

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE CANAIS DE RESFRIAMENTO PARA
INJEÇÃO DE PLÁSTICO EM MOLDE DE ALUMÍNIO

por

Giovani Luis Busetti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2016

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE CANAIS DE RESFRIAMENTO PARA
INJEÇÃO DE PLÁSTICO EM MOLDE DE ALUMÍNIO

por

Giovani Luis Busetti

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Eng. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Eng. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof.^a Dra. Eng. Adriane Prisco Petry

Prof. Dr. Eng. Sérgio Luiz Frey

Prof.^a Dra. Eng. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 22, Junho de 2016.

*Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus pais,
José Dionísio Buseti e Antônia Trevisol Buseti,
e ao meu amigo, André Pieres.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Francis Henrique Ramos França pelos ensinamentos em Transferência de Calor, disciplina que abriu horizontes e despertou o gosto pela área térmica; pela orientação durante a Iniciação Científica no LRT, período no qual aumentei o interesse em simulação numérica aplicada e pesquisa acadêmica; e finalmente, por aceitar a orientação para este trabalho de conclusão, pela paciência, pelo tempo empregado e pelas cobranças, indispensáveis para alcançar os melhores resultados.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica, aos colegas e amigos formados durante os anos de curso, por fazerem parte desta etapa tão importante.

À equipe da Victum Projeto de Produto, ao departamento de P&D, pelos conhecimentos adquiridos, por proporcionarem a prática em projeto de engenharia, por me introduzirem ao mundo da transformação de polímeros e, ao engenheiro Adir Schoier, por autorizar o uso de um dos produtos da empresa para a execução deste trabalho.

Aos familiares que incentivaram os estudos em Porto Alegre e me acompanharam, mesmo à distância. Em especial, agradeço à minha madrinha, Maria de Lourdes Buseti, pelas conversas e conselhos, e ao meu padrinho, João Paulo Antonioli, e seus pais, Dejalme e Ivone, por todo o suporte prestado.

Ao meu amigo e companheiro, nos estudos e na vida, André Pieres, pela parceria ao longo de toda a caminhada para esta formação, e à sua noiva, Mariana Bauermann, pela convivência enriquecedora e pelos momentos agradáveis que tornaram os últimos anos menos complicados.

E por último, agradeço aos meus pais, a quem dedico este título. Eles me deram a vida, foram os primeiros educadores e aqueles que não mediram esforços e dedicação para que eu tivesse a melhor instrução possível. Obrigado pai, obrigado mãe, pelo amparo financeiro, pelo amor, pela sabedoria dos conselhos e por permitir esta conquista.

BUSETTI, G. L. **Simulação Computacional do Sistema de Canais de Resfriamento para Injeção de Plástico em Molde de Alumínio**. 2016. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

A moldagem por injeção é um dos métodos de transformação mais empregados na produção de peças plásticas. Muitos aspectos do processo são significativamente afetados pela questão do resfriamento do molde. A partir de um projeto, dentro da indústria, de alteração dos canais de resfriamento de um molde para melhoria do acabamento superficial das peças injetadas, fez-se um trabalho que valeu-se da simulação numérica da moldagem por injeção para avaliar o projeto de canais de resfriamento em um molde de liga de alumínio 7075-T6, que produz quatro peças plásticas idênticas. Foi conduzida uma pesquisa abrangente sobre a interferência da temperatura no processo de injeção, sobre o estado da técnica para o projeto de canais de resfriamento em moldes e sobre a modelagem matemática que fundamenta a simulação. Como método de análise, quatro diferentes geometrias foram simuladas no código comercial *SolidWorks Plastics* sob as mesmas condições de operação, das quais, uma era o estado original e três eram propostas de otimização. Buscou-se construir configurações que mantivessem a temperatura do molde constante ao longo do ciclo de injeção e alcançassem uma distribuição uniforme de temperatura nas peças, com um baixo tempo de resfriamento. Houve uma distribuição homogênea de temperatura no molde e nas peças plásticas, semelhante para as quatro configurações simuladas. Também, notou-se que a temperatura média do molde no ciclo ficava próxima da temperatura de entrada da água nos canais de resfriamento. Observou-se que há aumento no fluxo de calor para os canais quando a água percorre um caminho menor com maior vazão. O tempo de resfriamento ficou próximo de 21,7 segundos para todas as configurações, permitindo concluir que elas possuem a mesma capacidade de remoção do calor do polímero fundido por meio do molde e dos canais de resfriamento. Ainda, compararam-se imagens da posição das linhas de emenda para validação do código. Outrossim, este trabalho possibilitou utilizar e ratificar a simulação numérica como ferramenta de auxílio ao projeto de moldes para injeção de plástico.

PALAVRAS-CHAVE: moldagem por injeção, canais de resfriamento, simulação numérica.

BUSETTI, G. L. **Computational Simulation of the Cooling Channel System for Plastic Injection in Aluminum Mold**. 2016. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Molding injection is one of the processing methods most employed in plastic parts production. Many aspects of the process are significantly affected by the issue of mold cooling. From a project, within the industry, of alteration of the cooling channels of a mold for superficial finish improvement of injected parts, it was made a work that applied injection molding numerical simulation to evaluate the cooling channels design in a 7075-T6 aluminum alloy, which produce four identical plastic parts. An extensive research about interference of the temperature in the injection process, state of art for the cooling channels design in molds and mathematical modelling that bases the simulation, was conducted. As analysis method, four different geometries were simulated in the commercial code *SolidWorks Plastics* under the same operating conditions, of which, one was the original state and three were optimization propositions. It sought to build configurations that maintained the mold temperature constant along the injection cycle and reached a uniform temperature distribution in the parts, with a low cooling time. There was a homogeneous temperature distribution in the mold and in the plastic parts, similar for the four simulated configurations. Also, it was noted that the average cycle mold temperature remains near to the cooling channels inlet water temperature. It was observed that there is an increase on the heat flux to the channels when the water flows thru a shorter path with a higher flow rate. The cooling time was near to 21.7 seconds for all configurations, allowing to conclude that they have the same heat removal capacity of the melt polymer through the mold and cooling channels. Moreover, images of the weld line position were compared for the code validation. Furthermore, this work made it possible to use and ratify the numerical simulation as a assistance tool in the project of plastic injection molds.

KEYWORDS: injection molding, cooling channels, numerical simulation.

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-------------|--|----------------------|
| <i>ABS</i> | - Acrylonitrile Butadiene Styrene | |
| <i>CAD</i> | - Computer Aided Design | |
| c_p | - Calor específico | [J/kg K] |
| D_c | - Diâmetro do canal | [m] |
| h_a | - Coeficiente convectivo do ar externo | [W/m ² K] |
| h_c | - Coeficiente convectivo do fluido refrigerante | [W/m ² K] |
| k_c | - Condutividade térmica do fluido refrigerante | [W/m K] |
| k_m | - Condutividade térmica do molde | [W/m K] |
| <i>LMDT</i> | - Média logarítmica das diferenças de temperatura | |
| \dot{m} | - Vazão mássica | [kg/s] |
| n | - Direção normal à superfície | |
| Nu_D | - Número de Nusselt | [adim] |
| <i>PC</i> | - Policarbonato | |
| Pr | - Número de Prandtl | [adim] |
| q'' | - Fluxo de calor | [W/m ²] |
| Re_D | - Número de Reynolds | [adim] |
| <i>RHCM</i> | - <i>Rapid Heat Cycle Molding</i> | |
| T | - Temperatura do molde | [°C] |
| T_a | - Temperatura do ar externo | [°C] |
| T_b | - Temperatura de mistura do fluido refrigerante | [°C] |
| T_b^I | - Temperatura de mistura do fluido na entrada do canal | [°C] |
| T_b^O | - Temperatura de mistura do fluido na saída do canal | [°C] |
| ΔT | - Resultado da LMDT | [°C] |
| t | - Tempo | [s] |
| α_m | - Difusividade térmica do molde | [m ² /s] |
| Γ | - Fronteira de controle do molde | |
| Γ_c | - Fronteira da superfície do canal de resfriamento | |
| Γ_e | - Fronteira da superfície externa | |
| Γ_p | - Fronteira da superfície da cavidade do molde | |
| μ | - Viscosidade absoluta | [Pa s] |
| ρ | - Massa específica | [kg/m ³] |
| \dot{V} | - Vazão volumétrica | [m ³ /s] |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 - Configuração do circuito tipo “U” | 5 |
| Figura 4.2 - Configurações de circuito tipo “retangular” e “Z” simétrico..... | 5 |
| Figura 5.1 - Avaliação da independência de malha | 8 |
| Figura 6.1 - Vistas em corte da temperatura média do molde no ciclo..... | 11 |
| Figura 6.2 - Distribuição do fluxo de calor nos canais de resfriamento | 12 |
| Figura 6.3 - Distribuição de temperatura na peça moldada | 13 |
| Figura 6.4 - Visualização da posição da linha de emenda principal | 14 |

| ÍNDICE | Pág. |
|---|------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS..... | 2 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 2 |
| 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 2 |
| 4.1. Influência da Temperatura do Molde no Processo de Injeção..... | 3 |
| 4.2. Linhas de Emenda..... | 4 |
| 4.3. Estado da Técnica para Projeto de Canais de Resfriamento | 5 |
| 4.4. Modelagem Numérica da Injeção de Plástico | 7 |
| 5. MODELAGEM COMPUTACIONAL..... | 7 |
| 5.1. Discretização do Domínio | 7 |
| 5.2. Condições do Problema..... | 8 |
| 5.3. Geometrias de Canais de Resfriamento Avaliadas | 9 |
| 6. RESULTADOS E ANÁLISE | 10 |
| 6.1. Temperatura Média do Molde no Ciclo | 11 |
| 6.2. Fluxo de Calor Médio no Ciclo | 12 |
| 6.3. Temperatura da Peça e Tempo de Resfriamento | 13 |
| 6.4. Posição das Linhas de Emenda..... | 13 |
| 7. CONCLUSÕES..... | 14 |
| 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 15 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 15 |
| ANEXO A - Ficha Técnica do Material ABS/PC Bayblend® T65 XF | 16 |
| APÊNDICE A - Desenho Técnico do Produto em Estudo..... | 18 |

1. INTRODUÇÃO

Devido à alta produtividade, alta reprodutibilidade de detalhes, boa estabilidade e bom desempenho dos produtos, a tecnologia de moldagem por injeção se tornou um dos processos mais amplamente utilizados para a fabricação de peças plásticas [Guilong et al., 2010; Hassan et al., 2010a].

