

Felipe Marin

**CONTRIBUIÇÕES AO PROJETO E FABRICAÇÃO DE
MOLDES PARA A INJEÇÃO DE PLÁSTICO CONTENDO
CANAIS COMPLEXOS DE REFRIGERAÇÃO (CONFORMAL
COOLING) EMPREGANDO A TÉCNICA DE MANUFATURA
ADITIVA METÁLICA FUSÃO SELETIVA A LASER
(SELECTIVE LASER MELTING – SLM)**

Dissertação submetida ao Programa
de mestrado em Engenharia e
Ciências Mecânicas da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
mestre em Engenharia e Ciências
Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Adriano
Fagali de Souza

Joinville
2018

Marin, Felipe

CONTRIBUIÇÕES AO PROJETO E FABRICAÇÃO DE MOLDES
PARA A INJEÇÃO DE PLÁSTICO CONTENDO CANAIS
COMPLEXOS DE REFRIGERAÇÃO (CONFORMAL COOLING)
EMPREGANDO A TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA
METÁLICA FUSÃO SELETIVA A LASER (SELECTIVE LASER
MELTING - SLM) / Felipe Marin ; orientador,
Adriano Fagali de Souza, 2018.

100 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal
de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de
Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas,
Joinville, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Polímeros.
3. Injeção de plástico. 4. Canais complexos de
refrigeração. 5. Manufatura aditiva metálica. I.
de Souza, Adriano Fagali. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Felipe Marin

**CONTRIBUIÇÕES AO PROJETO E FABRICAÇÃO DE
MOLDES PARA A INJEÇÃO DE PLÁSTICO CONTENDO
CANAIS COMPLEXOS DE REFRIGERAÇÃO (CONFORMAL
COOLING) EMPREGANDO A TÉCNICA DE MANUFATURA
ADITIVA METÁLICA FUSÃO SELETIVA A LASER
(SELECTIVE LASER MELTING – SLM)**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “mestre em engenharia e ciências mecânicas”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Joinville, 05 de fevereiro de 2018.

Prof. Breno Salgado Barra, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Adriano Fagali, de Souza, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jorge Vicente Lopes da Silva, Dr.
Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer

Prof. Carlos Maurício Sacchelli, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wagner Maurício Pachekoski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha querida
família, agradeço o suporte e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus e aos meus pais por sempre acreditarem e incentivarem mesmo nas horas mais difíceis.

Agradeço especialmente ao professor Adriano Fagali de Souza pela atenção e dedicação no desenvolvimento deste projeto. Pelos conhecimentos compartilhados, com foco em meu crescimento científico, pessoal e profissional.

Agradeço o suporte técnico das instituições UFSC, UniSOCIESC, CAPES, CNPQ, FAPESC, FEESC e SENAI. Das empresas pelo suporte financeiro e/ou técnico BMW do Brasil, Comac, Magma do Brasil, Sandvik, Sokit, Techcontrol, Tecnodrill, Tecnomotriz e Vtech. Villares Metals pelo fornecimento do aço inox N4534QA e VP20. Polimold pelo fornecimento do porta moldes 25.30249122A.

Um agradecimento especial a todos os amigos, colegas e servidores da UFSC que contribuíram com meu desenvolvimento pessoal ou na realização deste projeto.

Eu aprendi que para crescer como pessoa
preciso me cercar de gente mais inteligente
do que eu.
(William Shakespeare)

RESUMO

Os plásticos devido a vantagens como boa processabilidade, baixo custo e densidade estão presentes em diversas áreas produtivas de bens de consumo. O principal processo de manufatura é a injeção, processo cíclico onde a etapa de refrigeração afeta no desempenho e qualidade do processo. Diversos estudos para otimização dos canais de refrigeração no foram realizados. Porém, por se tratar de um processo complexo e depender da geometria do produto e material injetado o conhecimento ainda não foi consolidado havendo diferentes diretrizes para projeto do ferramental de injeção. O emprego de novos processos de manufatura aditiva metálica, como o Selective Laser Melting - SLM, viabiliza a fabricação canais complexos de refrigeração (conhecidos como *Conformal Cooling*), com geometrias que seguem o formato do produto. No entanto o custo deste processo de fabricação ainda é elevado. Assim, o presente estudo avalia o desempenho do emprego de moldes fabricados por manufatura aditiva metálica contendo canais complexos de refrigeração. Utilizando um componente automotivo como corpo de provas, foram projetados e fabricados moldes para a injeção de plástico. O processo de injeção foi simulado utilizando sistema CAE e peças plásticas foram fabricadas com moldes contendo canais convencionais de refrigeração e moldes com canais complexos. Os resultados mostram que o emprego de moldes fabricados por SLM contendo canais complexos de refrigeração apresentam vantagens ao processo de injeção e qualidade do produto. Contudo, o projeto deste sistema deve ser cautelosamente realizado para alcançar os benefícios esperados.

Palavras-chave: Polímeros, Injeção de plástico, Canais complexos de refrigeração. Manufatura aditiva metálica. SLM.

ABSTRACT

Due to advantages such as good processability, low cost and density plastics are present in several productive areas of consumer goods. The main manufacturing process is injection, a cyclical process where the cooling step directly affects the process performance and product quality. There are several studies on literature about optimization of molds cooling channels. However, due to complexity involved in this problem with a wide range of geometry types and materials the knowledge has not yet been consolidated, with numerous guidelines for the injection tool design. The development of new manufacturing process such as metal additive manufacturing process Selective Laser Melting - SLM, makes it possible to manufacture Conformal Cooling, a complex cooling channels that flow the topography of the part. However, the cost of this manufacturing process is still very high. Therefore, the present work aim to evaluates the performance of molds manufactured by metallic additive manufacture containing complex cooling channels. Using an automotive component as work piece, the molds were designed and manufactured for plastic injection molding. The injection process was simulated using software CAE and the molds were manufactured with conventional cooling and with Conformal Cooling channels to inject the work piece. The results show that the use of molds manufactured by SLM with Conformal Cooling channels have positive affect the injection process and product quality. However, the design of this system should be carefully carried out to achieve the expected benefits.

Keywords: Polymers. Plastic injection. Conformal Cooling. Additive Manufacture. SLM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação das propriedades com o peso molecular de polímeros, a) modulo elástico, b) resistência à tração e c) dureza.	27
Figura 2 - Cadeias poliméricas a) lineares, b) ramificadas e c) com ligações cruzadas.	28
Figura 3 - Termograma de um ensaio DSC.	30
Figura 4 - Representação do processo de injeção de plástico a) plastificação do material, b) preenchimento e compactação do material na cavidade, c) abertura do molde e extração do produto.	33
Figura 5 - Representação esquemática do fluxo em forma de fonte.	34
Figura 6 – Distribuição morfológica da parece ao centro da peça do processo de injeção de polipropileno.	34
Figura 7 - Configuração básica do molde de injeção.	35
Figura 8 - Representação do canal de alimentação de um molde de injeção.	36
Figura 9 - Comparação de leiautes de canais de distribuição.	37
Figura 10 - Sistema extrator utilizando pinos e lâminas extratoras.	38
Figura 11 – Sistema para saída de gases.	38
Figura 12 – Ciclo de injeção e dissipação de calor.	39
Figura 13 - Comparação refrigeração adequada e inadequada.	40
Figura 14 - Fluxo laminar e turbulento.	41
Figura 15 - Tipos de canais de refrigeração fabricados por furação.	41
Figura 16 - Modelo esquemático do molde com as dimensões dos canais de refrigeração.	42
Figura 17 – Principais tipos de canais de refrigeração, a) Palheta, b) Palheta retorcida, c) Cascata, d) Tubo de calor, e) Cascata helicoidal e f) Serpentina.	43
Figura 18 – Exemplo de canais complexos de refrigeração a) em série b) em paralelo.	44
Figura 19 - Canais complexos de refrigeração paralelos manufaturados por manufatura aditiva sobre um metal base – componente híbrido.	45
Figura 20 - Digitalização 3D de amostra de tubo de 2mm manufaturado por SLM, a)superfície inferior, b) superfície superior.	49
Figura 21 - Geometria de estudo.	52
Figura 22 - Projeto CAD do porta molde para injeção do suporte automotivo.	53
Figura 23 – Na esquerda cavidade móvel e direita a cavidade fixa do molde.	54

Figura 24 - a) Inserto inferior móvel e b) inserto fixo.	54
Figura 25 - a) Canais complexos em série, b) formato livre, c) série-paralelo...	55
Figura 26 - Produto com canais de refrigeração posicionados a) CC em série-paralelo CC, b) palhetas e c) furação convencional.	56
Figura 27 - Sistema de vedação utilizado entre placa suporte de refrigeração e insertos para a) canal complexo b) palhetas.....	57
Figura 28 – a) Fresamento – CNC Romi D600. b) Fuso amplificador de rotação Tecnodrill®. C) Apalpador Hexagon® e inserto SLM.	60
Figura 29 - Operações de usinagem de a) desbaste, b) acabamento.	60
Figura 30 - Inserto fixo com representação dos canais de refrigeração série-paralelo e designação de regiões da componente híbrida.	62
Figura 31 - Máquina de SLM Concept Laser M2 Cusing.....	62
Figura 32 - Análise de pó metálico Corrax® para manufatura SLM, aumento de 500 vezes.	63
Figura 33 - Processo de fabricação dos insertos por SLM.	64
Figura 34 - a) Sistema de extração do produto, b) Fechamento do molde.	65
Figura 35 - Viscosidade vs. temperatura vs. cisalhamento.	67
Figura 36 - Volume específico vs. Temperatura vs. pressão.....	67
Figura 37 - Medição com termômetro infravermelho.....	68
Figura 38 – a) Máquina de medir por coordenadas DEA 2204. b) Ponto de referenciamento no produto.	69
Figura 39 - Medidas d1 e d2 na inspeção com MMC.	70
Figura 40 - Medidas f1, f2, f3 e f4 na inspeção com MMC.....	70
Figura 41 - a) Equipamento ATOS Core 300. b) Geometrias analisadas.....	72
Figura 42 - Projeto do molde de injeção configuração com canais complexos de refrigeração.....	73
Figura 43 - Aprisionamento de ar com refrigeração a) regular por furação b) palhetas c) canais complexos.....	74
Figura 44 - Temperatura dos insertos a) móvel canais complexos, b) fixo canais complexos, c) móvel com palhetas, d) fixo com palhetas, e) móvel convencional , f) fixo convencional.	75
Figura 45 - Temperatura aferida com laser nos insertos conforme o ciclo de injeção.....	76
Figura 46 - Temperatura do produto ao final do ciclo de injeção de 28 segundos com a) canais complexos, b) palhetas, c) convencional por furação.....	77

Figura 47 - Produto preso no lado fixo devido ao gradiente de temperatura no molde.	78
Figura 48 - Distorção final do produto a) canais complexos, b) palhetas e c) furação convencional.	79
Figura 49 - Distância entre os pontos 9 e 12 do produto medidos com MMC...80	
Figura 50 - Distância entre os pontos 14 e 15 do produto medidos com MMC.80	
Figura 51 - Distância em x entre os pontos 8 e 10 em relação ao ponto 9 medidos com MMC.....	81
Figura 52 - Distância f2 do produto medidos com MMC.	81
Figura 53 - Distância f3 do produto medidos com MMC.	82
Figura 54 – Distância f4 do produto medidos com MMC.	82
Figura 55 - a) Marcas de afundamento previstas pela simulação, b) digitalização do produto injetado do ciclo 25 com canais complexos de refrigeração.....	83
Figura 56 - Percentual de cristalização previsto em simulação.....	84
Figura 57 - Produtos injetados (1) convencional, (2) palheta e (3) canais complexos de refrigeração.	86
Figura 58 – Canais complexos de refrigeração a) em série e b) FFCC.	96
Figura 59 - Tempo de injeção.	97
Figura 60 -Temperatura do produto ao final do ciclo de injeção a)	97
Figura 61 – Temperaturas nos insertos para ciclos mais longos.	98
Figura 62 – Curva DSC canais complexos de refrigeração.....	99
Figura 63 – Curva DSC canais convencionais com palhetas.	99
Figura 64 – Curva DSC canais convencionais por furação.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Recomendação de parâmetros de projeto de canais com secção circular segundo autores.....	42
Tabela 2 - Parâmetros do canal de entrada tipo leque.....	52
Tabela 3 - Numero de elementos da montagem para simulação.	57
Tabela 4 – Parâmetros de processo de simulação.	58
Tabela 5 - Comparação entre aços inoxidáveis Corrax® e N4534QA..	61
Tabela 6 - Descrição dos volumes da componente híbrida.	61
Tabela 7 – Propriedades típicas do PP Braskem H105.	66
Tabela 8 – Parâmetros recomendados para processamento do Braskem H105.....	66
Tabela 9 - Produtos inspecionados com medição com contato.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD – *Computer-aided design* (Desenho auxiliado por computador)

CAE – *Computer-Aided Engineering* (Engenharia Auxiliada por Computador)

CC – *Conformal Cooling* (Canais complexos)

CFD – *Computational Fluid Dynamics* (Dinâmica dos fluídos computacional)

DSC - *Differential Scanning Calorimetry* (Calorimetria exploratória diferencial)

FEA – *Finite-Element Analysis* (Análise de elementos finitos)

FEM – *Finite Element Method* (Método de Elementos Finitos)

FFCC – *Free Formed Conformal Cooling* (Canais complexos de formato livre)

kg – Quilogramas

m – Metros

mm – Milímetros

MMC – Máquina de medir por coordenadas

NC – *Numeric Control* (Controle Numérico)

PP – Polipropileno

PPi – Polipropileno isotático

T_g – Temperatura de transição vítrea

T_m – Temperatura de fusão

T_c – Temperatura de transição cristalina

s – Segundos

SLM – *Selective laser Melting* (Fusão Seletiva Laser)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS GERAIS	26
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
2 REVISÃO DE LITERATURA	27
2.1 INTRODUÇÃO AOS POLÍMEROS	27
2.1.1 <i>Comportamento de polímeros</i>	28
2.1.2 <i>Cristalinidade de polímeros</i>	30
2.1.3 <i>Polipropileno</i>	32
2.2 PROCESSO DE INJEÇÃO DE POLÍMEROS	33
2.2.1 <i>Moldes de Injeção</i>	34
2.2.2 <i>Sistemas do molde de injeção</i>	35
2.3 MANUFATURA ADITIVA (SLM)	48
2.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE INJEÇÃO	50
3 METODOLOGIA	51
3.1 PROJETO	51
3.1.1 <i>Seleção da geometria do produto</i>	51
3.1.2 <i>Projeto do molde de injeção</i>	53
3.1.3 <i>Projeto dos insertos</i>	54
3.2 SIMULAÇÃO DOS PROJETOS UTILIZANDO PROGRAMA CAE	57
3.3 PROCESSO DE MANUFATURA DO MOLDE DE INJEÇÃO	59
3.3.1 <i>Usinagem</i>	59
3.3.2 <i>Processo de manufatura aditiva SLM</i>	60
3.3.3 <i>Eletroerosão</i>	64
3.3.4 <i>Montagem do molde e ajuste em bancada</i>	65
3.4 INJEÇÃO DOS PRODUTOS	65
3.5 INSPEÇÃO DOS PRODUTOS	68
3.5.1 <i>Inspeção dos produtos injetados com contato</i>	68
3.5.2 <i>Inspeção dos produtos injetados sem contato</i>	71

3.6 ANÁLISE DSC	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1 PROJETO E SIMULAÇÃO.....	73
4.1.1 <i>Escolha do ponto de injeção</i>	73
4.1.2 <i>Análise de térmica</i>	74
4.2 CONTRAÇÃO E EMPENAMENTO	78
5 CONCLUSÕES	87
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS:.....	88
7. REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE I	96
APÊNDICE II.....	97
APÊNDICE III	99

1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A fabricação de produtos empregando materiais poliméricos cresceu muito nas últimas décadas vantagens como processabilidade e baixa densidade destacam sua aplicação em indústrias de bens de consumo (RÄNNAR, 2007).

Dentre os processos de transformação de polímeros, a injeção se caracteriza por apresentar alta produtividade, repetibilidade e flexibilidade de geometria, o que o torna amplamente utilizada na indústria. Dentre as etapas que compõem o processo de injeção, a refrigeração merece destaque por influenciar diretamente no desempenho do processo, dois terços do tempo de ciclo, e qualidade do produto (PARK e DANG, 2010).

