

INFLUÊNCIA DE MATERIAIS ALTERNATIVOS NAS PROPRIEDADES DE PEÇAS TUBULARES NO CONTEXTO DE MOLDES PROTÓTIPOS DE INJEÇÃO

Deives Roberto Baretta¹
Carlos Alberto Costa²
Ademir José Zattera³
António Sérgio Pouzada⁴

Resumo

As técnicas de Ferramental Rápido surgiram como opção na obtenção de lotes protótipos de peças plásticas, onde o desafio é garantir que as peças obtidas nesses tipos de ferramentas possuam características o mais próximas das solicitadas em aplicações reais. O objetivo desse trabalho foi analisar e avaliar o uso de materiais alternativos como, resinas e ligas de alumínio e de zinco, em cavidades de moldes híbridos de injeção e suas influências nas peças finais. Nesse trabalho foi avaliada a aplicação e influência da utilização de cavidades em ligas de Alumínio, Zamak, aço P20 e resina epoxídica em um molde de injeção. Ensaio de tração e impacto foram realizados nas peças injetadas e após relacionados com os resultados dos ensaios de determinação de cristalinidade e micrografias óticas das paredes de congelamento. A resistência mecânica das peças foi influenciada pelos diferentes tempos de ciclos e temperaturas usados, influenciados principalmente pelas diferentes características térmicas dos materiais usados, o que foi corroborado pelos estudos de cristalinidade e de morfologia dessas peças.

Palavras-chave: Moldes híbridos; Ferramental rápido; Materiais alternativos.

THE INFLUENCE OF ALTERNATIVE MATERIALS ON TUBULAR COMPONENTS PROPERTIES WITHIN THE CONCEPT OF INJECTION PROTOTYPE MOULDS

Abstract

The market demands for constant product innovations, which associated to shorter development cycles, have resulted in more effective and responsive techniques, such as the concept of rapid tooling in the field of injection moulding. One of these techniques is based on hybrid mould, which is produced in “soft” materials, allowing agility in their manufacturing and delivery time. This work explores the use of alternative materials, Zamak, Aluminium and epoxidic resin in deep cores within the concept of hybrid moulds, and relates them to the plastic component physical and mechanical properties. An experimental injection mould has been developed and instrumented for internal temperatures monitoring. For the experimental tests, the injection machine was set with the best conditions obtained in the Moldflow simulation. The prototype components were analysed for visual aspects, main dimensions, shrinkage, mechanical and physical properties, and also the morphology that developed in the mouldings. The influence of the mould core temperature in the morphology and physical properties of the mouldings were focused on this paper.

Key words: Hybrid mould; Rapid tooling; Alternative materials.

¹ Msc, Dept. de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul. Ph.D., Dept. de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul

² Dr., Dept. de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul

³ Ph.D., Dept. de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho

INTRODUÇÃO

As exigências de constante inovação nos produtos, com ciclos de desenvolvimento cada vez menores, tem resultado em técnicas mais efetivas e ágeis, principalmente na indústria de injeção de componentes plásticos. Nesse contexto, o conceito de Ferramental Rápido (RT) surgiu como uma solução possível e viável para a produção de pequenos lotes de peças, tanto finais como protótipos. Uma técnica utilizada nessa área é a de moldes híbridos, onde esses são produzidos, em parte, com materiais de mais fácil manufatura (materiais moles), permitindo assim maior agilidade e rapidez em sua fabricação.

Neste artigo, os conceitos de moldes híbridos de injeção (também conhecidos como moldes protótipos), e de ferramental rápido são abordados, com uma maior ênfase nos materiais alternativos que podem constituir as cavidades de injeção. Nesse trabalho é analisada a influência desses materiais (aço-P20, Alumínio, Zamak, resina epoxídica) empregados no inserto macho do molde em conjunto com a variável de temperatura das cavidades (30°C, 50°C e 70°C) durante a injeção, sobre as propriedades mecânicas, químicas e morfológicas da peça injetada.