O processo de moldagem por injeção é um processo não contínuo, mas cíclico, dividido por etapas. Consiste fundamentalmente em aquecer a matéria-prima polimérica até um estado pastoso, que deve ser empurrada (injetada) sob pressão para dentro da cavidade de um molde e ali mantida até a completa solidificação, tendo ao final, adquirido a geometria da cavidade do molde. Essa transformação acontece em uma máquina injetora cuja função é realizar todas as operações, além de comportar o molde fechado [Harada e Ueki, 2012].

O ciclo de injeção se inicia no momento em que o molde vazio é fechado para receber o polímero fundido. Em seguida, a rosca da máquina injetora atua como um pistão empurrando o material, já preparado na quantidade correta, para dentro da(s) cavidade(s) do molde através do bico de injeção da máquina. Nesta etapa de preenchimento (*filling*), controla-se a posição e a velocidade de avanço da rosca, que, multiplicada pela área da seção, resulta na vazão do material. A pressão aumenta conforme o material adentra o molde até atingir a pressão de injeção, valor programado na máquina como limite correspondente a uma pressão superior àquela necessária para preencher todo o molde. Após a cavidade estar completa, inicia-se a etapa de recalque (*packing*), onde a rosca permanece avançada mantendo uma pressão igual ou menor que a pressão de injeção. A função desta etapa é compensar a contração proveniente do resfriamento e consequente solidificação do material dentro do molde para que não haja defeitos como rechupes, empenamento e vazios internos. Para tanto, mais material é injetado no molde. O tempo de aplicação da pressão de recalque é regulado pelo tempo de congelamento do polímero no ponto de injeção (*gates*) na entrada da(s) cavidade(s). Na fase seguinte, o material é dosado, ou seja, inicia-se a preparação do material na quantidade adequada para o próximo ciclo. O material granular sólido que se encontra no funil de alimentação é arrastado pela rotação da rosca plastificadora e fundido por efeito do atrito com as paredes e pela condução de calor das unidades de aquecimento ao longo do cilindro. Ao mesmo tempo, a rosca é transladada para trás formando um reservatório de material quente e fundido entre o bico de injeção e a ponta da rosca. A fase de resfriamento (*cooling*) acontece simultaneamente com a dosagem. Aqui se aguarda a solidificação da massa fundida até que o moldado adquira rigidez suficiente para suportar a força dos extratores mecânicos que retiram a peça do molde, sem comprometer sua forma. Por último, o molde é aberto, a peça extraída e o ciclo recomeça [Granada, 2012; Harada e Ueki, 2012].

Apesar de ser considerada uma etapa do ciclo de injeção, o resfriamento do polímero se inicia no momento em que este entra em contato com a superfície metálica do molde, ou seja, desde a etapa de injeção o polímero fundido já está perdendo calor para o molde. [Harada e Ueki, 2012]. Entretanto, considerando-se a etapa de resfriamento isoladamente, sabe-se que cerca de três quartos do tempo de ciclo da moldagem por injeção é gasto no resfriamento do polímero fundido até que a peça atinja a temperatura de extração recomendada pelo fabricante do polímero. Aspectos de eficiência de produção ligado ao tempo de ciclo, qualidade e aparência estética do produto final são significativamente afetados pelo processo de resfriamento do molde [Guilong et al., 2010; Hassan et al., 2010a].

Com a difusão cada vez maior do uso de ferramentas de simulação numérica no meio industrial, faz-se a conexão para aplicar os códigos comerciais no auxílio à resolução de problemas de engenharia, como o caso da otimização do resfriamento na moldagem por injeção. Este tipo de abordagem permite a verificação de diferentes conceitos de projeto, sua aceitação ou descarte, sem a necessidade de construção real, reduzindo significativamente os custos de desenvolvimento. Devido à extensão de análise deste tipo de *software*, a simulação numérica do processo de moldagem por injeção auxilia no projeto de todo o ciclo produtivo da peça, desde a disposição dos canais de injeção e canais de resfriamento até a obtenção e refino dos parâmetros de processo, como velocidades, pressões, tempos e temperaturas.

2. OBJETIVOS

Pretende-se avaliar o projeto dos canais de resfriamento associados aos moldes de alumínio empregados para a injeção de peças plásticas sob baixa escala de produção. A partir de um estudo de caso inspirado em uma situação real, busca-se explorar a influência da geometria e do posicionamento do circuito de canais de resfriamento sobre as peças moldadas com o auxílio de simulação computacional no código comercial *SolidWorks Plastics*. Através destes canais de resfriamento, objetiva-se manter a temperatura do molde constante durante o ciclo de injeção e resfriar as peças uniformemente com um baixo tempo de ciclo de resfriamento. Por fim, este trabalho pretende mostrar o valor da simulação computacional como ferramenta para o aprimoramento e diminuição do tempo de projeto de moldes, e previsão dos resultados de injeção com minimização de possíveis problemas antes da entrada em produção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Hassan et al., 2009, analisou o efeito da posição e da forma dos canais de resfriamento sobre a distribuição de temperaturas no molde e sobre o grau de solidificação do polímero ao longo de sucessivos ciclos de moldagem. Concluiu-se que a geometria de canais que resulta no menor tempo de resfriamento não necessariamente leva a uma distribuição uniforme de temperaturas no produto.

Seguindo a mesma linha, Hassan et al., 2010b, realizou simulação bidimensional transiente para avaliar a influência da posição de quatro canais de resfriamento sobre a taxa de contração e sobre a distribuição de temperaturas numa peça de formato “T”, utilizando a simetria. Neste trabalho, considerou o comportamento compressível do polímero e somente os estágios de resfriamento e ejeção.

Hassan et al., 2010a, conduziu uma análise numérica tridimensional transiente para estudar a influência do posicionamento e forma de seis canais de resfriamento na solidificação e na transferência de calor do polímero fundido. Observou-se que o percentual de solidificação do polímero durante a injeção diminui com o afastamento dos canais de resfriamento e com o aumento do número de ciclos, devido ao aquecimento do molde. Ainda, concluiu-se que a aproximação dos canais de resfriamento à peça diminui o tempo de solidificação, reduz a máxima diferença de temperatura na peça e por consequência, o empenamento, mas não resulta em uma distribuição homogênea de temperaturas.

Guilong et al., 2010, fez estudos sobre um processo diferente de injeção, o *RHCM* ou ciclo de moldagem com aquecimento rápido. Este método de produção consiste de um rápido aquecimento do molde antes da injeção e de um subsequente rápido resfriamento para solidificação do polímero. Foi empregado o código comercial *ANSYS* com dois modelos para o tratamento individual das fases de aquecimento e resfriamento. Considerou-se a influência de materiais diferentes para as camadas de suporte do molde, isolamento e cavidade; do uso de diferentes fluidos, como água e óleo, com variação de temperatura de entrada; e da posição e geometria dos canais de aquecimento/resfriamento sobre a eficiência do processo. No mesmo trabalho, realizou-se teste experimental para avaliação da eficiência do método *RHCM* sobre a qualidade das peças.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Influência da Temperatura do Molde no Processo de Injeção

Ao lado de fatores do material, projeto da peça e do molde, a temperatura do molde é um dos parâmetros mais críticos do processo, uma vez que outros parâmetros como pressão e velocidade de injeção são afetados por este. Muitos estudos mostraram que a qualidade do moldado pode ser aumentada pela elevação da temperatura do molde durante os estágios de preenchimento e recalque. Portanto, o controle deste parâmetro é importante para o processo de injeção e para a qualidade dos produtos [Guilong et al., 2010].

Durante o preenchimento, o polímero quente fundido toca a superfície fria do molde e uma camada sólida se forma na parede [Hassan et al., 2009]. As superfícies do polímero fundido em contato direto com as paredes do molde esfriam mais rapidamente que a parte que não toca diretamente o metal (camada interior). Portanto, as camadas internas tem uma densidade maior e, conseqüentemente, uma contração maior que a camada exterior quando a peça resfria. Desse modo, criam-se tensões internas devido ao diferencial de contração entre o núcleo e o exterior. Tensões internas sempre ocorrem nas peças moldadas por injeção, e quando em excesso, podem prejudicar sensivelmente as propriedades mecânicas, térmicas e químicas, especialmente a resistência ao impacto [Harada e Ueki, 2012].

Moldes com temperaturas altas favorecem o escoamento do material polimérico e minimizam linhas de emenda e marcas de escoamento, proporcionam a redução das tensões internas e originam peças com melhor aspecto superficial e mais brilhantes, já que permite acomodação das tensões superficiais, eliminando defeitos transitórios da superfície do moldado, procedentes principalmente de um escoamento irregular ou da má “cópia” da superfície da cavidade do molde [Harada e Ueki, 2012]. Em contrapartida, altas temperaturas requerem tempos de resfriamento maiores para que o polímero solidifique, o que implica em ciclos de produção mais longos e peças com custo mais elevado.

Temperaturas mais baixas permitem ciclos mais rápidos, mas trazem uma série de desvantagens. O escoamento do material durante o preenchimento é dificultada, podendo impedir que este atinja as regiões mais afastadas do ponto de injeção, resultando em moldagens incompletas (*short shots*). Causam ainda o aumento das tensões internas, superfícies opacas, além de salientar as linhas de emenda e permitir que defeitos transitórios fiquem marcados na superfície da peça. Vale lembrar que a camada de polímero congelado se forma imediatamente após o contato do polímero fundido na superfície metálica do molde. Então, a temperatura da superfície do fundido depende mais da temperatura da superfície do molde do que da temperatura com que o polímero é injetado [Silva, 2009; Harada, 2004].

A velocidade de resfriamento depende da diferença de temperatura entre a massa fundida e a temperatura que se quer atingir (por exemplo, a temperatura do molde); da transferência de calor da massa fundida para o metal do molde (ou seja, a condutividade térmica do polímero fundido); e da capacidade de transferir este calor desde a superfície da cavidade até o meio refrigerante (por exemplo, a água) que circula pelos canais de resfriamento do molde [Harada e Ueki, 2012].

4.2. Linhas de Emenda

Nas peças moldadas por injeção, as linhas de emenda são formadas pela convergência e união das trajetórias distintas de escoamento do polímero. Estas trajetórias dependem da posição da entrada, das variações de espessura, da existência ou não de múltiplas entradas e das características do molde. As linhas de emenda, além de visualmente inaceitáveis, são potenciais pontos de falha em relação à perda de resistência da peça [Harada e Ueki, 2012].

