

# ESTUDO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS APLICADOS A CAVIDADES DE MOLDES HÍBRIDOS DE INJEÇÃO DE POLÍMEROS<sup>1</sup>

Deives Roberto Baretta<sup>2</sup>  
Carlos Alberto Costa<sup>3</sup>  
Ademir José Zattera<sup>4</sup>  
Antônio Sérgio Pouzada<sup>5</sup>

## 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 é analisar e avaliar o uso de materiais alternativos, resinas e ligas de alumínio e de zinco, em cavidades de moldes híbridos de injeção e suas influências nas peças finais. Nesse trabalho fez-se uso de um molde de injeção intercambiável com cavidades de Alumínio, Zamak, aço P20 e resina epoxídica e, instrumentalizado para o monitoramento das temperaturas internas. O polímero utilizado foi o PP. Os parâmetros usados na injetora foram obtidos através de simulações computacionais. Ensaios de tração e impacto, foram realizados e, após relacionados com os ensaios de determinação de cristalinidade e micrografias óticas das paredes de congelamento. Avaliações dimensionais e visuais também foram realizadas e relacionadas com as diferentes temperaturas de estabilização térmica adotadas. Sob o ponto de vista estético e dimensional o uso de diferentes materiais nas cavidades não afetou significativamente o produto final injetado. Porém a resistência mecânica das peças foi influenciada pelos diferentes tempos de ciclos e temperaturas usados, que foram baseados nas diferentes características térmicas dos materiais usados. Tais resultados foram corroborados a partir dos estudos da cristalinidade e da morfologia dessas peças. Tais análises tornam-se importantes quando se deseja que uma peça injetada por essas técnicas possua as mesmas características de uma peça injetada convencionalmente.

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

## STUDY OF ALTERNATIVE MATERIALS APPLIED TO CAVITIES OF POLYMERIC INJECTION HYBRIDS MOULDS

### Abstract

The market demands for constant product innovations, associated with shorter development cycles, have result in more effective and responsive techniques, mainly in injection moulding industry. In the field of injection moulding, the concept of rapid tooling has appeared as a solution for smaller production runs. One of these techniques is based on hybrid mould, which is produced in "soft" materials, allowing agility in their manufacturing and delivery time. The use of these materials raises new issues, as the actual influence on the final properties of the injected plastic component. 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 physical and mechanical properties in the plastic component. 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. The relationships between the injection moulding properties, core materials and injection mould process parameters are discussed presented in the end.

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

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 5º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 22 e 23 de agosto de 2007, São Paulo – SP, Brasil.*

<sup>2</sup> *Msc, Dept. de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul*

<sup>3</sup> *Ph.D., Dept. de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul*

<sup>4</sup> *Dr., Dept. de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul*

<sup>5</sup> *Ph.D., Dept. de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho*

## INTRODUÇÃO

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. Para esse trabalho, será 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.<sup>(1-5)</sup> 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.<sup>(1-4)</sup> Para Menges<sup>(3)</sup> no conceito de RT, os processos convencionais de usinagem também podem ser aplicados. Rosochowski<sup>(6)</sup> 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.<sup>(7)</sup> Rosato<sup>(8)</sup> 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. Consequentemente, 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).<sup>(9)</sup> 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.<sup>(10)</sup> 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.<sup>(11)</sup>

Contudo, uma questão a ser melhor entendida no uso dessas técnicas é o quanto, com relação ao processo/parâmetros, que os materiais alternativos utilizados em moldes protótipos propiciam as mesmas características mecânicas, químicas e dimensionais nos componentes produzidos. Para isso, nesse artigo, serão analisadas as influências de cada material nessas propriedades do produto injetado, tais como resistência à tração e impacto, além de dimensionamento da peça injetada obtida.

## 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 feitas 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. O conceito desse molde de injeção é o resultado de um trabalho cooperativo entre as Universidades de Caxias do Sul, Brasil e a Universidade do Minho, Portugal.

