

Estudo de injeção de termoplásticos em moldes produzidos em compósitos de base epoxídica de alta temperatura

Pedro V. Vasconcelos¹, F. Jorge Lino², Rui J. L. Neto²

¹ Dep. de Ciências de Engenharia, ESTG/ IPVC, Ap. 574, 4900-908 Viana do Castelo, Portugal

² INEGI – Instituto Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Rua do Barroco, 174, 4465-591 Leça do Balio, Porto, Portugal

* falves@fe.up.pt

RESUMO

Os moldes rápidos baseados em compósitos de base epoxídica de alta temperatura e utilizados no fabrico rápido de ferramentas apresentam uma durabilidade intermédia entre as chamadas ferramentas “soft tooling” e “hard tooling”. Tal facto deve-se à combinação de uma elevada tenacidade e boa estabilidade térmica das resinas epoxy com a alta rigidez, dureza e boa condutividade térmica das partículas metálicas. Esta última característica reduz o choque térmico no molde em cada ciclo de moldação, permite uma redução da temperatura do molde e reduz o tempo do ciclo de injeção.

Produziram-se materiais compósitos carregados com elevadas concentrações de partículas de alumínio e materiais compósitos híbridos constituídos por partículas de alumínio e fibras moídas, que além de serem testados em ensaios de laboratório foram também testados em moldes de injeção para termoplásticos. Esta comunicação pretende fornecer os resultados deste estudo que visa contribuir para a implementação destas tecnologias como alternativa viável para a obtenção de protótipos com tempos e custos reduzidos, permitindo às empresas aumentar a sua competitividade.

Palavras-chave: compósitos poliméricos, rapid tooling, moldes de injeção

1. INTRODUÇÃO

As ferramentas de matriz epoxídica de alta temperatura, que se incluem nas tecnologias de Rapid Tooling (RT), podem usar-se para processamento de qualquer tipo de material termoplástico adequado para moldação por injeção [1-3].

Os moldes de resinas carregados apresentam uma durabilidade intermédia entre as chamadas ferramentas “soft tooling” e “hard tooling”. Tal facto deve-se à combinação de uma elevada tenacidade e boa estabilidade térmica das resinas epoxy com a alta rigidez, dureza e boa condutividade térmica das partículas metálicas. Esta última característica reduz o choque térmico no molde em cada ciclo de moldação e permite uma redução das temperaturas de operação.

A falha de um molde de injeção determina o respectivo tempo de vida e pode ser causada por fissuração ou perda de integridade superficial, fractura ou desgaste para além dos limites impostos pelas tolerâncias. O processo de injeção de materiais poliméricos, a temperaturas na gama de 150 a 200°C, provoca geralmente um desgaste no molde do tipo erosivo.

O objectivo deste trabalho visa desenvolver resinas compósitas e otimizar o seu processamento, de modo a obter moldes que cumpram as especificações do processo de injeção de termoplásticos, numa perspectiva de obter protótipos em tempos curtos e a baixo custo.

2. DETALHES EXPERIMENTAIS

Os materiais seleccionados para a produção dos moldes, tendo em vista a melhoria da sua funcionalidade e vida útil foram os seguintes:

- Alumínio para aumentar a condutividade térmica;
- Fibras de vidro moídas para aumentar a resistência ao desgaste.

Utilizando estes materiais foram produzidos dois tipos de moldes compósitos:

- Molde monobloco bifásico, realizado através da mistura da resina epoxídica com partículas de alumínio de granulometria fina (compósito AF). Utilizou-se uma fracção volúmica de alumínio de 45% (pureza >98%);
- Molde monobloco trifásico ou híbrido realizado com uma mistura de 38.5% de alumínio e 4% de fibras de vidro moídas (compósito AFV).

A selecção optimizada destes materiais resultou de trabalhos já desenvolvidos pelos autores [4-6].

