade em obter um bom acabamento nas zonas em que existem suportes.

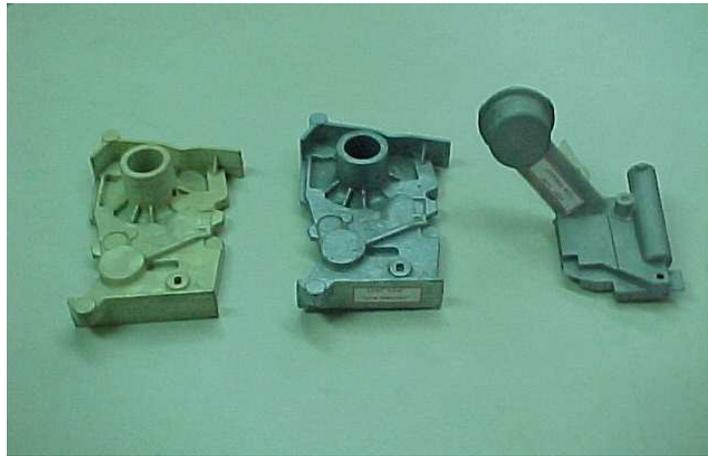


Figura 1 - Modelo LOM e protótipos numa liga de alumínio obtidos pelo processo do “LOM perdido”.



Figura 2 - Modelos em SLA (“Quick cast”) e protótipos em alumínio obtidos pelo processo do “Quick cast perdido”.



Figura 3 - Modelo em cera (“Thermojet”) e protótipos em alumínio obtidos pelo processo de “Thermoject perdido”.

4.2. CONVERSÃO INDIRECTA

O desenvolvimento dos processos de conversão indirecta de protótipos centrou-se fundamentalmente na utilização de dois tipos de moldes:

- Moldes de injeção de cera em silicone (figura 4);
- Moldes de injeção de cera em resina carregada com partículas de alumínio (figura 5) [11-13].



Figura 4 - Molde de injeção de cera em silicone. Na figura pode-se ainda observar o modelo em cera e o protótipo em alumínio.

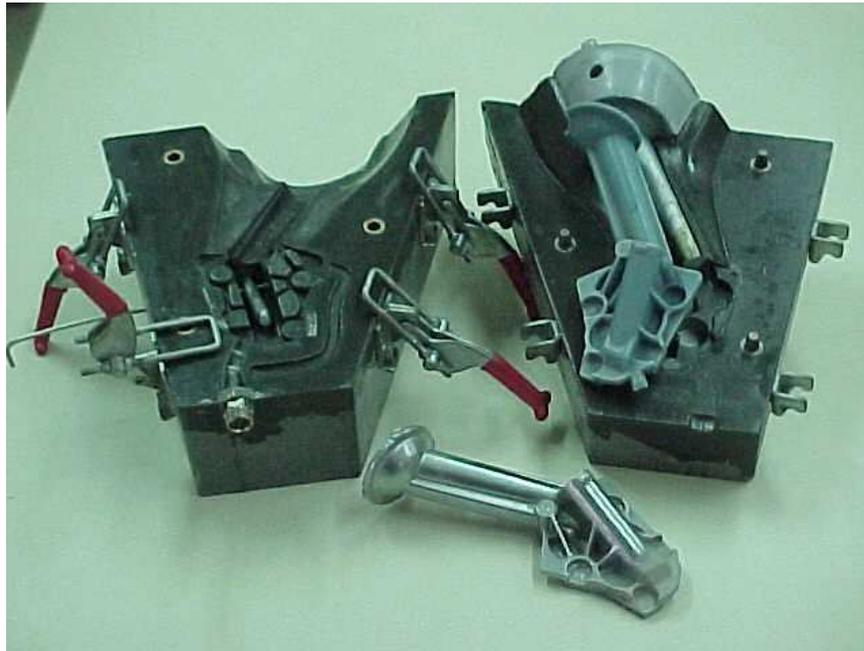


Figura 5 - Molde de injeção de cera em resina carregada com alumínio. Na figura pode-se ainda observar o modelo em cera e o protótipo em alumínio.

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

- Tampas de bombas de óleo para a CACIA;
- Corpos de fechadura electrónica para a CIFIAL;
- Caixa de filtro de óleo para a SONAFI;
- Estatuetas artísticas.

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 ± 3 mm. Este facto deve-se à influência da pressão de injeção na distorção dos moldes de silicone, o que inviabiliza a sua utilização na produção de protótipos técnicos.