O artigo inicia com uma breve explanação sobre os conceitos de moldes híbridos e de ferramental rápido, e materiais usualmente aplicados nesses métodos. Logo em seguida, a metodologia do experimento, onde o produto estudado, assim como o molde experimental, e as análises e ensaios realizados serão detalhados. Por fim, serão apresentados os resultados obtidos e as conclusões serão discutidas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As técnicas convencionais para a manufatura de moldes para a injeção de polímeros, usualmente geram significativo aumento no tempo de desenvolvimento de um produto e do investimento empregado.⁽¹⁻⁵⁾ O uso de técnicas de RT tem sido aplicado pelas indústrias para a fabricação mais rápida de pequenos lotes de peças, com propriedades similares as peças obtidas em grandes lotes.

Há muita divergência na literatura sobre o conceito de RT. Por exemplo, alguns autores comentam que RT é uma técnica de prototipagem rápida (RP) aplicada na fabricação de moldes de injeção.⁽¹⁻⁴⁾ Para Menges⁽³⁾ no conceito de RT, os processos convencionais de usinagem também podem ser aplicados. Rosochowski⁽⁶⁾ vai além na definição de RT e RP para moldes de injeção. Enquanto RP é baseado na adição de material na obtenção das cavidades, RT é baseado na remoção de material por usinagem. Deste modo, HSC (High Speed Cutting) também deveria ser entendido como um processo de RT.⁽⁷⁾ Rosato⁽¹⁾ defende que um molde protótipo é usualmente um molde com uma simples cavidade, usando metais leves, resinas epoxídicas ou borrachas de silicone na construção de suas cavidades.

Hoje, é considerado um molde híbrido de injeção o molde que faz uso de técnicas e materiais diferentes na construção de suas cavidades (macho e fêmea). Observa-se então, a similaridade de alguns conceitos sobre RT e moldes híbridos, mas ambos possuem os mesmos objetivos: redução nos custos e tempos de produção do molde de injeção, além da obtenção de peças-protótipos semelhantes às peças finais. Conseqüentemente, neste artigo, os conceitos de moldes híbridos e ferramental rápido (RT) serão aplicados de forma não diferenciada.

Dois tipos de materiais são comumente usados em moldes de RT, quando manufaturados usando HSC: alumínio e Zamak (liga de zinco, alumínio, manganês e cobre).⁽⁸⁾ Ambos são de fácil usinabilidade, e possuem excelentes propriedades, como resistência a corrosão e condutividade térmica.

Porém, quando existir a necessidade de remoção significativa de material, ou

excesso de detalhes, das cavidades do molde através de processos de usinagem, outras técnicas de RT podem ser aplicadas, como por exemplo, o uso de resinas epoxídicas fundidas. As cavidades com esse tipo de material podem ser obtidas de duas maneiras distintas: por fundição a vácuo, onde as cavidades são obtidas usando um modelo padrão (que usualmente é obtido por RP), e por usinagem de um bloco de resina pré-curada.⁽⁹⁾ No primeiro caso, os sistemas de resfriamento, assim como o de extração podem ser fabricados diretamente no molde. Porém, ambas as técnicas, frequentemente, recorrem ao uso de processos de usinagem de material, mas em menor quantidade.⁽¹⁰⁾

Contudo, um ponto que ainda necessita maior entendimento no uso dessa técnica é o quanto que esses tipos de materiais alternativos utilizados em moldes protótipos, associados com os parâmetros de processo, podem influenciar nas características mecânicas, químicas e dimensionais nos componentes produzidos. Para isso, nesse artigo, são analisadas as influências de cada material nessas propriedades de um produto plástico injetado.

MATERIAL E MÉTODOS

Molde Híbrido de Injeção Experimental

Para o desenvolvimento desse estudo, um molde de injeção experimental foi especificamente projetado e utilizado (Figura 1). Uma das principais características do molde é a de possuir uma fácil intercambialidade de suas cavidades, podendo as trocas serem realizadas rapidamente e sem a necessidade de se retirar o molde da máquina injetora. Além disso, o molde é instrumentalizado quanto à temperatura e pressões internas.

