

DEFEITOS DE COMPONENTES DE PLÁSTICO MOLDADOS POR INJEÇÃO: ANÁLISE DE CAUSAS E SOLUÇÕES ATRAVÉS DE UM SISTEMA CAE

Wesley Novaes Mascarenhas, M. Eng.

Trilogy International do Brasil, Av. Henry Ford, 2000, COPEC, 42810-000, Camaçari, Bahia, eng_wesley@ibest.com.br

Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC, ahrens@cimject.ufsc.br

André Ogliari, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC, ogliari@emc.ufsc.br

Resumo. *O processo de moldagem por injeção é um dos principais utilizados para fabricar componentes de plástico devido a sua capacidade de proporcionar peças com geometria complexa, em grande quantidade e de modo preciso, praticamente sem requerer etapas posteriores de acabamento. Para alcançar estas vantagens, as condições de moldagem durante a realização do ciclo de injeção exercem um papel fundamental, uma vez que as condições inadequadas podem levar ao surgimento de defeitos causados por fenômenos que podem comprometer a estrutura do componente, suas tolerâncias dimensionais e até mesmo sua aparência. Este trabalho apresenta uma discussão sobre os defeitos mais usuais em componentes injetados, provenientes do processo de moldagem por injeção. Através da descrição de um estudo de caso, que analisa as causas e possíveis soluções, é mostrado como os sistemas CAE podem ser utilizados para prever e evitar o surgimento destes defeitos.*

Palavras-chave: *componentes de plástico, sistemas CAE, análise reológica, moldagem por injeção, defeitos de fabricação.*

1. INTRODUÇÃO

A indústria da moldagem por injeção tem estado em constante desenvolvimento desde meados do século 19, quando a primeira máquina injetora foi patenteada em 1872 pelo americano John Wesley Hyatt, composta basicamente por um cilindro aquecido a vapor, um pistão operado hidraulicamente e um bico que descarregava o material plástico fundido no molde. Uma prensa hidráulica vertical, posicionada próxima à máquina, mantinha o molde fechado durante a injeção^(1,2).

Desde sua criação, componentes em materiais plásticos moldados por este processo têm encontrado aplicações nas mais diversas áreas, especialmente nos setores automobilístico, eletroeletrônico, aeronáutico, de embalagens, médico e de peças de alta qualidade^(1,2).

A qualidade dos componentes injetados depende, em grande parte, das condições de moldagem, que se não forem apropriadas, podem promover o aparecimento de defeitos, como empenamento, linhas de solda, rechupe, etc. Durante o desenvolvimento do produto, mais especificamente na fase de projeto preliminar, o projetista pode prever a ocorrência de eventuais defeitos e pode

desenvolver ações a fim de minimizá-los ou eliminá-los completamente. Esta investigação é realizada através da análise reológica (também conhecida como análise de moldabilidade) do componente, utilizando as ferramentas computacionais conhecidas como sistema CAE.

A técnica de simulação do processo utilizando os sistemas CAE não deve substituir a experiência do projetista. O entendimento do comportamento do material plástico durante a sua injeção, assim como a influência das condições de moldagem envolvidas, são essenciais para obter um controle adequado da injeção e conseqüentemente obter produtos livres de empenamento e outras marcas superficiais que comprometem sua qualidade visual. Sem o completo entendimento prático do processo de moldagem por injeção, dificilmente pode-se estabelecer critérios consistentes para avaliar os resultados práticos ou aqueles fornecidos pelos sistemas CAE.

Para melhor compreender o tema abordado e alcançar o objetivo, este trabalho, inicialmente, apresenta uma discussão dos principais defeitos associados ao processo de moldagem por injeção, apresentando suas principais causas e possíveis soluções. Em seguida, aborda os principais aspectos relativos aos sistemas CAE para análise reológica. Um estudo de caso foi realizado para ilustrar como os sistemas CAE podem ser utilizados para prever e evitar o surgimento de defeitos que podem comprometer a qualidade dos componentes. Finalmente, é apresentada uma conclusão do trabalho.

2. DEFEITOS EM COMPONENTES MOLDADOS POR INJEÇÃO

O processo de moldagem por injeção de um componente de plástico é realizado através de uma máquina injetora e, basicamente, é dividido em três fases distintas, que são: (1) preenchimento da cavidade, (2) recalque e resfriamento do componente e, por fim, (3) abertura do molde e extração do componente. Estas fases compõem o que se chama de "ciclo de moldagem por injeção" ou simplesmente "ciclo de injeção".

Os tempos necessários para realizar cada fase do ciclo de injeção devem ser o suficiente para não causar perdas na produtividade, devido a ciclos muito longos, e evitar defeitos ou problemas que possam comprometer a qualidade dos componentes produzidos. Geralmente, estes tempos são determinados através de análises reológica e de refrigeração com o auxílio de sistemas CAE.

Os principais defeitos encontrados em componentes de plástico e associados ao processo de moldagem por injeção são, basicamente, aqueles de natureza dimensional, estrutural e estética. Dentre os principais defeitos, pode-se destacar: empenamento, linhas de solda, linhas de junta, rechupe, vazios, rebarbas, marcas de queimadura, preenchimento incompleto, peso excessivo e trincamento³.

- 1) *Empenamento*: é um dos defeitos mais preocupantes num componente de plástico. Em geral, o empenamento é causado por uma diferença na contração da peça, ou seja, se uma região apresenta um nível de contração diferente de outra, o componente empenará⁽³⁾. Vários fatores estão relacionados com o comportamento complexo e não uniforme da contração de peças moldadas por injeção. Dentre eles incluem-se: comportamento anisotrópico do material devido à orientação induzida pelo fluxo, contração térmica assimétrica devido a um resfriamento inadequado do componente, contração volumétrica não-uniforme e dilatação térmica diferenciada devido ao efeito da geometria do componente⁽⁴⁾.
- 2) *Linhas de solda*: as linhas de solda formam-se durante o preenchimento da cavidade quando a frente de fluxo se separa e se encontra posteriormente em outra região do componente. É um dos principais defeitos que ocorrem em componentes de plástico injetado. Basicamente, as linhas de solda aparecem por três motivos: (1) quando a frente de fluxo encontra obstáculos e é obrigada a dividir-se para contorná-lo; (2) quando a espessura do componente é variável e (3) quando é utilizado um molde com mais de um ponto de injeção. A Figura 1 ilustra duas situações de formação das linhas de solda. Em (a), o fluxo é separado por um obstáculo e então combinado novamente. Em (b), há dois pontos de injeção. Sabe-se que as regiões onde há