Com a peça “caixa de filtro de óleo” a precisão dimensional aumentou para $\pm 0,5$ 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. No gráfico da figura 6 pode observar-se, para o caso da “caixa de filtro de óleo”, as vantagens económicas deste processo de conversão relativamente aos outros processos.

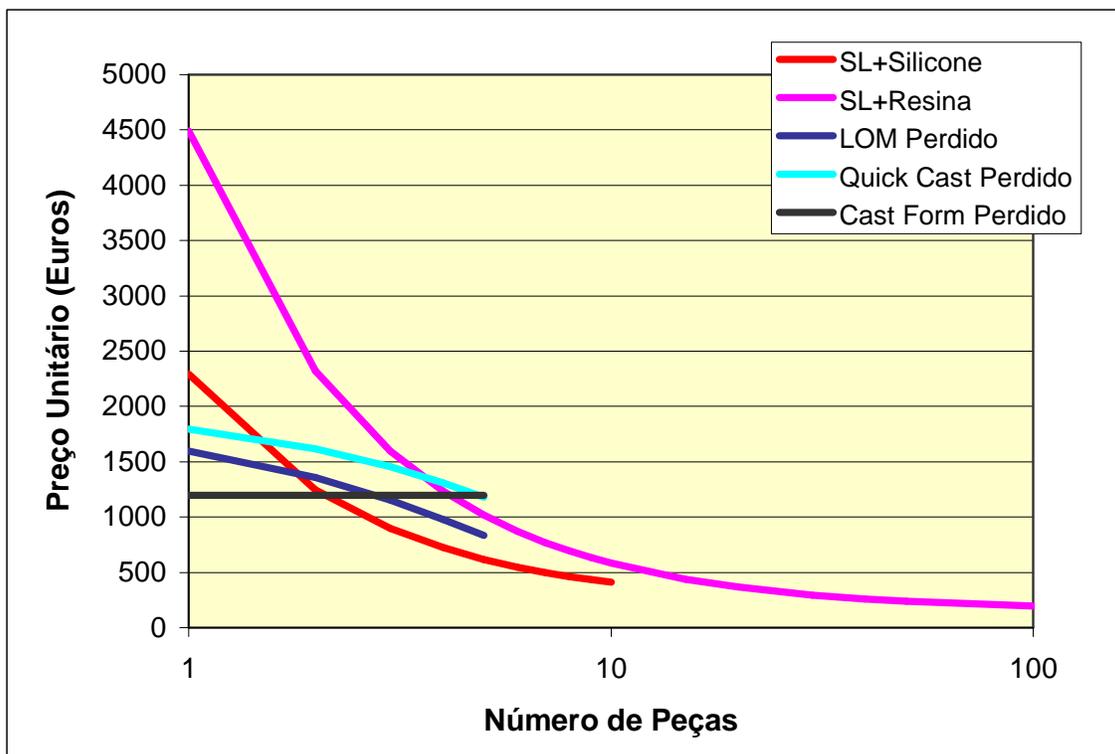


Figura 6 - Comparação dos custos de produção de protótipos metálicos utilizando diferentes processos de conversão metálica.

Usando os moldes de injeção de cera em resina carregada com partículas de alumínio foram produzidas cerca de 20 pré-séries de diferentes dimensões, 10, 20, 50, 70 e 150 peças, nomeadamente corpos de bombas de óleo, tampas de bombas de óleo, bombas de água, injectores de gás, válvulas de gás, distribuidores de gás, chaminés de esquentadores, entre outras, tal como se pode observar na figura 7.

Com um domínio adequado das contracções das resinas, ceras e metal, é possível garantir tolerâncias dimensionais de $\pm 0,2$ mm e eventualmente até $\pm 0,1$ mm (em 100 mm). Como regra geral pode-se afirmar que para este tipo de peças é possível, subcontratando o modelo original em estereolitografia (1 semana), entregar pré-séries de 10 peças em 3 semanas e de 20 peças em 4 semanas, com grande repetibilidade de prazos, qualidade metalúrgica e dimensional.



Figura 6 – Exemplos de protótipos metálicos produzidos por conversão metálica utilizando moldes em resinas carregadas.

Conforme se pode observar no gráfico da figura 6, 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. 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, processos que o INEGI nunca usou, mas que são processos correntes de produção em série como acontece na ZOLLERN.

5. CONCLUSÕES

A prototipagem rápida associada ao processo da “cera perdida” abriu claramente novas potencialidades para acelerar o desenvolvimento de produtos no sector da fundição injectada.

