
A importância dos sistemas de refrigeração em moldes de injeção: análise de um processo de fabricação pelo ponto de vista termodinâmico

Giovani Francelino
Micaíl Trespach Pedro
Daniel Oliveira
Eduardo Roberto Soares Batista

Resumo: O referido artigo apresenta um estudo de caso aplicado em uma empresa do segmento de auto-peças, fabricante de componentes plásticos injetados a base de PP (polipropileno). Nessa empresa foi feito o estudo da importância da refrigeração de moldes de injeção, visando verificar com base no problema de pesquisa apresentado se existe influência significativa do comportamento dos parâmetros relativos ao resfriamento quanto a possíveis problemas da qualidade. Para o desenvolvimento do mesmo tomamos como referência bibliografia fundamentada, prospectada em base de dados relevantes, bem como catálogos técnicos e entrevistas com especialistas. Tal pesquisa nasceu através das demandas impostas pela disciplina de termodinâmica aplicada, ministrada no curso de bacharelado em Engenharia de Produção da CESUCA – FACULDADE INEDI. Para desenvolver a mesma nos valem de uma abordagem interdisciplinar, aplicando para isto conhecimentos relativos às disciplinas relacionadas à qualidade.

Palavras-chave: Resfriamento de moldes de injeção; Qualidade; Termodinâmica.

1 INTRODUÇÃO

Dentre a diversa gama de processos de fabricação conhecidos e utilizados atualmente, estes podem ser classificados em processos de fabricação intermitente e processos de fabricação contínuos. Dentro da classe dos intermitentes há os processos de conformação mecânica, os quais têm uma participação significativa no parque industrial, tanto em nível nacional quanto em nível mundial. Dos processos de conformação, um dos mais utilizados são os processos de injeção, em que um dos recursos mais críticos para o seu adequado uso é o ferramental envolvido, e dentro do conceito de ferramental, um dos seus principais componentes é o molde de injeção. Tal ferramenta representa,

além dos aspectos técnicos envolvidos, uma importância primordial para a economia do setor. De acordo com Ferreira (2002) apud Silva (2009), a produção mundial de moldes rende um faturamento bruto na ordem de 20 bilhões de dólares. Os Estados Unidos encontram-se entre os maiores fornecedores, com um faturamento de mais de US\$ 5 bilhões, cujas exportações obtiveram um crescimento de 192% entre 1992 e 2000 (SILVA, 2009). No Brasil esta importância econômica também é expressiva, porém é constatada uma baixa competitividade no setor devido a baixa capacidade da indústria nacional de acompanhar os desenvolvimentos ocorridos no setor internacional. Também é verificado no Brasil a incapacidade de desenvolver alguns tipos de projetos e o prolongado tempo na execução da ferramenta, com consequente demora na entrega da mesma, conforme afirma Silva (2009).

O molde de injeção se mal desenvolvido interfere diretamente na qualidade dos produtos fabricados. Dentro da série de produtos que podem ser gerados por este tipo de ferramenta encontram-se os poliméricos. A diversidade de materiais poliméricos, de acordo com as suas características e propriedades, pode interferir no desenvolvimento do molde. Além disso, os parâmetros de processo também contribuem fortemente dentro deste contexto. Outro fator relevante é como o sistema de resfriamento, bem como os parâmetros associados, podem contribuir para o desempenho adequado deste tipo de processo de fabricação pelo ponto de vista da termodinâmica.