ocorrência de linhas de solda são as regiões mais sensíveis do componente, pois a resistência mecânica nestas é reduzida e com defeito superficial pronunciado. A razão pela qual as linhas de solda reduzem a resistência mecânica da região de formação, é que durante o preenchimento da cavidade a frente de fluxo arrasta consigo ar, material lubrificante e outras partículas para a região de formação das linhas de solda. Estas partículas e substâncias estranhas são introduzidas na junção fazendo com que o material plástico não se difunda completamente. Assim, na região de junção das frentes de fluxo, duas regiões distintas são formadas, como ilustra a Figura 2. Na parte detalhada da Figura 2, estão ilustradas as existências de duas regiões distintas: uma região com boa e outra de difusão ruim. O grau de difusão é máximo no centro do componente e decresce em direção à sua superfície. Rosato e Rosato⁽⁵⁾ recomendam que, por segurança, as tensões admissíveis de trabalho na região de linhas de solda sejam mantidas em pelo menos 15% da tensão admissível do material.

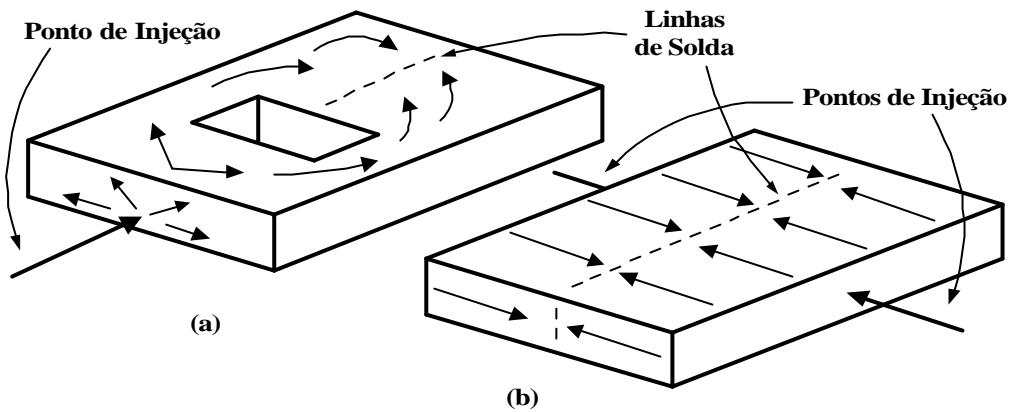


Figura 1: Formação das linhas de solda^{3,6}

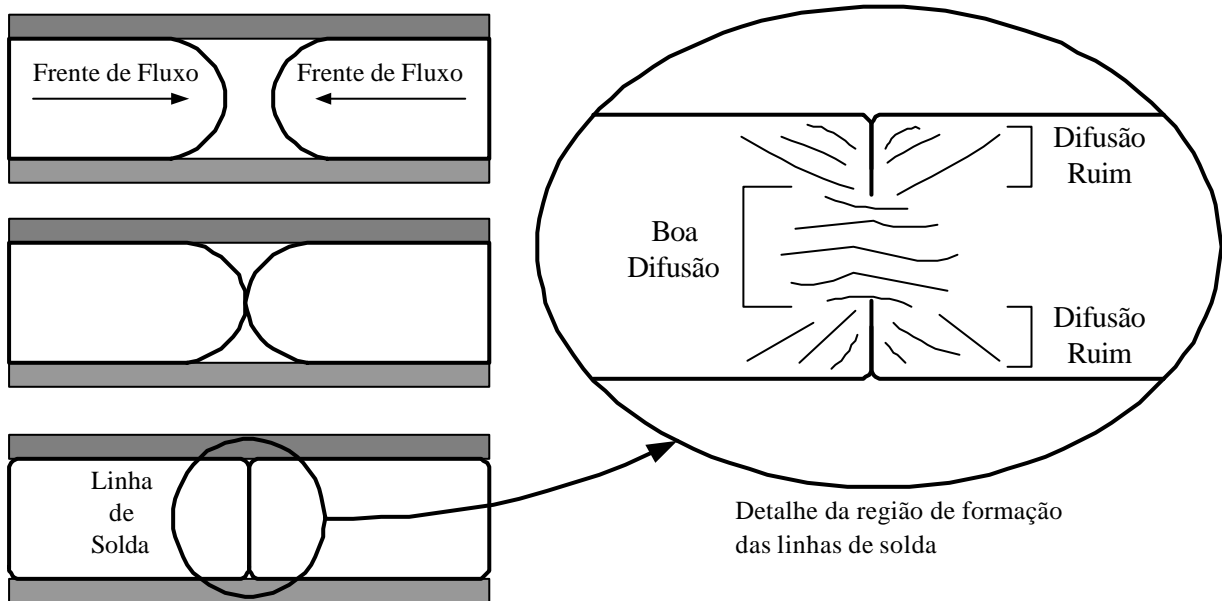


Figura 2: Detalhe da formação das linhas de solda e as duas regiões distintas de difusão⁴

- 3) *Linhas de junta*: são similares às linhas de solda. Diferem apenas na forma de encontro das frentes de fluxo. Nas linhas de junta os fluxos encontram-se paralelamente^(3,6), como ilustra a Figura 3.