2.1 EXECUÇÃO DOS MOLDES MONOBLOCOS EM COMPÓSITOS AF E AFV

A peça estudada foi um trinco para ser injectado em poliacetal. O modelo foi realizado em CAD e maquinado em ABS por maquinagem de alta velocidade (HSM) (Fig. 1a). Realizaram-se dois moldes, um no compósito tradicional, AF e outro no compósito híbrido, AFV. Estes moldes foram posteriormente facejados para serem ajustados em placas de aço porta-insertos. A Figura 1(a) mostra os molde com o gito de alimentação na superfície de apartação. Na Figura 1(b) está representado o molde maquinado e colocado na placa porta-insertos.

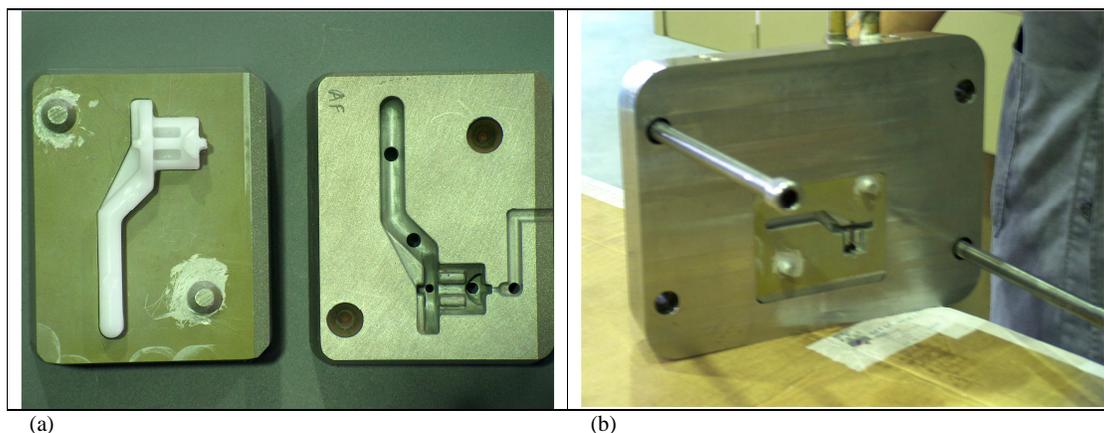


Figura 1: (a) peça injectada, cavidade e bucha em resina, sendo nesta última visível o gito de enchimento e os furos dos extractores; (b) placa porta-insertos contendo o molde rápido de resina (cavidade) para ser testado.

2.2 ENSAIOS DE INJECCÃO

Os ensaios de injeccção foram realizados numa máquina de ensaio de moldes de injeccção Negri Bossi (John Brown, USA) com uma capacidade de injeccção de cerca de 500 gr e uma força de fecho de 190 MPa.

As condições de ensaio [7, 8], depois de realizados alguns testes de afinação, foram as seguintes:

- 1ª injeccção, 130 MPa;
- 2ª injeccção, 50 MPa;
- tempo do ciclo de injeccção, 100 s;
- arrefecimento – circuito de água nos pratos da máquina;
- velocidade – 80%;
- temperatura do material injectado – 190°C.

Ambos os moldes foram sujeitos a cerca de 90 ciclos de injeccção de poliacetal. As peças injectadas foram numeradas por ordem numérica para posterior controlo, nomeadamente, detecção de defeitos, avaliação do acabamento superficial e estabilidade dimensional.

2.3 QUALIDADE DAS PEÇAS INJECTADAS

Embora o desempenho do material moldante seja influenciado pela tecnologia de fabricação associada, as características desse material têm um papel decisivo na qualidade das peças injectadas. A qualidade das peças injectadas foi avaliada recorrendo a critérios de:

- estabilidade dimensional;
- acabamento superficial;
- defeitos de injeção.

A estabilidade dimensional das peças injectadas pode ser determinada quantitativamente pela diferença entre as dimensões especificadas no desenho e as dimensões reais medidas nas peças injectadas. Para efeitos de comparação devem ser escolhidas peças do mesmo material (poliacetal, neste caso), obtidas nos mesmos intervalos dos ciclos de injeção, isto é, com o mesmo número de ordem. A Figura 2 mostra as 6 cotas lineares usadas para controlo. Foi utilizado um paquímetro digital com a precisão de 0.01 mm e uma máquina de medição por coordenadas ortogonal Mitutoyo BX303 (Japão).