O projeto do sistema de refrigeração é complexo, a geometria do produto e limitações dos processos produtivos podem ser obstáculos ligados diretamente ao custo e qualidade produtiva do ferramental. Para melhorar a troca térmica entre o polímero e molde, o emprego de simulações e geometrias de refrigeração otimizadas para cada molde se faz necessário (VIETRI et al., 2011).

Atualmente a maioria dos moldes de injeção são refrigerados utilizando sistemas tradicionais de refrigeração fabricados por furação e uso de insertos usinados. Essas técnicas de manufatura, no entanto, apresentam dificuldades para resfriar homogeneamente produtos com formatos complexos.

Em alguns casos o emprego de técnicas mais elaboradas de refrigeração tradicionais, utilizando palhetas e cascatas, podem desempenhar papéis satisfatórios, mas na grande maioria das formas complexas não é possível equilibrar as trocas térmicas.

Fabricar canais complexos de refrigeração que seguem a superfície do produto, também conhecidos como *Conformal Cooling* (CC), principalmente em produtos com geometrias complexas, podem melhorar significativamente a produtividade do processo e a qualidade do produto. Porém, sua fabricação não é possível pelo processo tradicional de fabricação, a furação (MARQUES et al., 2015).

Com o desenvolvimento de novos processos de manufatura aditiva metálicas, vem se tornando possível fabricar moldes com canais complexos. O processo de fabricação de manufatura aditiva por fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting* - SLM) permite a fabricação de peças complexas, com elevada densidade e propriedades mecânicas próximas de materiais como fundidos (MARQUES, 2014). Por ser uma

tecnologia recente, ainda apresenta limitações e elevados custos de fabricação.

Além do elevado custo para fabricação por SLM as variáveis do processo de injeção e de construção do molde de injeção tornam o tema bastante complexo. Por esses motivos, o conhecimento dos benefícios e diretrizes para projeto e manufatura de canais complexos ainda não são sólidos, sendo necessário maior aprofundamento no tema.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é projetar, fabricar e estudar o desempenho de um molde com três sistemas de refrigeração para a injeção de peças plásticas. A citar: i) canais convencionais de refrigeração (fabricados por furação); ii) canais convencionais de refrigeração utilizando palhetas (fabricados por furação); iii) canais complexos de refrigeração fabricados por manufatura aditiva metálica – SLM.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho estão apresentados a seguir:

- 1) Identificar uma peça plástica que será utilizada como corpo de prova. Projetar o respectivo molde para injeção de plástico contendo canais convencionais de refrigeração e canais de complexos.
- 2) Simular a troca de calor dos moldes projetados e parâmetros do processo de injeção utilizando sistema CAE. Identificar as diferenças entre os sistemas de refrigeração.
- 3) Fabricar os moldes projetados empregando os processos convencionais de manufatura e processo SLM para a fabricação do molde com canais complexos.
- 4) Realizar o processo de injeção utilizando os três moldes fabricados para validar os modelos de refrigeração propostos; identificar a viabilidade do emprego de canais complexos de refrigeração, avaliando o tempo ciclo e de qualidade no produto injetado, empenamento e cristalinidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

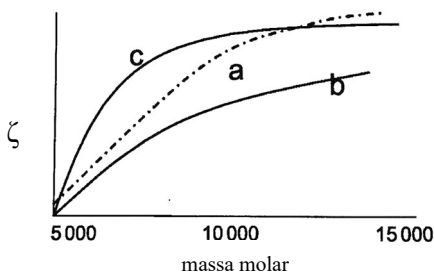
2.1 INTRODUÇÃO AOS POLÍMEROS

Manrich (2013) define polímero como qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha um alto peso molecular e com estruturas repetitivas, onde normalmente essa unidade é de baixo peso molecular. Essas estruturas são denominadas de meros.

Os polímeros apresentam dois tipos de ligações, ligações primárias fortes ($\sim 100\text{Kcal/mol}$) entre elementos da cadeia principal e ligações secundárias fracas ($\sim 5\text{Kcal/mol}$) entre as macromoléculas. Dependendo da afinidade entre os elementos constituintes das cadeias principais, tamanho da cadeia e seu arranjo, diferentes propriedades são esperadas.

Os tamanhos das macromoléculas influenciam nas propriedades do material polimérico, de forma geral elas aumentam com a massa molar até um certo patamar de estabilização (figura 1).

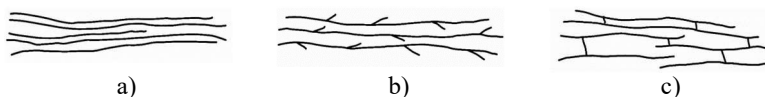
Figura 1 - Variação das propriedades com o peso molecular de polímeros, a) modulo elástico, b) resistência à tração e c) dureza.



Fonte: Manrich (2013).

As cadeias poliméricas podem ser do tipo linear, ramificada ou com ligações cruzadas (figura 2). As cadeias secundárias ou a ausência delas acaba influenciando no processamento do material e em suas propriedades, por exemplo, a presença de ligações cruzadas aumenta a resistência mecânica do polímero e garante propriedades de infusibilidade e solubilidade. As ramificações por sua vez atuam como obstáculos que tem ação plastificante interno reduzindo as propriedades mecânicas (MANO e MENDES, 1999).

Figura 2 - Cadeias poliméricas a) lineares, b) ramificadas e c) com ligações cruzadas.



Fonte: Mano e Mendes (1999).

2.1.1 Comportamento de polímeros

Os polímeros são classificados em termoplásticos e termo rígidos. Os polímeros termoplásticos apresentam a capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e/ou pressão, ao diminuir a temperatura endurecem e ficam no formato de moldado.

Os materiais termorrígidos após polimerizados não amolecem e solubilizam. Nesse processo ocorre a formação de ligações cruzadas entre cadeias poliméricas, não sendo possível fundi-lo novamente, o aumento de temperatura apenas causa sua degradação (CANEVAROLO, 2010).

Os polímeros são materiais viscoelásticos, apresentam características de fluído e solido elástico ao mesmo tempo. A parte elástica é proveniente dos ângulos e distâncias de ligações entre átomos das cadeias principais (inclui grupos laterais). A parte plástica é proveniente do atrito entre cadeias (e ligações fracas) que resulta em um tempo finito de resposta à solicitação mecânica (CANEVAROLO, 2010).

Manrich (2013) define viscoelasticidade como um comportamento ou resposta à deformação, onde ao mesmo tempo observa-se comportamento viscoso (o corpo deforma e não recupera nada, o corpo flui, depois de retirada a tensão de deformação) e comportamento elástico (ocorre total recuperação da deformação depois de retirada a tensão).

Dois fatores influenciam o comportamento viscoelástico dos materiais, a temperatura e a massa molar. O polímero pode apresentar três comportamentos diferentes, vítreo, borrachoso e viscoso. Sendo o comportamento viscoso o que acontece acima de T_m (temperatura de fusão) onde maior parte dos polímeros é processada.

Também pode ser citado a recuperação elástica de injetados e a consequência deformação proveniente de uma peça com tensões internas decorrentes de resfriamento ineficiente.

Para entender o comportamento térmico dos polímeros é necessário entender que eles apresentam três temperaturas características,

temperatura de transição vítrea T_g , de temperatura de fusão cristalina T_m e temperatura de cristalização T_c .

Segundo Mano e Mendes (1999), A temperatura de transição vítrea é a temperatura a partir da qual as regiões amorfas passam do estado rígido (vítreo) a readquirem progressivamente sua mobilidade desde que com aplicação do esforço mecânico apropriado. A medida que passamos a T_g e aumentamos a temperatura o material fica borrachoso e baixa-se sua viscosidade.

A temperatura de fusão cristalina é o valor médio de temperatura na qual ocorrem a fusão das regiões cristalinas, ao fornecer energia suficiente para ultrapassar essa temperatura o material muda de estado borrachoso para viscoso (fundido) (CANEVAROLO, 2010).

A temperatura de cristalização é a temperatura entre T_g e T_m na qual o polímero sob resfriamento rearranja suas cadeias organizadas de forma regular formando uma estrutura cristalina (cristalito ou lamelar).

A temperaturas de transição são importantes para o projeto do produto e processo. É importante selecionar o material para que não ocorra falha na condição de trabalho, e com temperatura de processamento baixa para facilitar o processamento do polímero e aumentar produtividade.

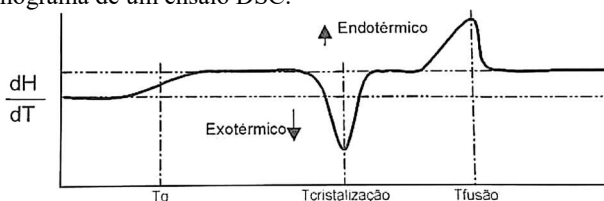
Para uma molécula adquirir mobilidade ela precisa responder a solicitação mecânica com folga de tempo, para isso é necessário aumentar o volume e superar as forças que seguram as cadeias. Dessa forma moléculas: com maiores obstáculos tendem a ter T_g mais elevados. São exemplos: ramificações, grupos laterais, polaridade, rigidez da cadeia principal (emprego de anéis aromáticos, sulfonas, ligações paralelas e duplas e triplas ligações).

Segundo Manrich (2013) O principal fator que influencia na mobilidade do polímero é a estrutura química e sua estruturação física. A primeira é a grande responsável pelas forças secundárias entre as moléculas, quando maior a força mais coesa fica as moléculas com seus vizinhos. Além da magnitude das forças a quantidade de ligações efetivas tem grande importância.

Calorimetria exploratória diferencial (Differential Scanning Calorimetry - DSC) é um ensaio que permite estudar as propriedades termodinâmicas e térmicas de materiais plásticos. O ensaio consiste em aquecer de forma controlada o material e comparar a mudança de entalpia do polímero com um padrão inerte, normalmente Índio ou zinco. A figura 3 mostra um termograma obtido em um DSC onde a área sob a curva é uma medida direta da entalpia associada as transições.

Com esse teste é possível determinar a temperatura de transição vítrea (T_g), temperaturas de fusão (T_m), entalpia de fusão (H_f), calor específico (C_p) e grau de cristalinidade (MANRICH, 2013).

Figura 3 - Termograma de um ensaio DSC.



Fonte: Manrich (2013).

Onde T_m é uma transição endotérmica e T_c é uma transição exotérmica, $\frac{dH}{dT}$ é a variação da entalpia em relação a temperatura.

2.1.2 Cristalinidade de polímeros

Os poliméricos por apresentarem longas cadeias, tendem a ter um número menor de cristalitos quando comparado a metais e cerâmicas, sendo praticamente impossível uma formação totalmente cristalina.

As propriedades mecânicas e termodinâmicas dos polímeros semicristalinos dependem do grau de cristalinidade. Quanto maior a cristalinidade maiores as propriedades de densidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência química, resistência à abrasão, temperaturas de fusão (T_m), de transição vítrea (T_g) e de utilização, enquanto que propriedades como resistência ao impacto, alongação e óticas são reduzidas (CANEVAROLO, 2010).

A facilidade de cristalização é uma variável dependente da estrutura química, presença de impurezas e condições de processamento do polímero. Ramificações ou grupos laterais devem ser pequenos, simétricos e regulares para se obter um maior grau de cristalinidade. Elementos que favorecem fortes ligações secundárias fortes também favorecem a cristalização.

Segundo Canevarolo (2010) os fatores que alteram a cristalinidade podem ser citados como fatores estruturais, linearidade da cadeia, taticidade, presença de grupo lateral, configuração em torno de duplas ligações, polaridade, rigidez da cadeia principal e copolimerização.

O grau de cristalinidade ou cristalização permite identificar além da habilidade de cristalização do polímero características de seu processamento.

É possível detectar através de testes a proporção entre sua fase amorfa e cristalina através de uma aproximação, desconsiderando a região de interface existente entre as duas fases e defeitos cristalinos. Devido a esses problemas de identificação, não se mede em termos absolutos a cristalinidade dos polímeros. Determinou-se um Índice de Cristalinidade que pode variar de acordo com as técnicas utilizadas, as técnicas mais usuais empregadas para tal são Volume específico, calor específico e entalpia de fusão.

a) Volume específico

O cálculo por volume específico baseia-se na diferença de densidade entre as fases cristalinas, mais empacotadas e amorfas menos compactadas sendo possível através do cálculo da densidade estimar o grau de cristalinidade da amostra (CANEVAROLO, 2010).

$$\phi^{sv} = \frac{\bar{V}_a - \bar{V}}{\bar{V}_a - \bar{V}_c} = \frac{\rho_c (\rho_a - \rho)}{\rho (\rho_a - \rho_c)}$$

Onde $\bar{V}$ é o volume específico da amostra, $\bar{V}_a$ o volume específico da fase amorfa, $\bar{V}_c$ é o volume específico da fase cristalina que pode ser calculado conhecendo a célula unitária, ρ é a densidade, ρ_c densidade cristalina e ρ_a é a densidade amorfa obtido em resfriamento rápido a temperatura ambiente.

b) Entalpia de fusão – DSC

O grau de cristalinidade também pode ser obtido utilizando um teste de calorimetria exploratória diferencial (Differential Scanning Calorimetry - DSC) medindo a área sob o pico de fusão da amostra e a partir da sua normalização com a entalpia de fusão cristalina, conforme a equação (CANEVAROLO, 2010):

$$\phi^H = \frac{H_a - H}{H_a - H_c} = \frac{\Delta H}{\Delta H^0}$$

Onde, ΔH é a variação da entalpia de fusão da amostra por exemplo e ΔH^0 é a variação da entalpia de fusão da fase cristalina. Para o PPI, a entalpia de fusão tabelada é de 165,3 J/g.

c) Calor específico

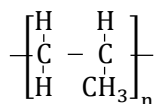
O grau de cristalinidade também pode ser calculado utilizando o calor específico a pressão constante utilizando um DSC, com a calibração utilizando uma amostra de safira padrão e valores tabelados, a equação que relaciona o calor específico com o grau de cristalinidade é a seguinte (CANEVAROLO, 2010):

$$\phi^c = \frac{(c_p)_a - c_p}{(c_p)_a - (c_p)_c}$$

Onde $(c_p)_a$ é o calor específico da amostra na fase amorfa, $(c_p)_c$ na fase cristalina e c_p é o calor específico da amostra a pressão constante.

2.1.3 Polipropileno

O Polipropileno (PP) é um termoplástico, semicristalino, pertencentes ao grupo das poliolefinas, sua estrutura repetitiva é mostrada na figura 4. O PP é resistente a solventes e produtos químicos, com grande faixa de cristalinidade, tenacidade e massa molar variando tipicamente de 10^4 - 10^5 .



O PP tem como principal característica ser uma commodity de baixo custo, apresenta excelentes resistências a flexão, fadiga, resistências químicas e elétricas, tendo baixa absorção de umidade. No entanto, apresenta boa sensibilidade a raios ultravioletas (UV) e agentes oxidantes, sendo necessária sua aditivação (Mano, 1991).

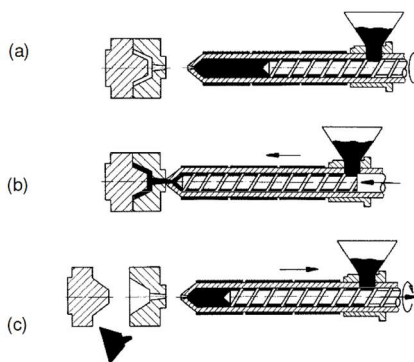
Segundo (BOUJELBENE et al., 2004) mais de um terço dos produtos injetados são para indústria automotiva, e a maior parte dos produtos são produtos aparentes de grande dimensão feitos em PP.

2.2 PROCESSO DE INJEÇÃO DE POLÍMEROS

A injeção de polímeros é o principal processo para processamento de material termoplástico. É um processo cíclico que permite produção em larga escala de produtos pré-acabados com formatos complexos, boa precisão dimensional e com possibilidade de emprego de diversos materiais (TSAI e LAN, 2015), (MANRICH, 2013).

O processo de injeção é exemplificado na figura 4, ele consiste na realização de um esforço geralmente hidráulico em um embolo com material plástico aquecido, onde o movimento empurra o material plástico para dentro da cavidade do molde preenchendo a cavidade e compactando material, compensando a contração durante solidificação. Por último, o embolo retorna para nova dosagem e abertura do molde com extração do produto.