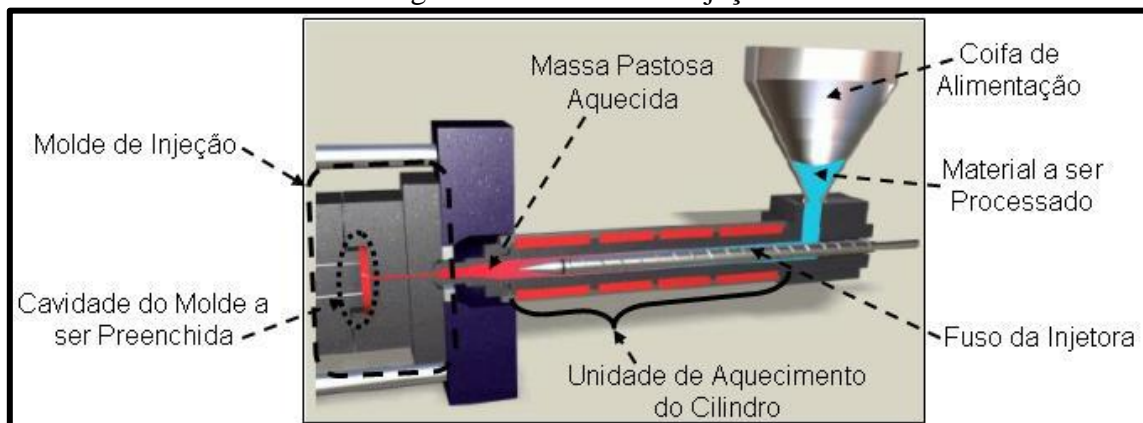
Com base nestes aspectos apresentados, a pesquisa terá como objetivo geral fazer o estudo dos parâmetros de processo de injeção relacionados ao resfriamento do molde, visando identificar, através de um estudo de caso, de como as condições de resfriamento aplicadas a um molde de injeção podem interferir na qualidade e nos custos associados ao processo. Para tanto o nosso objetivo específico é verificar tal comportamento de resfriamento de molde em uma injetora para componentes automotivos confeccionados em PP (polipropileno) de uma empresa fabricante de auto-peças, classificada como fornecedora de primeiro nível de uma das maiores montadoras de automóveis do mundo, que tem uma de suas operações localizada no município de Gravataí – RS. O problema de pesquisa consiste em afirmar se as condições de resfriamento de moldes de injeção afetam diretamente a qualidade e os custos associados ao processo e, com base nos dados coletados, propor alternativas para a melhoria do processo de injeção no qual o estudo foi focado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Como operações de conformação entendemos aquelas que visam conferir à peça a forma ou as dimensões, ou o acabamento específico, ou ainda qualquer combinação destes três itens através da deformação plástica do material (FERRARESI, 1970). Os processos de conformação mecânica estão em sua maioria dentro da classe de processos de fabricação intermitente, incluindo a fabricação de componentes. Na produção de matérias-primas, porém, a conformação mecânica pode ganhar contornos de fabricação contínua, pois a saída de produtos dos processos é praticamente ininterrupta (CHIAVERINI, 1986). Quanto aos materiais utilizados, em geral esses processos são aplicados a materiais metálicos, de alta conformabilidade, mas a utilização de outros tipos de materiais, como os plásticos, é também possível (CHIAVERINI, 1986). No caso da pesquisa em questão o estudo foi desenvolvido sobre um processo de conformação por injeção de PP (polipropileno).

O processo de injeção consiste no aquecimento do material polimérico colocado em um recipiente em forma de funil ou similar. Após esta etapa, o material escoar para a câmara de aquecimento sob condições controladas de temperatura e tempo, variando de acordo com o tipo de polímero a ser processado. Quando os parâmetros citados são atingidos, o material polimérico é transportado através de um eixo helicoidal sob condição de velocidade controlada até o molde de injeção, onde penetra no mesmo a uma determinada pressão e adquire a forma do molde, produzindo o produto desejado. A figura abaixo apresenta a esquematização de uma injetora através das etapas do processo.