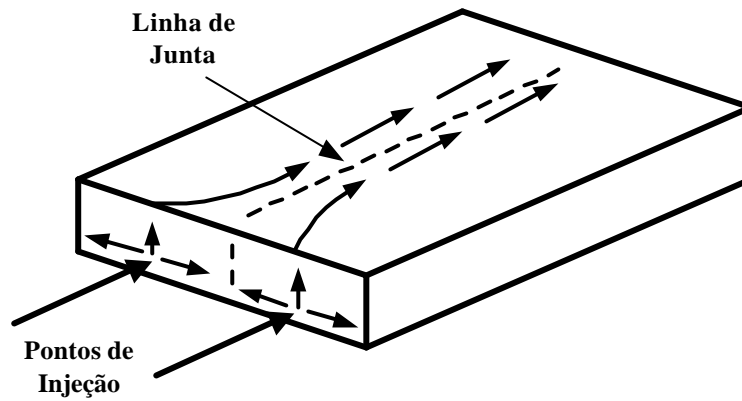


Figura 3: Linha de junta formada a partir de dois pontos de injeção^{3,6}

- 4) *Rechupe*: é o aprofundamento localizado da superfície do componente onde há variação considerável de espessura de parede, causado pela contração desigual do material durante o seu resfriamento. Geralmente, ocorre em regiões onde há nervuras⁽⁷⁾. A linha pontilhada na Figura 4 ilustra, de forma exagerada, uma superfície do componente que apresentou rechupe. Caso seja necessário inserir nervuras para reforçar o componente, estas devem ser projetadas conforme recomendações encontradas nas literaturas, a fim de minimizar a ocorrência do rechupe.

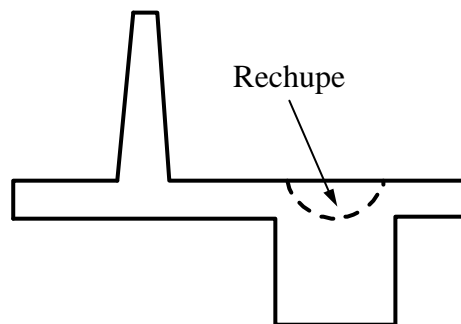


Figura 4: Defeito de rechupe por contração diferenciada³

- 5) *Vazios*: podem ser descritos como bolhas que se formam no interior do componente, em que sua superfície externa resfria-se, devido à transferência de calor do material plástico para o sistema de refrigeração do molde, e o material contrai-se na direção da espessura criando um vazio no seu centro^(8,5). A Figura 5 ilustra como ocorre a formação dos vazios.

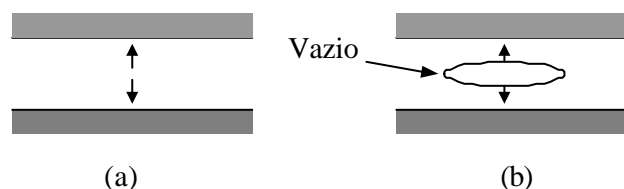


Figura 5: Ilustração da formação de vazios¹⁴

As setas ilustradas na Figura 5.a mostram a ocorrência de forças agindo no interior do componente, provenientes da contração do material. A Figura 5.b ilustra a formação do vazio durante o resfriamento do componente. Os vazios podem ocorrer devido à umidade contida no material e que não foi removida através do pré-secamento. Geralmente, aumenta-se a pressão e o tempo de recalque a fim de evitar os vazios⁽⁸⁾.

- 6) *Rebarbas*: é uma quantidade de material que penetra na linha de partição do molde e solidifica junto com o componente. Geralmente, a rebarba é causada por: desgaste do molde ou desalinhamento das placas, obstruções entre as placas, força de fechamento insuficiente, posição do ponto de injeção inadequada, regiões com pressões elevadas, excesso de material e presença de materiais estranhos. Para prevenir a rebarba, recomenda-se que as placas do molde estejam alinhadas; não haja obstruções no curso de abertura e fechamento do molde; a força de fechamento da máquina seja aumentada; o efeito de empacotamento seja evitado modificando a geometria do componente ou reduzindo a pressão de injeção ou recalque. O efeito de empacotamento ocorre quando o material plástico fundido penetra na cavidade e preenchem primeiro as regiões, cujos caminhos apresentam menor resistência. Estas regiões continuarão sendo compactadas até que as outras (de menor resistência) estejam preenchidas^(3,9). A rebarba compromete a qualidade visual do componente e, em alguns casos, aumenta o seu tempo de produção e custo, pois será necessário removê-la através de uma operação posterior à extração do componente.
- 7) *Marcas de queimadura*: são marcas de coloração preta que se formam sobre a superfície do componente causado pela combustão do ar aquecido durante a formação das bolsas de ar. As bolsas de ar surgem no encontro de mais do que duas frentes de fluxo ou em cantos da cavidade, quando o ar não consegue escapar pelo sistema de ventilação do molde ou pela linha de partição (Figura 6).

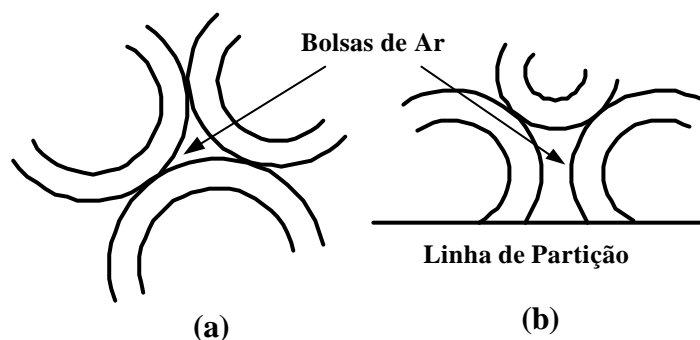


Figura 6: Formação de bolsas de ar⁹

Na Figura 6, os círculos representam as frentes de fluxo formando as bolsas de ar. A situação (a) é a mais crítica, pois o ar fica aprisionado no interior da cavidade. A situação (b) é a mais favorável, uma vez que o ar pode escoar através da linha de partição do molde. Na situação mais crítica, em (a), o ar aprisionado pode entrar em combustão e gerar manchas de queimadura na superfície do componente, pois o ar é aquecido em decorrência da sua compressão. Este defeito também compromete a qualidade visual do componente.