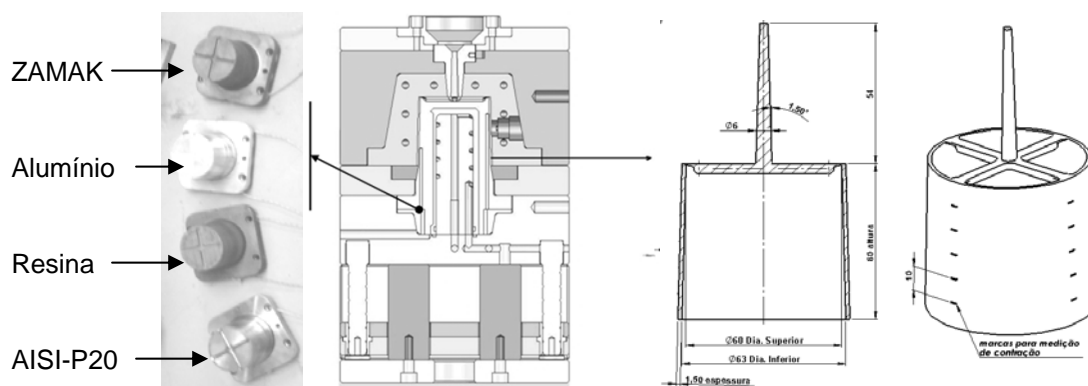


Figura 1: Molde híbrido de injeção experimental e peça estudada

Para os testes experimentais parâmetros de processo, pré-otimizados, obtidos via simulação computacional (Moldflow®) foram definidos e após repassados na máquina de injeção utilizada (HIMACO 80-150). Foram adotadas quatro configurações distintas para o conjunto moldante (cavidade e inserto), sendo que para todas as situações a cavidade era de aço AISI-P20 e os insertos de: aço AISI-P20, Alumínio 7075, Zamak-5 e resina epoxídica (Figura 1). Preferiu-se adotar esse tipo de configuração para que um estudo mais detalhado sobre diferenças na morfologia da peça injetada fosse realizado, permitindo uma melhor visualização das paredes de congelamento.

Foram analisadas 12 configurações diferentes (4 materiais x 3 temperaturas do molde). Essas configurações de cavidades resultam no objetivo do experimento, onde podem ser observadas na peça injetada variações como: a influência dos diferentes materiais nos tempos de resfriamentos, variações dimensionais, além de contrações, que são causadas diretamente sobre o inserto macho do molde. O

controle de temperatura no molde foi feito por um termoregulador marca Moretto modelo THP84.

Propriedades dos Materiais Utilizados

Os materiais metálicos alternativos utilizados neste estudo foram Alumínio 7075-T6 e Zamak-5, já que, de acordo com a literatura consultada, são os mais indicados para ferramentais rápidos, em termos de ligas leves. O aço utilizado foi o AISI P-20, por apresentar ótima combinação de propriedades em relação a seu custo, e por ser comumente utilizado em moldes convencionais. O macho em resina epoxídica utilizado foi fabricado com resinas comerciais da marca *Huntsman®*: RenCast 436 com carga de 10% em alumínio no núcleo do macho; RenGel 426 aplicada na camada externa do macho; e o endurecedor REN HY 150. As propriedades térmicas e mecânicas desses materiais podem ser visualizadas na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1: Propriedades mecânicas e térmicas aplicadas nesse estudo.

Propriedades	AISI P20	Alumínio 7075-T6	Zamak-5	Resina Epoxídica
Densidade [Mg/m ³]	7.80	2.71	6.76	1.75
Calor específico [J/kg.K]	460	782.3	420	1050
Condutividade térmica [W/m.K]	29	138	109	1
Coefficiente de expansão térmica [K ⁻¹]	12x10 ⁻⁶	22.5x10 ⁻⁶	27.4x10 ⁻⁶	60x10 ⁻⁶
Módulo de elasticidade[GPa]	200	70	85	6.86

O material polimérico selecionado para a injeção foi o polipropileno (PP) isotático, marca *Braskem®* H503. Esse polímero foi selecionado por apresentar estrutura semicristalina (facilitando assim o estudo dos efeitos na cristalinidade), por ser de fácil processabilidade, e por sua grande gama de aplicações.