Figura 4 - Representação do processo de injeção de plástico a) plastificação do material, b) preenchimento e compactação do material na cavidade, c) abertura do molde e extração do produto.



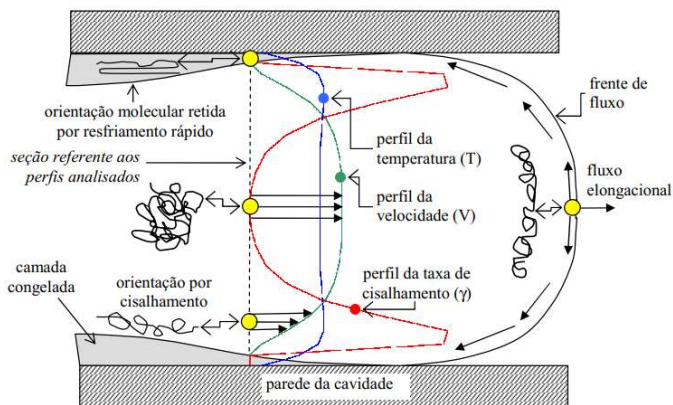
Fonte: Michaeli e Potsch (1995), apud Sacchelli (2007).

Na figura 5, Cavalheiro (2007) exemplificou o fenômeno do escoamento do material termoplástico na injeção de produtos de paredes finas. Estão descritos os três principais fenômenos envolvidos, o cisalhamento, a velocidade e a temperatura.

O gradiente de temperatura existente entre o material fundido e o molde de injeção provoca solidificação das paredes para o núcleo do canal. Dessa forma com a ação da velocidade de preenchimento e da tensão cisalhante na parede do material resulta em diferentes orientações moleculares do centro para a extremidade. A figura 6 apresenta as

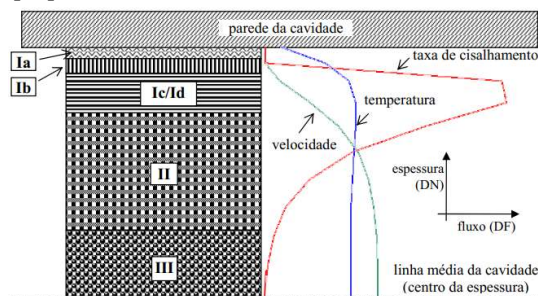
estruturas formadas para a injeção de PP camada superficial (Ia), camada refinada (Ib), camadas de baixo e alto cisalhamento (Ic/Id), zona de transição/núcleo orientado (II, e núcleo isotrópico (III).

Figura 5 - Representação esquemática do fluxo em forma de fonte.



Fonte: Cavalheiro (2007).

Figura 6 – Distribuição morfológica da parede ao centro da peça do processo de injeção de polipropileno.



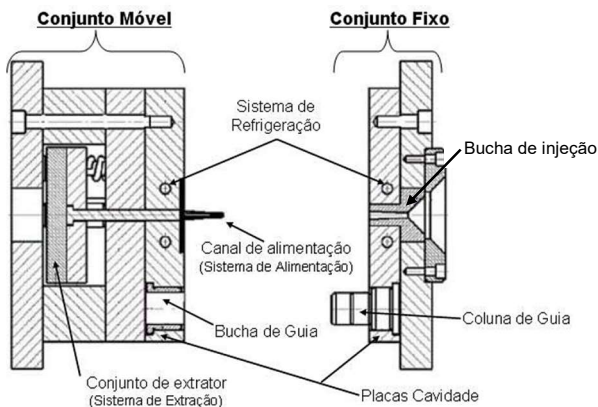
Fonte: Cavalheiro (2007).

2.2.1 Moldes de Injeção

O molde de injeção contém as cavidades com a geometria do produto, é uma das principais componentes do processo. Silva (2009) define os moldes de injeção como ferramentas construída individualmente que, adaptadas à máquina de injeção, possibilitam produzir componentes de forma variada, com pouca ou grande

complexidade, através de um ciclo produtivo, possuindo boa repetibilidade, acabamento e tolerâncias dimensionais do produto moldado. A figura 7 apresenta a configuração de um molde de injeção.

Figura 7 - Configuração básica do molde de injeção.



Fonte: Silva (2009).

São requisitos do molde de injeção garantir preenchimento de todas as regiões das cavidades, manter as características do produto em todos os ciclos, facilitar o resfriamento do material e promover extração das peças injetadas (MANRICH, 2013).

2.2.2 Sistemas do molde de injeção

O molde de injeção é composto, normalmente, pelos seguintes sistemas: de injeção, de extração, de saída de gases e refrigeração.

i) Sistema de alimentação

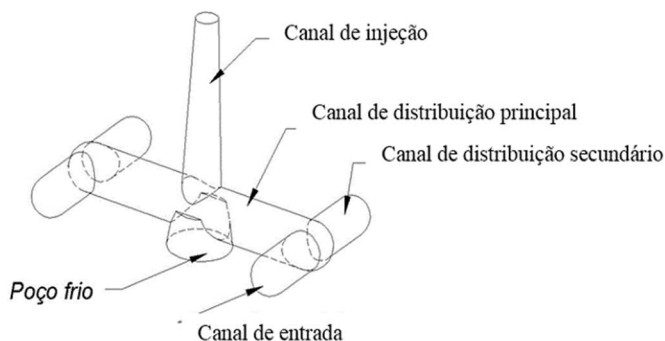
O sistema de alimentação é responsável por conduzir o material para preencher a cavidade do molde. Para Thomazi (2009) o sucesso no processo de injeção de termoplásticos está diretamente relacionado ao conhecimento do fluxo de preenchimento, sendo possível assim escolher os melhores locais para distribuição de fluxo (eficiência do processo) e estética do produto aceitável.

Existem dois tipos de canais de alimentação: frios e quentes. Devido a maior facilidade de fabricação e custo de componentes de

aquecimento e controle os canais frios são mais baratos. Para grandes volumes produtivos o emprego de câmeras quentes é viável devido aos ganhos em produtividade.

Os canais frios normalmente são compostos por canal de injeção, canais de distribuição, poço frio e canal de entrada – figura 8.

Figura 8 - Representação do canal de alimentação de um molde de injeção.



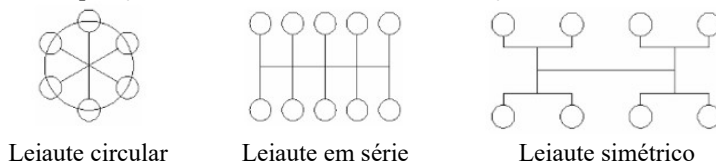
Fonte: Beaumont (2004).

O canal de injeção é destacado juntamente com o produto, sendo assim necessário ângulo de saída para que o conjunto não fique preso na cavidade fixa do molde. Por ser a primeira parte em contato com o material viscoso e apresentar ângulo que restringem o fluxo (necessário para extração), seu desgaste é elevado. Para aumentar a vida útil do molde além do uso de tratamentos, empregam-se buchas de injeção que permitem substituição desta região com baixo custo.

Os canais de distribuição ficam localizados normalmente na linha de fechamento do molde, existem várias configurações para esse canal, com variações de leiaute e dimensões para garantir bom padrão de preenchimento das cavidades do molde.

A figura 9 apresenta algumas das configurações de canais de distribuição para vários produtos. Salienta-se que para garantir mesmo padrão de preenchimento das cavidades é necessário alterar os diâmetros dos canais de distribuição e compensar as perdas de escoamento. Dessa forma, leiautes circulares e simétricos são os mais utilizados para injeção de vários produtos idênticos.

Figura 9 - Comparação de leiautes de canais de distribuição.



Fonte: Menges e Mohren (1993) apud Dias (2008).

Os canais de ataque ou de entrada é uma das partes mais importantes do sistema frio de alimentação. Normalmente utilizam-se canais de entrada com grandes restrições de áreas como o capilar, restrito e submarino a fim de não marcar o produto ou até mesmo facilitar o destaque dos canais na extração produto. Para produtos com grande volume de material entradas em aba, anel, disco e leque ou até mesmo entrada direta podem ser empregadas para maior produtividade.

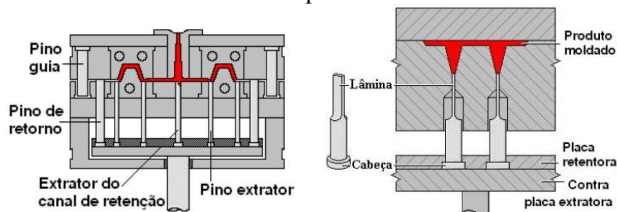
ii) Sistema de extração

O sistema de extração tem a finalidade de após solidificação e abertura do molde extrair o material plástico da cavidade. Para retirar o material de dentro da cavidade normalmente é necessário a realização de um esforço mecânico para expulsar o material plástico que contrai em volume e fixa-se nas cavidades durante o processo de solidificação.

Normalmente são empregados sistemas de extração utilizando pinos ou lâminas, figura 10, por apresentarem menor custo de fabricação. Também são utilizados sistemas pneumáticos valvulados, mecanismos com abertura ou rotação e placas extratoras (Dias, 2008).

Os extratores são alojados em placas extratoras ou entre placa e contra placa extratora e travados/posicionados para não rotacionar. Com o fechamento, para os extratores não marcarem a cavidade fixa, utiliza-se pinos de retorno ou sistemas mecânicos com molas para retorno do sistema de extração.

Figura 10 - Sistema extrator utilizando pinos e lâminas extratoras.



Fonte: Brito (2003) apud Dias (2008).

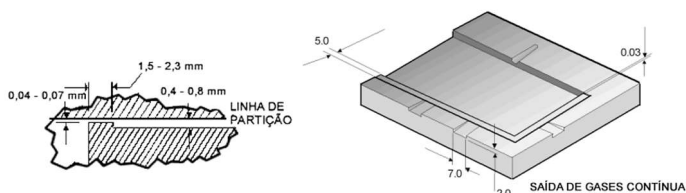
iii) Saída de gases

O sistema de saída de gases é fundamental para evitar defeitos como falta de preenchimento, presença de bolhas e linhas fracas de emenda no produto injetado. Tais defeitos são agravados com altas velocidades de produção principalmente para produtos com pouca espessura (THOMAZI, 2009).

A figura 11 apresenta dois sistemas de saída de gases, pontual e contínua. No sistema de saída de gases pontual um pequeno orifício com centésimos de milímetros é usinado para garantir que apenas o gás passe sem preenchimento do canal com material polimérico. É importante que para essa configuração conhecer o padrão de preenchimento para corretamente posicionar os canais nas regiões de final de fluxo.

No sistema contínuo existe um alívio ao redor da linha de fechamento do produto, de poucos centésimos de milímetro de profundidade, e saídas distribuídas conforme é mostrado na figura 11.

Figura 11 – Sistema para saída de gases.



Fonte: Thomazi (2009).

iv) Refrigeração

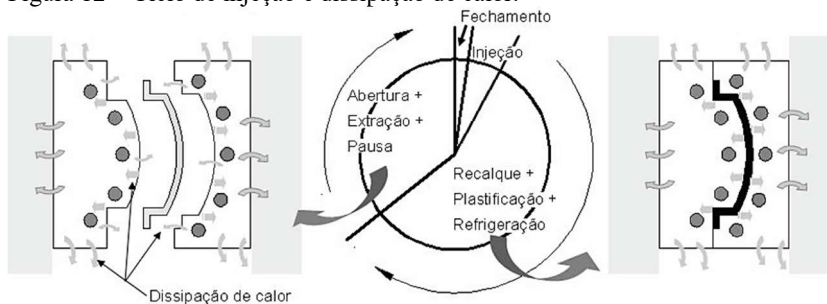
Após conclusão da fabricação do molde é possível otimizar tempos de abertura e fechamento do molde, extração, preenchimento e recalque (MANRICH, 2013). No entanto estes tempos apresentam pouco

impacto no tempo total de ciclo. Para otimizar o ciclo de injeção é necessário atuar na refrigeração, ela demanda aproximadamente dois terços do tempo total de ciclo (PARK e DANG, 2010).

Sacchelli (2007) estudou a cadeia de manufatura de moldes de injeção, o tipo de refrigeração e a material de injeção se mostraram sendo os fatores que mais influenciam no valor de orçamento das ferramentarias investigadas. Devido a importância da refrigeração no tempo de ciclo, seu estudo deve ser aprofundado.

O sistema de refrigeração é responsável por remover do molde o calor proveniente do polímero fundido injetado no interior da cavidade – figura 12. A etapa de refrigeração no ciclo de injeção inicia logo após a injeção do produto e termina com a extração do produto, contemplando a compactação e recalque do material injetado.

Figura 12 – Ciclo de injeção e dissipação de calor.

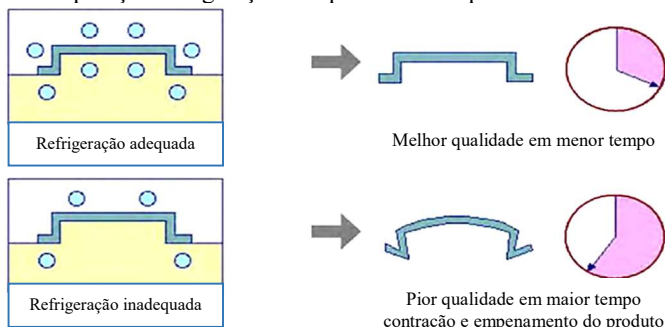


Fonte: Silva (2009).

A distribuição térmica no molde de injeção influencia diretamente na qualidade e custo do processo de injeção, afetando além do tempo de ciclo a qualidade do produto. Durante o processo de refrigeração, dois efeitos acontecem simultaneamente, a contração do produto e o empenamento.

O empenamento é proveniente de uma refrigeração desigual entre regiões do molde. A diferenças de temperaturas resultam taxas de solidificação diferentes, isso resulta em tensões desiguais nas superfícies do produto e deformações não desejadas. A figura 13 exemplifica esse problema. O empenamento é agravado com a contração.

Figura 13 - Comparação refrigeração adequada e inadequada.



Fonte: Park e Dang (2011).

Usualmente, o processo de refrigeração é realizado através de furos passando por perto das cavidades, por onde passa um fluido refrigerante. Esse fluido normalmente é a água, devido ao menor custo, porém podem ser utilizados outros líquidos e gases (Dias, 2008).

HSU et al. (2013) utilizando software projetou um molde bi metálico, ao invés de um fluido para refrigeração foi utilizado uma barra de cobre. Essa configuração apresentou redução de 35% no tempo de ciclo em relação ao molde sem refrigeração, sendo uma boa solução para moldes de alta fadiga.

Devido ao processo de furação e complexidade das geometrias injetadas, existem limitações técnicas de fabricação que impossibilitam o canal seguir a geometria da cavidade o que resulta em refrigerações menos homogêneas (ALTAF, 2015)

Para garantir uma boa troca térmica é necessário que o fluido refrigerante passe pelos canais de forma turbulenta. Reynolds (Re) é um número adimensional utilizado para indicar o estado do escoamento. A equação de Reynolds é apresentada a seguir.

$$Re = \frac{\rho U d}{\eta} \quad (1)$$

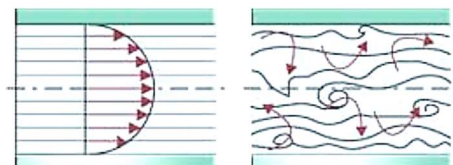
Onde, ρ é a densidade em kg/m^3 , U é a velocidade média em m/s , d é o diâmetro do canal (m) e η é a viscosidade do fluido ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$).

A figura 14 apresenta o escoamento interno laminar ($Re < 2300$) e turbulento ($Re > 4000$), é possível observar que para o regime turbulento ocorre constante mistura do fluido o que resulta em uma maior homogeneidade (Dias, 2008).

Para refrigeração de moldes de injeção de plástico recomenda-se emprego de Re próximo de 10000. Para Re maiores o ganho não compensa a energia gasta para conduzir o fluido pelos canais (Dimla et al, 2005).

Com o emprego de manufatura aditiva metálica juntamente com softwares de simulação é possível, dentro de uma certa faixa, controlar a rugosidade dos canais e inserir obstáculos para controlar a turbulência, podendo melhorar a eficiência térmica do molde.

Figura 14 - Fluxo laminar e turbulento.