As peças moldadas são geometricamente complexas e acabam gerando obstáculos. Quando as duas frentes do escoamento se encontram novamente tendem a soldar-se, particularmente na sua parte central, onde o material está mais quente. Durante a união das frentes, ar ou gás pode ficar preso na interface. Esse ar reduz a resistência da emenda através da diminuição da área de contato de união ou, no caso de materiais sensíveis ao calor, pela degradação do polímero na zona de solda, já que o ar preso sofre uma compressão que dá lugar ao superaquecimento [Harada, 2004; Harada e Ueki, 2012].

As linhas de emenda são caracterizadas de duas formas: (i) *weld line* e (ii) *meld line*, de acordo com o ângulo no encontro das frentes do escoamento. Na proximidade do obstáculo, o escoamento se divide e se une novamente e as duas frentes formam um ângulo menor que 135° no ponto de encontro; quanto menor o ângulo, menor a resistência da linha de solda (*weld line*). Mas, à medida que a frente se distancia do obstáculo, as duas frentes caminham paralelamente e o ângulo aumenta. Para ângulos maiores que 135° a resistência é menos comprometida e a linha de união resultante é chamada de *meld line* [Harada e Ueki, 2012].

Através de simulação numérica pode-se prever e alterar o posicionamento das linhas de emenda, embora elas não possam ser eliminadas, de modo que fiquem em áreas menos críticas da peça quanto à qualidade ou aparência. Isto é feito variando-se a pressão, temperatura, localização e dimensão das entradas de injeção [Harada, 2004].

4.3. Estado da Técnica para Projeto de Canais de Resfriamento

Na moldagem por injeção, o molde possui duas funções: (i) prover o formato da peça a ser manufaturada, e (ii) extrair o calor do material para solidificar a peça o mais rápido possível [Zheng et al., 2012]. A temperatura do molde deve ser mantida suficientemente baixa para obrigar o material quente a transferir seu calor de fusão sensível e latente às superfícies do molde [Harada, 2004].

O sistema de resfriamento deve ser capaz de remover o calor a uma taxa determinada para que a peça plástica possa ser ejetada sem distorção. Um sistema eficiente objetiva a redução a um tempo de ciclo mínimo e a redução dos custos operacionais, deve minimizar defeitos indesejáveis como rechupes, contração irregular, tensões residuais e empenamento e alcançar uma distribuição uniforme de temperaturas no produto. Adicionalmente aos aspectos funcionais, o projeto dos canais de resfriamento deve também considerar a fabricabilidade do sistema para controlar os custos de construção do molde [Hassan et al., 2010a].

Em sua maioria, os moldes de injeção são resfriados com água através de um circuito de canais de resfriamento existentes no interior dos mesmos. O resfriamento por meio de furos feitos diretamente no molde é o método mais comum por ser mais conveniente e econômico. Os furos, sempre que possível, devem manter uma distância mínima de 25 mm em relação à peça, pois ao redor do furo ocorre um resfriamento local severo, que pode causar restrições ao escoamento do polímero, provocando marcas superficiais indesejáveis. Além disso, deverão ser paralelos à menor dimensão da base do molde para que a distância percorrida pelo fluido e o tempo de residência dentro do molde seja o menor possível [Harada, 2004].

Os sistemas construídos por usinagem através do processo de furação caracterizam-se pela interligação dos furos de modo a criar um circuito para a passagem do fluido refrigerante. Estes circuitos podem ter um único nível ou vários, dependendo da altura do moldado e da arquitetura escolhida. Silva (2009), no capítulo 2, elenca os diferentes tipos de arquiteturas empregadas como solução para os circuitos de resfriamento na moldagem por injeção. Neste trabalho, serão identificadas apenas as arquiteturas mais comumente utilizadas na prática, as quais também foram consideradas para a construção dos modelos simulados.

O circuito do tipo “U” é adotado para o resfriamento de cavidades com perfil longo e baixo. Conforme ilustrado pela Figura 4.1, a conexão dos furos pode ser realizada de duas formas: cruzando-se as furações no interior do molde e aplicando-se tampões de vedação roscados com o-rings ou buchas metálicas inseridas sob pressão, Figura 4.1a; ou atravessando-se os furos pela extensão do molde e unindo-os externamente com uma mangueira flexível, Figura 4.1b.

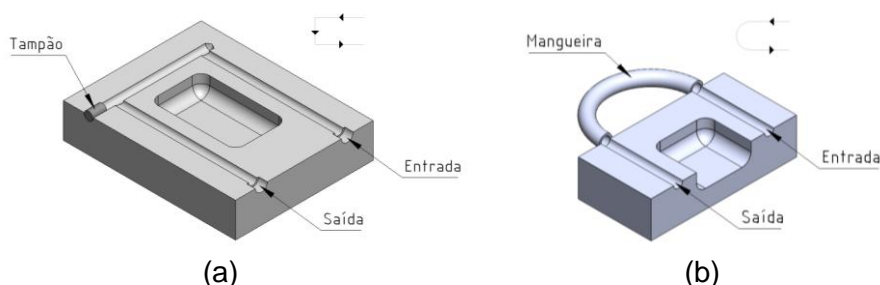


Figura 4.1. Configuração de circuito tipo “U”: (a) cruzamento interno das furações e uso de tampões de vedação e (b) conexão externa por mangueira.

Semelhante à configuração do tipo “U”, existe a configuração do tipo “retangular” aplicada para cavidades que contemplam um perfil retangular, podendo se apresentar com

pouca ou muita profundidade. Conforme a altura do moldado aumenta, adota-se mais de um nível de canais. Estes podem formar um único circuito com uma entrada e uma saída ou circuitos independentes com entradas e saídas próprias para cada nível. A Figura 4.2a exemplifica a construção de um nível, com a ligação interna do circuito feita pela intersecção dos furos e a vedação externa realizada com tampões.

A configuração do tipo “Z” é aplicada para o resfriamento quando há uma grande área. Conforme mostra a Figura 4.2b, a configuração simétrica permite que tanto as entradas quanto as saídas dos circuitos estejam do mesmo lado do molde, com as entradas ao centro, próximas do ponto de injeção (local mais quente), e as saídas nos extremos. Como nos casos anteriores, faz-se uso dos tampões para criar os desvios de percurso e para garantir a vedação externa.

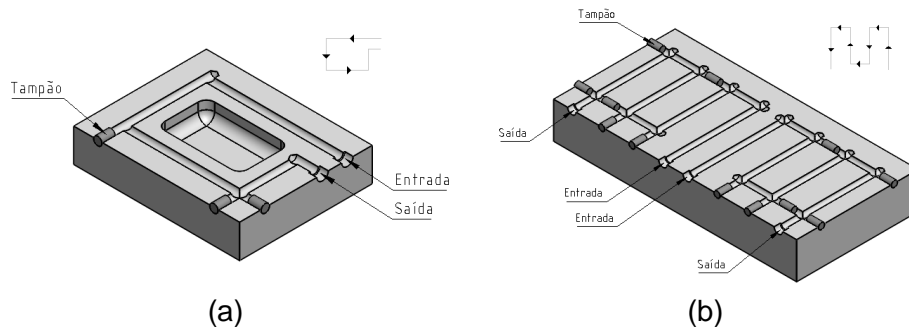


Figura 4.2. Configurações de circuito: (a) tipo “retangular” e (b) tipo “Z” simétrico.

O calor do polímero fundido é retirado através da convecção forçada pelo movimento do líquido de arrefecimento por entre os canais de resfriamento e pela convecção natural do ar que circunda a superfície externa do molde [Hassan et al, 2009]. A transferência de calor é enormemente aumentada quando o escoamento do líquido encontra-se em regime turbulento. Portanto, para que a troca térmica seja eficiente, recomenda-se a limpeza dos canais de resfriamento do molde para a retirada de incrustações e um regime turbulento do líquido refrigerante nos canais (número de Reynolds > 10.000) [Harada e Ueki, 2012]. Conforme Incropera (2012), o número de Reynolds para o escoamento em um tubo circular pode ser calculado em função da vazão mássica ou da vazão volumétrica segundo a Equação 4.1:

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D_c \mu} = \frac{4\rho\dot{V}}{\pi D_c \mu} \quad (4.1)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica, ρ é a massa específica do fluido, \dot{V} é a vazão volumétrica, D_c é o diâmetro do canal e μ é a viscosidade absoluta.

4.4. Modelagem Numérica da Injeção de Plástico

Soluções analíticas para os problemas de moldagem por injeção são muito raras devido às complexidades das equações governantes, o comportamento do material e a geometria da cavidade do molde. Para se alcançar resultados úteis à rotina de projeto, faz-se necessário recorrer às soluções numéricas. [Zheng et al., 2011].

O trabalho de simulação inicia-se a partir do recebimento do desenho tridimensional do produto em projeto. Realiza-se o ajuste do arquivo digital com o uso de ferramentas CAD (simplificação da geometria) para favorecer a construção da malha computacional e melhorar o processo de solução. Em seguida, faz-se a representação das condições do problema no simulador e, por fim, inicia-se a análise numérica do processo de injeção.

Para que seja possível a simulação de fenômenos físicos, como os que ocorrem durante a moldagem por injeção, é necessário que princípios e leis físicas sejam obedecidas e representem os fenômenos envolvidos. Por exemplo, o escoamento do polímero fundido pela cavidade; a geração de pressão em função do aumento da resistência ao escoamento; a troca de calor entre o polímero fundido e a parede do molde; a contração que ocorre durante o resfriamento, entre outros. Essas leis são as equações de conservação ou governantes, tais

como a de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia. Para a introdução das características do material polimérico, tem-se as equações constitutivas reológicas, de fluxo de calor e de comportamento PVT - pressão, volume e temperatura. Sobre as condições do problema tem-se a geometria da peça e do molde e condições operacionais programáveis na máquina injetora [Harada e Ueki, 2012].

De maneira geral, os códigos comerciais que simulam o processo de moldagem por injeção empregam a abordagem da Equação de Hele-Shaw, condicionada à simplificação da Teoria da Lubrificação Hidrodinâmica (*Lubrication Approximation*), para a modelagem matemática do escoamento do material polimérico fundido no interior da cavidade. Uma hipótese importante do desenvolvimento dessa formulação, advém do fato de que o material polimérico forma uma camada congelada ao tocar as paredes frias do molde e isso cria um escoamento de fluido por entre duas placas planas sólidas. Detalhes sobre a obtenção da equação de Hele-Shaw e outras considerações de modelagem matemática para as análises de preenchimento e recalque, bem como as formulações empregadas para as análises da cristalização, orientação das fibras em materiais compostos, previsão de contração e empenamento, além de uma discussão sobre as diferentes técnicas de solução das equações algébricas, podem ser encontradas no trabalho de Zheng et al., 2011.