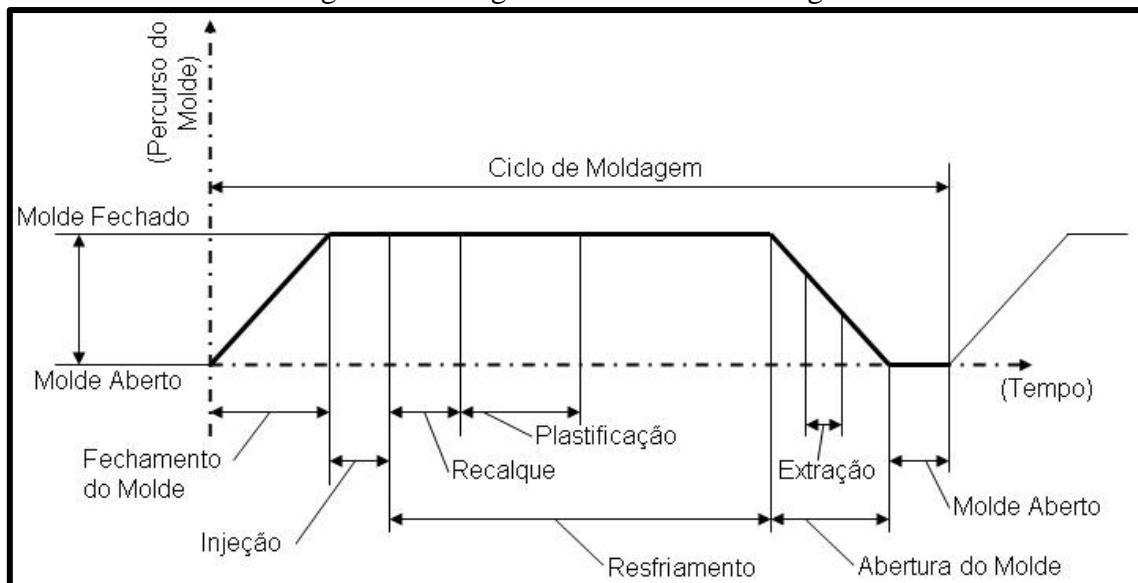
Figura. 1 - Unidade de injeção



Fonte (SILVA, 2009)

O processo de injeção é constituído por um conjunto de operações, sendo estas conhecidas através de um ciclo de moldagem, podendo ser identificadas na figura abaixo.

Figura. 2 - Diagrama do ciclo de moldagem

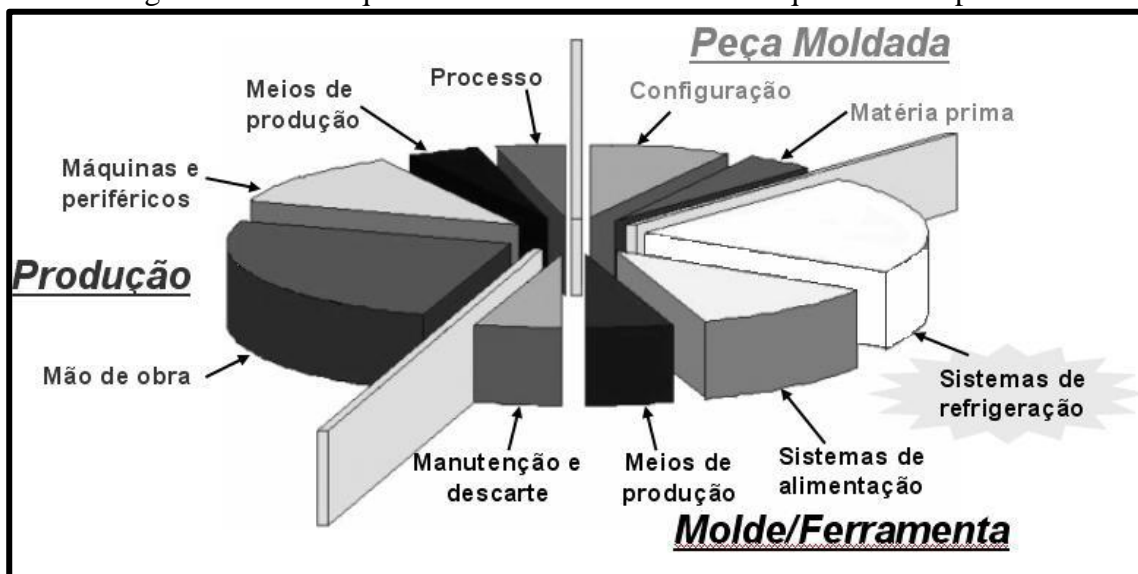


Fonte: (SILVA, 2009) (Adaptado de REES, 1995)