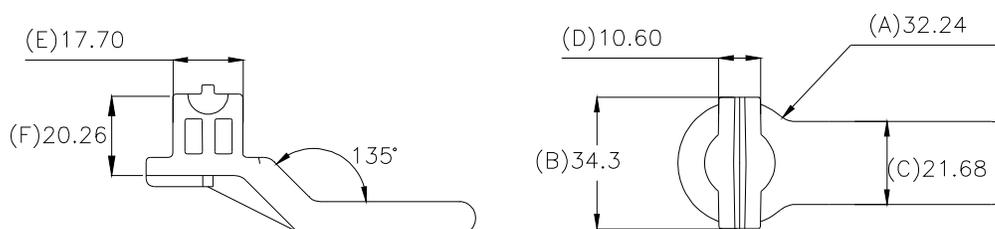


Figura 2: Cotas do modelo para controlo da estabilidade dimensional.

Para avaliação do acabamento superficial foram considerados os parâmetros de rugosidade superficial, linhas de fluxo e alteração de cor. As linhas de fluxo e alteração da cor são determinados, em termos qualitativos, por inspeção visual. Para a determinação da rugosidade, numa determinada direcção e localização da superfície da aba do trinco, utilizou-se um perfilómetro Hommel Werke LV-50, (Hommelwerke-Thyssen, Alemanha), equipado com um apalpador com gama de $\pm 300 \mu\text{m}$, com cone de diamante de abertura 90° e raio de ponta de $5 \mu\text{m}$. Foram realizadas 6 leituras por cada tipo de material.

A avaliação dos defeitos de injeção fez-se também por inspeção visual, tendo sido considerados os seguintes: rebarba, empenos, linhas de soldadura, chupados, fissuras e outros. O empeno do ângulo de 135° da aba foi medido numa máquina de projecção de perfis Mitutoyo PJN322 (Japão).

2.4 QUALIDADE DAS CAVIDADES MOLDANTES

Após a injeção, a qualidade das cavidades moldantes foi avaliada por:

- controlo dimensional, após os ensaios de injeção (determinação de cotas nas peças e traçado de perfis da cavidade moldante) para avaliação do desgaste;
- observação da superfície em microscopia SEM;
- medição da rugosidade média, segundo os critérios de rugosidade R_a , R_z e $R_{\text{máx}}$, numa determinada direcção e localização da superfície moldante (aba do trinco).

O desgaste do molde foi medido de modo indirecto, através da determinação da diferença de cotas medidas em peças injectadas no mesmo inserto com um intervalo de 50 peças na ordem de injeção, tendo sido controladas em cada peça as seis dimensões indicadas na Fig. 2. Para os dois tipos de insertos foram seleccionadas as peças com os números de ordem de injeção 28 e 78.

3. RESULTADOS

3.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE INJEÇÃO

Os tempos gastos num processo de moldação repartem-se em:

- Tempos de enchimento;
- Tempos de retenção;
- Tempos de arrefecimento;
- Tempos de abertura do molde.

Comparativamente aos moldes metálicos, nos moldes baseados em resinas epoxídicas são utilizadas, em geral, pressões de injeção mais reduzidas, o que vai aumentar o tempo de enchimento. Mas é sobretudo a reduzida condutividade térmica destes materiais poliméricos que está na origem de tempos de arrefecimento substancialmente mais elevados do que nos moldes metálicos, originando um ciclo mais longo.

O ciclo de injeção nos moldes em resina teve a seguinte duração (Fig. 3a):

Tempo de injeção – 1s;

Tempo de retenção – 12s;

Tempo de arrefecimento – 80s;

Tempo de abertura – 7s;

O tempo de arrefecimento ocupou neste caso 80% da duração do ciclo e seria aconselhável aumentar ainda mais este tempo, a fim de melhorar em especial a qualidade das peças. O tempo de injeção foi reduzido (1%), pois a peça tinha um volume pequeno e a pressão de injeção teve uma magnitude semelhante à usada nos moldes metálicos.