A modelagem matemática significativa para este trabalho de conclusão é a que realiza a solução do problema térmico, ou seja, a análise do resfriamento (módulo *Cool*, na linguagem dos códigos). Para a questão da transferência de calor, o campo de temperaturas no molde é governado pela equação de condução do calor transiente, em coordenadas retangulares, com propriedades constantes, Equação 4.2:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_m} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

onde $\alpha_m = k / (\rho c_p)$ é a difusividade térmica do molde, k é a condutividade térmica, ρ é a massa específica, c_p é o calor específico, e T é a temperatura no molde.

A temperatura do molde é inicialmente dada como a temperatura do fluido refrigerante e, subsequentemente, o campo de temperaturas do molde ao final do ciclo anterior é usado como condição inicial para o novo ciclo iterativo de resfriamento.

A fronteira do molde Γ é compreendida pela superfície da cavidade Γ_p , pela superfície do canal de resfriamento Γ_c , e pela superfície externa Γ_e . As condições de contorno para essas superfícies são discriminadas a seguir.

Para a superfície da cavidade do molde Γ_p , a condição de fluxo de calor é dada pela Equação 4.3:

$$k_m \frac{\partial T}{\partial n} = -q'' \quad (4.3)$$

onde k_m é a condutividade térmica, T é a temperatura do molde, n representa a direção normal à superfície e q'' é o fluxo de calor através da interface fundido e molde, que não é conhecido de antemão.

Para a superfície dos canais de resfriamento Γ_c , a condição de convecção é dada pela Equação 4.4:

$$k_m \frac{\partial T}{\partial n} = -h_c (T - T_b) \quad (4.4)$$

onde T é a temperatura do molde, h_c representa o coeficiente de transferência de calor entre o molde e o fluido refrigerante na temperatura de mistura (*bulk temperature*) T_b . O coeficiente de transferência de calor é dado pela Equação 4.5:

$$h_c = \frac{k_c Nu_D}{D_c} \quad (4.5)$$

onde k_c é a condutividade térmica do fluido, D_c é o diâmetro do canal e Nu_D é o número de Nusselt local em escoamentos plenamente desenvolvidos. Conforme a equação de Dittus-Boelter, o número de Nusselt pode ser avaliado pela Equação 4.6:

$$Nu_D = 0,023Re_D^{0,8}Pr^{0,4} \quad (4.6)$$

onde Re_D é o número de Reynolds (Eq. 4.1) e Pr é o número de Prandtl. Como ambos T e T_b podem variar ao longo do comprimento do canal de resfriamento, a média logarítmica das diferenças de temperaturas (LMDT) é adotada na Equação 4.4. Para cada elemento do canal, seja T_b^I e T_b^O a temperatura média do fluido na entrada e na saída, respectivamente, tem-se a Equação 4.7:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_o - \Delta T_l}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_l)} \quad (4.7)$$

onde $\Delta T_o = T - T_b^O$, $\Delta T_l = T - T_b^I$ e ΔT é o valor da LMDT para $T - T_b$.

Para a superfície externa Γ_e , a condição de convecção é dada pela Equação 4.8:

$$k_m \frac{\partial T}{\partial n} = -h_a(T - T_a) \quad (4.8)$$

onde T é a temperatura do molde, T_a é a temperatura do ar ambiente e h_a representa o coeficiente de transferência de calor entre a superfície exterior do molde e o ar ambiente, aproximadamente, $h_a \approx 10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Como relatado na seção 4.1, a temperatura do molde tem efeitos significativos sobre o escoamento do polímero e o comportamento da solidificação, e o resfriamento inadequado é uma das principais causas de defeitos em peças moldadas, como o empenamento. Portanto, nas simulações de moldagem por injeção, a análise do resfriamento do molde é essencial por duas razões: uma é ser utilizada como ferramenta numérica para o projeto do sistema de resfriamento; a outra é fornecer as condições de contorno térmicas para as análises de preenchimento (*filling*) e recalque (*packing*). Isto ocorre porque a análise de resfriamento e a análise de preenchimento estão essencialmente acopladas, uma vez que a temperatura transiente das paredes da cavidade e o fluxo de calor são desconhecidos em ambas as análises [Zheng et al., 2011].

5. MODELAGEM COMPUTACIONAL

O estudo dos canais de resfriamento internos a moldes de alumínio foi conduzido com o auxílio da simulação computacional do processo de injeção por meio do código comercial *SolidWorks Plastics*. O grupo de programas *SolidWorks* é comumente encontrado na indústria metalmeccânica pelo fato de ser uma ferramenta CAD que cria a modelagem tridimensional de produtos e projetos. A família de programas contém softwares integrados e comunicáveis com o ambiente CAD para realização de simulação computacional em casos específicos, como é o caso da indústria de transformação de polímeros que tem à disposição o *SolidWorks Plastics*.

Os códigos comerciais disponíveis para a simulação da moldagem de polímeros por injeção, incluindo o *SolidWorks Plastics*, se caracterizam por conduzir a modelagem do problema inteiramente no ambiente de trabalho do código. Isto significa que a discretização do domínio (geração da malha), construção dos canais de resfriamento e/ou canais de alimentação, aplicação das condições do problema, como materiais e parâmetros de processo, são realizados pelo software em uma sequência determinada de passos. O cálculo numérico da solução é executado com diferentes módulos de análise para as etapas do ciclo de injeção.

5.1. Discretização do Domínio

Este trabalho de conclusão se baseou em uma peça plástica real, produzida atualmente por uma empresa transformadora local. Devido às pequenas dimensões e detalhes, como nervuras, torres para parafusos e arredondamentos, mostradas no desenho técnico no Apêndice A, a malha necessariamente precisa ser refinada para captar com acuracidade estas características. Entretanto, deve-se evitar utilizar uma malha tão refinada a ponto de se comprometer o tempo computacional e a eficiência da simulação numérica.

Pelo fato do molde consistir de quatro cavidades iguais, o teste de independência de malha considerou a simetria e foi conduzido para somente uma cavidade com o módulo *Flow* (módulo de análise da etapa de preenchimento). Escolheu-se o resultado para a temperatura de mistura ao final da injeção como parâmetro de avaliação, coletado nos nós da malha próximos a oito pontos da peça, conforme ilustra a Figura 5.1a. Os simuladores comerciais do processo de injeção têm por padrão construir a malha computacional a partir do tamanho, em milímetros, dos elementos triangulares. Inicialmente, é criada uma malha superficial ou casca; em seguida, é feita a transformação dos elementos bidimensionais em elementos sólidos, hexaédricos ou tetraédricos. Neste trabalho, empregou-se uma malha sólida com elementos tetraédricos.

O gráfico de pontos da Figura 5.1b representa o estudo de independência de malha em que seis malhas foram construídas com elementos triangulares de 5, 4, 3, 2, 1 e 0,5 mm, nomeadas de A até F, respectivamente. Para cada malha, coletou-se o valor da temperatura de mistura nos nós mais próximos aos pontos marcados na Figura 5.1a. O método de comparação entre as malhas ponto a ponto foi necessário devido à impossibilidade de obtenção de resultados para uma superfície ou plano de controle com o *software*, o que geraria um gráfico contínuo e um comportamento claro para o parâmetro escolhido.

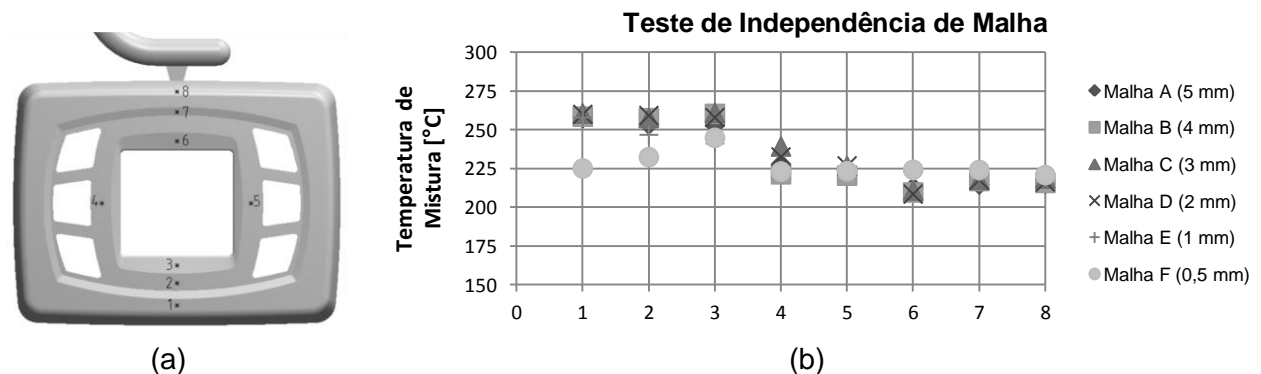


Figura 5.1. Avaliação da independência de malha: (a) Identificação dos pontos de referência e (b) Resultado da temperatura de mistura ao final da injeção.

Conforme mostra a Figura 5.1b, o resultado da temperatura de mistura ficou muito próximo para as malhas de A até E, uma vez que os símbolos estão sobrepostos. Tomando-se a malha mais refinada (malha F) como o resultado mais aferido possível, nota-se que as outras malhas, mais grosseiras, obtiveram valores de temperatura que variam muito pouco para os pontos 5, 7 e 8. Os pontos 3, 4 e 6 tiveram variação maior, mas de amplitude pequena. Já os pontos 1 e 2 ficaram bem acima da referência. Levando-se em consideração a imprecisão da coleta de dados e, admitindo que a maioria dos pontos de amostra revelou-se independente da malha, é plausível inferir que uma malha intermediária, como a malha C, retorna resultados satisfatórios sem comprometer o tempo computacional para cálculo.

Para completar a discretização do problema, além da construção da malha para as quatro cavidades da peça, o simulador cria um molde virtual nas dimensões indicadas pelo usuário e automaticamente reconhece os canais de resfriamento apontados para a discretização. Ao final do processo de criação de malha, resulta um modelo de volumes finitos representativo da peça (cavidades), canais de resfriamento e molde, que neste trabalho teve mais de 1 milhão de elementos tetraédricos.