O molde de injeção bem feito, bem como os seus sistemas de funcionamento e parâmetros associados, são fundamentais para um pleno e adequado desempenho do processo. Como sistemas podem ser citados três: o sistema de alimentação, sistema de extração e o sistema de refrigeração. Dentre estes três o sistema de refrigeração representa um impacto significativo quando do projeto dos moldes. Os parâmetros associados ao mesmo possuem importância significativa para uma produtividade consistente, o que se não for levado em consideração ou se mal projetado poderá comprometer a qualidade do produto, bem como impactará nos custos. A importância do resfriamento do molde tem grande representatividade no processo e isso pode ser identificado através da sua participação no ciclo de moldagem representado na figura 2 acima.

Menges (1993), Rees (1995), Brito et al (2002) e Harada (2006) apud Silva (2009) reforçam o contexto, quando afirmam que o desempenho térmico do molde de injeção para termoplásticos, determinado através do sistema de refrigeração, tem influência direta nas propriedades e nos defeitos aparentes no produto e na produtividade dessas ferramentas (SILVA, 2009). A figura abaixo apresenta alguns fatores que influenciam de forma decisiva a qualidade dos produtos fabricados.

Figura 3 - Fatores que influenciam decisivamente a qualidade do produto moldado



Fonte: STEINKO (2004)

Já existem dados relevantes, através de outras pesquisas, que confirmam que boa parte das causas referentes aos problemas de qualidade com os produtos estão relacionados a configuração térmica heterogênea do molde, existindo relação com o desenvolvimento e projeto incorreto ou com a escolha do sistema de refrigeração inadequado. Isto pode ser validado por Steinko (2004) apud Silva (2009), que informa que no mínimo 60% dos problemas aparentes estão relacionados à causa citada. Outro aspecto observado por Stitz et al (2002) é que o posicionamento dos sistemas de refrigeração nos moldes se faz mais por uma questão de espaço que sobra na ferramenta do que para o local em que deve ser instalado adequadamente.

Outro dado a ser considerado, é o fato dos sistemas de refrigeração serem, na maioria das situações, projetados de forma intuitiva, por tentativa e erro, por similaridade de moldes existentes ou ainda baseados na própria experiência do projetista (SILVA, 2009).

De acordo com Rees (1995) apud Silva (2009), a fase de resfriamento de um produto injetado constitui-se aproximadamente 80% do tempo total de um ciclo. Sendo assim, pode-se afirmar que qualquer melhora nesse tempo refletirá diretamente na produtividade do processo (SILVA, 2009). Todo e qualquer tipo de perda que puder ser identificada durante o processo de injeção é fundamental para incrementar o aumento de produtividade e garantir continuamente a qualidade dos produtos fabricados, contribuindo para o aumento da competitividade da organização no mercado. Por isso o

referente estudo de caso foi desenvolvido visando identificar como a empresa em questão vem trabalhando neste processo. O trabalho pretende identificar possíveis perdas, valendo-se de técnicas da termodinâmica e, com base nisto, propor possíveis melhorias que podem ser implementadas pela organização de acordo com as suas necessidades.