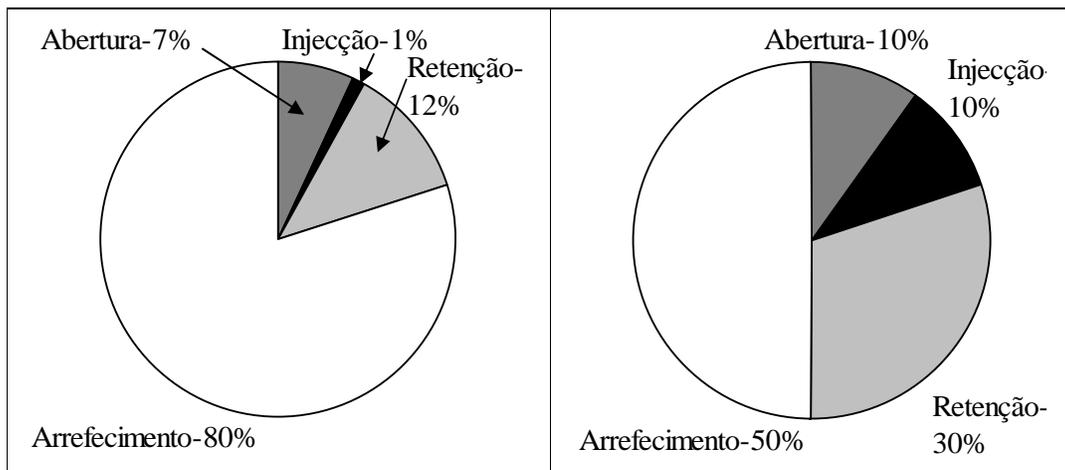


Figura 3: Distribuição percentual de tempos durante as diferentes fases de um ciclo de injeção: (a) nos moldes em resina estudados; (b) nos moldes metálicos, em geral (valores típicos).

3.2 QUALIDADE DAS PEÇAS INJECTADAS

Devido à resistência, dureza e rigidez das resinas epoxy, é possível obter dimensões mais precisas do que com as ferramentas de “soft tooling” [1]. Estas resinas permitem ainda reproduzir detalhes cuidados e paredes finas devido às condições de injeção de alta pressão [4].

As cotas reais medidas nas peças foram comparadas com as cotas do modelo. No molde AF, os desvios encontrados nas peças injectadas foram maiores provavelmente porque as duas metades do modelo usado no fabrico dos moldes não se ajustavam bem, pois apresentavam um certo empeno devido a já terem sido usadas na produção dos moldes AFV. Considerando a avaliação de 6 cotas medidas nas peças injectadas constatou-se uma contracção média de 3.3% relativamente ao modelo.

Registaram-se empenos significativos no ângulo da dobra da aba de 135° (Fig. 2). Os moldes AF e AFV registaram um desvio de 3.1°. Os empenos elevados que surgiram nas peças foram devidos, por um lado, à elevada contracção do material e ao facto de ser uma peça de grande espessura (maciça) [9]. Por outro lado, a extracção da peça faz-se a uma temperatura mais elevada do que num molde metálico, o que origina contracções mais elevadas. Um modo de reduzir a contracção seria aumentar o tempo de arrefecimento dentro do molde, o que no presente caso era pouco prático, já que exigiria tempos de utilização da máquina de injeção muito mais elevados e antieconómicos.

Não se registaram chupados, linhas de soldadura e fissuras. No entanto, as marcas dos extractores foram muito profundas devido à elevada temperatura a que se realizou a extracção. As peças obtidas nos moldes AF apresentaram um pequeno ressalto na junta de partição devido à existência de uma folga no guiamento dos dois inserts, no entanto os inserts estavam bem ajustados pelo que a rebarba não foi excessiva.

Os resultados da determinação da rugosidade, avaliada por três parâmetros de rugosidade, estão indicados na Tabela 1. Deve assinalar-se que os valores da rugosidade do modelo foram medidos após a sua utilização no fabrico dos moldes.

	Critérios de rugosidade (μm)		
	Ra	Rz	Rmáx
Modelo	0.9	5.2	6.4
Peças AF	2.9	14.7	22.7
Peças AFV	2.0	9.7	13.5

Tabela 1: Rugosidade medida no modelo e nas peças injectadas. Todas as peças foram ensaiadas numa mesma zona superficial.