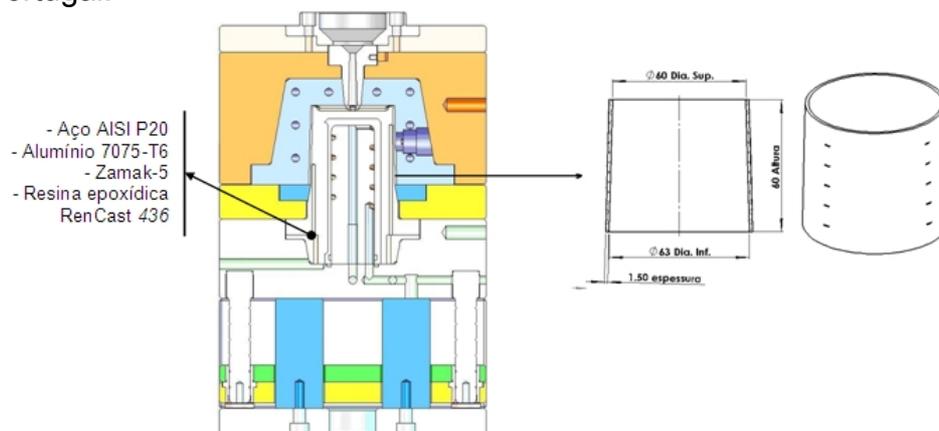


Figura 1: Molde híbrido de injeção experimental e peça estudada

Para os testes experimentais os melhores parâmetros de processo 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 2). O controle de temperatura no molde foi feito por um termoregulador marca Moretto modelo THP84.



**Figura 2:** Molde experimental e os 4 machos utilizados

Foram analisadas 12 configurações diferentes (4 materiais x 3 temperaturas). 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. Somente o material do inserto macho foi alterado, permanecendo a cavidade fêmea com o mesmo material, aço AISI P20, para todos os ensaios. 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.

### 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 as seguintes resinas comerciais da marca *Huntsman*<sup>®</sup>: 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.

<b>Propriedades</b>	<b>AISI P20</b>	<b>Alumínio 7075-T6</b>	<b>Zamak-5</b>	<b>Resina Epoxídica</b>
Densidade [Mg/m <sup>3</sup> ]	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 <sup>-1</sup> ]	12x10 <sup>-6</sup>	22.5x10 <sup>-6</sup>	27.4x10 <sup>-6</sup>	60x10 <sup>-6</sup>
Módulo de elasticidade[GPa]	200	70	85	6.86

O material polimérico selecionado para a injeção foi o polipropileno (PP) isotático, marca *Braskem*<sup>®</sup> 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

A partir das simulações matemáticas computacionais realizadas, a Tabela 2 reúne todos os parâmetros relevantes no experimento para que uma peça de qualidade aceitável fosse injetada. 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. As pressões de injeção usadas nessas configurações foram reduzidas em 20% das pressões utilizadas nas configurações do aço AISI P20, e as pressões de recalque reduzidas a 60% dessas pressões de injeção. 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 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