3 METODOLOGIA

Para a realização do presente estudo foi aplicada uma metodologia baseada em referencial teórico consistente, onde utilizamos duas bases de dados para a nossa pesquisa, Scopus e BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações). Através do levantamento bibliográfico realizado aplicamos dois questionários nos quais as questões foram relativas ao processo de fabricação e ao molde em questão. Tais questionamentos foram realizados aos responsáveis pelo setor de manutenção (área de apoio da empresa). Também nos valem da aplicação de modelo matemático proposto por Li et al (2000) apud Salmoria et al (2008), que serviu de orientação quantitativa para a análise do balanceamento energético do sistema de resfriamento utilizado pela empresa, com foco no equipamento utilizado como objeto de estudo.

O questionário realizado junto ao representante da empresa em estudo levou em consideração as necessidades relacionadas ao modelo matemático, usado para se adquirir os resultados almejados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a execução das medições relativas ao sistema de resfriamento do molde em estudo foi levado em consideração a metodologia adotada por Li et al (2000) apud Salmoria et al (2008) em que estes descrevem o balanço de energia em um molde de injeção através da modelagem matemática apresentada abaixo.

Figura. 4 - Modelo matemático para balanceamento de energia em um molde de injeção

$$Q_{plast} = [(T_M - T_E) \cdot C_p + i_m] \cdot \rho_M \cdot \frac{S}{2} \cdot x \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1)$$

$$Q_w = t_k \cdot \left(\frac{1}{\alpha \cdot \rho_{mold} \cdot C_p \cdot S_e} + \frac{1}{h \cdot \pi \cdot D} \right)^{-1} \cdot (T_w - T_{fluido}) \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2)$$

$$Q_{plast} = Q_w \quad (3)$$

$$S_e = 2\pi / \text{Ln}(2x \cdot \text{Sinh}(2\pi y) / \pi D)$$

Fonte (SALMORIA et al, 2008)

Sendo Q_{plast} a quantidade de calor fornecido pelo termoplástico para o molde; Q_w o calor transferido do molde para o fluido de resfriamento através das paredes da cavidade; S_e o fator de forma (obtido por $S_e = 2\pi / \text{Ln}(2x \cdot \text{Sinh}(2\pi y) / \pi D)$); S a espessura da peça; x , a distância entre os canais de resfriamento; y a distância entre o canal de resfriamento e a peça; D o diâmetro do canal de resfriamento; t_k o tempo de resfriamento; α , a difusividade térmica do material do molde; ρ_{mold} a densidade do material do molde; C_p o calor específico do material do molde; T_M a temperatura do termoplástico injetado na cavidade; T_E a temperatura na qual a peça injetada é extraída do molde; T_{fluido} a temperatura do fluido de resfriamento; T_w a temperatura da parede da cavidade do molde; C_p o calor específico do termoplástico; IM a entalpia de fusão do termoplástico; ρ_M a densidade do termoplástico; e h o coeficiente de transferência de calor por convecção (para água $h = 0,0314/D \cdot \text{Re} \cdot 0,8$; sendo Re , o número do Reynolds). A difusividade térmica do material do molde é representada como sendo de acordo com o modelo matemático abaixo.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad [\text{m}^2 / \text{s}]$$

Sendo λ a condutividade térmica; C_p o calor específico; e ρ a densidade do material.

Durante a etapa de projeto de um molde para injeção de termoplásticos é desejável que se obtenham recomendações visando assegurar uma troca de calor eficiente, garantindo assim um resfriamento uniforme na peça (SALMORIA et al, 2008). Deste modo um resfriamento uniforme ocorre quando existe o equilíbrio térmico entre Q_{plast} e Q_w , ou seja, $Q_{\text{plast}} = Q_w$.

Através dos dados coletados via entrevista com a empresa e pesquisa em fontes associadas, onde estes foram postos no modelo matemático que foi apresentado, têm-se os seguintes valores:

$$Q_{\text{plast}} = 2.468,79 \text{ Jm}^{-1}$$

$$Q_w = 0,10 \text{ Jm}^{-1}$$

Para complementar o referido estudo foi feita a análise do artigo de Li et al (2000) apud Salmoria et al (2008), visando verificar o modelo matemático aplicado. Constatou-se que Salmoria et al (2008) fizeram uma adaptação do modelo de Li et al (2000) apud Salmoria et al (2008), sendo esta adaptação considerada mais simplificada para o estudo de caso em questão, por parte dos autores.