Em todas as peças injectadas, surge regularmente uma textura de tipo picotado que terá origem, provavelmente na elevada temperatura de ejeção. Esta textura é responsável pelos valores médios elevados de rugosidade medidos nas peças.

Constata-se que o estado superficial das peças injectadas nos moldes em AFV é superior ao das peças dos moldes AF. Este resultado vem comprovar o melhor desempenho dos moldes com reforço de fibras de vidro moídas. Não se registaram linhas de fluxo e alteração de cor nas peças produzidas.

3.3 QUALIDADE DAS CAVIDADES MOLDANTES

No final do ensaio foi detectada uma folga entre a cavidade e bucha do molde AF, como já foi referido. Os resultados de avaliação do desgaste pela comparação das cotas medidas em peças injectadas entre o ciclo de injeção 28 e 78 estão indicados na Tabela 2. Constata-se que o desvio é aproximadamente zero no molde AFV e diferente de zero no molde AF.

	Cotas controladas em mm					
	A	B	C	D	E	F
Modelo	32.24	34.3	21.68	10.6	17.7	20.26
Peça AF28	31.32	33.13	21.24	10.28	17.26	19.51
Peça AF78	31.34	33.23	21.27	10.31	17.31	19.54
Diferença (AF78-AF28)	0.02	0.10	0.03	0.03	0.05	0.03
Peça AFV28	30.78	32.88	21.04	10.31	16.91	19.41
Peça AFV78	30.78	32.88	21.04	10.31	16.91	19.42
Diferença (AFV78-AFV28)	0	0	0	0	0	0.01
Contracção média (peça/modelo)	1.19 3.7%	1.27 3.7%	0.53 2.5%	0.3 2.8%	0.6 3.4%	0.79 3.9%

Tabela 2: Resultados do controlo das peças injectadas nos ciclos com o número de ordem 28 e 78, utilizando os moldes AF e AFV.

Podemos seguramente concluir que os moldes AFV apresentam um desgaste não detectável dentro da precisão do aparelho de medida e, portanto, a resistência ao desgaste erosivo é superior à do molde AF. Este resultado está de acordo com os resultados obtidos em ensaios de desgaste abrasivo que indicam que o compósito AFV apresenta melhores características tribológicas [10].

As imagens SEM da superfície moldante após os ensaios de injeção revelam um pronunciado desgaste erosivo, mais intenso nos moldes manufacturados em AF. O material da matriz epoxídica apresenta uma superfície muito irregular devido ao arranque das partículas e fibras. Nas superfícies em que o fluxo do termoplástico foi unidireccional, produziu-se uma superfície estriada bem vincada, como se pode ver na Figura 4. As partículas de alumínio exibem superfícies mais homogéneas com estrias de desgaste e deformação plástica (Fig. 5a).