- 8) *Preenchimento incompleto*: constitui-se na produção de componentes incompletos. As possíveis causas de preenchimento incompleto são: restrições devido à solidificação dos canais de injeção; comprimentos de fluxo muito longos ou complexos; efeito de hesitação e contra-pressão devido às bolsas de ar. Para evitar a produção de componentes incompletos, recomenda-se: balancear os caminhos de fluxo, para que as frentes deste cheguem em pontos equidistantes dos pontos de injeção ao mesmo tempo e com pressões iguais; garantir um gradiente de pressão mais uniforme possível; aumentar a temperatura do molde e/ou do material; aumentar a velocidade de injeção e aumentar o número de pontos de injeção para evitar o efeito de hesitação. Este efeito ocorre quando o material penetra na cavidade e encontra uma região pouco espessa. A pressão de injeção é insuficiente para preencher esta região e o material flui pelas regiões mais espessas. Enquanto a cavidade vai sendo preenchida o material plástico nas regiões menos espessas resfria-se. Quando as regiões mais espessas estiverem preenchidas a

pressão de injeção ficará, então disponível para preencher as regiões menos espessas. Mas, com o material já solidificado, esta região não poderá ser mais preenchida.

- 9) *Peso excessivo*: em alguns casos, é uma característica indesejável ao componente considerado um defeito. Pois a produção de componentes com peso excessivo aumenta o custo de produção devido ao custo de material que é utilizado desnecessariamente. Este defeito é causado pelo efeito de empacotamento e pela utilização de espessuras muito elevadas. Para evitar peso excessivo, recomenda-se utilizar fluxo o mais balanceado possível para evitar empacotamento.
- 10) *Trincamento*: é a falha do componente devido às condições de moldagem utilizadas, que produzem altas tensões residuais. O trincamento pode causar a falha prematura do componente ou comprometer a sua qualidade visual. Basicamente, o trincamento é causado por altas velocidades de injeção, refluxo de material durante a fase de recalque e tempos de recalque e de resfriamento muito longos. Para prevenir trincamento recomenda-se reduzir a velocidade de injeção, aumentar a espessura do componente e minimizar a contração volumétrica diferenciada, a fim de evitar empenamentos e altas tensões residuais.

Boa parte dos defeitos apresentados está diretamente relacionada aos parâmetros de injeção adotados. A análise reológica, através de sistema CAE, auxilia a identificação prematura dos defeitos, permitindo sua correção, e ajuda a determinar de maneira ótima as variáveis de processo que serão utilizadas para fabricar o componente. Defeitos provenientes da umidade contida no material, como vazios e bolsas de ar, são prevenidos realizando uma secagem do material antes da moldagem do componente.

3. SISTEMAS CAE PARA ANÁLISE DE MOLDABILIDADE

Os sistemas CAE empregados para análise de moldabilidade são ferramentas numérico-computacionais utilizadas para simular o processo de moldagem por injeção de um componente de plástico. Seu principal objetivo é otimizar o projeto do molde para viabilizar a obtenção de componentes isentos de defeitos. Segundo Peixoto⁽⁹⁾, a utilização de sistemas CAE, para a análise do processo de injeção, pode levar, em muitos casos, à redução de custos e, principalmente, do tempo de fabricação do molde, reduzindo o número de retrabalhos.

A fim de realizar suas atividades, relacionadas à mecânica dos fluidos, os sistemas CAE para análise de moldabilidade utilizam os métodos numéricos. Dentre os mais utilizados quatro deles se destacam: Método das Diferenças Finitas (MDF); Método dos Elementos Finitos (MEF); Método dos Volumes Finitos (MVF); e Método dos Elementos de Contorno (MEC). Segundo D'Ávila⁽¹⁰⁾, o método numérico mais adequado para resolver problemas relacionados à mecânica dos fluidos é o método dos volumes finitos (MVF). Através do qual são obtidas equações aproximadas baseado em balanços de conservação de massa, quantidade de movimento e da energia no volume elementar⁽¹¹⁾. Ultimamente, tem sido bastante utilizado em análises de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Geralmente, os sistemas CAE comerciais para realizar análises de moldabilidade utilizam o método dos elementos finitos (MEF) e o método das diferenças finitas (MDF)⁽¹²⁾. O MEF constitui-se na subdivisão (discretização) do componente em pequenas regiões chamadas de elementos, cujas conexões entre os elementos são modeladas através de nós. O processo de discretização é utilizado para representar o domínio estudado através de valores a serem determinados, denominados de Graus de Liberdade (DOF). Em outras palavras, o MEF constitui-se num método numérico-computacional utilizado para a solução aproximada de equações diferenciais a fim de determinar os valores dos parâmetros nodais (DOF), que posteriormente serão utilizados para calcular, analiticamente, as grandezas desejadas, como por exemplo, tensões e distribuição de temperatura e pressão. Em análises de moldabilidade o MEF é utilizado para calcular a distribuição de pressão na cavidade e nos canais do molde. Enquanto o MDF é utilizado para determinar a distribuição de temperatura⁽¹²⁾. Elementos finitos uni, bi e tridimensionais são utilizados nas análises reológicas.

Geralmente, os elementos unidimensionais são utilizados para representar o sistema de canais. Os bi e tridimensionais são mais utilizados para representar a cavidade, sendo os bidimensionais para cavidades pouco espessas e os tridimensionais para cavidades muito espessas. Na prática, recomenda-se utilizar os elementos tridimensionais em componentes cuja espessura seja superior a 4,0 mm.

A análise de moldabilidade utilizando sistemas CAE permite ao engenheiro projetista verificar a ocorrência de fluxo desbalanceado, falhas no preenchimento, pontos de temperatura muito elevada, altas taxas de cisalhamento, gradientes de pressão demasiadamente grandes, empenamentos, local de formação de linhas de solda, ocorrência de ar aprisionado, dentre outros resultados. Fornece, assim, subsídios para a avaliação do comportamento do fluxo do material fundido, defeitos potenciais (empenamentos, rechupes, trincas, etc.), determinação dos parâmetros de processo e decisão quanto a detalhes construtivos do molde.

Moldflow Plastic Insight [®] é o sistema CAE comercial mais conhecido e utilizado para realizar análises de moldabilidade. Os principais diagramas fornecidos pelo *Moldflow* [®] para avaliar o desempenho do processo de injeção e as condições de moldagem utilizadas são: pressão, temperatura, tempo de preenchimento, taxa de cisalhamento, tensão de cisalhamento, linhas de solda, bolsas de ar, temperatura instantânea, tempo de resfriamento, porcentagem de camada solidificada, força de fechamento e contração volumétrica.