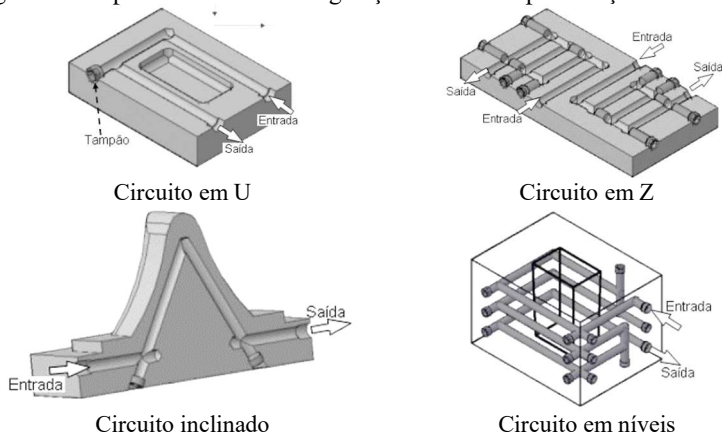


Fonte: René (2013).

a. Sistemas de refrigeração por furação

A figura 15 apresenta as configurações dos canais de refrigeração tradicionais por furação. A fabricação destes tipos de canais é limitada pelas características geométricas do produto e relação de comprimento e diâmetro da ferramenta de furação (L/D). Normalmente são empregados diâmetros maiores para reduzir o número de furos e facilitar a fabricação.

Figura 15 - Tipos de canais de refrigeração fabricados por furação.



Fonte: Silva (2009), Brito et al (2003) apud Dias (2008).

Meyer (2005), Park e Pham (2009) baseados em experiência de projeto, análise de engenharia e casos práticos sugerem parâmetros para projeto de canais circulares. Dang e Park (2011) modelou matematicamente canais de refrigeração circulares e sugere parâmetros que otimizam o processo. Os parâmetros sugeridos pelos autores são mostrados na tabela 1 e identificados na figura 16.

Analisando o fluxo de calor envolvido no processo e aplicando o balanço de energia temos que:

$$Q_{ks} = Q_E + Q_C \quad (2)$$

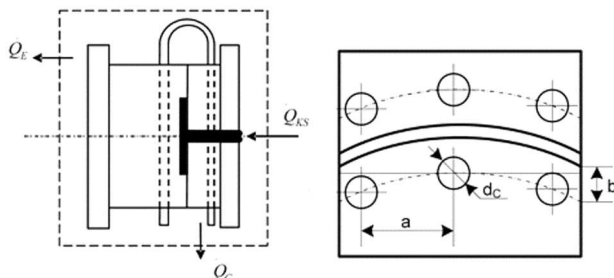
Onde Q_{ks} , Q_E e Q_C são respectivamente o fluxo de calor trocado com o polímero, ambiente e com o circuito de refrigeração.

Tabela 1 – Recomendação de parâmetros de projeto de canais com seção circular segundo autores.

Autor	Espessura da parede (mm)	Diâmetro do furo (mm) - d_c	Distância entre canais (mm) - a	Distância da cavidade (mm) - b
Dang e Park	0 – 2	8 – 10	$c = 0,7a + 1,6d_c$	
	2 – 4	10 – 12		
	4 – 6	10 – 14		
Mayer	0 – 2	4 – 8	$2d \leq a \leq 3d_c$	$1,5b \leq b \leq 2d_c$
	2 – 4	8 – 12		
	4 – 6	12 – 14		
Park e Pham	-	6 - 12	$2d \leq a \leq 5d_c$	$d \leq b \leq 5d_c$

Fonte: Dang e Park (2011), Mayer (2005), Park e Pham (2009).

Figura 16 - Modelo esquemático do molde com as dimensões dos canais de refrigeração.



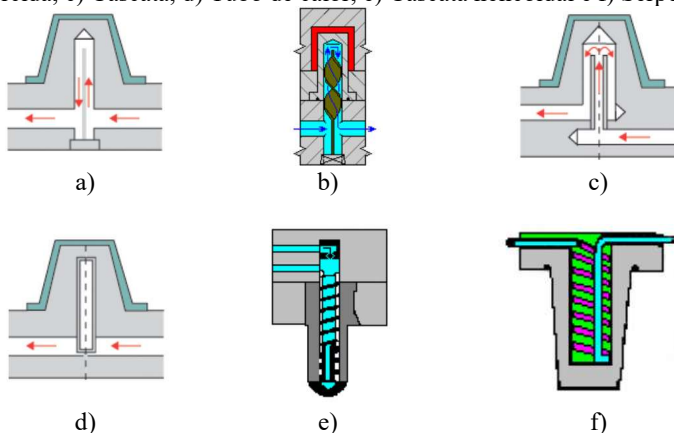
Fonte: Park e Pham (2009).

b. Sistema de refrigeração com palhetas

Com a finalidade de melhorar a troca térmica e alcançar regiões onde não é possível circuito por furação, foram desenvolvidos sistemas com insertos para melhorar a troca térmica dos moldes.

A figura 17 apresenta os principais tipos de refrigeração utilizando insertos. Dentre elas a mais utilizada, pela facilidade de manufatura e custo de fabricação são as palhetas. Para fabricação de cavidades circulares normalmente são empregados insertos com cascatas helicoidais e serpentinadas.

Figura 17 – Principais tipos de canais de refrigeração, a) Palheta, b) Palheta retorcida, c) Cascata, d) Tubo de calor, e) Cascata helicoidal e f) Serpentina.



Fonte: Brito et al. (2003), Menges e Mohren (1993) apud Dias (2008).

Eiamsa-ard e Wannissorn (2015) investigaram o emprego de cascatas e palhetas seguindo a superfície do produto e verificaram uma melhoria na homogeneidade do molde quando comparado aos circuitos tradicionais.

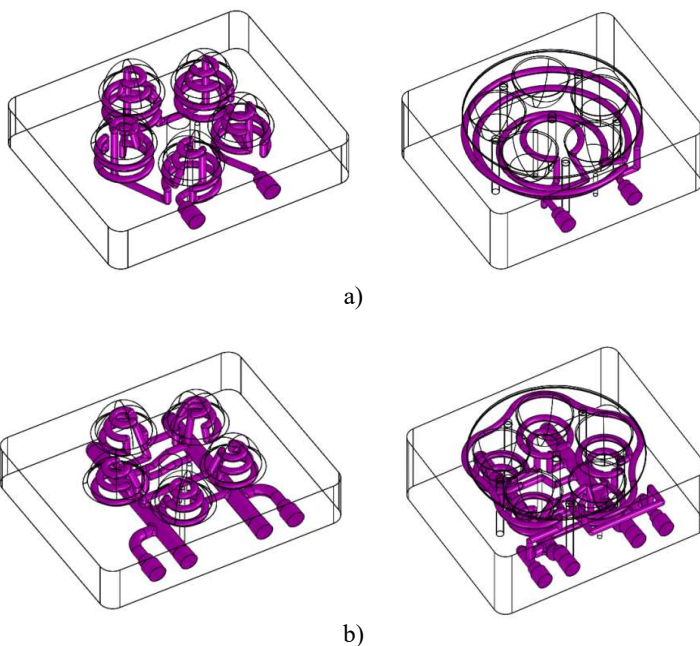
Park e Dang (2010) projetou um molde com conjuntos de palhetas seguindo a superfície do produto. Esse método permite combinar os benefícios de uma melhor transferência de calor com baixo custo de fabricação. No entanto, essa solução tem limitações para fabricação de moldes de produtos mais complexos.

c. Sistemas de refrigeração com canais complexos

O emprego de manufatura aditiva metálica para fabricação de moldes e matrizes vem possibilitando emprego de novas estratégias de refrigeração. Formatos de refrigeração seguindo a superfície do produto, denominado de canais complexos de refrigeração (*Conformal Cooling*), já mostram benefícios na qualidade do produto e aumento produtividade.

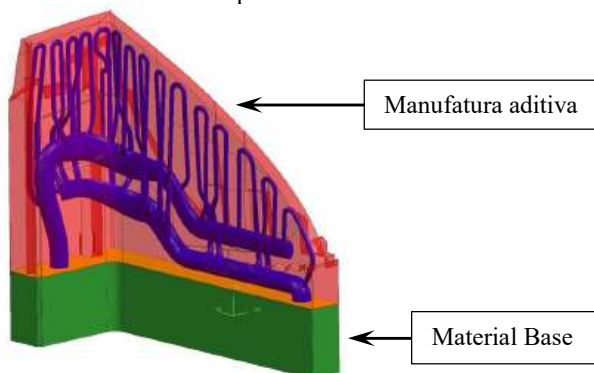
Por se tratar de um conceito recente seu conhecimento ainda não está consolidado sendo estudado. A figura 18 e 19 mostram exemplos de aplicações de canais complexos de refrigeração para moldes de injeção.

Figura 18 – Exemplo de canais complexos de refrigeração a) em série b) em paralelo.



Fonte: Marques et al. (2015).

Figura 19 - Canais complexos de refrigeração paralelos manufaturados por manufatura aditiva sobre um metal base – componente híbrido.



Fonte: René (2006).

Beard (2014) com o emprego de canais complexos de refrigeração, mesmo com poucas análises computacionais, obteve uma redução de 10% do tempo de ciclo. Com o emprego de análises de engenharias como CFD (computational fluid dynamics) e FEA (*finite-element analysis*) melhores qualidades do produto podem ser obtidas e maiores reduções do ciclo.

Os custos adicionais de fabricação do ferramental por métodos não tradicionais se pagam com redução do custo de operação gerando maiores lucros. A redução de produtos com falha em 1% adiciona 1% de receita e previne gastos com recall. Setores industriais ligados a confiabilidade como médico, automotivo e militar devem preferir o emprego de refrigeração com canais complexos. (BEARD, 2014)

Para Altaf et al. (2011) o problema de refrigeração não uniforme é recorrente mesmo com o emprego de canais complexos de refrigeração, as geometrias com secção circulares apresentam dificuldades em refrigerar quinas e cantos. Novos formatos de canais estão sendo estudados para aperfeiçoar essas limitações.

RAHIM et al. (2016) estudou a utilização de canais complexos fabricados por usinagem com secção retangular. Para a geometria de estudo, formato retangular, o empenamento reduziu em 24% em x e 54% em y com redução do tempo de ciclo em 65% quando comparado a refrigeração equivalente com secção circular. O estudo contribuiu para o

tema, no entanto não é aplicável para geometrias mais complexas e apresenta limitação para fabricação com manufatura aditiva.

Au e Yu (2007) investigaram o emprego de refrigeração complexa em formato estruturado (*lattice / scaffold structures*) obtendo melhores resultados de uniformidade térmica ao longo da geometria, que resultou em redução de contração, empenamento e tensões térmicas. No entanto, com esses tipos de canais, maiores perdas de carga são esperadas nos circuitos de refrigeração. Também é esperada uma menor resistência mecânica do conjunto devido ao maior espaço no interior do produto, sendo mais susceptível a fadiga, desgaste mecânico e térmico.

Saifullah (2007), utilizando análise térmica comparou molde para injeção de uma geometria de formato de caixa com canais de refrigeração por furação e complexos, observou-se um ganho de 20% no tempo de ciclo.

Rännar et al. (2007) utilizando canais complexos constataram redução de empenamento e tempo de ciclo em relação a refrigeração convencional e com palhetas.

Zheng et al. (2011) comparou, utilizando simulações, o emprego de canais complexos com refrigeração tradicional em um produto com geometria complexa e espessura fina. O emprego de um sistema complexo de refrigeração apresentou ganhos significativos na homogeneização da temperatura na cavidade e 68% no tempo por ciclo. Menores resultados de contração foram obtidos o que indica um processo mais preciso.

Rao et al. (2002) desenvolveram um modelo analítico para avaliar parâmetros de canais complexos de acordo com a superfície e espessura do produto, aproximando os canais de refrigeração existe um ganho de tempo de ciclo.

Li (2001) desenvolveu um modelo para gerar canais complexos. O modelo separa e identifica estruturas simples para gerar resultados individuais para construção de uma resposta final. Au et al. (2011) estudou o projeto de canais complexos para peças com geometrias complexas baseados no conceito de visibilidade de superfície e composição de poliedros. Mais tarde, Jauregui-Becker et al. (2013) projetou um modelo automático para projeto de canais complexos. Estes estudos contribuíram no desenvolvimento do tema, no entanto projetos manuais ainda são recomendados para geometrias mais complexas e com restrições.

Wang et al. (2011), Au et al. (2011) Agazzi et al. (2013) estudaram, baseados em transferência de calor, o projeto de canais complexos de refrigeração. De acordo com eles melhor uniformidade de temperatura, redução de ciclo e defeitos como empenamento são esperados quando comparados com emprego de canais tradicionais de refrigeração.

Wang et al. (2015) desenvolveram um algoritmo para gerar canais complexos em espiral seguindo uma cópia deslocada da superfície (offset). Comparando os resultados, para o mesmo produto, com estudos anteriores, melhores resultados foram obtidos.

Marques et al. (2015) estudou estratégias em série e paralelo de canais complexos. O emprego de circuitos em série apresentou melhores resultados com Re próximo a 10000, enquanto que no circuito paralelo apresentou regiões com deficiência de refrigeração, perda de carga e baixo Re .

Marin et al. (2017) também comparou estratégias de canais complexos em série e em paralelo com regiões em paralelo (circuito série-paralelo). Ao utilizar circuitos em série e paralelo apenas nas regiões mais críticas, foi possível obter uma melhor homogeneidade nas cavidades do molde, redução de tempo de ciclo e melhoria na qualidade dos produtos injetados em relação aos canais em série.

Estes estudos contribuíram no desenvolvimento e consolidação de conhecimento sobre canais complexos avaliando e reportando seus benefícios e limitações. No entanto, novos estudos utilizando estratégias com sistemas complexos de refrigeração precisam ser realizados para consolidar conceitos e aprimorar o projeto de moldes de injeção.

2.3 MANUFATURA ADITIVA (SLM)

Os processos de manufatura aditiva metálica vêm possibilitando a fabricação de componentes complexos inviáveis pelos métodos tradicionais de fabricação (MANZUR et al., 2016). Além da fabricação de componentes semiacabados e recuperação de produtos, estuda-se aplicação industrial de moldes metálicos, em diferentes materiais, com canais complexos de refrigeração fabricados por manufatura aditiva (XU et al., 2001); (DONG, 2011).

Amillotta et al., (2014) estudaram a manufatura de um molde, por manufatura aditiva metálica, com canais complexos para fundição sob pressão (*die casting*) com uma liga de zinco. Diferentemente de moldes para injeção onde os ganhos focam na redução de tempo de ciclo, nesse processo busca-se uma boa qualidade superficial do produto. Com o molde foram produzidos industrialmente mais de 2000 produtos. O molde em SLM se mostrou interessante para fabricação de pequenos lotes.

Dentre as técnicas de manufatura aditiva metálica a fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting* – SLM) vêm se destacando por fabricar produtos com propriedades mecânicas mais próximas de produtos fabricado pelas técnicas tradicionais de fabricação (MARQUES, 2014).

O emprego de SLM permite a fabricação de geometrias em diversos materiais metálicos não viáveis pelos processos tradicionais de fabricação ou a produção de pequenos lotes de produto sem a necessidade de fabricação de um ferramental (ZHANG et al., 2013).

O processo SLM é similar à outras técnicas de manufatura aditiva que fabricam camada por camada. O usuário entra com a geometria, CAD 3D, divide no programa a geometria em camadas. Gera as trajetórias para o movimento de um laser para cada uma das camadas no programa. O usuário alimenta a máquina com o pó metálico, atmosfera controla e o código gerado e o produto é fabricado camada a camada por um laser que se movimenta conforme as trajetórias programadas, a figura XX exemplifica o processo de manufatura (YADROITSEV e SMUROV, 2011);(SOUZA e ULBRICH, 2013).