	<i>Tempo de injeção MPI</i>	<i>Tempo de Injeção Máquina</i>	<i>Tempo de recalque</i>	<i>Tempo de recalque Máquina</i>	<i>Pressão de injeção MPI</i>	<i>Pressão de injeção Máquina</i>	<i>Pressão de recalque MPI</i>	<i>Pressão de recalque Máquina</i>
P20-30°	1.34	1.40	10.00	10.00	37.05	39.00	29.64	30.00
P20-50°	1.44	1.50	10.00	10.00	35.46	36.00	28.37	29.00
P20-70°	1.54	1.60	10.00	10.00	33.42	34.00	26.74	27.00
RP4036-30°	2.03	2.00	22.00	22.00	30.01	30.00	18.00	18.00
RP4036-50°	2.02	2.00	22.00	22.00	28.50	29.00	17.00	17.00
RP4036-70°	2.16	2.20	22.00	22.00	27.03	27.00	16.00	16.00
Al-30°	1.34	1.40	10.00	10.00	37.31	39.00	29.85	30.00
Al-50°	1.44	1.50	10.00	10.00	35.59	36.00	28.47	29.00
Al-70°	1.54	1.60	10.00	10.00	33.57	34.00	26.86	27.00
Zamak-30°	1.34	1.40	10.00	10.00	37.31	39.00	29.85	30.00
Zamak-50°	1.44	1.50	10.00	10.00	35.57	36.00	28.46	29.00
Zamak-70°	1.54	1.60	10.00	10.00	33.57	34.00	26.85	27.00

## Coleta de Amostras

Foram injetadas para cada configuração estudada 15 peças para estabilidade térmica do processo 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. Essas informações sobre a coleta de amostras encontram-se na Tabela 3. 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 realizado.

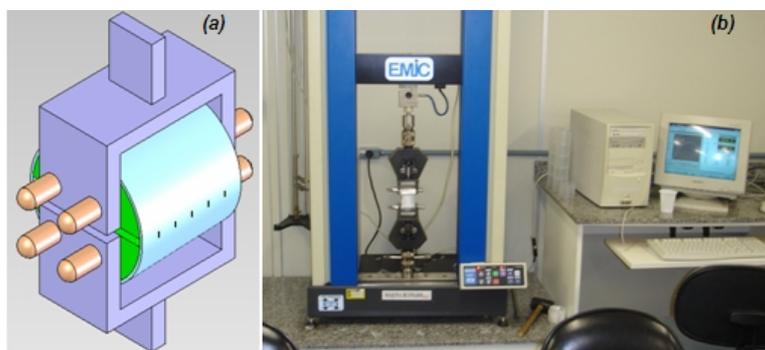
**Tabela 3:** Coleta de amostras

<b>Configuração</b>	<b>AISI P20</b>			<b>Resina</b>			<b>Alumínio</b>			<b>ZAMAK</b>		
	<b>30°</b>	<b>50°</b>	<b>70°</b>	<b>30°</b>	<b>50°</b>	<b>70°</b>	<b>30°</b>	<b>50°</b>	<b>70°</b>	<b>30°</b>	<b>50°</b>	<b>70°</b>
<b>Ensaio</b>												
Estabilidade térmica	15	15	15	15	-	15	15	15	15	15	15	15
Coleta de amostras	30	30	30	30	-	30	30	30	30	30	30	30
Ensaio de durabilidade	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-
Ensaio destrutivo	-	-	-	-	35	-	-	-	-	-	-	-
Total de cada configuração	45	45	45	45	23	45	45	45	45	45	45	45
<i>Total de cada cavidade macho</i>		13			32			13			13	
		5			5			5			5	

### 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 (Figura 3-b), 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 desenvolvido para essa análise é apresentado na Figura 3-a.



**Figura 3:** Ensaio de resistência à ruptura.

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 (Figura 4-b), 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 4-c). Na Figura 4-a é demonstrado o gabarito usado para posicionar a amostra, assim como o equipamento utilizado para o ensaio. Os dados obtidos nesse ensaio foram as energias absorvidas [%] e a resiliência [J/m].