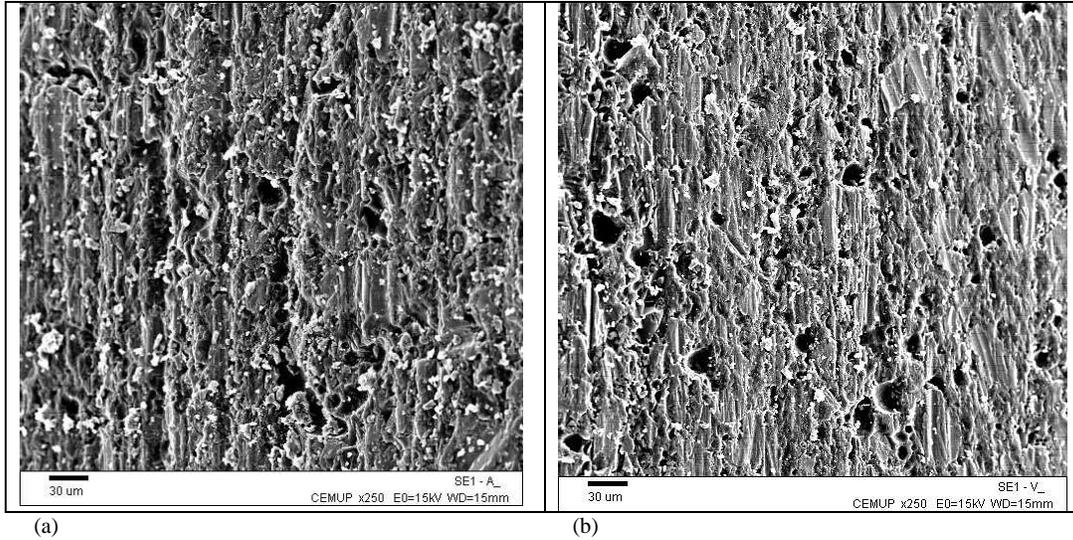


Figura 4: Imagens SEM da superfície da zona moldante, em que é visível uma profunda escoriação na direcção do fluxo termoplástico dos moldes: (a) AF e; (b) AFV.

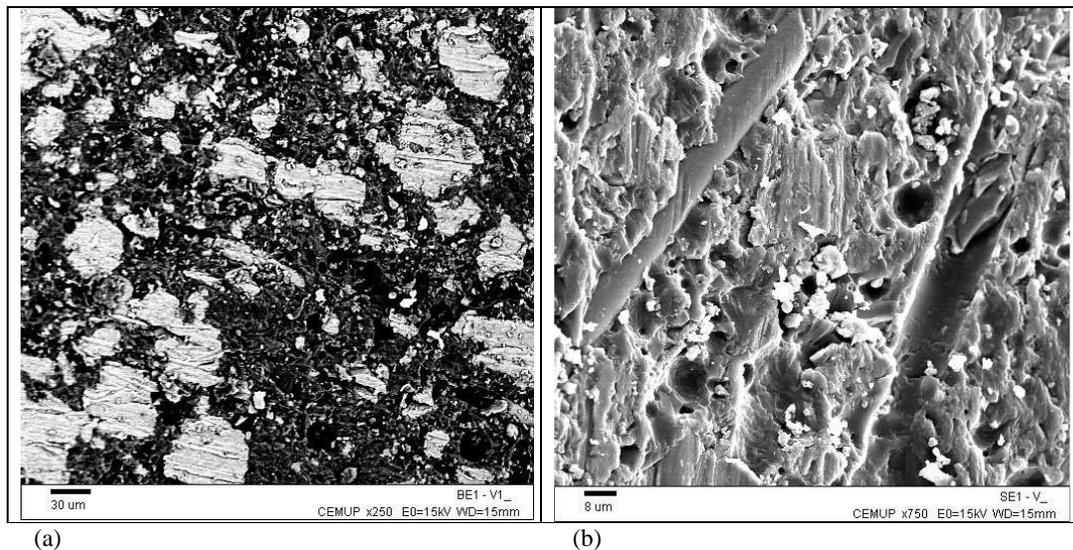


Figura 5: Imagens SEM da superfície da zona moldante dos moldes AFV: (a) as partículas de alumínio, observadas através de electrões retrodifundidos, apresentam estrias profundas de desgaste e deformação plástica; (b) a fibra de vidro do lado esquerdo apresenta sulcos provocados pelo desgaste erosivo.

No compósito AFV é difícil distinguir a presença das fibras de vidro. As fibras orientadas paralelamente à superfície foram facilmente removidas pela acção do fluxo termoplástico. Quanto maior a perpendicularidade das fibras em relação à superfície, maior será a probabilidade de se manterem sem ser arrancadas, contribuindo assim para uma maior integridade do material do molde.

A Figura 5b mostra um caso raro de uma fibra que ainda não foi arrancada apresentando sulcos provocados pelo desgaste erosivo. Supõe-se que para além do desgaste, as fibras estão sujeitas a choques térmicos devido às variações bruscas de temperatura durante o ciclo de injeção, promovendo uma fragmentação acelerada das fibras expostas.

A qualidade superficial dos moldes após cerca de 90 ciclos de injeção, avaliada pelo critério da rugosidade média Ra, foi de 1.41 μm para os moldes AF e apenas 0.94 μm para os moldes em AFV (Tab. 3). Este resultado vem confirmar que o material AFV possui uma integridade física e uma resistência ao desgaste erosivo mais elevadas que o material AF, sendo o molde recomendado para ser utilizado em RT.