Os questionamentos aplicados à empresa foram aplicados conforme apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 1 - Questionamento quanto ao processo de fabricação

| Questionamento a empresa | Resposta | Observações |
|---|---|---|
| As temperaturas nas placas dos moldes estão variando entre 2 e 5° C? | Conforme imagem fornecida sobre a situação do processo de injeção do para-choque. | Constatado uma variação de mais de 19° C. Não atendendo ao recomendado. |
| O posicionamento dos canais de resfriamento do molde está balanceado? | São bem balanceados. Estão dispostos de forma simétrica a partir do centro. | Ver figura do molde. |
| Quais são os maiores problemas de qualidade constatados? | Dimensional (temperatura), manchas (umidade ou temperatura elevada), falhas e rechupes. | - |
| Qual é a temperatura de injeção? | Conforme orientação do fabricante de MP, podendo variar entre 190 e 230° C. | Consideramos para este caso a temperatura constatada no processo, com base na temperatura média observada na imagem do software de monitoramento. |
| Existe canal de refrigeração próximo ao bico de injeção? | Não. Os canais de refrigeração ficam próximos as cavidades com formato final da peça a ser produzida, chegando o plástico do bico de injeção até elas por sistemas de câmaras quentes ou canais de injeção. | Não atende ao recomendado. |
| Como estão as condições de acabamento superficial do molde? | Os moldes de injeção de termoplásticos tem suas superfícies lisas ou com texturas para acabamento sem pintura. Não podem estar espelhadas, pois causam brilho excessivo nas peças. Não pode estar oxidado, se não gera manchas ou prejudica saída de gases durante a injeção. | - |
| Qual é o meio refrigerante? | O molde tem seu resfriamento controlado por unidade de água gelada, que por sua vez utiliza o gás R22 para refrigerar a água. Atualmente esta sendo substituído. | - |
| Qual é a arquitetura do sistema de refrigeração do molde em estudo? | Arquitetura de furos em perfil retangular. | Atende ao recomendado. |