5.2. Condições do Problema

O molde, de 250 x 250 x 120 mm, é usinado sobre um bloco sólido de liga de alumínio 7075-T6 com condutividade térmica (k) de 130 W/(m.K), calor específico (c_p) de 960 J/(kg.K) e massa específica (ρ) de 2810 kg/m³. A peça é produzida com um material conhecido como blenda ABS/PC, isto é, uma mistura dos polímeros ABS (Acrlonitrila Butadieno Estireno, em

português) e PC (Policarbonato) numa proporção controlada para a obtenção de determinadas propriedades, entre as quais estão a elevada processabilidade, rigidez e resistências térmica, mecânica e às intempéries. Na prática, utiliza-se o composto comercial Bayblend® T65 XF com condutividade térmica (k) do fundido de 0,163 W/(m.K), calor específico (c_p) do fundido de 1980 J/(kg.K) e massa específica (ρ) de 965 kg/m³ e de 1130 kg/m³, para os estados fundido e sólido, respectivamente. Mais informações sobre o polímero estão disponíveis na ficha técnica fornecida pelo fabricante no Anexo A. O material entra no molde num estado pastoso à temperatura de 260°C e deve ser resfriado até a temperatura de ejeção de 115°C, conforme consta no banco de dados do simulador. O ar ambiente é considerado com temperatura de 30°C, valor comum no ambiente industrial e nas proximidades da máquina injetora.

O sistema de resfriamento no qual este trabalho está baseado contém, principalmente, o controlador de temperatura de água Piovan® TW9, próprio para o processo de moldagem por injeção. Com uma potência de aquecimento de 9 kW, pode aquecer a água ambiente até 90°C; com sua bomba, impele o fluido refrigerante pelo interior do molde com uma vazão constante de 60 litros/min (10⁻³ m³/s). Por recomendação do fabricante do material polimérico, o molde deve estar à temperatura média de 80°C para a obtenção de melhores resultados. De acordo com a experiência prática, sabe-se que na injeção em molde de alumínio, a temperatura da água de entrada nos canais corresponde à temperatura do molde. Mesmo com os seguidos ciclos de injeção, uma vez que a razão massa de plástico sobre massa de alumínio é muito baixa, o material polimérico não tem força para elevar em excesso a temperatura, sendo o aquecimento do molde controlado pela água que circula. Portanto, a temperatura escolhida para a água de entrada é de 80°C com a vazão total (60 litros/min) sendo dividida conforme o número de entradas nos canais de resfriamento.

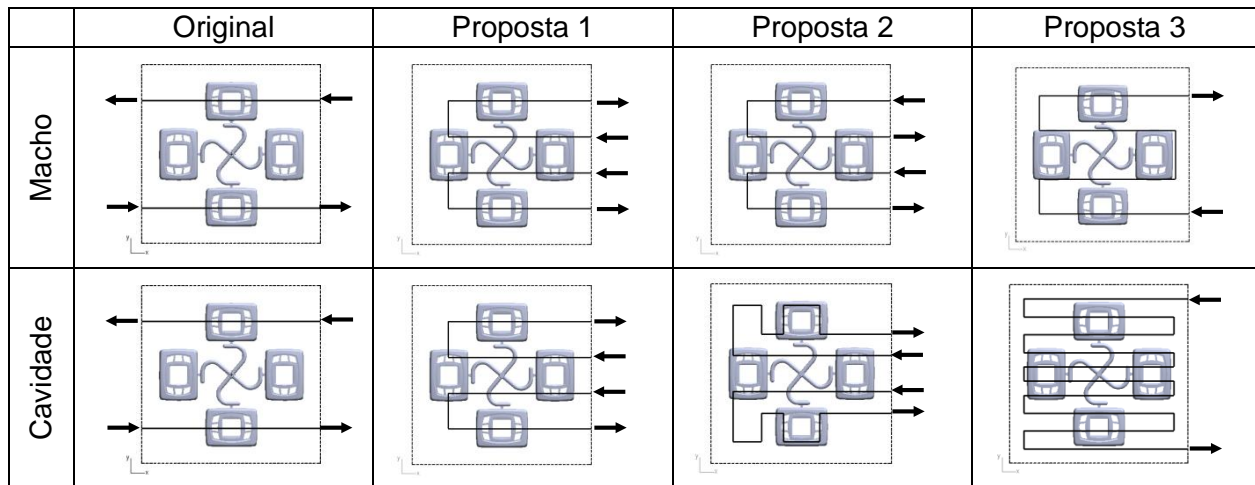
5.3. Geometrias de Canais de Resfriamento Avaliadas

Seguindo a proposta de trabalho, fez-se uma série de experiências na tentativa de modificar a geometria dos canais de resfriamento do molde em estudo e observar a influência das mudanças sobre a moldagem. De início, conduziu-se a simulação numérica do processo de injeção representando os canais no estado atual, isto é, com a forma e posicionamento existentes no molde real que inspirou este trabalho. Em seguida, três variações de geometria foram elaboradas com base na pesquisa de estado da técnica (seção 4.3) e simuladas nas mesmas condições de contorno.

A Tabela 5.1 resume os modelos de trabalho separados por figuras informativas em que se representa com linha tracejada os limites do molde e com linha sólida os canais de resfriamento construídos tanto para o lado móvel (cavidade) quanto para o lado fixo (macho). É no lado fixo que existem grandes restrições para posicionar os canais de resfriamento devido à presença dos pinos extratores que realizam a desmoldagem e ejeção da peça. As setas indicam os pontos de entrada e saída da água para cada circuito de resfriamento.

O modelo que representa o estado original dos canais de resfriamento é formado por circuitos idênticos no macho e na cavidade. A furação passante dista 50 mm das laterais do molde e o centro dos furos, de 10 mm de diâmetro, está afastado do plano de fechamento (plano que divide o molde em duas partes) em 40 mm no macho e 30 mm na cavidade. Na situação real, os canais estão na mesma posição, porém formam um circuito de passagem do tipo “U” com conexão externa por mangueira (vide Figura 4.1b). Para o funcionamento da simulação, o circuito foi simplificado para canais passantes, com a água entrando por um lado do molde e saindo pelo outro, sem ligação, porque o simulador não permite a construção de um canal de resfriamento fora dos limites do molde. O sentido percorrido considerando a presença da mangueira, foi mantido. A vazão de água em cada entrada foi considerada igual a 30 litros/min, como se fossem dois circuitos unidos pela mangueira. Entretanto, problemas ocorrem com essa simplificação. Na realidade, a temperatura na entrada do canal passante após a mangueira é condicionada à temperatura da água já elevada durante a passagem pelo canal anterior. Na configuração simulada, a água de entrada nos canais está na condição de contorno de 80°C e o trajeto percorrido é menor.

Tabela 5.1 - Resumo dos modelos avaliados.



A proposta 1 consiste de um sistema tipo “U” duplo, com furação de 10 mm de diâmetro, idêntico para o macho e para a cavidade. Os centros dos furos estão a 50 mm da lateral do molde e a 50 mm de distância entre si. Os canais foram aproximados da peça, estando a 36 mm do plano de fechamento na cavidade e 25 mm no macho, de modo a respeitar a diretriz de projeto de distância mínima de 25 mm da peça. O sentido de percurso da água também seguiu as recomendações, com a entrada pelo centro do molde e a saída nos extremos. Como existem quatro entradas, a vazão de água é de 15 litros/min em cada.

A proposta 2 integra um sistema tipo “U” duplo para o macho, semelhante à proposta 1. Porém, com a alternância nas posições de entrada e saída da água, tentou-se reproduzir os efeitos de transferência de calor de um trocador de calor em contracorrente. Para a cavidade, criou-se um sistema misto do tipo “retangular” com “Z” simétrico. Novamente, a água entra no circuito pelo centro e sai pelos extremos. Foram mantidas as demais condições de projeto da proposta 1, como o posicionamento com relação ao plano de fechamento, o diâmetro dos furos e a vazão de água por entrada.

Por último, a proposta 3 traz dois circuitos do tipo “Z”, com a água percorrendo todo o molde em uma única passagem. No macho, o circuito é semelhante ao tipo “U” das propostas anteriores, porém, possui uma ligação interna no centro. Na cavidade, mais desvios no caminho da água puderam ser construídos, uma vez que não há restrições devido a pinos extratores. Havendo somente duas entradas, a vazão de água pode ser de 30 litros/min em cada circuito, elevando-se a turbulência no sistema. Condições como o diâmetro dos furos e a posição com relação ao plano de fechamento foram mantidas iguais aos conceitos anteriores.

O conhecimento do número de Reynolds para o escoamento do fluido no interior dos canais de resfriamento é um parâmetro importante, uma vez que é fundamental garantir o regime turbulento. Avaliando-se as propriedades da água líquida à temperatura de 80°C e pressão atmosférica, tem-se uma massa específica (ρ) de 971,8 kg/m³ e uma viscosidade absoluta (μ) de 3,543E-4 Pa.s. De acordo com a Equação 4.1, para uma vazão volumétrica de 30 litros/min (5E-4 m³/s) o número de Reynolds é igual a 17,46E4; e para uma vazão de 15 litros/min (2,5E-4 m³/s), resulta em um Reynolds de 8,73E4. Portanto, sendo os resultados maiores que 10.000, está assegurado o escoamento turbulento e uma maior retirada de calor por convecção forçada.

6. RESULTADOS E ANÁLISE

A parte de coleta e análise dos resultados é, sem dúvidas, a mais difícil e, ao mesmo tempo, a mais importante de todo o trabalho. O *SolidWorks Plastics* reverte uma significativa quantidade de dados para cada etapa de análise (preenchimento, recalque, resfriamento e empenamento). Nesta seção, serão apresentados inicialmente os resultados para a

temperatura média do molde e para o fluxo de calor nos quatro casos estudados. Em seguida, mostram-se os resultados para a distribuição de temperaturas na peça, com considerações sobre o tempo de resfriamento, e um comparativo sobre a posição das linhas de emenda.

6.1. Temperatura Média do Molde no Ciclo

O resultado para a temperatura média do molde no ciclo é um parâmetro significativo para a análise, porque mostra se o objetivo de manter o molde a uma temperatura uniforme, no caso, por volta de 80°C, foi alcançado. Em cada ciclo, o molde irá sofrer com oscilações de temperatura e o sistema de resfriamento deve ser capaz de controlar essas variações, para retornar ao nível de base antes da próxima injeção.

O diagrama de cores da Figura 6.1 revela a condição de temperatura média no molde para os quatro casos analisados. Os planos de corte e a escala foram ajustados para permitir a melhor visualização dos resultados. Nota-se que em todas as configurações simuladas, a temperatura se manteve próxima dos 80°C (cor azul), como desejado. Na região adjacente à peça e aos canais de alimentação, há um aumento de poucos graus acima desta margem, estando as regiões verde e amarelo com temperaturas entre 82°C e 84°C. Ainda, na superfície do molde interna às peças, não visível na Figura 6.1, há uma maior concentração de calor, visto que é a área de contato do polímero fundido. A temperatura média do molde atinge de 85°C até um máximo de 90°C nessas áreas.