O processo dos modelos perdidos, particularmente do “Quick Cast” (eventualmente do “Cast Form”), apesar de dispendioso, é o único processo que permite obter protótipos metálicos unitários quase completamente funcionais em prazos muito curtos, 3 - 4 dias.

O processo de cera perdida com moldes de silicone pode ser mais vantajoso que o anterior, mas para 2 - 5 protótipos e não para um protótipo unitário. O aumento de prazo e a diminuição dos custos, são a desvantagem e vantagem respectivamente, relativamente ao processo dos modelos perdidos.

Para pré-séries superiores a 5 peças e particularmente para 10 – 50, peças o processo mais interessante será o dos moldes em resinas carregadas com partículas de alumínio.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Jorge Lino Alves, F. Jorge Sousa Braga, Manuel S. Simão, Rui J. Neto, e Teresa Margarida Duarte, “PROTOCLICK - Prototipagem Rápida”, Editado por Protoclick, www.protoclick.com, Porto, Fevereiro, 2001, ISBN 972-95376-1-5.
- [2] D.T. Pham, and S.S. Dimov, “Rapid Manufacturing, The Technologies & Applications of Rapid Prototyping & Rapid Tooling”, Springer-Verlag, 2001, ISBN 1-85233-360-X.
- [3] F. J. Lino, e R. J. Neto, “A Prototipagem Rápida na Indústria Nacional”, 2º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica da Ordem dos Engenheiros, Coimbra, pp. 4.15 - 4.22, 15-16 Dezembro, 2000.
- [4] R. J. Neto, A. B. Magalhães, Mário J. A. Pinto, e Bárto Paiva, “A Prototipagem Rápida e a Produção de Protótipos Funcionais e Pré Séries em Fundição”, *Tecnometal*, Nº 112, pp. 5-8, Setembro/Outubro, 1997.
- [5] F. Jorge Lino, Henry Camboa, Bárto Paiva, Ricardo Paiva e Rui J. Neto, “Conversão Directa de Modelos Obtidos por Prototipagem Rápida”, *Jornadas Politécnicas de Engenharia, ESTG de Leiria*, pp. 1-12, Novembro, 2001.
- [6] Rui J. L. Neto, A. P. Barbedo de Magalhães, Teresa M. P. Duarte e F. Jorge Lino Alves, “A Prototipagem Rápida e a Fabricação Rápida de Ferramentas para Forjamento na Indústria de Ferragens”, *Tecnometal*, Nº 115, pp. 5-9, Março/Abril, 1998.

- [7] Vasconcelos, P.V., Lino, F.J., Neto, R.J., "O Fabrico Rápido de Ferramentas em Engenharia Concorrente", *Tecnometal*, 136, pp. 17-21, Setembro/Outubro, 2001.
- [8] Rui Neto, "Fabricação de Objectos por Camadas de Papel, em "Rede Nacional de Prototipagem Rápida", comunicações apresentadas na divulgação do projecto RNPR, *O Molde*, Ano 13, Nº 45, pp. 28-33, Setembro, 2000.
- [9] Rui Neto, e Ricardo Paiva, *Projecto Mobilizador RNPR "Tecnologias de Conversão por Fundição a Partir de Protótipos Rápidos"*, *Tecnometal*, Nº 129, pp. 14-15, Julho/Agosto, 2000.
- [10] F. J. Lino, H. Camba, B. Paiva, and R. J. Neto, "Direct Conversion of Rapid Prototyping Models", *Materiais 2001, 1st International Materials Symposium, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra 9-11, April, 2001.*
- [11] P. V. Vasconcelos, F. J. Lino, and R. J. Neto, "Estudos de Optimização do Fabrico de Ferramentas Utilizando Resinas Carregadas", *1^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia, Auditório da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Leiria, 14-16 Novembro, 2001.*
- [12] P. V. Vasconcelos, F. J. Lino, and R. J. Neto, "Optimization of Resin Tooling Processing – Aluminium Filled and Fiber Reinforced Epoxies" *CIMTEC 2002, 10th International Conferences on Modern Materials & Technologies, 10th International Ceramics Congress & 3rd Forum on New Materials, Florence, Italy, 14-19 July, 2002.*
- [13] P. V. Vasconcelos, F. J. Lino, R. J. Neto, and A. Teixeira, *Glass and Carbon Fibre Reinforced Hybrid Composites for Epoxy Tooling*, *Article Contest on Preparation of Composite Materials, a ser publicado na Struers Journal of Materialography, Struers, 2002.*