Parâmetros de Processo Simulados e Adotados

Os parâmetros de processo usados no experimento, primeiramente, foram obtidos através de simulação (MoldFlow - MPI), analisados e, após configurados na máquina injetora, conforme resume a Tabela 2. Especificamente, para as configurações com o inserto macho de resina epoxídica, as condições de pressão de injeção, pressão de recalque, tempo de injeção e de recalque foram ajustadas como medida de preservação da vida útil desse macho. O tempo de ciclo foi ajustado para 120 segundos, devido à baixa condutividade térmica desse material. Os dados de processo para os 4 materiais utilizados no conjunto moldante e suas respectivas temperaturas de moldagem para as configurações a 50°C são visualizados na Tabela 2. Os tempos são apresentados em segundos [s] e as pressões em MPa.

Tabela 2: Tempos de processo – Simulação X Execução

	Tempo de injeção MPI	Tempo de Injeção Máquina	Tempo de recalque	Tempo de recalque Máquina	Pressão de injeção MPI	Pressão de injeção Máquina	Pressão de recalque MPI	Pressão de recalque Máquina
P20-50°	1.44	1.50	10.00	10.00	35.46	36.00	28.37	29.00
RP4036-50°	2.02	2.00	22.00	22.00	28.50	29.00	17.00	17.00
Al-50°	1.44	1.50	10.00	10.00	35.59	36.00	28.47	29.00
Zamak-50°	1.44	1.50	10.00	10.00	35.57	36.00	28.46	29.00

Coleta de Amostras

Foram injetadas para cada configuração estudada 15 peças para a obtenção da estabilidade térmica do molde de injeção e, após foram injetadas e colhidas 30 amostras para cada configuração. Na configuração de resina injetada sobre o molde a 50°C foi realizado um experimento de durabilidade do conjunto. Após injetadas, as amostras foram acondicionadas a temperatura de 20°C e umidade relativa de 50%

durante 48 horas, conforme norma ABNT 7452, antes de cada ensaio mecânico.

Ensaio e Análises Realizadas

Para que o objetivo do trabalho fosse alcançado, foram realizados os seguintes ensaios e análises:

Ensaio mecânico de ruptura por tração: realizado em máquina EMIC, modelo EMIC DL 3000, com capacidade de até 30 kN. A velocidade aplicada durante o ensaio foi de 50 mm/min e a célula de carga utilizada foi de 2 kN. O dispositivo de fixação da amostra, desenvolvido para essa análise, é apresentado na Figura 3-a.

Ensaio mecânico de impacto: O ensaio de impacto seguiu a norma ASTM D256, exceto quanto à espessura da peça que é inferior à solicitada. O ensaio de impacto em uma máquina CEAST modelo 6545/000, com pêndulo de 1J e velocidade de impacto de 3.46m/s. Nesse ensaio, preferiu-se analisar de forma distinta a influência de linhas de solda na resistência ao impacto. Dois tipos de amostras, em cada configuração estudada, foram preparados, um com a linha de solda sobre a amostra e em outro a amostra foi cortada sobre a linha de fluxo (Figura 3-b).

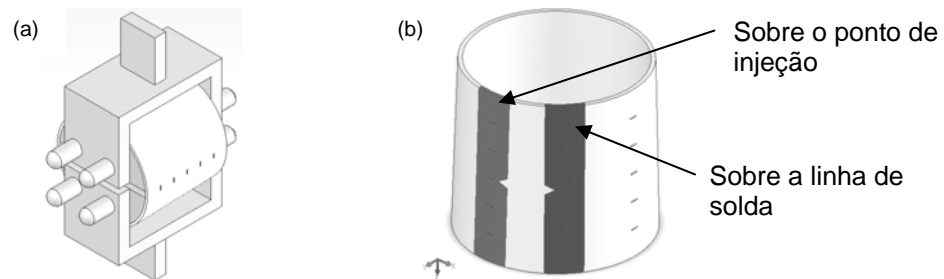


Figura 3: Ensaio de resistência à ruptura (a). Corpo de prova para ensaios de impacto (b).