4. ESTUDO DE CASO

Visando mostrar como os sistemas CAE podem ser utilizados para prever e evitar o surgimento de defeitos foi realizado um estudo de caso, considerando o componente, cuja geometria é ilustrada na Figura 7. Este componente foi modelado com o sistema CAD *I-Deas* [®].

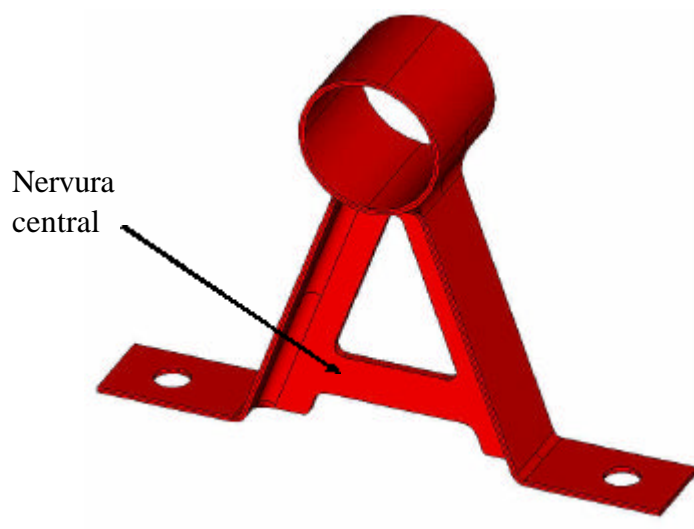


Figura 7: Modelo tridimensional do componente utilizado no estudo de caso

O componente ilustrado na Figura 7 constitui-se de um suporte de mancal que, originalmente era fabricado em material metálico. Neste estudo o objetivo é avaliar sua moldabilidade, considerando sua fabricação em material plástico. Neste caso, considera-se que as fases de projeto informacional e conceitual do componente já foram realizadas¹. As informações provenientes destas fases foram utilizadas para selecionar o material plástico mais adequado. O material selecionado foi o *Makrolon 2205* [®], fabricado pela Bayer AGTM e pertencente à família dos policarbonatos. O componente foi considerado que estaria submetido a um carregamento de 10 kg e seria fixado ao solo por meio de parafusos. Utilizando estas informações foi realizada uma análise de resistência mecânica do componente para determinar a espessura mínima de parede para suportar os carregamentos aplicados. Na análise reológica, a geometria e dimensões provenientes da análise estrutural foram

avaliadas para verificar se os parâmetros de processo especificados seriam adequados para garantir a qualidade do componente injetado.

A partir da análise de resistência mecânica, verificou-se que o componente deveria ter uma espessura mínima de 2,0 mm. Contrariando esta especificação, foi utilizada uma espessura de 3,0 mm na nervura central. Esta espessura diferenciada foi utilizada prevendo que os pontos de injeção seriam posicionados nesta região. Desta forma, o material plástico fundido escoaria melhor. Com esta geometria e dimensões foi realizada a análise reológica do componente utilizando o *Moldflow Plastic Insight*[®].

O processo foi iniciado pelo estudo da localização mais apropriada do ponto de injeção. O objetivo deste estudo inicial foi verificar a região mais propícia para posicionar o(s) ponto(s) de injeção. A Figura 8 ilustra o resultado obtido, em que os pontos de injeção foram posicionados na nervura central do componente. Dois pontos foram utilizados. Em seguida, foi realizada a análise de preenchimento da cavidade do molde, cujos resultados são mostrados na Tabela 1 e nas Figuras 9 e 10.

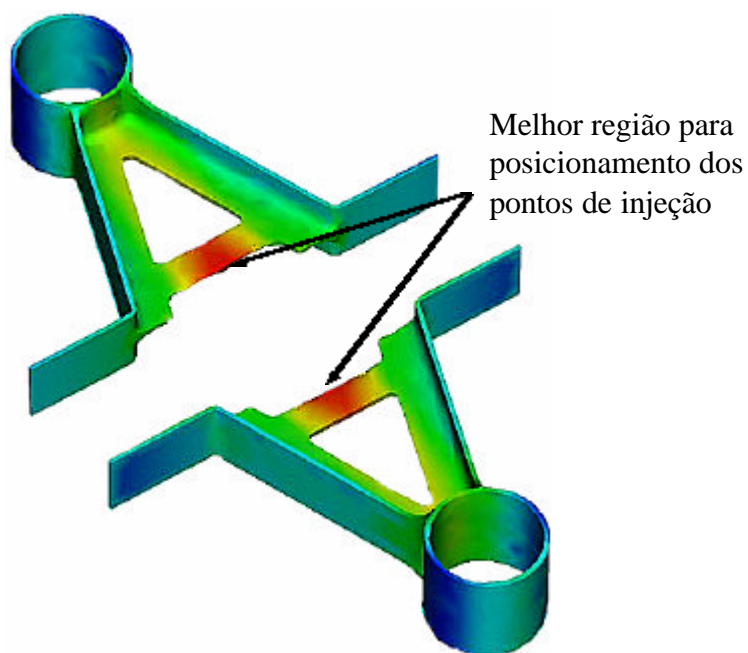


Figura 8: Indicação da melhor região de posicionamento dos pontos de injeção

A Tabela 1 apresenta os valores máximos e mínimos dos principais gráficos avaliados na análise de preenchimento, enquanto a Figura 9 ilustra o diagrama de temperatura indicando, também, a localização das linhas de solda (regiões circuladas), bem como os pontos de formação de bolsas de ar (regiões retangulares). A Figura 10 ilustra os resultados da distribuição das tensões de Von Mises no componente, provenientes da análise de resistência mecânica, a fim de comparar a posição das linhas de solda com as regiões mais solicitadas.