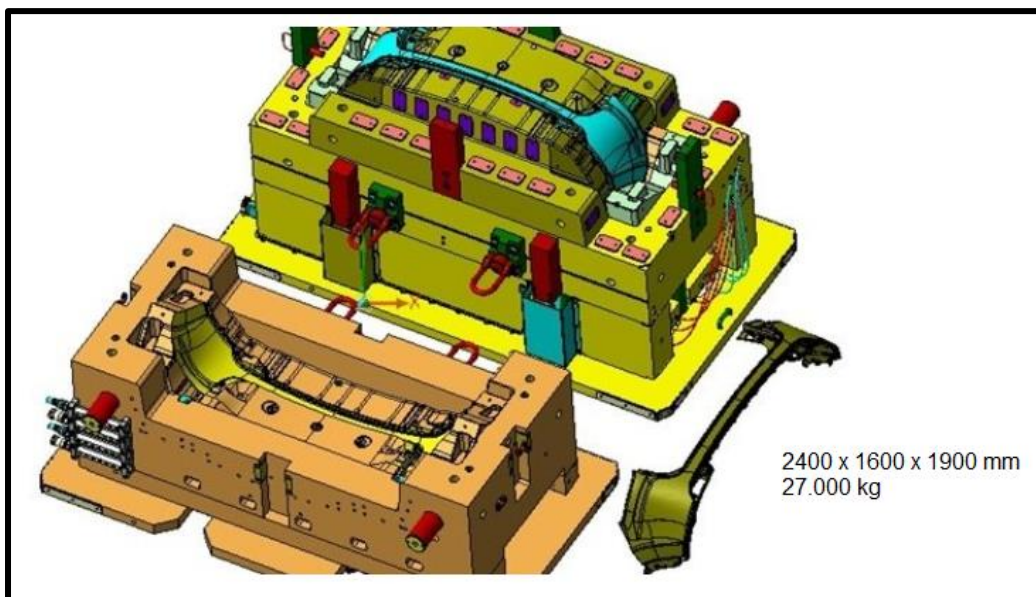
Fonte: Autores

Tabela 2 - Questionamentos aplicados para o modelo matemático

| Questionamento a empresa | Resposta | Observações |
|--|---|---|
| Espessura da peça em estudo | O para-choque dianteiro ou traseiro tem o peso entre 3,5 e 4 kg, com espessura que varia entre 2,2 e 3,5, conforme o desenho de absorção de impacto. | Consideramos 2,2 mm para aplicar no modelo matemático, visando observar o comportamento de resfriamento em condições mais críticas. |
| Distância entre os canais de resfriamento | Depende. Como o para-choque é grande, tem canais que ficam mais próximos e outros mais distantes. Tem capacetes (partes moveis para possibilitar fechamento) que possuem refrigeração também. Em média pode-se dizer entre 90 e 140 mm. | Consideramos 90 mm para aplicar no modelo matemático, visando observar o comportamento de resfriamento em condições mais críticas. |
| Diâmetro do canal de resfriamento | 12 mm | - |
| Tempo de resfriamento | 20 segundos | - |
| Material do molde | Aço P20 | - |
| Temperatura de injeção | 205° C média | - |
| Temperatura da peça na extração | 40 a 45° C | Consideramos 40° C para aplicar no modelo matemático, visando observar o comportamento de resfriamento em condições mais críticas. |
| Temperatura do fluido de resfriamento | 12 a 16° C | Consideramos 12° C para aplicar no modelo matemático, visando observar o comportamento de resfriamento em condições mais críticas. |
| Temperatura da parede da cavidade do molde | 30 a 45° C | Consideramos 40° C |