Análise de Cristalinidade e Morfologia Cristalina: A morfologia cristalina foi analisada a partir das micrografias do corte da espessura da peça, onde também se pode observar o comportamento da parede de congelamento. Exemplos dessas micrografias podem ser observados na Figura 5. As observações foram feitas com o microscópio de luz polarizada em seções finas com cerca de 15 μ m de espessura. As seções foram cortadas à temperatura ambiente com um micrótomo equipado com lâminas de aço descartáveis e montadas entre uma lâmina e uma lamela de vidro com bálsamo do Canadá. A análise de cristalinidade foi realizada em equipamento para a análise de DSC de marca SHIMADZU, modelo 50. A massa de cada amostra utilizada foi de 10 \pm 0.6 mg e, todas as análises foram realizadas com taxa de aquecimento de 10°C/min em uma atmosfera de nitrogênio e, com fluxo de 50ml/min. Além desses ensaios foram avaliadas as seguintes dimensões do produto: diâmetro de 60mm, diâmetro de 63mm, altura da peça e espessura.

RESULTADOS

Nessa sessão são apresentados os resultados obtidos nas análises e ensaios citados anteriormente. Os resultados do ensaio de resistência à ruptura são apresentados em forma de gráfico na Figura 4, que demonstram a redução na resistência à ruptura das configurações de amostras injetadas sobre os diferentes materiais alternativos aplicados nesse trabalho. Em relação ao aço AISI-P20, o comportamento mecânico das amostras injetadas sobre o inserto macho de resina apresentou o pior comportamento, seguido das amostras injetadas sobre o inserto macho de alumínio e do inserto macho de Zamak. Essa redução nas propriedades mecânicas também foi observada nos resultados do ensaio de resistência ao impacto em ambas as situações analisadas, sobre a linha de solda e sobre a frente de fluxo.

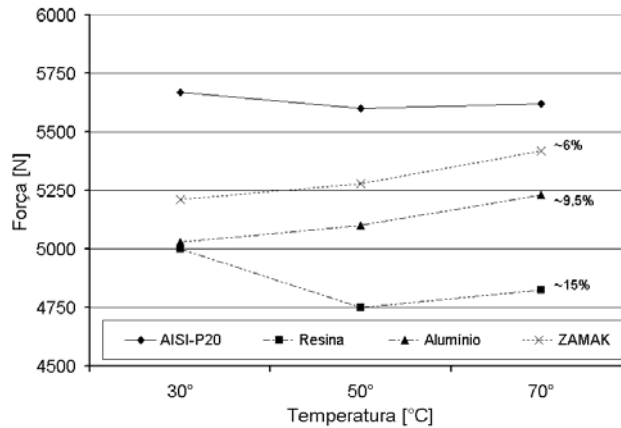


Figura 4: Resultados do ensaio de resistência à ruptura

Foi realizada também uma análise quanto aos aspectos visuais da peça injetada. Esses resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Aspectos visuais das amostras

<i>Macho</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Rebarba</i>	<i>Linha de solda</i>	<i>Preenchimento</i>
AISI P20	30°C	Sim	Não	Ok
	50°C	Sim	Não	Ok
	70°C	Não	Não	Ok
Resina	30°C	Sim	Sim	Ok
	50°C	Sim	Sim	Ok
	70°C	Não	Não	Ok
Alumínio	30°C	Não	Sim	Rechupe
	50°C	Não	Não	Ok
	70°C	Não	Não	Rechupe
Zamak5	30°C	Não	Sim	Ok
	50°C	Não	Não	Rechupe
	70°C	Não	Não	Incompleto

Em algumas configurações ocorreram rebarbas nas peças, resultado das diferentes propriedades térmicas dos materiais envolvidos nas cavidades moldantes. Como os insertos machos de materiais alternativos foram fabricados com o mesmo dimensional do que o inserto de aço AISI-P20, durante a injeção com diferentes temperaturas de cavidades houve maior ou menor dilatação do inserto. Isso fez com que as folgas existentes entre o inserto e a placa extratora fossem maiores ou menores, possibilitando a ocorrência de rebarbas, ou aprisionamento da gases, respectivamente.

A morfologia observada por meio das micrografias obtidas, mostra à influência dos diferentes tipos de materiais aplicados no conjunto moldante sobre a estrutura da peça, onde se observa um comportamento similar quanto às peças injetadas sobre materiais com propriedades térmicas semelhantes, como os insertos machos de material metálico, por exemplo (Figura 5-a).