Como as linhas de solda são as regiões mais fracas do componente e o mesmo está submetido a um carregamento externo, então, a posição e a qualidade das linhas de solda formadas foram avaliadas. Duas recomendações foram seguidas. Primeiro, para que a linha de solda tenha boa difusão e os defeitos visuais sejam minimizados, a temperatura na região de formação não deve estar 20 °C abaixo da temperatura de injeção¹⁵. A Tabela 1 mostra que a diferença entre a temperatura máxima e mínima no componente é de apenas 1 °C. Logo, espera-se que as linhas de solda tenham boa difusão. A segunda recomendação é quanto às tensões provenientes do carregamento externo. Observando a Figura 10 pode-se verificar onde estão localizadas as áreas mais solicitadas no componente. Comparando as Figuras 9 e 10 pode-se perceber que as regiões propícias à formação das linhas de solda estão localizadas em áreas pouco solicitadas e que não oferecem riscos à integridade estrutural do componente. Assim, se o componente falhar não será nas

regiões de formação das linhas de solda. Mesmo não sendo o critério de resistência de projeto mais adequado para o projeto de componentes de plástico, segundo recomendações de Mascarenhas *et al*⁽¹³⁾, a distribuição das tensões de Von Mises foi ilustrada na Figura 10 apenas para mostrar onde se localizam as regiões mais solicitadas.

As bolsas de ar ocorrem apenas no final do preenchimento, onde o ar poderá sair mais facilmente pelo sistema de ventilação do molde ou pela linha de partição. Desta forma, não haverá a possibilidade de ar aprisionado no centro do componente nem a ocorrência de preenchimento incompleto e marcas de queimadura na superfície do componente.

Tabela 1: Valores máximos e mínimos dos principais diagramas da análise de preenchimento

Diagramas	Máximo	Mínimo
Camada solidificada (%)	15,80	1,36
Tempo de resfriamento (s)	24,00	9,34
Taxa de cisalhamento (1/s)	3170,0	90,5
Tensão de cisalhamento (MPa)	0,571	0,027
Pressão (MPa)	31,7	0,0
Temperatura (°C)	300	299
Tempo de preenchimento (s)	1,230	0,0008
Temperatura instantânea (°C)	304	297
Força de fechamento (ton)	21,5	0,0

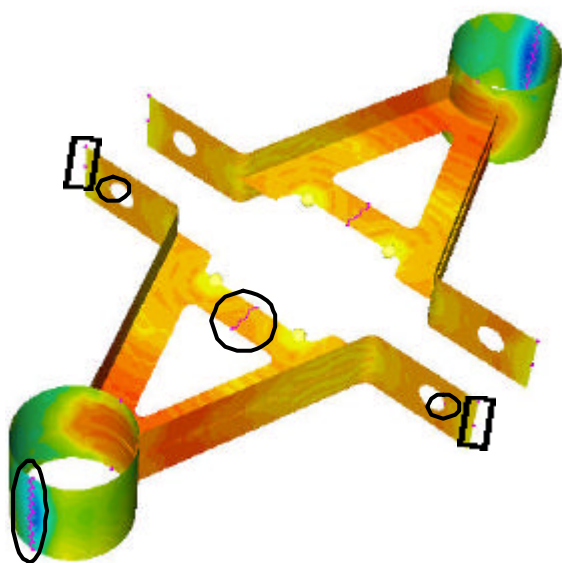


Figura 9: Distribuição de temperatura e posição de formação das linhas de solda

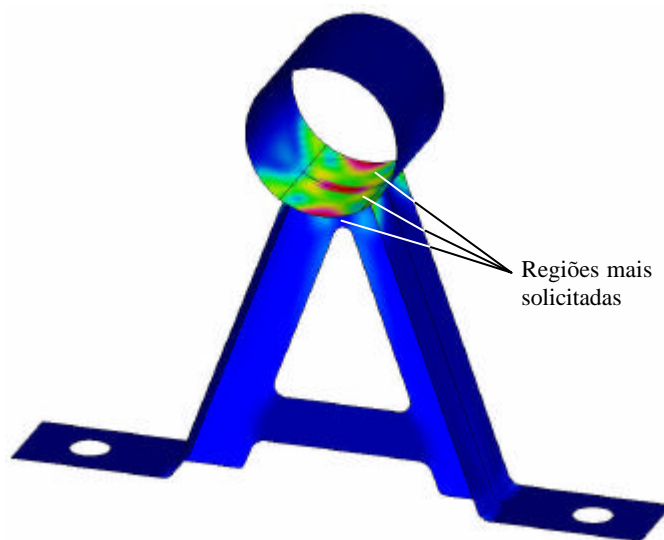


Figura 10: Tensões de Von Mises

A taxa de cisalhamento máxima ilustrada na Tabela 1 está abaixo daquela especificada pelo fabricante do material, que é de 40.000 s^{-1} . Apenas a tensão de cisalhamento ficou ligeiramente acima do especificado para o material, que é de 0,5 MPa. Aumentar a espessura do componente ou diminuir a velocidade de injeção são recomendações que podem ser seguidas, a fim de reduzir as tensões de cisalhamento no componente. Valores muito acima do recomendado podem provocar trincamento ou empenamento excessivo. Neste caso, o valor de 0,571 MPa foi considerado aceitável, já que a diferença não é muito grande e este valor ocorre apenas na região do ponto de injeção, onde há uma estrição no fluxo devido as suas dimensões reduzidas. Desta forma, não haveria necessidade de mudar a espessura do componente ou a velocidade de injeção e realizar novas análises estrutural e reológica, o que aumentaria o tempo de desenvolvimento do componente.

A força de fechamento máxima necessária para manter o molde fechado foi de aproximadamente 21,5 toneladas, sugerindo um valor de referência mínimo para a máquina injetora a ser utilizada. Se a força de fechamento for menor, haverá a possibilidade de aparecimento de rebarbas, comprometendo a qualidade superficial do componente.

As Figuras 11 e 12 ilustram, respectivamente, o tempo de preenchimento e a distribuição de pressão na cavidade. O tempo de preenchimento consiste no tempo necessário para a frente de fluxo alcançar um determinado ponto do componente e o tempo necessário para preencher totalmente a cavidade. Neste caso, este tempo foi de 1,23 segundos. Pode-se verificar que as frentes de fluxo e a distribuição de pressão estão bastante uniformes, ou seja, pontos do componente equidistantes dos pontos de injeção são preenchidos ao mesmo tempo com pressões iguais. Através destes dois diagramas não se verificaram os fenômenos de hesitação, empacotamento ou caminho preferencial. Desta forma, defeitos relacionados a estes fenômenos serão evitados.