Portanto, conclui-se que a temperatura da água de entrada nos canais de resfriamento tem efeito dominante sobre o sistema, porque o molde permanece nas proximidades da temperatura da água que escoa pelos canais. Isto pode estar ligado à condutividade térmica elevada do alumínio que leva a uma distribuição homogênea de temperatura. Por outro lado, a análise sobre resultados médios no tempo pode mascarar a verdadeira influência dos canais de resfriamento sobre a temperatura do molde, pois o fenômeno é naturalmente transiente.

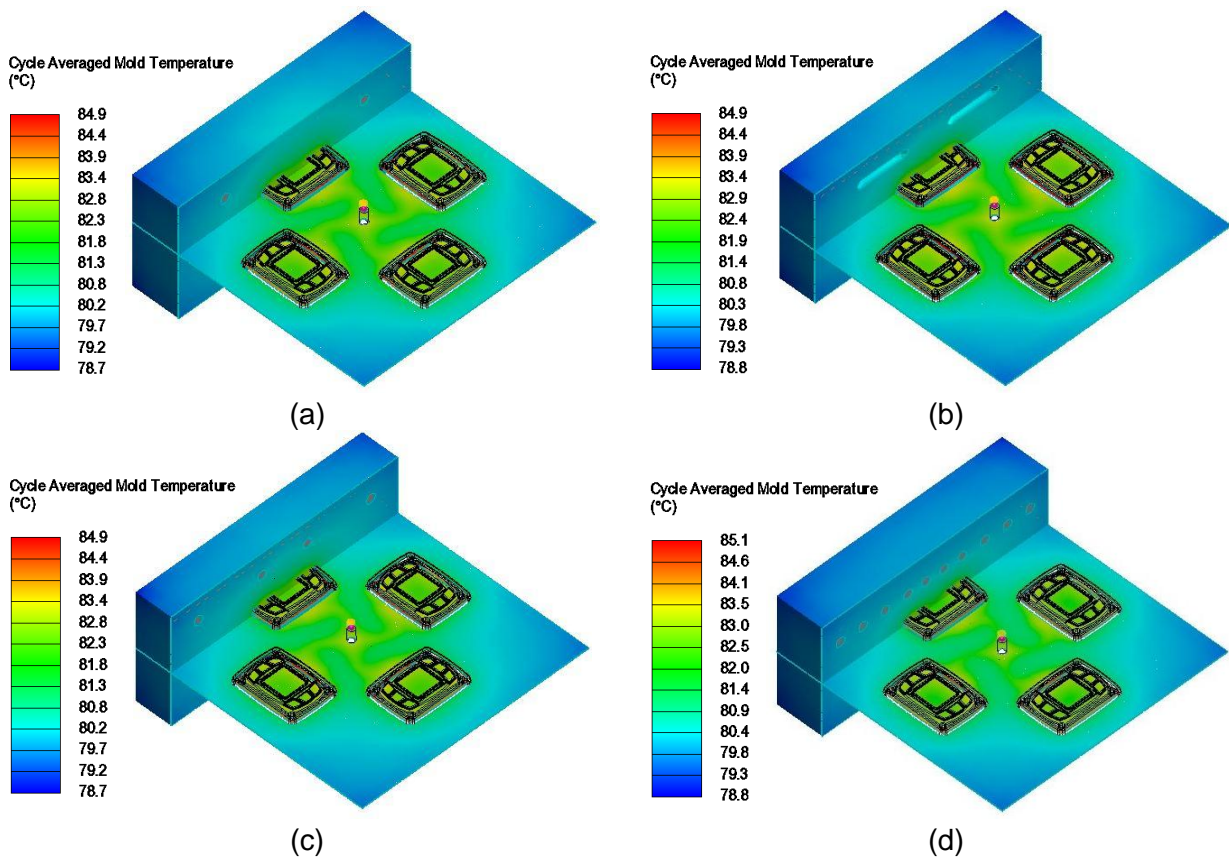


Figura 6.1. Vistas em corte da temperatura média do molde no ciclo: (a) Configuração original; (b) Proposta 1; (c) Proposta 2; e (d) Proposta 3.

6.2. Fluxo de Calor Médio no Ciclo

A solução do fluxo de calor médio no ciclo indica a quantidade de energia térmica retirada do molde pelo sistema de resfriamento por unidade de área. Por meio da observação desse resultado, pode-se apontar quais regiões dos canais de resfriamento estão sendo mais solicitadas na função de remover o calor das peças e do molde.

A Figura 6.2 reúne os contornos do fluxo de calor médio em $J/(s.cm^2)$, que corresponde a $10^4 W/m^2$, para os quatro casos estudados. Valores positivos indicam superfícies que receberam energia, elevando sua temperatura, como no caso dos canais de resfriamento. Ao contrário, valores negativos representam superfícies que cederam energia, perdendo temperatura, como na peça moldada. É possível afirmar que a simulação numérica obteve resultados coerentes com a física do problema, pois os canais de resfriamento cumpriram sua função e retiraram o calor da peça moldada, como se tem observado para esses dispositivos.

Na Figura 6.2a, representativa do modelo original, é observado o máximo valor de fluxo de calor entre todas as geometrias, $12.366 W/m^2$. Em ordem decrescente, tem-se a proposta 3, Figura 6.2d; a proposta 2, Figura 6.2c; e com o menor valor, a proposta 1, Figura 6.2b, com $8.965 W/m^2$. O resultado maior para o modelo original pode ser explicado pelo fato desta configuração possuir, para cada canal, a menor distância a ser percorrida pela água juntamente com a elevada vazão de 30 litros/min. Isto implica que a água escoou com mais turbulência e passa menos tempo em contato com a superfície metálica, removendo, localmente, maior quantidade de calor.

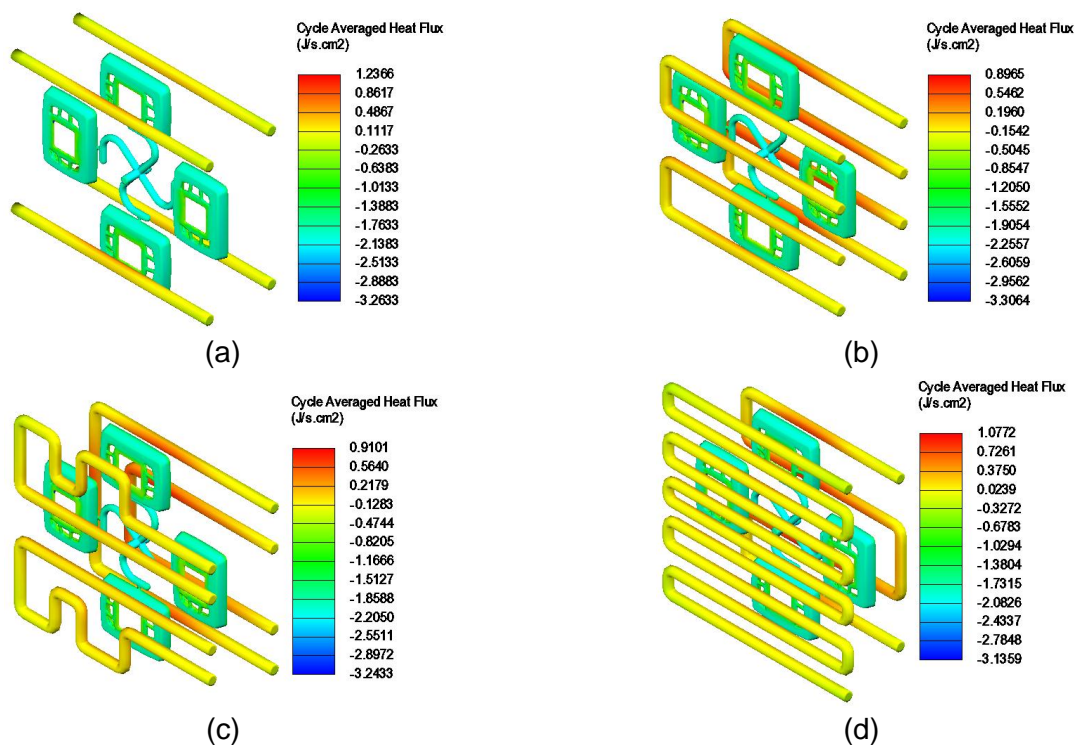


Figura 6.2. Distribuição do fluxo de calor nos canais de resfriamento: (a) Configuração original; (b) Proposta 1; (c) Proposta 2; e (d) Proposta 3.

Entretanto, este resultado isoladamente pode levar a conclusões incorretas acerca de qual geometria de canais extraiu mais calor do molde. Isto porque, conforme mostram os contornos na Figura 6.2, existem trechos que foram mais sobrecarregados com a transferência de calor (regiões em vermelho), enquanto que em outros, a solicitação foi menor (regiões em amarelo, valor próximo de zero), visto que há uma forte dependência da posição do trecho em relação às peças que estão trocando calor. Mas, sabendo-se que a temperatura média do molde permaneceu semelhante entre os modelos, é plausível inferir que todos eles possuem a mesma capacidade de remoção do calor do polímero fundido por meio do molde e dos canais.

6.3. Temperatura da Peça e Tempo de Resfriamento

Outros dados relevantes para análise são as distribuições de temperatura na peça em dois momentos distintos do processo: (i) no instante final da etapa de preenchimento e, (ii) no fim da etapa de resfriamento. Com essa composição, pode-se observar a variação de temperatura sofrida pelo polímero desde o estado fundido até a completa solidificação. O tempo necessário para que esse decréscimo de temperatura aconteça é o tempo de resfriamento, parâmetro significativo para avaliação da produtividade de partes moldadas.

A distribuição de temperaturas na peça foi semelhante para todos os modelos simulados pelo fato das condições impostas serem as mesmas. Citam-se a temperatura de entrada do polímero fundido de 260°C; a temperatura de 80°C para a água circulante nos canais e, por consequência, uma temperatura média do molde de 80°C (vide seção 6.1); e a temperatura de referência de 115°C para término do resfriamento (temperatura de ejeção).