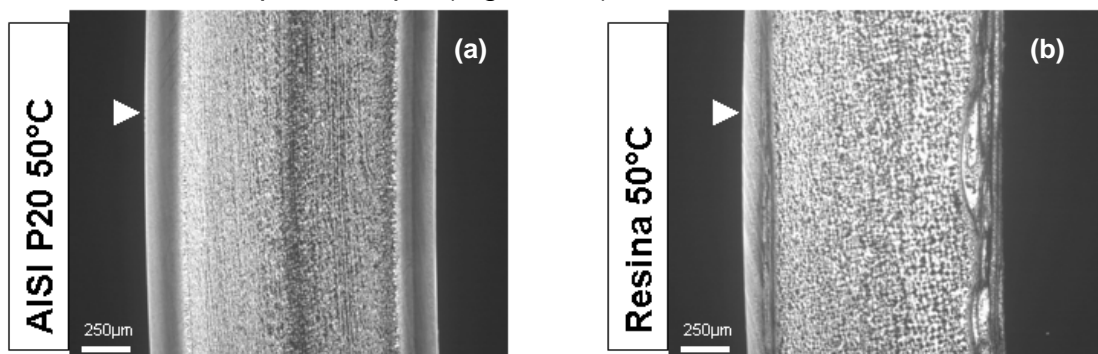


Figura 5: Micrografia das amostras injetadas nas configurações AISI-P20 (a) e Resina (b) a 50°C.

Além disso, essas peças apresentaram uma estrutura simétrica em relação à superfície e o miolo da peça. Um comportamento oposto ao mencionado anteriormente ocorre nas peças injetadas no inserto de resina (Figura 5-b). Como o ciclo de refrigeração para essas configurações foi mais lento, isso fez com que uma estrutura com esferulitos de tamanhos mais elevados fosse originada. Além disso, observando as micrografias apresentadas na Figura 5, nota-se que a distribuição da estrutura é claramente assimétrica. A seta indica o lado da cavidade em aço.

Analisando o grau de cristalinidade quanto à temperatura do molde, observou-se que nas configurações a 30°C o grau de cristalinidade é menor devido ao menor tempo de resfriamento. Para as outras configurações de 50°C e 70°C, observou-se um valor semelhante para o grau de cristalinidade. Nas configurações de Resina essa variação diminui, pois o ciclo de injeção é o mesmo (120s) para as três temperaturas usadas para esse material. O grau de cristalinidade para todas as amostras injetadas sobre o macho de Resina é menor que o grau das outras configurações, devido a essas diferenças no tempo de ciclo de resfriamento, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4: Dados do ensaio de DSC para cristalinidade e entalpia

<i>Macho</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	ΔH_f [J/g]	<i>Cristalinidade [%]</i>
AISI P20	30	82.12	39.29%
	50	85.64	40.97%
	70	85.52	40.91%
Resina	30	81.89	39.18%
	50	82.38	39.41%
	70	82.91	39.66%
Alumínio	30	81.09	38.79%
	50	83.64	40.02%
	70	83.91	40.14%
Zamak	30	81.12	38.81%
	50	83.60	40.00%
	70	83.05	39.74%

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos dados apresentados na seção anterior, sobre os ensaios de resistência mecânica, observa-se que as amostras injetadas sobre o macho de Resina apresentaram um comportamento inferior as amostras injetadas sobre os machos metálicos. Isso se dá, principalmente, pelo fato de que o ciclo de injeção para essas amostras, precisou ser prolongado para que as amostras pudessem ser extraídas do molde devido à característica de isolante térmico da resina epoxídica. Como visto anteriormente, o resfriamento lento gera esferulitos de tamanho grande, e nesse caso, existe ao final da cristalização do polímero, uma menor quantidade de moléculas interesferulíticas. Isso faz com que haja uma diminuição da capacidade da massa polimérica (peça plástica) em absorver a propagação de trincas oriundas do ensaio de resistência ao impacto.