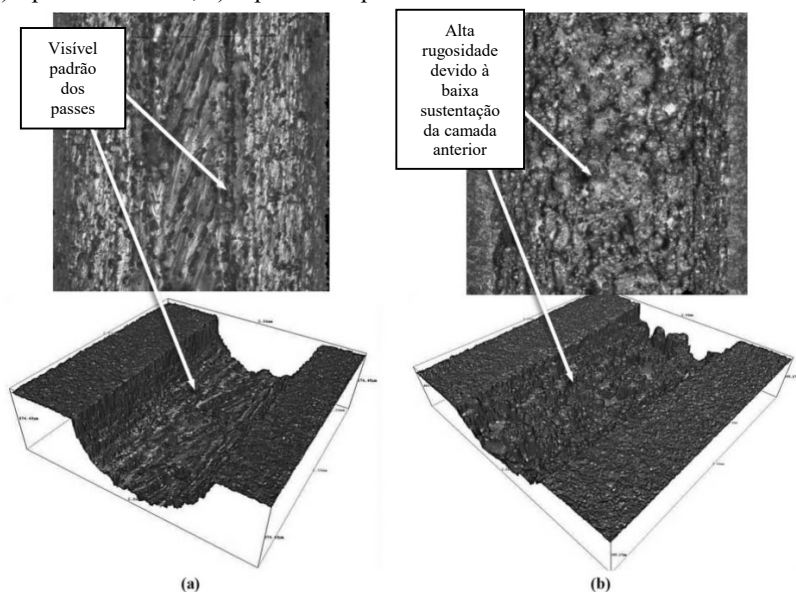
Para Yadroitsev, Bertrand e Smurov (2007) a qualidade de uma peça produzida por SLM depende da qualidade da matéria-prima (dimensão e distribuição das partículas) potência do laser, velocidade de escaneamento do laser que devem ser compatíveis com o material a ser fabricado.

Fontanella (2017) estudou a manufatura de componente híbrido, utilizando como metal base o aço inox PH13-8Mo laminado e deposição de Uddeholm Corrax® por SLM. Em ensaios mecânicos constataram que a interface de ligação apresentou integridade, rompendo na parte manufaturada por SLM.

Manzur et al. (2016) estudaram parâmetros do processo SLM que otimizam fabricação de moldes em H13. Fabricou corpos de prova com canais circulares e circulares autossustentados de 12, 4 e 8 milímetros de diâmetro. Foi observado aumento de rugosidade nas ultimas camadas depositadas e distorções dimensionais nos corpos de prova com canais de 4 e 8 milímetros. Atribuiu-se esses defeitos a falta sustentação (baixa rigidez) das camadas anteriores quando não são fundidas, não recomendando a fabricação de canais com 4 milímetros ou mais.

A figura 20 mostra a rugosidade de um tubo circular de 2 milímetros de diâmetro fabricado em H13 por SLM. Observa-se que a parte inferior, fabricado sobre camadas fundidas, apresenta menor rugosidade que a parte superior onde foi fabricado sobre camadas não fundidas.

Figura 20 - Digitalização 3D de amostra de tubo de 2mm manufaturado por SLM, a) superfície inferior, b) superfície superior.



Fonte: Manzur et al. (2016).

Atualmente a maior parte dos trabalhos encontrados na literatura que visam a fabricação de moldes por manufatura aditiva metálica, estudam por meio de ferramentas computacionais a estratégia e o projeto de canais complexos de refrigeração. Existe uma carência de informação para aplicação industrial de moldes fabricados com canais complexos por SLM e esse estudo vem a contribuir.

2.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE INJEÇÃO

A fabricação de produtos com formatos complexos e diferentes leiautes para o molde torna o projeto do ferramental bastante complexo. O emprego de ferramentas computacionais se faz necessária para auxiliar o projeto do molde e melhorar a eficiência do processo e a qualidade dos produtos. Segundo Boujelbene et al. (2004) 10% dos custos envolvidos para fabricação de um molde de injeção são provenientes de simulação e projeto.

Miranda (2012) simulou e instrumentou com sensores de temperatura e pressão dois moldes de injeção. Injetando duas ligas de polipropileno um com alta e outro com baixa densidade, obteve comportamentos de pressão semelhantes aos simulados, no entanto, com uma baixa precisão. Porém, com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelamentos matemáticos, vem sendo possível avaliar os resultados com maior precisão.

A simulação permite reduções de custo com retrabalhos e modificações do molde antes mesmo de sua fabricação. Com o programa CAE é possível analisar o processo e modifica-lo para obter ganhos no tempo de ciclo e redução de custos (SAIFULLAH, 2007).

Segundo Gou et al. (2011) com o emprego de programas CAE como Moldflow, Moldex 3D, Polyflow, é possível reduzir o risco de defeitos como marcas de afundamento e empenamento. A capacidade de acerto do sistema é dependente dos modelos matemáticos de prever comportamentos simultaneamente dos efeitos do cisalhamento, temperaturas e pressão.

Para Altaf (2011) o emprego de programas de simulação tem um importante papel de prever resultados e comparar diferentes estratégias de refrigeração a fim de melhorar o processo de injeção.

3 METODOLOGIA

O estudo teve como objetivo a otimização do processo de injeção de termoplásticos com o emprego de refrigeração complexa em moldes de injeção de plástico.

Para estudar as melhorias do processo de injeção com a implementação de sistemas de refrigeração complexo manufaturados por SLM, foi proposto uma metodologia de projeto auxiliado por programas CAE para injeção de termoplásticos.

Para conhecer os ganhos da aplicação de SLM, processo de alto custo, em moldes de injeção, propõem-se variar a refrigeração para um produto utilizando tanto técnicas convencionais de fabricação, quanto para projetos de canais complexos. Estudar as vantagens da aplicação de canais complexos visando reduções de custos, através de melhoria do tempo de ciclo e qualidade no produto injetado.

Para alcançar os objetivos, o estudo foi dividido em etapas, na primeira etapa de planejamento seguiu-se com: Projeto, Simulação CAE e Planejamento de manufatura. Em uma segunda etapa de análise dos resultados onde ocorreram as fases de manufatura, injeção e análise dos produtos injetados.

3.1 PROJETO

Para a etapa de projeto tomou-se o cuidado na escolha das geometrias e projeto em programa CAD a fim de atingir os resultados esperados com a conclusão do estudo.

Nesta etapa ocorreram a seleção da geometria do produto, projeto das cavidades do ferramental e especificação do porta moldes, design dos sistemas de injeção, extração e sistema de refrigeração.

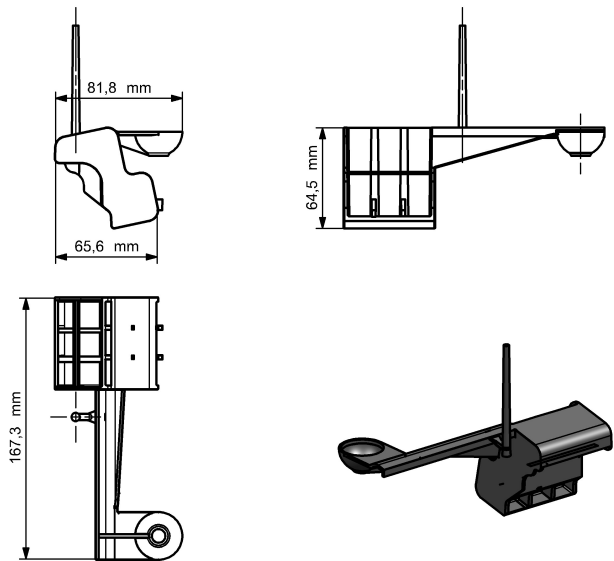
3.1.1 Seleção da geometria do produto

A figura 21 apresenta a geometria escolhida para o estudo. O produto é baseado em uma peça automotiva. O modelo CAD do produto foi fornecido pela empresa automotiva e modificado, para viabilizar estudo de refrigeração, no programa Siemens NX 9.0.

Escolheu-se esse produto por apresentar regiões com dificuldade de refrigeração, ranhuras no produto que resultam no ferramental torres esbeltas, e possibilita a aplicação de palhetas para otimização local da refrigeração. Sendo possível comparar a aplicação de canais complexos com palhetas.

Foi especificado um canal frio de alimentação do produto do tipo leque. O canal do tipo leque tem como característica todas as dimensões variáveis o que permite grande vazão e aplicação para vários polímeros. Como consequência também é possível modificar a frente de fluxo para facilitar na distribuição do material de maneira mais uniforme permitindo redução de empenamento, apresenta facilidade de manufatura e permite destacamento após injeção deixando marcas leves (DIAS, 2008). A tabela 2 apresenta os parâmetros do canal utilizado

Figura 21 - Geometria de estudo.



Fonte: Autor.

Tabela 2 - Parâmetros do canal de entrada tipo leque.

Canal de injeção Leque	Dimensão	Representação
Diâmetro (D)	4,0 mm	
Altura (H2)	2,0 mm	
Comprimento do canal (C1)	8,0 mm	
Comprimento do canal (C2)	5,0 mm	
Abertura (A)	8,0 mm	
Altura de entrada (H)	0,8 mm	

Fonte: Autor.

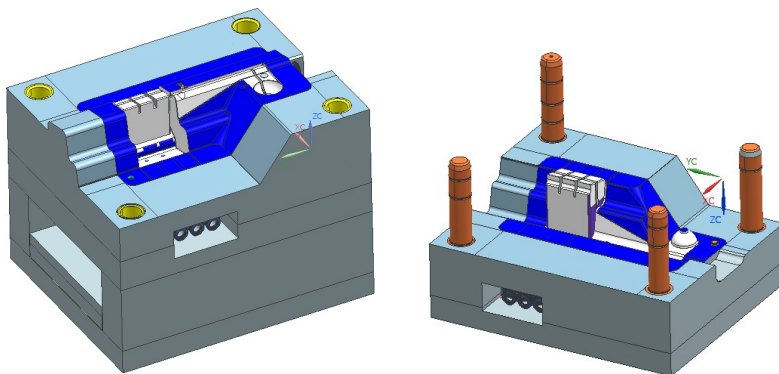
3.1.2 Projeto do molde de injeção

A partir das dimensões do produto foi selecionado o porta moldes de duas placas Polimold® 25.30249122A, confeccionado em aço 1045. Para fabricação das cavidades foram utilizados aço AISI P20 (Wnr 1.2738), fornecido pela Villares Metals, aço utilizado para fabricação de moldes de injeção com características de boa resistência ao desgaste e polibibilidade.

As cavidades foram extraídas em modelo CAD a partir de dois blocos sólidos cortados por uma linha de partição superior e outra inferior (superfícies em azul – Figura 22).

As linhas de partição foram obtidas a partir da projeção das superfícies superior e inferior do produto expandido em 2%, compensação da contração do polipropileno entre 0,8% e 2,5% (MANO, 1991). Para facilitar ajuste foi deixado uma distância de 1 milímetro entre o porta molde fixo e móvel, ficando um degrau de 0,5 milímetros entre as cavidades e o porta moldes.

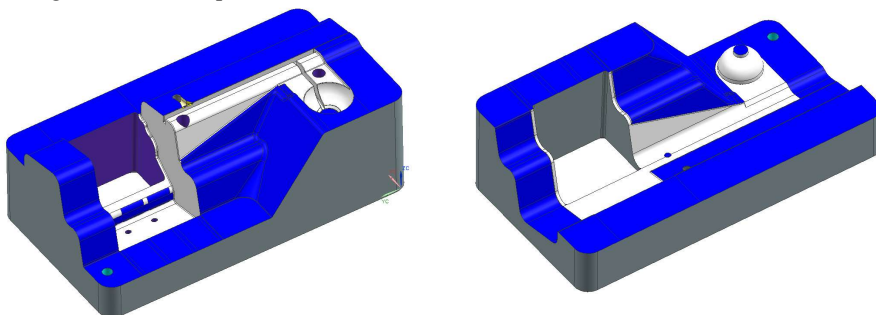
Figura 22 - Projeto CAD do porta molde para injeção do suporte automotivo.



Fonte: Autor.

A partir da geometria das cavidades foi extraído dois insertos intercambiáveis de refrigeração bem como canais para extratores e canal de injeção conforme mostra a figura 23. Posteriormente para manufatura destes canais que exigem precisão foi empregado eletroerosão (*Electro Discharge Machining* – EDM) de corte a fio.

Figura 23 – Na esquerda cavidade móvel e direita a cavidade fixa do molde.

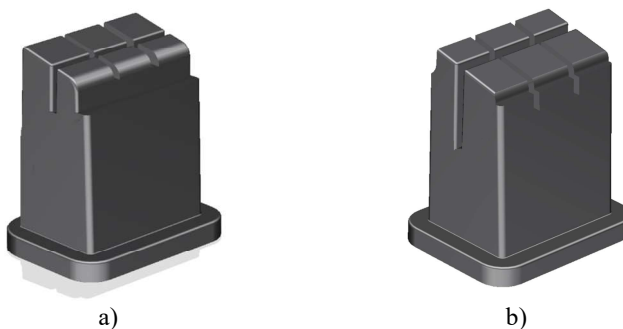


Fonte: Autor.

3.1.3 Projeto dos insertos

Para reduzir os gastos de manufatura e estudar diferentes tipos de refrigeração foram utilizados insertos intercambiáveis onde é possível com a substituição do mesmo modificar a refrigeração local. Para facilitar a montagem os insertos foram projetados com ângulos de saída de 2° e uma limitação de curso na base conforme pode-se observar na figura 24.

Figura 24 - a) Inserto inferior móvel e b) inserto fixo.



Fonte: Autor.

Utilizou-se diferentes estratégias de refrigeração a fim de comparar as técnicas de refrigeração para injeção de termoplásticos: complexa, palhetas (*baffles*) e por furação passando longe da região complexa.

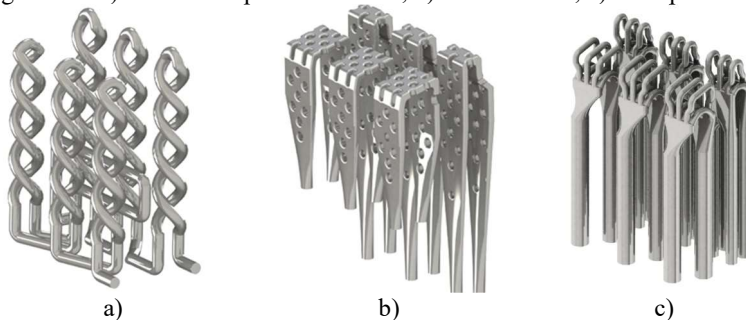
i. Sistema de refrigeração com canais complexos

Com a finalidade de avaliar diferentes projetos complexos de refrigeração foram modelados três diferentes conceitos geométricos para o canal, um primeiro utilizando conceito de canal em série em espiral, um segundo modelo utilizando o conceito de formato livre (*Free Formed Conformal Cooling – FFCC*). As duas geometrias (figura 25 a-b) foram analisadas em um estudo preliminar de Marin et al. (2017).

Os resultados mostraram que os canais complexos com formato livre, por apresentar ramificações, apresentam maior homogeneidade com melhorias na qualidade do produto e possibilitando melhoria de produtividade. No entanto tal geometria não apresentou confiabilidade suficiente para ser manufaturado por SLM correndo risco de perda de sustentação das camadas fundidas sob pó não fundido (Manzur, 2016).

Dessa forma foi proposto um terceiro projeto com canais ramificados (série-paralelo), figura 25 c e 26 a.

Figura 25 - a) Canais complexos em série, b) formato livre, c) série-paralelo.



Fonte: Autor.

Durante o projeto dos canais de refrigeração de formato livre e série-paralelo, tentou-se manter secções dos canais o mais constante possível para garantir a continuidade do fluxo e refrigeração homogênea.

ii. Sistema de refrigeração por palhetas

Foram empregadas palhetas de 9 milímetros no estudo para garantir que a vazão apresente fluxo o mais similar possível aos canais do sistema complexo de refrigeração – série-paralelo, onde empregou-se entrada e saídas com 6 milímetros de diâmetro. Dessa forma não foi

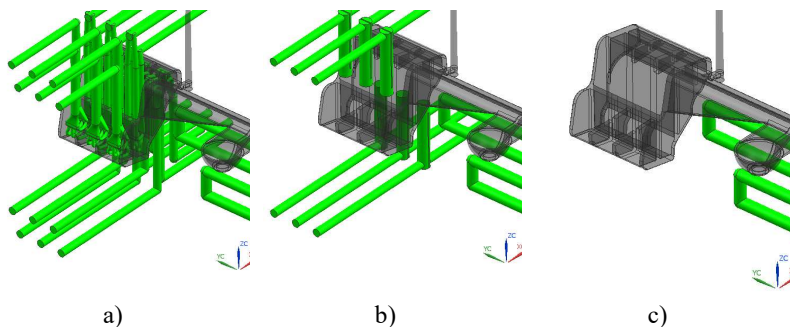
possível chegar tão próximo da superfície das torres dos insertos como os projetos de canais complexos FFCC e série-paralelo.