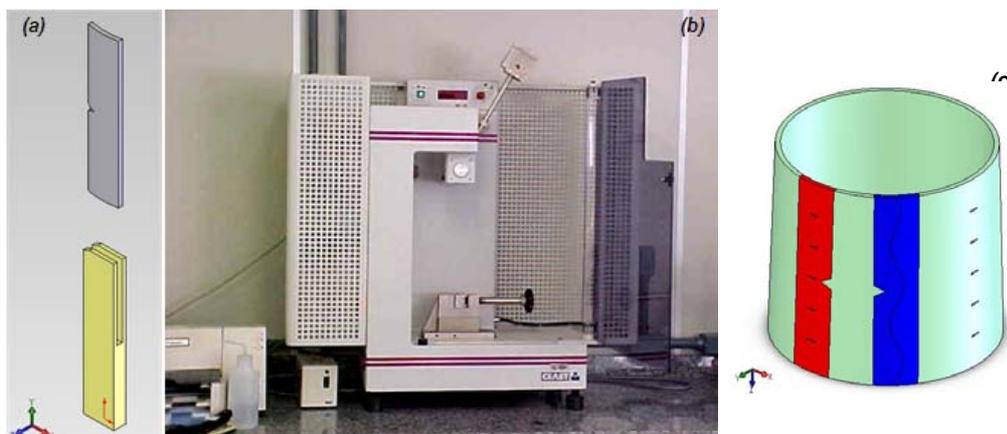


Figura 4: Ensaio de impacto

Ensaio dimensionais e aspectos visuais: O ensaio dimensional foi realizado com paquímetro digital marca *Mitutoyo* com resolução centesimal. Os aspectos visuais avaliados foram: rebarbas, marcas de linha de junção e solda, e rechupes. Foram avaliadas as seguintes dimensões do produto: diâmetro de 60mm, diâmetro de 63mm, altura da peça e espessura. Além disso, 5 peças distintas de cada configuração foram avaliadas e cada dimensão foi medida em 3 pontos diferentes, conforme ilustra a Figura 5. As medições de rugosidade foram realizadas com um rugosímetro da marca *Taylor-Hobson*, modelo *Surtronic 3+*.

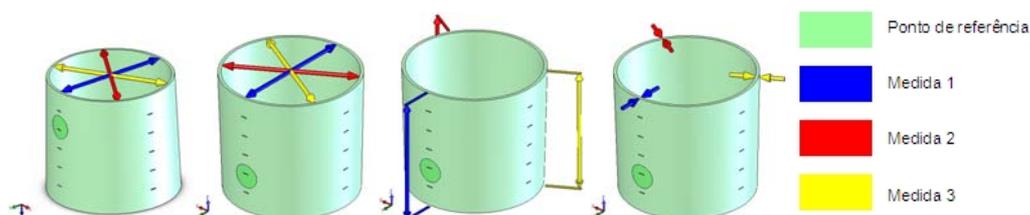
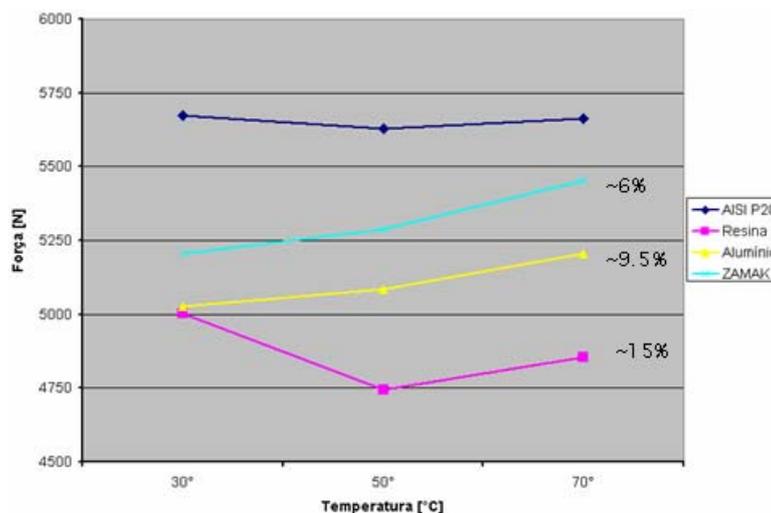


Figura 5: Pontos de medição da análise dimensional

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. As observações foram feitas com o microscópio de luz polarizada em seções finas com cerca de  $15\mu\text{m}$  de espessura. As secções 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  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  em uma atmosfera de nitrogênio e, com fluxo de  $50\text{ml}/\text{min}$ .