	Critérios de rugosidade (μm)		
	Ra	Rz	Rmáx
MOLDE-AF	1.41	11.37	13.83
MOLDE-AFV	0.94	6.84	7.96

Tabela 3: Rugosidade da superfície dos moldes estudados.

4. CONCLUSÕES

Um dos aspectos mais salientes deste ensaio é que permitiu verificar que os moldes baseados em resinas epoxídicas de alta temperatura suportam razoavelmente bem pressões de injeção idênticas às que são aplicadas nos moldes metálicos. A geometria da peça com 4 reentrâncias e com ângulos de saída reduzidos também constituía outro desafio à resistência do molde. Verificou-se que os poros, que são frequentes nas resinas deste tipo, não constituíram um factor crítico da durabilidade do molde, pois foi utilizada uma tecnologia específica de processamento em vácuo que permite reduzir significativamente a porosidade. No entanto, tendo em vista melhorar o tempo de vida do molde há necessidade de realizar reforços em zonas críticas de um modo eficiente.

O compósito AFV exibiu maior resistência ao desgaste erosivo nos ensaios de injeção, o que parece também repercutir-se em melhor qualidade das peças injectadas, ou seja peças com melhores tolerâncias e menor rugosidade, fazendo dele o tipo de molde indicado para estas aplicações de RT.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do FEDER concedido no âmbito do projecto POCTI/EME/41199/2001, “Development of an Indirect Rapid Tooling Process Based in Polymeric Matrix Composites”, aprovado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e POCTI.

Projecto co-financiado pelo Fundo Social Europeu no âmbito do concurso Público 4/5.3/PRODEP/2000, pedido de financiamento nº 1012.004, da medida 5/acção 5.3 – Formação Avançada de Docentes do Ensino Superior submetido pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo.

REFERÊNCIAS

- [1] Pedro V. Vasconcelos, F. Jorge Lino e Rui J. Neto, “The importance of rapid tooling in product development”, *Materiais 2001, 1st International Materials Symposium, SPM, Coimbra, Portugal, 9 - 11 Abril 2001, Materials Science Forum, 169-172, 2002.*
- [2] P. Hilton and P. Jacobs, “Rapid tooling, Technologies and industrial applications”, *Marcel Dekker, New York, 2000.*
- [3] U. Baraldi and C. Emmerchts, “Low cost tooling for injection moulding”, *Composites Tooling III, Proceedings CRIF 94, Elsevier Science Ltd., 27-42, 1994.*

- [4] *Pedro V. Vasconcelos, F. Jorge Lino e Rui J. Neto, "Utilização de fibras moídas no fabrico de ferramentas de matriz polimérica", 2^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia, 13-14 de Novembro, EST de Setúbal, 2002.*
- [5] *Pedro V. Vasconcelos, F. Jorge Lino, A. Monteiro Baptista e Rui J. Neto, "Tribological behaviour of epoxy based composites for Rapid Tooling, aceite para publicação no J. Wear, Outubro, 2004.*
- [6] *Pedro V. Vasconcelos, F. Jorge Lino e Rui J. Neto, "Metodologia de produção de vácuo no fabrico rápido de moldes em compósitos de base polimérica", RPD 2004, Agile Development for Productivity, Centimfe, Marinha Grande, 12 and 13 October 2004.*
- [7] *J. Oliveira, "Ensaio de moldes de injeção", O Molde, Vol. 53, 5-15, 2002.*
- [8] *A. Cunha, "Moldação por injeção e materiais plásticos", Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plástico, Vol. 2, Ed. por Centimfe, 40, 2003.*
- [9] *A. Pontes, S. Mendes, A. Matos, A. Rato e A. Brito, "Zonas moldantes, guiamento e travamento", Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plástico, Vol. 5, Ed. por Centimfe, 11-20, 2000.*
- [10] *I. Narisawa, "High-speed tribology of polymer composites", Advances in Composite Tribology, Ed. by K. Friedrich, Elsevier, 559-582, 1993.*