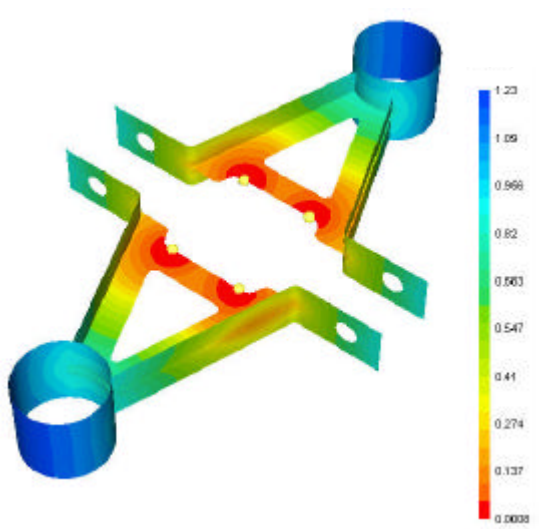


Figura 11: Tempo de preenchimento

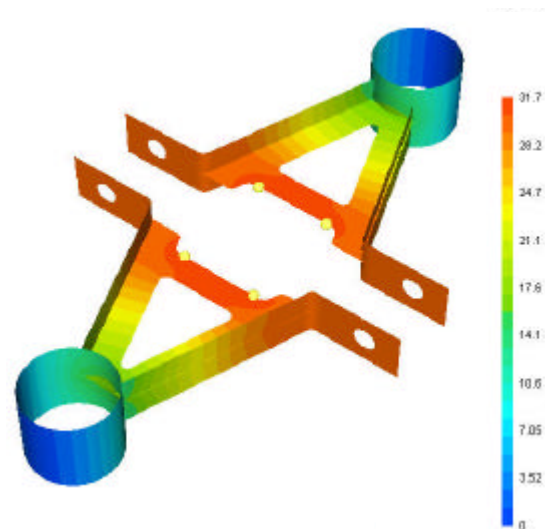


Figura 12: Distribuição de pressão

Quando o material plástico fundido é injetado dentro da cavidade e vai entrando em contato com as paredes do molde, uma fina camada se solidifica rapidamente, devido à troca térmica. Assim que a cavidade estiver totalmente preenchida, o material continua a resfriar-se e solidificar-se. Em decorrência deste resfriamento, o componente apresenta uma contração volumétrica. Para compensar esta contração e, conseqüentemente a perda de suas dimensões originais, mais material é introduzido na cavidade até que o canal de entrada esteja totalmente solidificado. Esta fase é conhecida como recalque e a análise em sistema CAE que a simula leva o mesmo nome. A análise de recalque do componente foi realizada após a de preenchimento e o principal diagrama avaliado foi o de contração volumétrica, como ilustra a Figura 13.

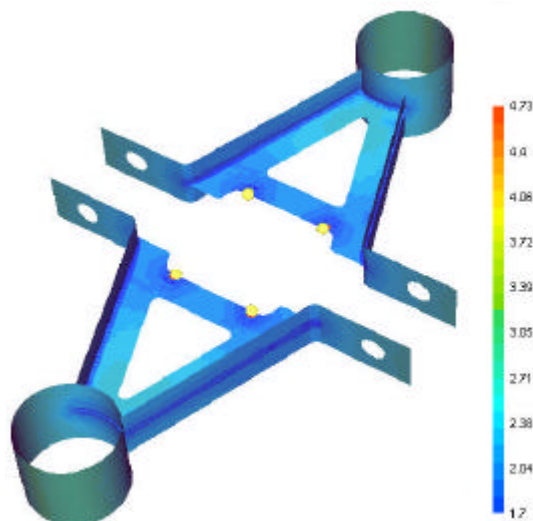


Figura 13: Contração volumétrica

Pode-se considerar que a distribuição da contração volumétrica no componente apresentou-se uniforme. Não há variação brusca de contração de uma região para outra. Assim, espera-se que defeitos como rechupe e empenamentos sejam mínimos e dentro do especificado pelas tolerâncias. Se fosse verificado rechupe devido à contração volumétrica alta outra análise de recalque deveria ser realizada aumentando a pressão de recalque. O valor máximo observado, 4,73%, ocorreu apenas nos pontos de injeção, não oferecendo risco à qualidade do componente.

Boa parte dos defeitos associados ao processo de injeção está relacionada com os parâmetros de injeção adotados. A análise reológica em sistemas CAE auxilia a identificação prematura destes defeitos permitindo a sua correção, muito antes que o molde seja fabricado e a produção seja iniciada. Isto potencializa a obtenção de componentes de qualidade. Defeitos provenientes da umidade contida no material não são diretamente verificados na análise reológica, pois a umidade não é um parâmetro de processo. Assim como a temperatura do molde e de injeção, a velocidade e a pressão de injeção. Recomenda-se que o material passe por uma secagem antes de ser processado. Talvez, este seja um problema cujos defeitos associados não podem ser diretamente observados na análise reológica. A Tabela 2 relaciona os principais defeitos associados ao processo de injeção com possíveis causas, quais diagramas da análise reológica podem ser avaliados para verificar a ocorrência ou não do defeito e as possíveis soluções para evitá-los. Esta tabela pode ser utilizada como uma orientação para a identificação dos problemas de injeção e como proceder para evitá-los. A Tabela 2 demonstra ainda que nem sempre a avaliação de apenas um diagrama da análise reológica é o suficiente para identificar dificuldades no processo e possíveis defeitos que comprometem a qualidade do componente, confirmando a afirmação de que o processo de injeção é bastante complexo.

Tabela 2: Defeitos de componentes injetados, possíveis causas e soluções.