A Figura 6.3a mostra o contorno de temperatura para a seção central da peça, incluindo o canal de alimentação, para o instante final da etapa de preenchimento. Observa-se a fina camada de polímero solidificado na superfície da peça à temperatura do molde de 80°C (em azul) e as camadas interiores, ainda no estado fundido, com temperaturas crescentes na direção do centro entre 200°C e 260°C (em laranja). O lado oposto ao canal de injeção, apresenta temperatura nas camadas internas levemente superior, por volta de 265°C, explicado pelo aquecimento do material polimérico por atrito. A Figura 6.3b mostra a mesma imagem anterior, mas para o instante de término da etapa de resfriamento. A região interna da peça encontra-se com temperaturas entre 85°C e 94°C. O canal de alimentação é o ponto mais quente, com temperatura média de 150°C, pois possui maior espessura e é o último a ser completamente preenchido.

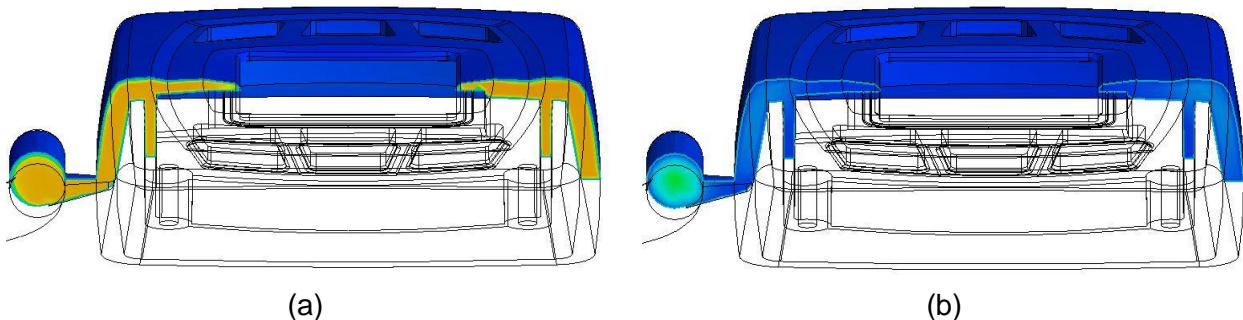


Figura 6.3. Distribuição de temperatura na peça moldada: (a) Temperatura no final do preenchimento e (b) Temperatura no final do resfriamento.

O resultado anterior também está associado ao tempo de resfriamento. Do mesmo modo, este foi semelhante para todas as configurações simuladas, ficando próximo de 21,7 segundos, o que corresponde a 77,5% do tempo completo de ciclo. Polímeros requerem longos tempos de resfriamento porque possuem baixa condutividade térmica. Dois fatores que afetam o tempo de resfriamento são a temperatura de entrada do polímero fundido e a temperatura do molde. Como a temperatura do polímero fundido que entra na cavidade e a temperatura média do molde são iguais entre os modelos, o tempo de resfriamento também precisa ser o mesmo, uma vez que o diferencial de temperatura entre o polímero fundido e o molde é idêntico.

6.4. Posição das Linhas de Emenda

Este trabalho de conclusão surgiu, dentro do meio industrial, da proposta de melhorar as marcas de linha de emenda impressas na superfície aparente da peça. Entretanto, ao longo dos estudos e experiências práticas, viu-se que este tipo de defeito é majoritariamente dependente da posição do ponto de injeção, de parâmetros de máquina como a pressão de injeção, e é inerente à geometria da peça, pelo fato da presença de áreas vazadas, ao invés do formato ou posição dos canais de resfriamento.

Porém, este resultado é um indicador válido para justificar o uso da ferramenta de análise numérica, pois, como mostra a Figura 6.5, é possível prever com precisão a localização das linhas de emenda. Como o ponto de injeção está na parte inferior das figuras, a frente do escoamento se divide ao passar pela janela central e se une novamente no lado oposto. Essa linha de emenda é classificada como linha de solda fria, uma vez que o ângulo de encontro das frentes é menor do que 135° , podendo representar risco de fratura em caso de má união.

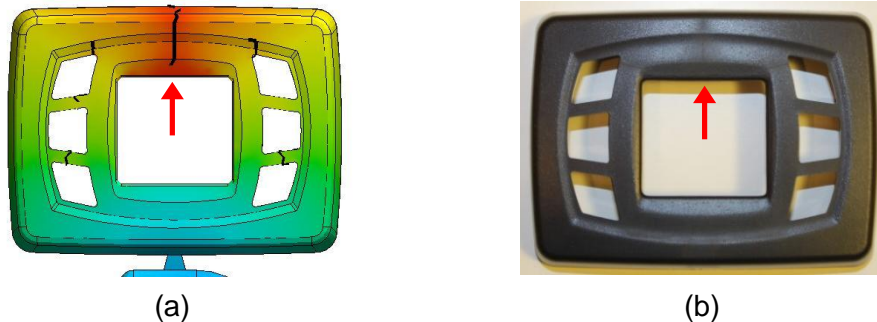


Figura 6.4. Visualização da posição da linha de emenda principal: (a) Resultado previsto pela simulação numérica e (b) Foto do produto real.

7. CONCLUSÕES

Por serem amplas as possibilidades de projeto de canais de resfriamento e serem aplicáveis diversas combinações de condições de operação, as propostas elaboradas para este trabalho representam apenas exemplos daquilo que é realizável na prática. Portanto, outras configurações operando sob diferentes condições poderiam retornar novos resultados, próximos ou afastados do que foi obtido até o momento.

Pelos resultados se apresentarem muito próximos com esta metodologia, não foi possível determinar qual das propostas elaboradas é a melhor solução para a questão do resfriamento e dos outros aspectos a ele associados, assim como não é possível inferir a qualidade da moldagem da peça a partir apenas dos resultados térmicos.

Particularmente, o molde aqui estudado é fabricado em alumínio, ao contrário da maioria da indústria transformadora de polímeros, que emprega o aço como matéria-prima. Essa característica pode ter influenciado diretamente nos resultados, pois a condutividade térmica elevada do alumínio seria uma provável responsável pela homogeneização da distribuição de temperaturas no molde. Também, ao longo do trabalho, notou-se que a temperatura média do molde no ciclo ficava próxima da temperatura de entrada da água nos canais de resfriamento, fato também comprovado por observações práticas realizadas durante a produção. Então, para que a temperatura recomendada do molde de 80°C seja atingida, a água deve entrar nos canais à esta temperatura.

Resultados para o fluxo de calor conduziram para o esperado, com a simulação mostrando a remoção do calor pelo circuito de canais de resfriamento e valores máximos na ordem de 10.000 W/m^2 . Apesar dos resultados individuais das quatro propostas mostrarem-se diferentes entre si, uma análise mais abrangente, incluindo a distribuição de temperaturas no molde, permite concluir que, neste caso, a forma e a posição dos canais de resfriamento não foi fator determinante para o comportamento térmico global do sistema. Porém, sabe-se que os canais são importantes para a retirada do calor em pontos específicos das peças moldadas e devem ser projetados de modo a proporcionar uma equidade no resfriamento.

Devido à igualdade das condições de operação para os quatro modelos simulados, a distribuição de temperatura na peça foi semelhante ao final das etapas de preenchimento e de resfriamento. O tempo de resfriamento em todos os modelos permaneceu igual, próximo de 21,7 segundos, correspondendo a 77,5% do tempo total de ciclo, uma vez que este resultado é fortemente associado ao diferencial existente entre a temperatura de entrada do polímero fundido e a temperatura do molde. Na última seção dos resultados, fez-se um comparativo de imagens da posição das linhas de emenda, mostrando a proximidade dos resultados entre a

simulação e o que acontece na realidade, além de comprovar que este defeito superficial não está associado diretamente com a posição e a geometria dos canais de resfriamento.

De modo geral, este trabalho conduziu a um maior entendimento sobre o *SolidWorks Plastics* e proporcionou a prática com uma ferramenta válida para uso em atividade profissional de engenharia. Também, levantou questões acerca da coerência entre os resultados encontrados e da dificuldade do *software* em mostrar conclusões claras para previsão de aspectos do acabamento superficial, como brilho e intensidade da aparência das linhas de emenda.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final do trabalho, questões permaneceram em aberto e hipóteses levantadas para explicação dos resultados obtidos necessitam de estudos complementares para validação. Um ponto importante seria investigar se a elevada condutividade térmica do alumínio realmente é fator determinante para a uniformização das temperaturas no molde e se isso diminui a importância da posição e geometria dos canais de resfriamento. Sugere-se realizar a análise do problema térmico com resultados instantâneos e não médias no tempo, de forma a captar tênues diferenças entre os modelos que possam ter sido ocultadas pelos resultados médios retornados pelo simulador. Pode-se averiguar com maior profundidade se o campo de temperaturas na peça e o tempo de resfriamento são fortemente dependentes das condições de operação. Ainda, o estudo de casos com peças plásticas e moldes de maiores dimensões ajudaria na observação mais clara da influência dos canais de resfriamento sobre o processo.

A moldagem por injeção em moldes de alumínio não é comum na indústria de transformação de polímeros e estudos comparativos entre diferentes materiais para moldes seriam uma abordagem relevante. Poderia-se reduzir o grau de realismo do problema para estudar o fenômeno em seus aspectos mais fundamentais, obtendo correlações que contribuiriam para melhores projetos de moldes. Por fim, o campo da moldagem por injeção é muito amplo e a simulação numérica pode ser aplicada aos problemas desta área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Granada, J. E.; **“Simulação da etapa de preenchimento no processo de moldagem por injeção”**, Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Guilong, W.; Guoqun, Z.; Huiping, L.; Yanjin, G.; **“Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating cooling systems for rapid heat cycle injection molding process”**, Materials and Design, vol. 31, p. 3426-3441, 2010.

Hassan, H.; Regnier, N.; Le Bot, C.; Pujos, C.; Defaye, G.; **“Effect of cooling system effect on the polymer temperature and solidification during injection molding”**, Applied Thermal Engineering, vol. 29, p. 1786-1791, 2009.

Hassan, H.; Regnier, N.; Le Bot, C.; Defaye, G.; **“3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding”**, International Journal of Thermal Sciences, vol. 49, p. 161-169, 2010a.

Hassan, H.; Regnier, N.; Pujos, C.; Arquis, E.; Defaye, G.; **“Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding”**, Applied Thermal Engineering, vol. 30, p. 1547-1557, 2010b.

Harada, J.; **“Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos”**, Artliber, 2004.

Harada, J.; Ueki, M.; **“Injeção de termoplásticos: produtividade com qualidade”**, Artliber, 2012.

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; **“Fundamentos de transferência de calor e de massa”**, LTC, 6ª edição, p. 309, 2012.