O sistema de refrigeração por palhetas juntamente com a geometria do produto é mostrado na figura 26-b.

iii. Sistema de refrigeração por furação

A refrigeração convencional por furação foi realizada na cavidade (porta inserto). Os projetos dos sistemas de refrigeração convencional juntamente com a geometria do produto são mostrados nas figuras 26 c.

Figura 26 - Produto com canais de refrigeração posicionados a) CC em série-paralelo CC, b) palhetas e c) furação convencional.



Fonte: Autor.

Com a utilização de insertos foi necessário modificar a entrada e saída de refrigeração. Placas para adaptar a entrada e saída de fluido nos insertos foram utilizadas, permitindo assim intercambiabilidade. Dessa forma, para modificar a refrigeração na região crítica apenas é necessário substituir o inserto e a placa suporte.

Para realizar a vedação entre o inserto e a placa suporte de refrigeração foram utilizados dois sistemas. Para garantir sentido e continuidade do fluxo, buchas de cobre tubulares com rebaixos no inserto e na placa foram utilizados, mantendo a seção interna constante. Também foi utilizada vedação com anel de borracha (O-ring) de 2,5 milímetros de diâmetro com rebaixos de canais quadrados de $2 \times 2 \text{ mm}^2$, garantindo assim pressão de vedação – figura 27.

Figura 27 - Sistema de vedação utilizado entre placa suporte de refrigeração e insertos para a) canal complexo b) palhetas.



Fonte: Autor.

Notou-se durante as etapas de projeto que os canais complexos, por seguir a superfície do produto, acabam limitando o espaço para posicionamento de extratores. Somando a necessidade de sistemas intercambiáveis, resultou em um molde com pouco espaço entre canais de refrigeração e de extratores.

3.2 SIMULAÇÃO DOS PROJETOS UTILIZANDO PROGRAMA CAE

As simulações foram realizadas no programa Sigmasoft® 5.1. O modelo CAD foi importado em formato STEP e atribuído a cada componente os seus respectivos materiais, esse processo repetiu-se por 3 vezes para simular os 3 sistemas de refrigeração. Gerou-se a malha com elementos hexaédricos garantindo ao menos 3 elementos entre paredes.

A tabela 3 apresenta o número total de elementos para cada uma das configurações de refrigeração. Nota-se que para esse tipo de elemento, mesmo para canais complexos de refrigeração, não é necessário um aumento significativo no refinamento da malha.

Tabela 3 - Numero de elementos da montagem para simulação.

Montagem	Número de elementos
Canais complexos – série-paralelo	561346
Palhetas	536571
Convencional	543210

Fonte: Autor.

Os parâmetros empregados no estudo foram escolhidos com base em resultados preliminares. Primeiramente foi rodado uma simulação

para avaliar o preenchimento do produto, determinando assim o local de ataque.

Avaliou-se primeiramente o fluxo de material durante a injeção, dessa forma foi selecionado o ponto exato de posicionamento do canal de injeção para garantir um bom encontro das frentes de fluxo e balanceamento do produto reduzindo assim possíveis defeitos como linhas de solda, empenamento e aprisionamento de bolhas de ar no produto.

Sequencialmente foi simulado, para a mesma região, o preenchimento utilizando o canal de alimentação do tipo leque e sequencialmente reduzindo o tempo de injeção.

Em uma etapa final, foi realizada 3 simulações para determinar o tempo de ciclo para cada um dos sistemas de refrigeração. Foi fixado os seguintes parâmetros: material, temperatura de refrigeração e injeção e 95% de solidificação do produto para extração.

Adicionalmente foram realizadas mais duas simulações mantendo o tempo de ciclo em 28 segundos, referente ao tempo para canais complexos, para os canais de refrigeração com palheta e convencionais por furação. Os parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na tabela na 4.

Tabela 4 – Parâmetros de processo de simulação.

Parâmetro	Descrição
Material de injeção	Braskem H 105
Material das cavidades	P20 (DIN 1.27.11)
Temperatura inicial do molde	25°C
Temperatura de injeção	240,0°C
Tempo de ciclo	28,0s*
	44,0 s**
	57,0 s***
Abertura e fechamento	5,0s
Tempo de injeção	0,4s
Tempo de recalque	2,0s
Fluido refrigerante	Água
Temperatura do fluido	25,0°C
Comutação	50% da pressão de injeção
* canais complexos; ** palhetas; *** convencionais por furação	

Fonte: Autor.

Foram analisados os resultados das simulações com 2 objetivos, avaliar possíveis defeitos no produto e estudar a melhoria de produtividade com o emprego de refrigeração complexa.

Verificou-se as temperaturas dos insertos e cavidades, contração e empenamento do produto, marcas de afundamento, regiões de acúmulo de ar, linhas de solda e cristalinidade do produto injetado.

3.3 PROCESSO DE MANUFATURA DO MOLDE DE INJEÇÃO

O planejamento de manufatura foi realizado com auxílio do programa Siemens NX 9.0, onde gerou-se os programas NC (*Numeric Control* - Controle Numérico) para fresamento e furação, e extração das geometrias para operações de eletroerosão.

Os programas NC foram simulados no próprio programa, convertidos em linguagem G e enviados por cartão para máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado).

3.3.1 Usinagem

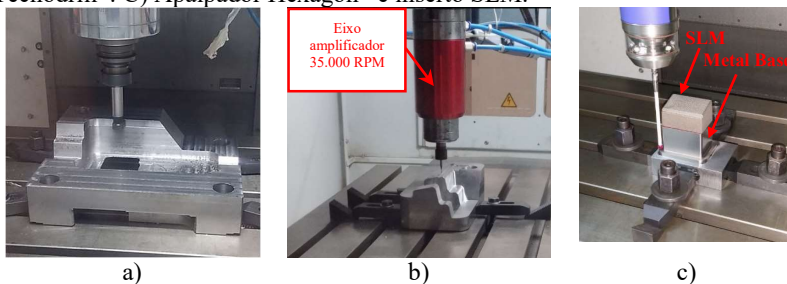
O molde foi usinado em um centro de usinagem Romi D600 com eixo árvore de 7500 RPM e comando Fanuc Oi MC. Para usinagem de alguns detalhes com ferramentas de menores como o canal de injeção, foi acoplado na CNC um fuso amplificador de rotação Tecnodrill® EletroSpindle EMT90-173522-W de 35.000 rpm – figura 28 b.

Para zeramento e posicionamento das componentes utilizou-se o apalpador infravermelho 25.41-hdr Hexagon® – Figura 28 c.

A figura 29 mostra operações de desbaste (a), e acabamento (b) nas componentes usinadas. Furos de refrigeração foram realizados utilizando brocas de aço rápido (HSS) para furação profunda com operação intermitente com retirada de cavaco.

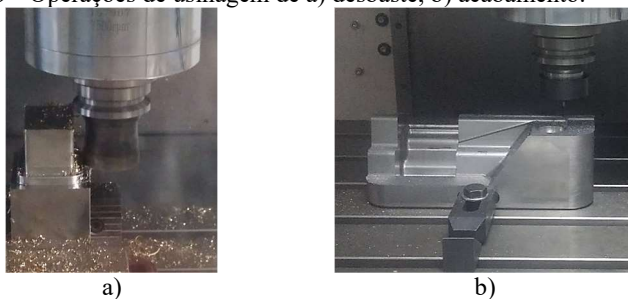
As partes do molde, sempre que possível, foram fixadas na mesa da máquina CNC para maior precisão de usinagem, operações sem necessidade de precisão dimensional como furação foram realizadas utilizando morsa visando agilidade no processo de fabricação.

Figura 28 – a) Fresamento – CNC Romi D600. b) Fuso amplificador de rotação Tecnodrill®. c) Apalpador Hexagon® e inserto SLM.



Fonte: Autor.

Figura 29 - Operações de usinagem de a) desbaste, b) acabamento.



Fonte: Autor.

3.3.2 Processo de manufatura aditiva SLM

O processo de manufatura aditiva SLM apresenta limitações quanto aos materiais empregados, não sendo possível manufatura de aços com alto teor de carbono como a série AISI P20 comumente empregada para manufatura de moldes de injeção.

Dentre os materiais disponíveis para manufatura dos insertos especificou-se o material UDDEHOLM Corrax®, um aço inoxidável endurecido por precipitação que apresenta boas propriedades mecânicas para emprego em moldes de injeção, podendo chegar a durezas de 50 HRC.

Como o processo SLM apresenta alto custo de fabricação comparado aos processos tradicionais como fresamento, optou-se por fabricar o inserto como um componente híbrido. Foi utilizando fresamento para fabricação de uma metal base para deposição por SLM apenas da parte complexa, reduzindo assim o custo de fabricação.

Para a fabricação do metal base, devido dificuldade técnica de se conseguir uma pequena quantidade de Corrax®, especificou-se um material com propriedades similares, o Villares Metals N4534QA, para evitar defeitos como trincas durante a fabricação. A tabela 5 apresenta a comparação química dos materiais utilizados.

Tabela 5 - Comparação entre aços inoxidáveis Corrax® e N4534QA.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	S	P	Zn
Corrax®	0,03	0,30	0,30	12,00	9,20	1,40	1,60	*	*	*
N4534QA	0,033	0,04	0,05	12,47	8,18	2,13	1,02	0,0013	<0,005	0,0015

Fonte: Uddeholm, 2017 e Autor.

Fontanella (2017) desenvolveu conhecimentos otimização da fabricação de componentes híbridos utilizado Corrax® e N4534QA. Os objetivos do estudo foram otimização de parâmetros para obtenção de melhores propriedades no inserto, alinhamento entre metal base e trajetória do laser e desempenho operação de eletroerosão.

Por limitação de recursos apenas uma das configurações de canais complexos de refrigeração foi fabricada. Selecionou-se a geometria com melhores resultados obtidos com simulação CAE e que viabilizaram um menor tempo de ciclo.

Tanto a geometria FFCC quanto a série-paralelo apresentaram resultados bastante similares, apresentavam vazão similar e pequenas distância dos canais até a superfície do molde. Optou-se pelo segundo projeto pois viabiliza manufatura como componente híbrido, apresentando menor custo de produção.

A tabela 6 apresenta o volume de material fabricado por SLM, volume de material fabricado pelo processo de usinagem, volume total de cada um dos insertos e quanto foi reduzido da utilização de SLM com a componente híbrida.

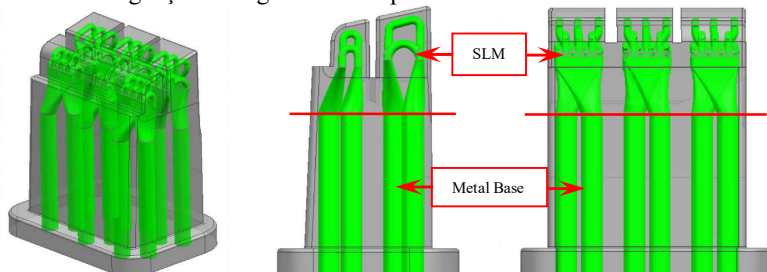
Tabela 6 - Descrição dos volumes da componente híbrida.

	Volume SLM (mm³)	Volume Usinado (mm³)	Volume total (mm³)	Redução do uso de SLM (%)
Inserto Móvel	45856,29	95271,33	141127,62	67,51
Inserto Fixo	51544,41	105208,02	156752,43	67,11

Fonte: Autor.

A figura 30 mostra o inserto fixo com os canais de refrigeração exemplificando região do metal base (manufaturado por usinagem) e de manufatura aditiva metálica SLM.

Figura 30 - Inserto fixo com representação dos canais de refrigeração série-paralelo e designação de regiões da componente híbrida.



Fonte: Autor.

Como existe uma limitação na qualidade superficial obtida pelo processo de fabricação por SLM foi necessário deixar sobremetal de 1 milímetro no metal base e na parte depositada. Assim, foi necessário preencher totalmente as ranhuras dos insertos para fabricação por SLM.

A fabricação dos insertos com canais complexos foram realizadas em uma máquina de fusão seletiva a Laser da Concept Laser M2 Cusing – figura 31.

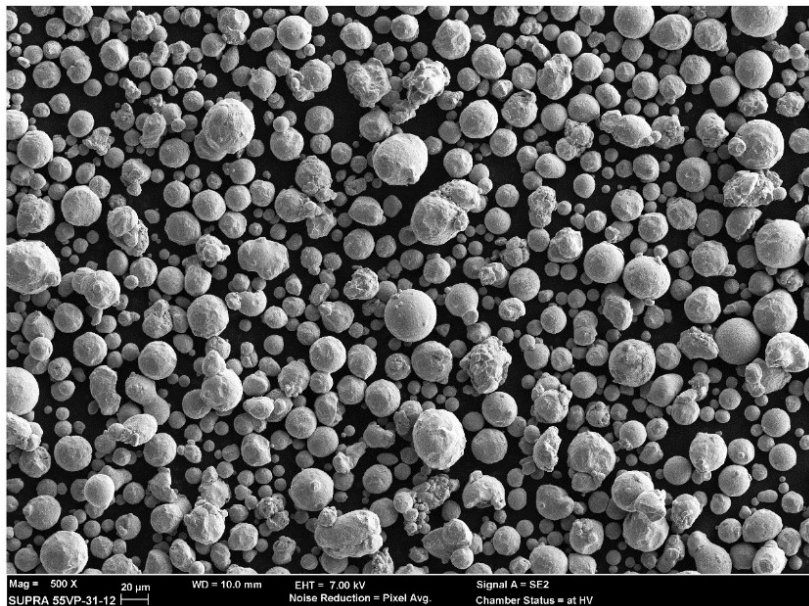
Figura 31 - Máquina de SLM Concept Laser M2 Cusing.



Fonte: Concept Laser, 2011.

A figura 32 mostra uma amostra do pó de Uddeholm Corrax[®] utilizado na manufatura dos insertos de refrigeração. O produto, fornecido pela Concept Laser, foi analisado em MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e as partículas apresentavam tamanho entre 5 μm e 50 μm .

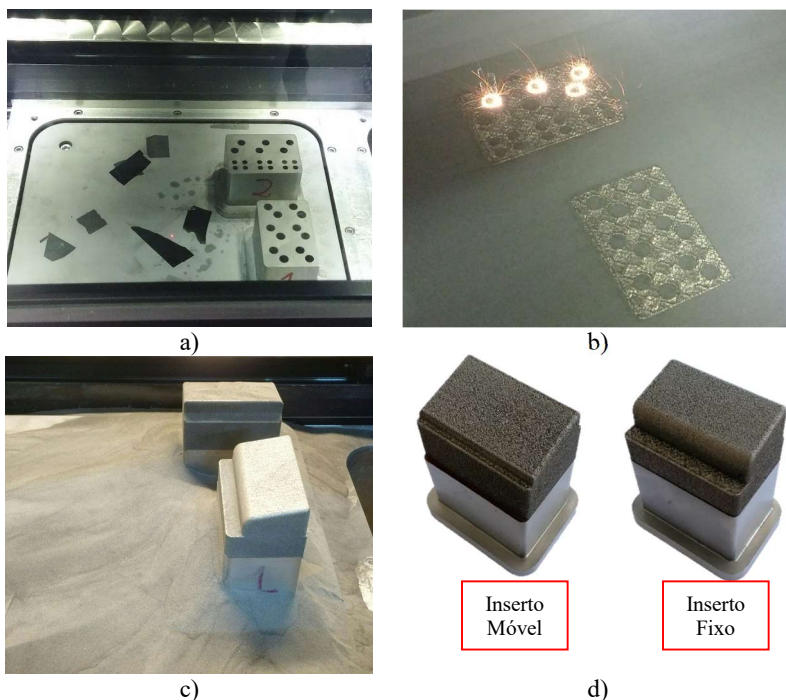
Figura 32 - Análise de pó metálico Corrax[®] para manufatura SLM, aumento de 500 vezes.



Fonte: Autor.

A figura 33 apresenta o processo de fabricação dos insertos, em (a) é possível verificar o posicionamento dos metais bases na placa de fabricação, em (b) preenchimento com pó e fusão seletiva de uma camada, em (c) o produto final e a retirada do pó não fundido e em (d) o inserto móvel e fixo em bancada.