Defeitos	Possíveis Causas	Diagramas a Consultar	Possíveis Soluções
Empenamento	- Empacotamento - Contração volumétrica Diferenciada	- Tempo de preenchimento - Temperatura - Tensão de cisalhamento - Contração volumétrica	- Balancear os caminhos de fluxo - Mudar a posição dos pontos de injeção
- Linhas de solda - Linhas de junta	- Caminho preferencial	- Tempo de preenchimento - Temperatura - Pressão - Linhas de solda	- Balancear os caminhos de fluxo - Mudar a posição dos pontos de injeção - Aumentar a temperatura de injeção - Alterar a espessura do componente
Rechupe	- Contração volumétrica elevada	- Contração volumétrica	- Aumentar pressão ou tempo de recalque
Vazios	- Contração volumétrica elevada	- Contração volumétrica	- Aumentar pressão ou tempo de recalque

Tabela 2: Defeitos de componentes injetados, possíveis causas e soluções (continuação).

Rebarbas	- Empacotamento	- Tempo de preenchimento - Temperatura - Pressão - Força de fechamento	- Balancear os caminhos de fluxo - Ajustar o tempo de preenchimento - Aumentar a força de fechamento
Marcas de queimadura	- Bolsas de ar	- Bolsas de ar - Tempo de preenchimento	- Aumentar pressão ou tempo de recalque
Preenchimento incompleto	- Hesitação - Bolsas de ar	- Tempo de preenchimento - Temperatura - Pressão	- Balancear os caminhos de fluxo - Aumentar a velocidade de injeção - Aumentar a temperatura de injeção - Mudar a espessura do componente - Aumentar o número de pontos de injeção
Peso excessivo	- Empacotamento	- Tempo de preenchimento - Temperatura - Pressão - Força de fechamento	- Balancear os caminhos de fluxo - Mudar a posição dos pontos de injeção
Trincamento	- Tensão de cisalhamento elevada	- Tensão de cisalhamento - Contração volumétrica	- Mudar o material - Aumentar a espessura do componente

5. CONCLUSÕES

Ao processo de moldagem por injeção de um componente está associado uma série de variáveis, que precisam ser adequadamente determinadas, a fim de não comprometer a qualidade final do componente. Além da grande quantidade, há uma forte dependência entre estas variáveis, o que dificulta a determinação dos valores ótimos para o processo. Não se trata apenas de estabelecer um valor para uma determinada variável e sim um conjunto de valores que, quando analisados simultaneamente, contribuirão para a eficiência do processo e a obtenção de componentes de qualidade.

A aplicação dos sistemas CAE na simulação do processo de injeção aumenta, significativamente, as chances de ter um processo bem controlado, pois estas ferramentas fornecem informações que, quando avaliados adequadamente, permitem um melhor entendimento do problema facilitando a determinação dos parâmetros de processo, para obter a qualidade desejada dos componentes produzidos. Cabe ao projetista avaliar os recursos que estes sistemas oferecem e se a ordem de aproximação dos resultados é coerente com suas necessidades. A experiência do projetista é bastante útil durante esta avaliação e deve ser complementar à análise reológica usando sistemas CAE.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Capes pelo apoio financeiro e a Telma Biondi de Novaes pelo suporte.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MASCARENHAS, W. N. **Sistematização do processo de obtenção do leiaute dimensional de componentes de plástico moldados por injeção**. 2002. 218f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
2. BLASS, Arno. **Processamento de polímeros**. 2. ed. Editora da UFSC, 1998. 313p.
3. Catálogo da Moldflow. **Moldflow design principles**. Moldflow Pty Ltd., Victoria, Austrália.
4. MALLOY, Robert. **Plastic part design for injection molding: an introduction**. Carl Hanser Verlag, 1994. 460p.
5. ROSATO, Donald; ROSATO, Dominick. **Injection moulding handbook**. Von Nostradamus Reinhold, Inc., 1986. 899p.

6. WHELAN, A.; GOFF, J. P. **Developments in injection moulding – 3**. Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 1985. 324p.
7. DIHLMANN, C. **Simulação e análise de preenchimento de cavidades em moldes para injeção de termoplástico utilizando método manual e tecnologia CAE/CAD**. 1993. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
8. GE PLASTIC. **Design guide**. Disponível em: <www.geplastic.com>.
9. PEIXOTO, F. L. **Consideração quanto ao uso de técnicas para análise de fluxo em cavidades de moldes de injeção**. 1999. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
10. D'ÁVILA, A. M. **Processo de moldagem por injeção de polímeros semicristalinos – caracterização e simulação assistida por computador**. 1997. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
11. MALISKA, Clóvis R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., 1995. 424p.
12. KENNEDY, Peter. **Flow analysis of injection molds**. Carl Hanser Verlag, 1995. 237p.
13. MASCARENHAS, W. N. *et al.* **Design criteria and safety factors for plastic components design**. *Materials and Design*, v. 25, n. 3, p. 257-261, May 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 20 de julho de 2004.
14. CRACKNELL, P. S.; DYSON, R. W. **Handbook of thermoplastic injection mould design**. Chapman & Hall, 1993. 132p.
15. **Função de ajuda (Help) do Moldflow Plastic Insight[®]**.

INJECTION MOLDED PLASTIC COMPONENTS DEFECTS: CAUSES AND SOLUTION ANALYSIS THROUGH A CAE SYSTEM

Wesley Novaes Mascarenhas, M. Eng.

Trilogy International do Brasil, Av. Henry Ford, 2000, COPEC, 42810-000, Camaçari, Bahia, eng_wesley@ibest.com.br

Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC, ahrens@cimject.ufsc.br

André Ogliari, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC, ogliari@emc.ufsc.br

Abstract. *The injection molded process is one of the main used to manufacture plastic components due to its capacity of promoting parts with complex geometry, on a large quantity and accurately, practically without requesting later finishing work. To reach these advantages, the molding conditions during the injection cycle play a fundamental role, since inadequate conditions can lead to appearing of defects caused by phenomenous, which can endanger the component structure, its dimensional tolerances and even its appearance. This work presents a discussion about the more usual defects. Through a case study description, which analyses the causes and possible solutions, is showed how the CAE systems can be used to foresee and avoid the appearing of these defects.*

Keywords. *Plastic components, CAE systems, rheological analysis, injection molding, manufacturing defects.*