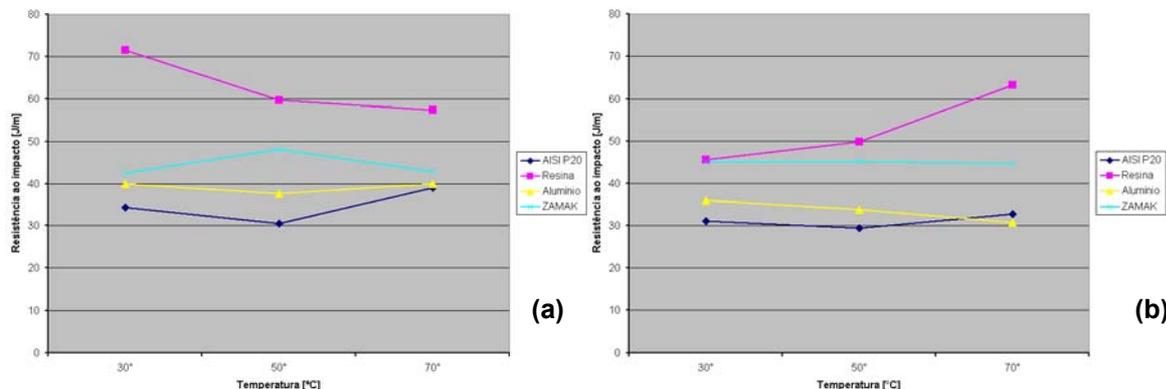
## RESULTADOS

Nessa sessão do artigo serão 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 6.



**Figura 6:** Resultados do ensaio de resistência à ruptura

Os resultados apresentados na Figura 6 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 um 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, e em ambas as situações: sobre a linha de solda e sobre a frente de fluxo. Esses resultados são apresentados na Figura 7-a e 7-b.



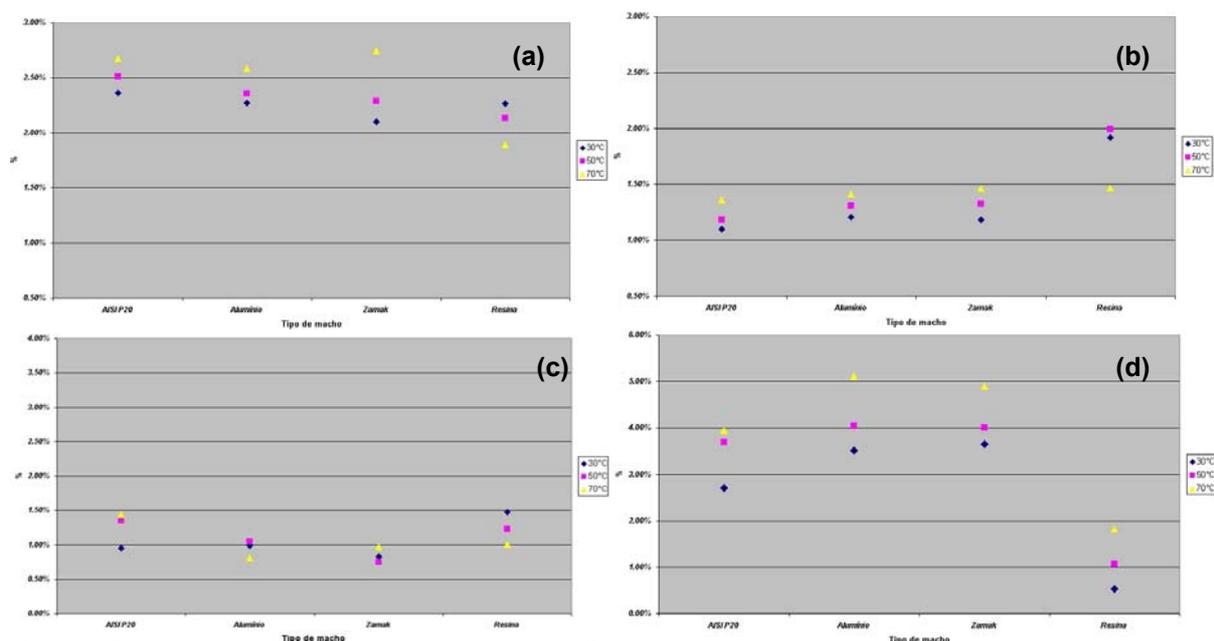
**Figura 7:** Resultados do ensaio de resistência ao impacto (a) sobre a frente de fluxo (b) sobre a linha de solda