Figura 33 - Processo de fabricação dos inserts por SLM.



Fonte: Autor.

3.3.3 Eletroerosão

Após a fabricação por SLM e usinagem de todas as componentes foram realizadas operações de desbaste e acabamento por eletroerosão das regiões onde não foi possível remover material por fresamento.

Para abrir os furos dos extratores e cortar a bucha de injeção em ângulo foi realizado um pré-furo com o equipamento de furo rápido Agie Charmilles DRILL 20.

Foi utilizada uma máquina de corte a fio Agie Charmilles CUT 20 P para furação da passagem dos extratores (ajuste H7), cortes em ângulo para o alojamento dos inserto nas cavidades do molde e na bucha de injeção além de fabricação das ranhuras nos inserts.

3.3.4 Montagem do molde e ajuste em bancada

Após fabricação de todas as componentes insertos, extratores e o fechamento do molde foi ajustado em bancada – figura 34.

Figura 34 - a) Sistema de extração do produto, b) Fechamento do molde.



a)



b)

Fonte: Autor.

3.4 INJEÇÃO DOS PRODUTOS

O processo de injeção foi realizado em uma máquina Haitian MA 2500, com refrigeração de água industrial a 26.1°C e vazão de 9 l/min. os parâmetros do processo de injeção foram os simulados no programa CAE SigmaSoft 5.1. Foram definidos os seguintes parâmetros de injeção, que se mantem constante para todos os casos para fins de estudo:

- Temperatura de injeção	240,0°C
- Tempo de ciclo	28,0s
- Abertura e fechamento	5,0s
- Tempo de injeção	0,4s
- Tempo de recalque	2,0s
- Fluido refrigerante	Água industrial.
- Pressão de comutação	50% da pressão de injeção

Para injeção utilizou-se polipropileno (PP) H 105, material de alto índice de fluidez e baixo custo fabricado pela Braskem. Como características gerais ele apresenta excelente processabilidade, elevada rigidez e ótima transparência sendo indicado para alta produtividade e

produção de produtos de paredes finas. Tais aplicações o torna amplamente utilizado para injeção de brinquedos, embalagens, utilidades domésticas, produtos de ciclos rápidos em geral (BRASKEM, 2017). As propriedades deste material são mostradas na tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades típicas do PP Braskem H105.

Características	Método	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (230° C/2,16kg)	D 1238	g/10min	40
Densidade	D 792	g/cm ³	0,905
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	1700
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	Mpa	39
Alongamento no Escoamento	D 638	%	8
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	-	102
Resistência ao Impacto Izod a 23°C	D 256	J/m	25
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa	D 648	° C	110
Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 MPa	D 648	° C	59
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	D 1525	° C	154
Opacidade	D 1003	%	34

Fonte: Braskem (2017).

A tabela 8 apresenta os parâmetros recomendados para processamento de H105 da Braskem.

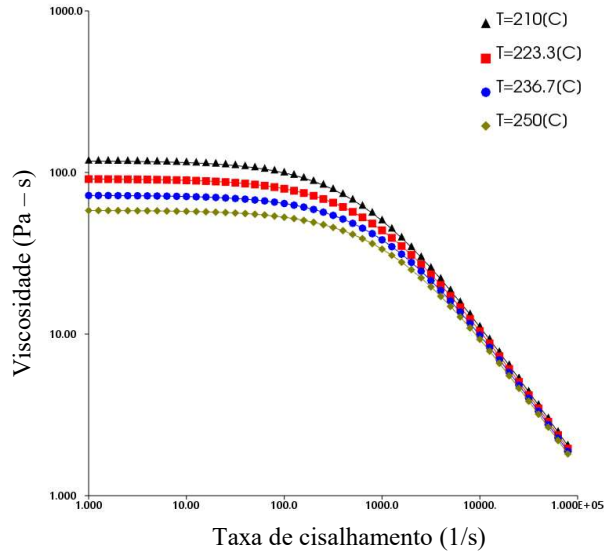
O PP apresenta durante processamento comportamento elastosplástico termo-fluído altamente não linear, de difícil previsibilidade, sendo necessário testes empíricos para determinação de suas propriedades reológicas. (TSAI, 2015). A figura 35 e 36 apresentam as curvas de viscosidade pela temperatura pelo cisalhamento e volume específico pela temperatura pela pressão respectivamente.

Tabela 8 – Parâmetros recomendados para processamento do Braskem H105.

Característica	Unidade	Valores
Janela de temperatura de processamento	° C	210 - 250
Temperatura máxima	° C	290
Temperatura do molde	° C	20 - 60
Temperatura de ejeção	° C	110

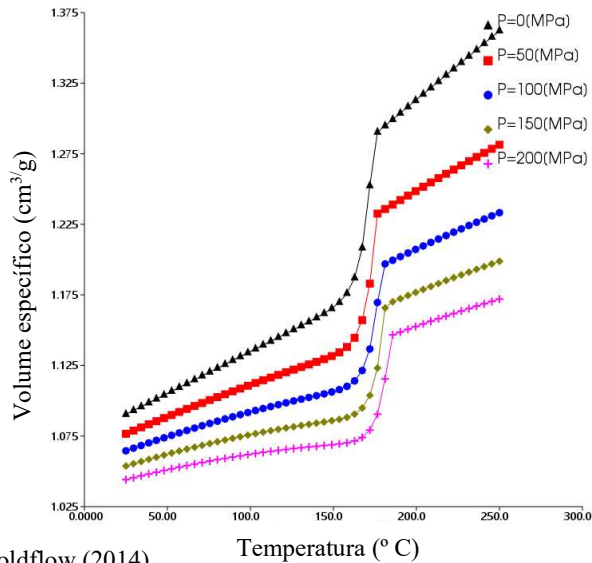
Fonte: Moldflow (2014).

Figura 35 - Viscosidade vs. temperatura vs. cisalhamento.



Fonte: Moldflow (2014).

Figura 36 - Volume específico vs. Temperatura vs. pressão.



Fonte: Moldflow (2014).

Foram realizadas 3 sequências de injeções, uma com refrigeração convencional, outra com refrigeração com palhetas e uma terceira utilizando os insertos *com* canais complexos em série-paralelo. Foi utilizando sempre os mesmos parâmetros na injetora e o mesmo tempo de ciclo (28 segundos).

Durante o processo de injeção as temperaturas foram mensuradas utilizando um termômetro digital sem contato KKmoon GM300, figura 37, a aproximadamente 300 mm de distância no final de cada ciclo de injeção. Os dados de temperatura foram coletados na região indicada pela seta na figura 37.

Figura 37 - Medição com termômetro infravermelho.



Fonte: Autor.

3.5 INSPEÇÃO DOS PRODUTOS

Uma semana após injeção, os produtos foram inspecionados para avaliar distorções dimensionais em relação ao CAD. Foram utilizados os sistemas de medição por contato com máquina de medir por coordenada (MMC) e inspeção sem contato com sensor ótico.

A avaliação com contato foi utilizada para medir com maior precisão e de forma quantitativa as distorções no produto injetado. A inspeção sem contato foi utilizada para comparar os resultados reais com o simulado pelo programa CAE.

3.5.1 Inspeção dos produtos injetados com contato

Para avaliar diferença na qualidade do produto injetado com os sistemas de refrigeração propostos foi utilizado uma máquina de medir por coordenadas (MMC) DEA 2204 (Figura 38 a) para quantificar

algumas dimensões críticas e mensurar distorções e empenamento do produto injetado.

Mantendo o tempo de ciclo em 28 segundos, não foi possível tirar mais de 16 produtos com refrigeração com palhetas e 4 com refrigeração tradicional por furação. Foram selecionados os produtos mostrados na tabela 9 para medição por contato.

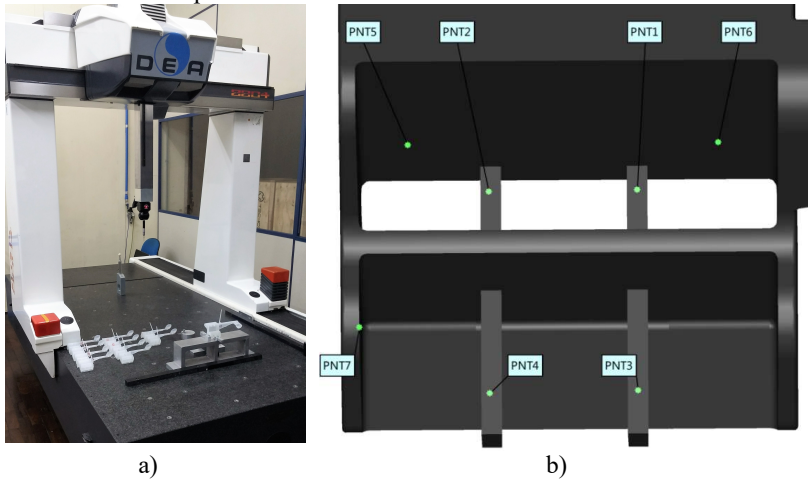
Tabela 9 - Produtos inspecionados com medição com contato.

Canais complexos	1	3	8	15	25
Palhetas	1	3	8	15	-
Convencional	1	3	-	-	-

Fonte: Autor.

Os produtos foram avaliados 7 dias após o processo de injeção, em ambiente controlado com temperatura média de 20,7°C e 44% de umidade. Os produtos foram posicionados um a um em um dispositivo de medição e avaliados com uma réplica. Para garantir a medição foi programado uma rotina de zeramento no programa PC DIMS, com 7 pontos a partir da geometria do CAD (figura 38 b).

Figura 38 – a) Máquina de medir por coordenadas DEA 2204. b) Ponto de referenciamento no produto.

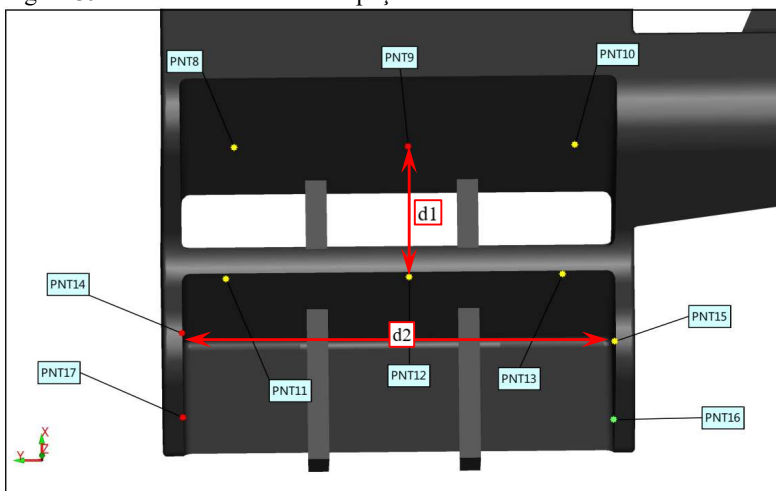


Fonte: Autor.

Foram mensurados 10 pontos para avaliar as distorções do produto com o projetado em CAD pelo programa. Os pontos de medição foram escolhidos para realizar dois tipos de medições.

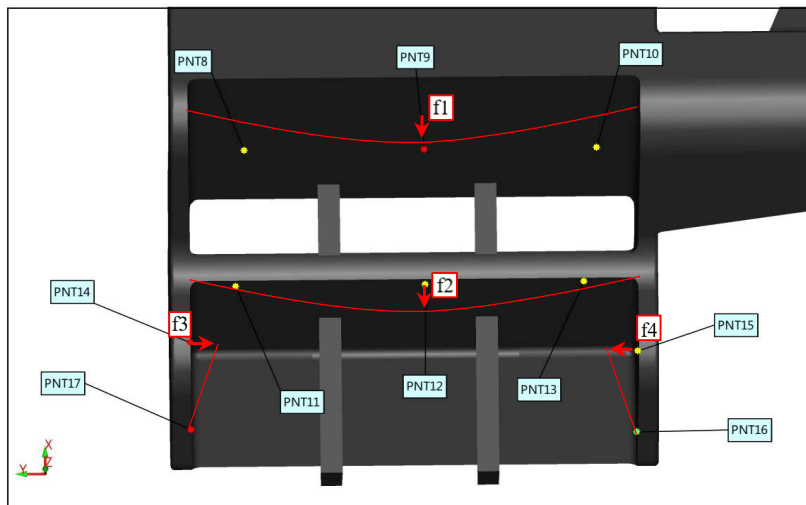
O primeiro mostrado na figura 39 é a avaliação da distância entre duas faces em pontos específicos. A segunda medição, figura 40, avalia a direção e magnitude da distorção em cada face em x para os pontos 14-17 e 15-16 e em y para os pontos 8-9-10 e 11-12-13. Com essas duas avaliações é possível mensurar a variação das deformações com os diferentes sistemas de refrigeração.

Figura 39 - Medidas d1 e d2 na inspeção com MMC.



Fonte: Autor.

Figura 40 - Medidas f1, f2, f3 e f4 na inspeção com MMC.



Fonte: Autor.

3.5.2 Inspeção dos produtos injetados sem contato

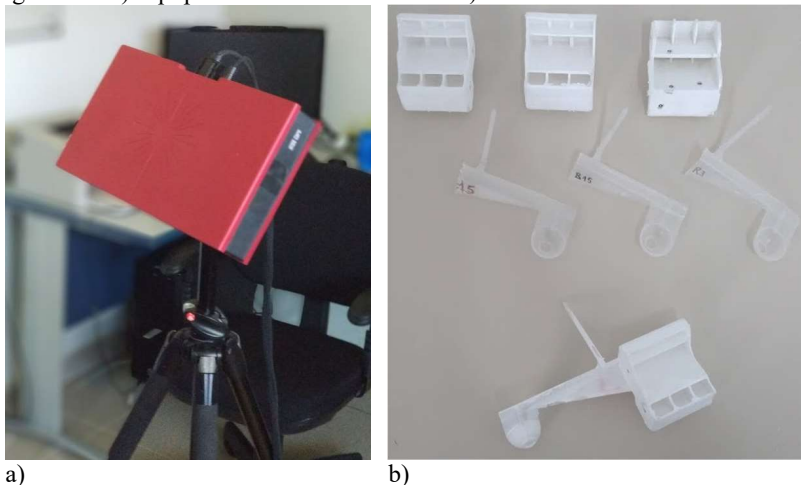
Foi realizada medição tridimensional de alguns dos produtos injetados com o sensor ótico ATOS Core 300, figura 41 a. Selecionou-se os produtos injetados com canais complexos, ciclo 15, palhetas ciclo 15 e sem refrigeração ciclo 3.

Para facilitar a digitalização dos produtos, foram cortadas a região de interesse para análise. Um quarto produto foi selecionado, 25º ciclo com canais complexos, e digitalizado na íntegra.

Como o material injetado é translúcido foi necessário recobri-lo com um revelador não aquoso. A figura 41 b apresenta os produtos recobertos, prontos para análise.

O programa utilizado para realizar o escaneamento e comparação com o modelo CAD foi o ATOS Professional 2017 e a comparação foi realizada utilizando técnica de melhor ajuste (*best fit*).

Figura 41 - a) Equipamento ATOS Core 300. b) Geometrias analisadas.



Fonte: Autor.

3.6 ANÁLISE DSC

Foi realizado teste de Calorimetria Exploratória Diferencial (Differential Scanning Calorimetry - DSC) para avaliar a cristalinidade dos produtos obtidos no processo de injeção.

Foram selecionadas para as análises a 15ª amostra da configuração de canais complexo e com palhetas e a 4ª amostra com refrigeração convencional por furação.

O teste foi realizado em um equipamento TA Instruments DSC Q20 utilizando amostras de 10 gramas recortadas na região central entre os insertos.

Foram realizados dois ciclos de aquecimento de 25° C até 300° C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. O resfriamento entre o 1º e o 2º ciclo foi realizado com uma taxa de (provavelmente) 80°C/min. Os ensaios foram realizados em uma atmosfera de N₂ com vazão de 40ml/min, parâmetros recomendados para evitar umidade sem ruídos para os resultados.