Silva, S. L.; **“Sistemática para o projeto do sistema de refrigeração de moldes para injeção de polímeros”**, Monografia (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

Zheng, R.; Tanner, R.; Fan, X.; **“Injection molding: integration of theory and modeling methods”**, Springer-Verlag, 2011.

ANEXO A - Ficha Técnica do Material ABS/PC Bayblend® T65 XF¹

Ficha de especificação

Bayblend® T65 XF - (PC+ABS)
Covestro Deutschland AG



| Informação do produto | | | |
|---|---------|------------------------|-----------------|
| <ul style="list-style-type: none"> (PC+ABS) blend Vicat/B 120 = 120 °C improved flowability compared to T65. | | | |
| Propriedades reológicas | Value | Unit | UNDEFINED(73) |
| Índice de fluidez volumétrico, MVR | 18 | cm ³ /10min | ISO 1133 |
| Temperatura | 260 | °C | ISO 1133 |
| Carga | 5 | kg | ISO 1133 |
| Propriedades mecânicas | Value | Unit | UNDEFINED(73) |
| Módulo de tração | 2400 | MPa | ISO 527-1/-2 |
| Tensão no escoamento | 54 | MPa | ISO 527-1/-2 |
| Deformação no escoamento | 4.4 | % | ISO 527-1/-2 |
| Propriedades térmicas | Value | Unit | UNDEFINED(73) |
| Temperatura de deflexão térmica, 1.80 MPa | 102 | °C | ISO 75-1/-2 |
| Temperatura de deflexão térmica, 0.45 MPa | 122 | °C | ISO 75-1/-2 |
| Temperatura de amolecimento Vicat, 50°C/h 50N | 118 | °C | ISO 306 |
| Coef.de expansão térmica linear, paralelo | 80 | E-6/K | ISO 11359-1/-2 |
| Coef.de expansão térmica linear, perpend. | 85 | E-6/K | ISO 11359-1/-2 |
| Espessuras do tubo de teste | 1.5 | mm | IEC 60695-11-10 |
| Cartão Amarelo (yellow card) disponível | Yes | - | - |
| Flamabilidade UL94 a espessura h | HB | class | IEC 60695-11-10 |
| Espessuras do tubo de teste | 0.8 | mm | IEC 60695-11-10 |
| Propriedades elétricas | Value | Unit | UNDEFINED(73) |
| Constante dielétrica, 100Hz | 3.1 | - | IEC 60250 |
| Constante dielétrica, 1MHz | 3 | - | IEC 60250 |
| Fator de dissipação dielétrica, 100Hz | 30 | E-4 | IEC 60250 |
| Fator de dissipação dielétrica, 1MHz | 85 | E-4 | IEC 60250 |
| Resistividade volumétrica específica | >1E13 | Ohm*m | IEC 60093 |
| Resistividade superficial específica | >1E15 | Ohm | IEC 60093 |
| Resistência elétrica | 35 | kV/mm | IEC 60243-1 |
| Índice comparativo de linha de fuga | 250 | - | IEC 60112 |
| Outras propriedades | Value | Unit | UNDEFINED(73) |
| Absorção de água | 0.7 | % | Sim. to ISO 62 |
| Absorção de umidade | 0.2 | % | Sim. to ISO 62 |
| Densidade | 1130 | kg/m ³ | ISO 1183 |
| Propriedades para cálculos reológicos | Value | Unit | UNDEFINED(73) |
| Densidade do fundido | 965 | kg/m ³ | - |
| Condutividade térmica do fundido | 0.163 | W/(m K) | - |
| Capacidade térmica específica do fundido | 1980 | J/(kg K) | - |
| Difusividade térmica | 8.53E-8 | m ² /s | - |
| Temperatura de ejeção | 120 | °C | - |
| Produção de amostra para teste | Value | Unit | UNDEFINED(73) |
| Moldagem por injeção, temperatura da massa. | 260 | °C | ISO 294 |
| Moldagem por injeção, temperatura do molde | 80 | °C | ISO 10724 |

¹ Fonte: Campus Plastics, www.campusplastics.com/material/pdf/44461/BayblendT65XF?sLg=pt, acessado em: 05/06/2016.

Características

Processamento

Moldagem por injeção

Aditivos

Desmoldante

Forma de entrega

Granulos

Disponibilidade regional

América do Norte, Europa, Ásia Pacífico, America Centra e do Sul, Oriente/África

Informações sobre processamento

Moldagem por injeção

PREPROCESSING

Max. Water content: 0.02 %

Drying temperature: 100 - 110 °C

(depending on the grade 10 °C below the Vicat VST/B120 temperature, but not higher as the recommended values).

Drying time:

Circulating air drying oven (50 % fresh air) 4-8 h

Fresh air dryer (high speed dryer) 2-4 h

Dry air dryer 2-4 h

PROCESSING

Melt temperature: 240-280 °C

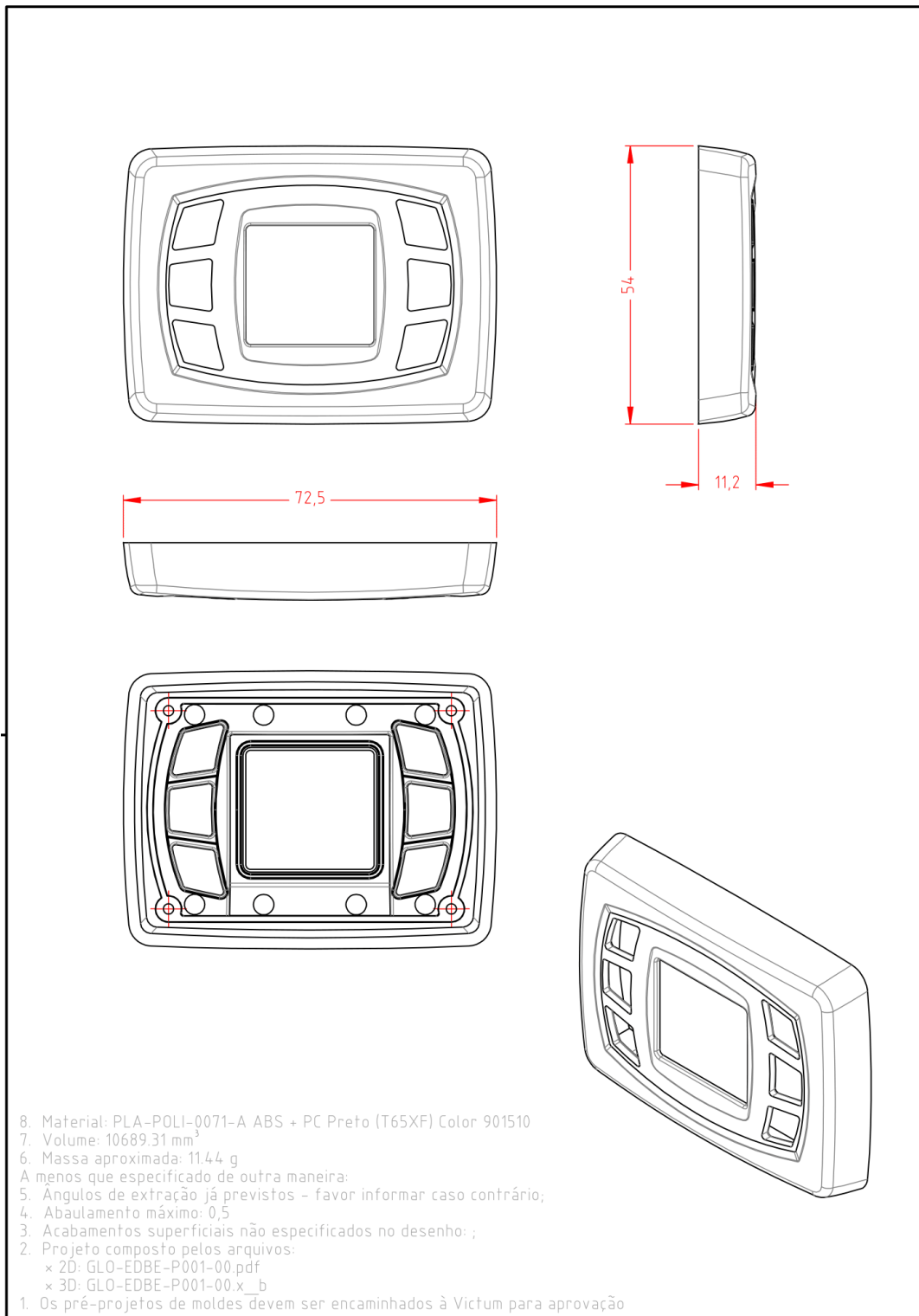
Mold temperature: 70-100 °C

Use open nozzle.


Typical value

These values are typical values only. Unless explicitly agreed in written form, they do not constitute a binding material specification or warranted values. Values may be affected by the design of the mold/die, the processing conditions and coloring/pigmentation of the product. Unless specified to the contrary, the property values given have been established on standardized test specimens at room temperature.

APÊNDICE A - Desenho Técnico do Produto em Estudo



- 8. Material: PLA-POLI-0071-A ABS + PC Preto (T65XF) Color 901510
- 7. Volume: 10689,31 mm³
- 6. Massa aproximada: 11,44 g
- A menos que especificado de outra maneira:
- 5. Ângulos de extração já previstos - favor informar caso contrário;
- 4. Abaulamento máximo: 0,5
- 3. Acabamentos superficiais não especificados no desenho ;
- 2. Projeto composto pelos arquivos:
 - × 2D: GLO-EDBE-P001-00.pdf
 - × 3D: GLO-EDBE-P001-00.x_b
- 1. Os pré-projetos de moldes devem ser encaminhados à Victum para aprovação

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|--------|--|----------------|----|--------|------------------|-----------|---------------------|-----------|-----------|--------------|
| DESCRIÇÃO | | | | PAINEL FRONTAL | | CODIGO | GLO-EDBE-P001-00 | | FOLHA | 1 de 1 | | |
|  Rua Dr. João Inácio, 520 Porto Alegre/RS - Brasil tel (51) 3275.5400 fax (51) 3275.5416 www.victim.com.br | PROJETO | EDBE | | UNIDADE | mm | ESCALA | 1:1 | | Tolerâncias Gerais: | 50 ±0,15 | 100 ±0,20 | 150 ±0,25 |
| | CLIENTE | GLOBUS | | | | | | 200 ±0,30 | | 250 ±0,35 | 300 ±0,40 | |
| | | | | | | | | | | 400 ±0,50 | ▷ ±0,6 | angular:±30° |