A Tabela 4 apresenta a redução na resistência ao impacto, em relação às amostras injetadas sobre as configurações de aço AISI-P20 e as diferenças encontradas sobre as amostras injetadas sobre a linha de solda e sobre a frente de fluxo na peça injetada.

**Tabela 4:** Redução na resistência ao impacto em comparação as amostras injetadas sobre o inserto de AISI-P20

Amostra	Sobre a frente de fluxo	Sobre a linha de solda
Resina	50.7%	59.4%
Alumínio	9.1%	20.4%
Zamak	11.3%	14.3%

Quanto ao dimensionamento das amostras injetadas, os resultados encontrados serão apresentados em forma de percentual de contração. A Figura 8 ilustra, para as 4 medidas avaliadas, o grau de contração encontrado.



**Figura 8:** Análises dimensionais (a) diâmetro de 60mm (b) diâmetro de 63mm (c) altura da peça (d) espessura

O grau de contração para esse polímero utilizado fica na faixa de 1 a 2,5%. Na maioria das configurações analisadas o dimensional encontrado ficou dentro dessa faixa de contração. Nas amostras injetadas sobre o inserto macho de Resina o percentual de contração encontrado foi baixo. Isso ocorreu devido aos parâmetros de injeção utilizados para essas configurações terem sido alterados, conforme descrito anteriormente.

Foi realizada também uma análise quanto aos aspectos visuais da peça injetada. Esses resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Aspectos visuais das amostras

<i>Macho</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Rugosidade (Ry)</i>	<i>Rebarba</i>	<i>Linha de solda</i>	<i>Preenchimento</i>
AISI P20 Ry=5.00 µm	30°C	9.00 µm	Sim	Não	Ok
	50°C	7.33 µm	Sim	Não	Ok
	70°C	6.67 µm	Não	Não	Ok
Resina Ry=12.33 µm	30°C	16.00 µm	Sim	Sim	Ok
	50°C	12.67 µm	Sim	Sim	Ok
	70°C	14.33 µm	Não	Não	Ok
Alumínio Ry=4.67 µm	30°C	6.00 µm	Não	Sim	Rechupe
	50°C	6.00 µm	Não	Não	Ok
	70°C	4.67 µm	Não	Não	Rechupe
Zamak5 Ry=7.00 µm	30°C	6.00 µm	Não	Sim	Ok
	50°C	5.67 µm	Não	Não	Rechupe
	70°C	4.67 µm	Não	Não	Incompleto

Em algumas configurações ocorreram rebarbas nas peças, isso se deu devido as 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.

Quanto as rugosidades medidas, como era esperado, as peças injetadas sobre os insertos metálicos apresentaram uma melhor rugosidade. As peças injetadas sobre o inserto de resina apresentaram rugosidade inferior. Isso se deu também ao fato de o ciclo de injeção ter sido prolongado para as peças dessas configurações.