Fonte: Autores

Figura. 7 - Molde de injeção de para-choque



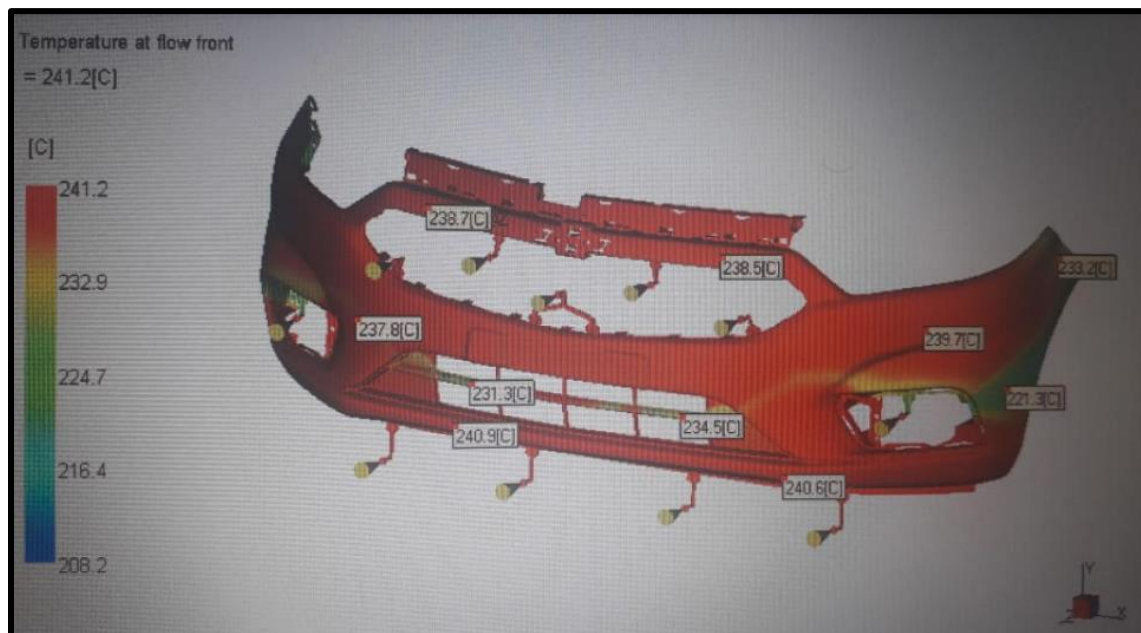
Fonte: Empresa em estudo

Com base nos dados apresentados podemos constatar que as condições de equilíbrio e/ou balanceamento energético durante o processo de resfriamento do molde em questão não são satisfatórias, contribuindo para a geração de produtos não-conformes, bem como um aumento no custo da não-qualidade. O ideal conforme definido pela aplicação do modelo matemático de Li et al (2000) apud Salmoria et al (2008) é que Q_{plast} seja igual a Q_w .

Com base nestes dados e análises realizadas sugerimos como potenciais melhorias a serem implementadas pela empresa em seu processo de injeção, com foco no sistema de resfriamento do molde em que foi feito o estudo:

- Implementar canais de resfriamento próximos aos bicos de injeção;
- Alterar o *lay-out* do molde de injeção, possibilitando a existência de bicos de injeção localizados nos pontos que apresentam regiões mais frias, de acordo com a figura de distribuição de temperaturas no processo de injeção, conforme mostrado abaixo, pois foi constatado uma variação de mais de 19° C, variação esta não recomendada para o processo.

Figura. 8 - Distribuição das temperaturas no processo de injeção



Fonte (Empresa em estudo)

- Aplicar estudo de DOE (Projeto de Experimentos) considerando como variável de saída o empenamento do para-choque, realizando experimentos de acordo com os ajustes definidos para a temperatura do fluido de resfriamento, visando otimizar o processo de injeção;

- Aplicar estudos de viabilidade econômica, com o uso de técnicas de engenharia econômica a fim de verificar se valem a pena os investimentos propostos em termos de melhoria. Sugere-se utilizar o VPL (Valor Presente Líquido) e o PB (*Pay back*).

5 CONCLUSÃO

O processo de injeção é uma das operações de conformação mais usadas, no qual o ferramental, no caso, o molde de injeção representa uma importância primordial para a economia do setor. Boa parte dos problemas de qualidade associados ao processo de injeção está relacionada à configuração térmica do molde, o que pode representar até 60% dos problemas referentes à causa citada. Isto pôde ser percebido durante o desenvolvimento do presente estudo através da utilização do modelo matemático desenvolvido por Li et al (2000) apud Salmoria et al (2008), do qual nos

valem como referência para verificar como o processo de injeção da empresa em estudo estava se comportando através da análise do sistema de refrigeração.

Pelo o que foi apresentado e pesquisado podemos constatar e consideramos que é de extrema importância o uso de técnicas relacionadas à termodinâmica, bem como uma modelagem matemática fundamentada para uma tomada de decisão consistente, a fim de aplicar estes conhecimentos para a otimização e racionalização de métodos e processos pelo ponto de vista da Engenharia de Produção.

Também esperamos que os resultados apresentados no presente estudo possam ser utilizados efetivamente pela empresa em que foi feita a referida pesquisa.

REFERÊNCIAS

BARROS, I. M. F. C. S. *Modelação do Comportamento Térmico de Moldes de Injeção*. 2004. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Guimarães. Portugal.

CHIAVERINI, Vicente. *Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento*. São Paulo: Mc Graw Hill, 1986. 2.ed.

FERRARESI, Dino. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

SALMORIA, G.V et al. In: Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 18, n. 3, 2008. *Influência do Desempenho Térmico de Moldes Fabricados com Compósito Epóxi/Alumínio nas Propriedades de PP Moldado por Injeção*.

SILVA, Sérgio Luis. *Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros*. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.