Quanto ao ensaio de resistência à ruptura, as amostras injetadas sobre o macho de aço AISI P20 apresentaram um melhor comportamento, pois analisando conjuntamente a morfologia dessas amostras, percebe-se que há um melhor refinamento da estrutura, além de uma melhor disposição. Além disso, essas amostras apresentaram um maior grau de cristalinidade, em relação às amostras injetadas sobre os outros materiais. Comparando a morfologia e a cristalinidade das amostras injetadas sobre os machos de Alumínio e Zamak, com as amostras injetadas sobre o aço AISI P20 e Resina, percebe-se que as propriedades mecânicas apresentadas nas amostras injetadas sobre o Alumínio e o Zamak validam o que foi concluído para as amostras injetadas sobre os machos de aço AISI

P20 e de Resina.

CONCLUSÃO

Este artigo mostrou uma parte inicial dos estudos realizados sobre componentes plásticos injetados em moldes de injeção híbridos, dentro da abordagem de *Rapid Tooling*. Os resultados mostraram que em sua maioria, não houve maiores diferenças entre os aspectos dimensionais. Contudo, a resistência mecânica das peças injetadas foi influenciada pelos diferentes tempos de ciclos usados. Esses tempos de ciclo foram configurados devido as diferentes características térmicas dos materiais empregados nos machos (condutividade e coeficiente de expansão térmica). Isso se torna um ponto importante quando se deseja que as propriedades mecânicas da série de protótipos reais, sejam as mesmas daquelas que serão produzidas em lotes reais. O estudo morfológico realizado também confirma, segundo a literatura pesquisada, a diminuição das propriedades mecânicas devido às diferenças observadas quanto à cristalinidade das amostras estudadas.

Do ponto de vista de estética, as peças injetadas sobre o macho de resina apresentaram um acabamento superficial inferior às outras peças. Algumas configurações estudadas apresentaram rechupes e falhas no preenchimento devido à falta de escape de gases ocasionada pela dilatação excessiva dos machos.

Finalmente, a utilização de peças produzidas em moldes híbridos (protótipos) é economicamente viável para uma produção de lotes curtos. A opção por esse tipo de técnica deve ser realizada se observando quais as características, propriedades e aplicações que esse produto terá. Futuros trabalhos são necessários para avaliar a influência dos materiais alternativos quando se utiliza o par (cavidade-macho) do mesmo material, bem como quais seriam os resultados com outros tipos de polímeros, como amorfos, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- 1 ROSATO, D.; ROSATO, V.; DOMINICK, V. **Injection Molding Handbook**. New York: Chapman & Hall, 1995.
- 2 CHUA, C.K.; HONG, K.H.; HO, L. Rapid Tooling Technology. **The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.15, n.8, pp.604-8, julho 1999.
- 3 MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P. **How to make injection molds**. Munich: Hanser, 2000.
- 4 JIANG, X.; LIU, X.; ZHANG, C. Feasibility study of a new rapid tooling process. **The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, n. 3-4, p. 296-304, dezembro 2005.
- 5 MARTINHO, P.; POUZADA, A. Hybrid Moulds: the Use of Combined Techniques for the Rapid Manufacturing of Injection Moulds. In **2nd Int. Conf. Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping**, Leiria: Setembro, 2005
- 6 ROSOCHOWSKI, A.; MATUSZAK, A. Rapid Tooling: the state of the art. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 106, n. 1-3, pp. 191-8, outubro 2000.
- 7 ZEILMANN, R. P.; SANTIN, R.; COSTA, C. A.; POUZADA, A. S. Tool wear in the high speed machining of injection moulds. In **Rapid Product Development**, 2006, Marinha Grande: pp 1-6, novembro 2006.
- 8 MORATELLI, M.; COSTA, C. A. Seleção de aços para cavidades/machos de moldes de injeção. **Máquinas e Metais**, v. 42, n. 482, p. 144-61, março 2006.
- 9 VOLPATO, N.; AMORIN, J.; MANENTE, M. The use of epoxy resins as inserts for injection mould. In **International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, São Paulo, Novembro 2003. v. 1, p. 1-10.
- 10 BUSATO, F. A. **Parâmetros de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes fabricados por estereolitografia com resina SOMOS 7110®** 2004. 146 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFSC, Florianópolis, 2004.