A morfologia observada através das micrografias obtidas mostra à influência do diferentes materiais aplicados no conjunto moldante na estrutura da peça, onde se observou um comportamento similar quanto às peças injetadas sobre materiais com propriedades térmicas semelhantes. Esse é o caso das peças injetadas sobre os insertos machos de material metálico. 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. Como o ciclo de refrigeração para essas configurações foi mais lento, isso fez com que uma estrutura com esferulitos de tamanho mais elevados fosse originado. Além disso, a distribuição da estrutura é claramente assimétrica.

O grau de cristalinidade foi determinado para cada uma das configurações estudadas através de análise de DSC, de onde o  $\Delta H_f$  para cada configuração foi determinado. O grau de cristalinidade foi calculado através da Equação 1. Para o valor do calor de fusão do polipropileno ( $\Delta H_f^\circ$  -100% cristalino) adotou-se 209 J/g.

$$X = \left( \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^\circ} \right) \times 100 \quad eq.(1)$$

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. Na configuração de Resina 30°C, 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 inserto macho de Resina é menor que o grau das outras configurações, pois além do maior tempo de ciclo de injeção devido ao maior tempo de resfriamento.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através dos dados apresentados nos itens anteriores, sobre os ensaios de resistência mecânica, pode-se observar que as amostras injetadas sobre o inserto 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 dessa 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, isto é, moléculas que cruzam entre os esferulitos criando uma interface. 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 grau de 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. Nessas amostras (Zamak e Alumínio), pode-se observar um tamanho de esferulito superior ao apresentado nas amostras injetadas sobre o aço AISI P20 e inferior ao apresentado nas amostras injetadas sobre o macho de Resina. Quanto à cristalinidade, os valores apresentados foram, na maioria das configurações de Alumínio e Zamak, ficaram intermediários aos valores das amostras injetadas sobre o macho de aço AISI P20 e Resina. Esses dois aspectos aliados garantiram que as amostras injetadas sobre esses dois machos (Zamak e Alumínio) apresentassem um comportamento mecânico intermediário, se comparados com as amostras injetadas sobre os insertos machos de aço AISI P20 e 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.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem as seguintes empresas: Aralsul – Huntsman, Braskem, Polimold, Unitec.

## REFERÊNCIAS

- 1 ROSATO, D.; ROSATO, V.; DOMINICK V. Injection Molding Handbook. New York: Chapman & Hall, 1995.
- 2 CHUA, C. K.; HONG, K. H.; HO, S. L. Rapid Tooling Technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15, pp. 604-608, 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 International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005.
- 5 MARTINHO, P., BÁRTOLO, P. J., QUEIRÓS, M. P., PONTES, A. J., e POUZADA, A. S., "Hybrid Moulds: the Use of Combined Techniques for the Rapid Manufacturing of Injection Moulds," in VR@P2005 - 2nd Int. Conf. Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping Leiria, 2005.
- 6 ROSOCHOWSKI, A. e MATUSZAK, A., "Rapid Tooling: the state of the art," Journal of Materials Processing Technology, vol. 106, pp. 191-198, 2000.
- 7 ZEILMANN, R. P., SANTIN, R., COSTA, C. A., e POUZADA, A. S., "Tool wear in the high speed machining of injection moulds," in Rapid Product Development RPD2006 Marinha Grande, 2006.
- 8 ROSATO, D. e ROSATO, D. V., Injection Molding Handbook. New York: Chapman & Hall, 1995.
- 9 MORATELLI, M. e COSTA, C. A., "Seleção de aços para cavidades/machos de moldes de injeção," in Máquinas e Metais, 428 ed. vol. XLII, 2006, pp. 144-161.
- 10 VOLPATO, N., AMORIN, J., e MANENTE, M., "The use of epoxy resins as inserts for injection mould," in COBEM2003 São Paulo, 2003.
- 11 BUSATO, F. A., "Parâmetros de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes fabricados por estereolitografia com resina SOMOS 7110®," 2004, 146 p, (Dissertação de mestrado) - UFSC, Florianópolis, 2004.