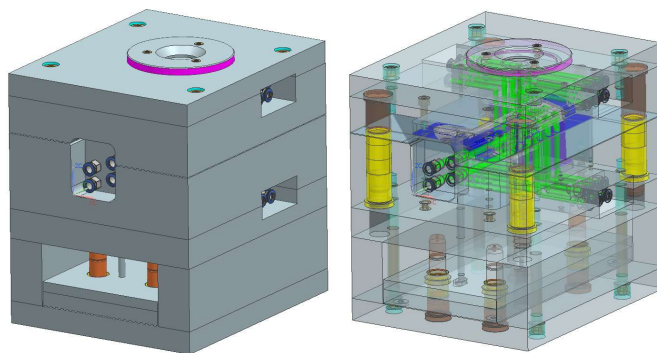
Para análise dos resultados foi utilizado o software Origin 8.0 para calcular as entalpias. O valor obtido integrando a área da curva foi comparado com o valor tabelado para o polipropileno, obtendo o grau de cristalização de amostras injetadas com os diferentes moldes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROJETO E SIMULAÇÃO

A Figura 42 apresenta o projeto do porta moldes com os sistemas de extração, refrigeração com canais complexos de injeção.

Figura 42 - Projeto do molde de injeção configuração com canais complexos de refrigeração.



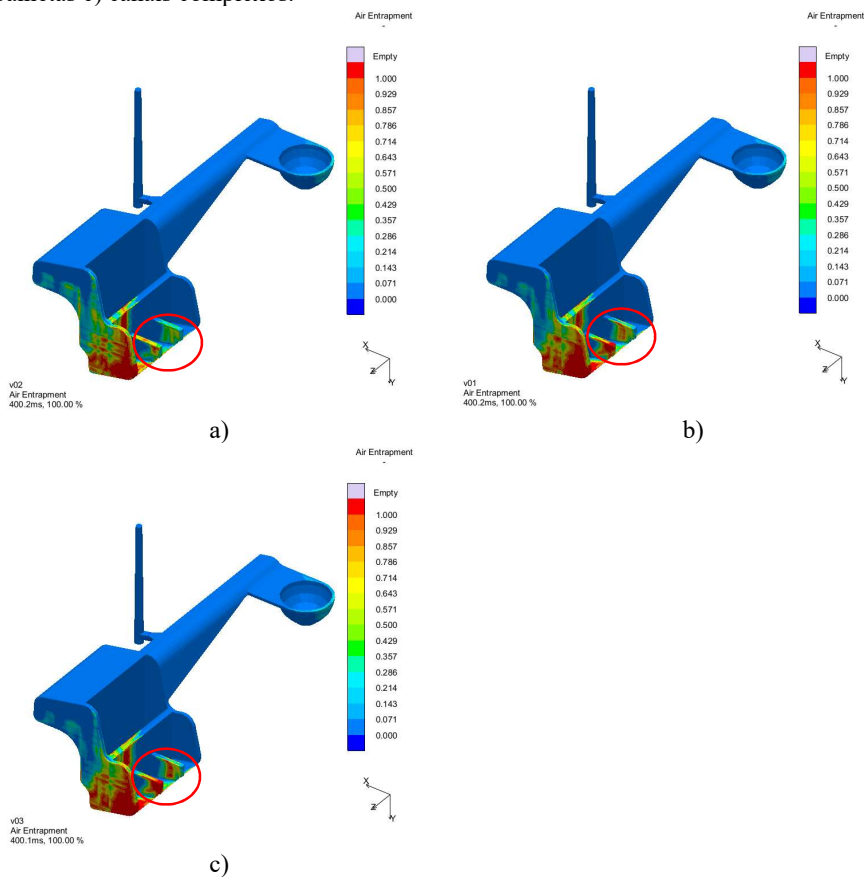
Fonte: Autor.

4.1.1 Escolha do ponto de injeção

A partir dos resultados de simulação CAE definiu-se a posição do canal de injeção do tipo leque, 18 mm deslocado para direita dos insertos, posição escolhida para balanceado do preenchimento do produto. Resultados para o preenchimento podem ser encontrados no Apêndice II.

A figura 43 apresenta o resultado para o aprisionamento de ar. Decorrente do uso da mesma geometria e parâmetros de processo obteve-se uma similaridade entre as regiões propensas ao aprisionamento. No entanto, verifica-se que para o projeto com canais complexos, existe uma redução no aprisionamento do ar nas ranhuras em contato com os insertos. Essa redução pode ter sido proveniente de uma solidificação mais rápida com menor contração do PP.

Figura 43 - Aprisionamento de ar com refrigeração a) regular por furação b) palhetas c) canais complexos.

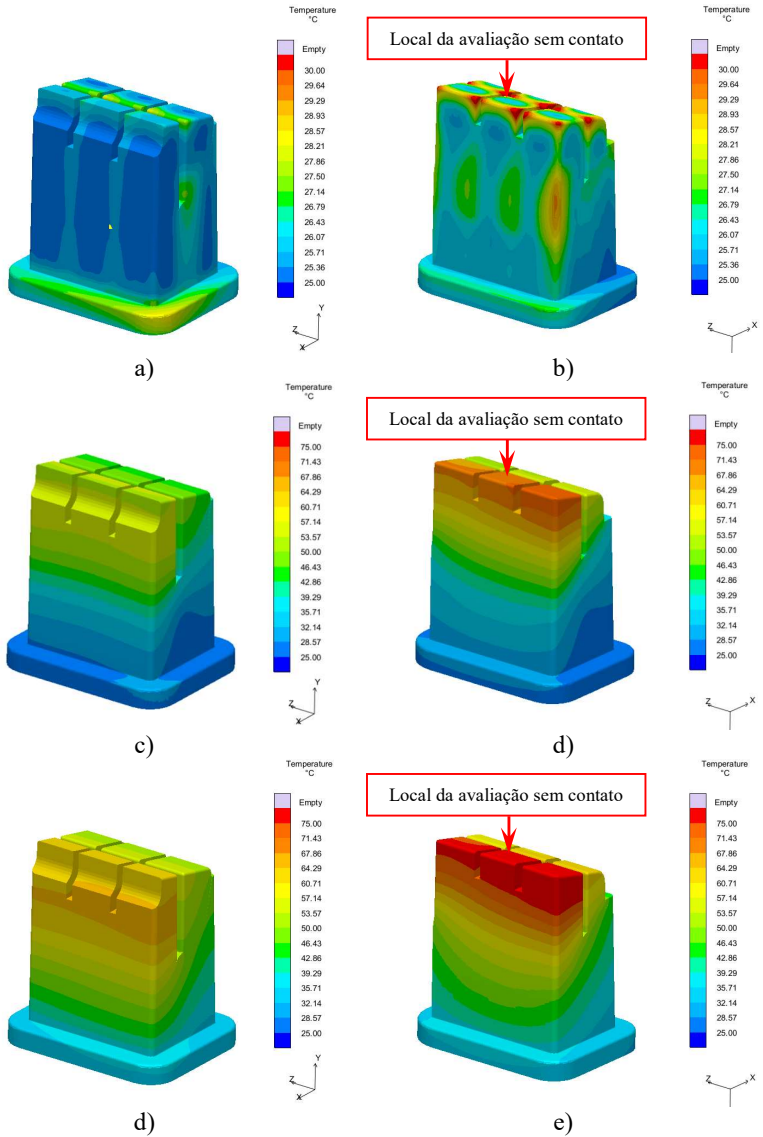


Fonte: Autor.

4.1.2 Análise de térmica

Na figura 44 observa-se que para os canais com refrigeração complexa, para melhor visualização do padrão de temperaturas, a escala foi alterada, reduzindo de 75 para 30°C uma mudança bastante significativa para homogeneidade da superfície para um mesmo tempo de ciclo.

Figura 44 - Temperatura dos insertos a) móvel canais complexos, b) fixo canais complexos, c) móvel com palhetas, d) fixo com palhetas, e) móvel convencional, f) fixo convencional.



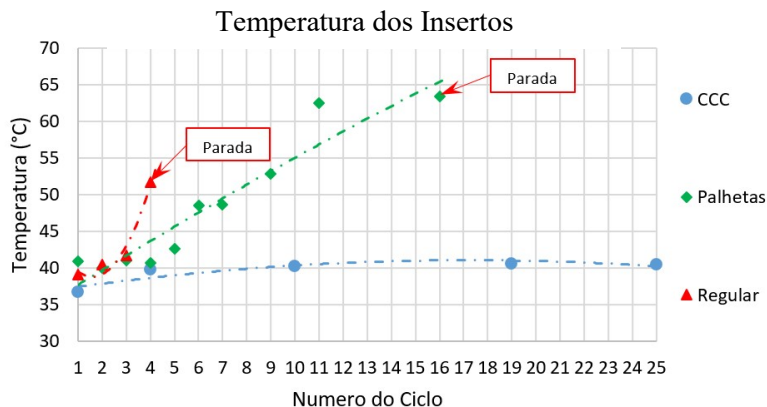
Fonte: Autor.

A figura 45 apresenta os resultados obtidos com medição sem contato. Observa-se que a temperatura apresentou similaridade com os resultados observados nas regiões indicadas pelas setas na figura 44, principalmente para as melhores condições de refrigeração. Na figura também estão plotados uma linha de tendências.

Observando o gráfico fica evidente que sem refrigeração no inserto (dados em vermelho) existe uma tendência de rápida elevação de temperatura para o tempo de ciclo de 28 segundos. Ao utilizar palhetas, a temperatura também apresenta tendência de alta só que com menor intensidade. O aumento de temperatura está relacionado com a inviabilidade de injeção de produtos e interrupções no ciclo.

Atribui-se interrupção do processo o aumento da temperatura nos insertos, que causaram distorções no produto injetado e fixação na cavidade durante o processo. Estão indicados os pontos de parada de cada um dos três processos na figura 45.

Figura 45 - Temperatura aferida com laser nos insertos conforme o ciclo de injeção.



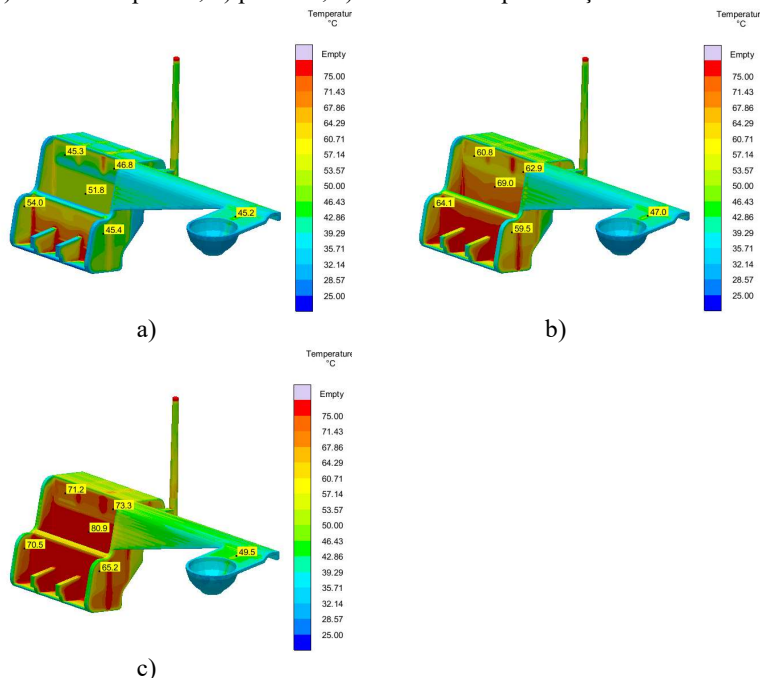
Fonte: Autor.

No apêndice II são apresentados os resultados das simulações CAE para os tempos de ciclo de 44 segundos e 57 segundos para os moldes com refrigeração tradicional por furação e tradicional com palhetas respectivamente. Comparando com os resultados obtidos para a mesma configuração observou-se que o intervalo entre a maior e menor temperatura reduziu, o que beneficia a qualidade do produto em razão do processo produtivo.

Verificou-se com as simulações que mesmo para um maior tempo de ciclo (44 segundos e 57 segundos respectivamente aos insertos com palheta e refrigeração convencional por furacão), as temperaturas máximas (ficaram próximas de 55°C) e a homogeneidade não foram semelhantes aos resultados obtidos com canais complexos. O gradiente ficou próximo dos 30 graus, enquanto que para os canais complexos de refrigeração próximo de 5 graus, aproximadamente 600% menor.

A figura 46 apresenta o resultado da simulação para a temperatura do produto em regime permanente, tempo de ciclo de 28 segundos. Verifica-se que existe uma relação da temperatura dos insertos com a temperatura dos produtos durante a extração.

Figura 46 - Temperatura do produto ao final do ciclo de injeção de 28 segundos com a) canais complexos, b) palhetas, c) convencional por furacão.



Fonte: Autor.

Pode-se inferir que é possível aumentar a produtividade e qualidade do produto com a escolha mais adequada dos canais de refrigeração. O emprego de manufatura aditiva para fabricação de moldes

com canais complexos de refrigeração corretamente dimensionados, se mostra bastante eficiente para isso.

Um dos problemas de partes do molde com altas temperaturas é proporcionar diferentes tempos de solidificação de produtos, gerando distorções e tensões que podem além de comprometer a qualidade do produto final gerar problemas de processo.

A figura 47 apresenta a aderência de um produto no molde – lado fixo, ele aconteceu após o 4º ciclo de com refrigeração convencional e 16º ciclo com palhetas. O autor acredita que a alta temperatura dos inserts e contração do PP foram fatores que influenciaram na ocorrência desse problema.

Figura 47 - Produto preso no lado fixo devido ao gradiente de temperatura no molde.



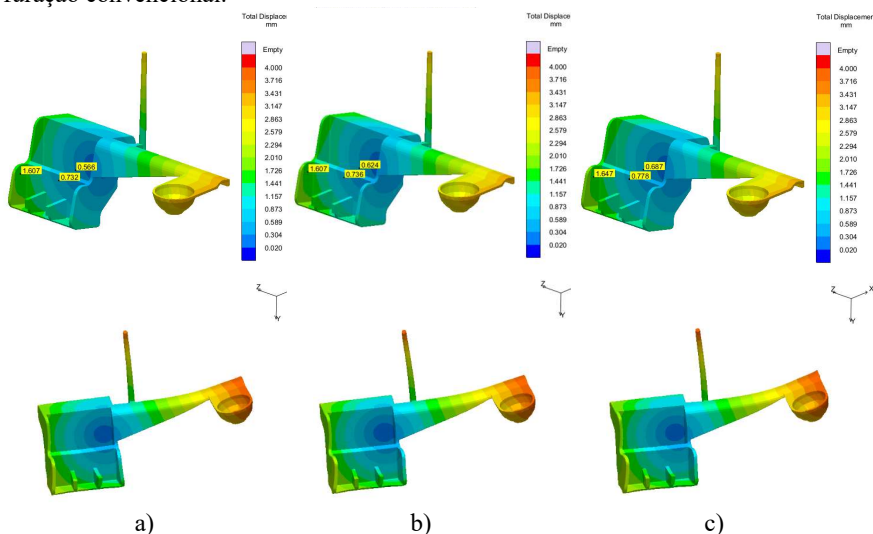
Fonte: Autor.

4.2 CONTRAÇÃO E EMPENAMENTO

A figura 48 apresenta os resultados das simulações da contração e empenamento dos produtos, 30 minutos após extração, no programa CAE. Na parte superior, são mostrados os resultados da deformação e

alguns pontos comparativos em relação ao CAD, observa-se que existe diferença não significativa entre os modelos. Na parte inferior é mostrado as distorções do produto com amplificação de 10x. Observando os resultados obtidos no programa CAE, não é possível verificar significativa diferença entre os produtos injetados com refrigeração canais complexos de refrigeração e palhetas.

Figura 48 - Distorção final do produto a) canais complexos, b) palhetas e c) furação convencional.



Fonte: Autor.

Os gráficos mostrados nas figuras 49 e 50 mostram a distância entre dois pontos medidos em uma máquina de medir por coordenadas. A linha em vermelho mostra o valor nominal do CAD.

A avaliação do produto uma semana depois mostrou que a distância entre os pontos 9 e 12 para os canais complexos apresentaram uma variação muito pequena enquanto que para os inserts com palhetas chegou a 7,25% superior no ciclo 15. A distância entre os pontos 14 e 15 também foram mais próximas do modelo CAD para os inserts com complexos de refrigeração onde a deformação foi 1,5% superior e com palhetas (ciclos 15) 1,1% superior ao terceiro ciclo com refrigeração convencional por furação.

Figura 49 - Distância entre os pontos 9 e 12 do produto medidos com MMC.

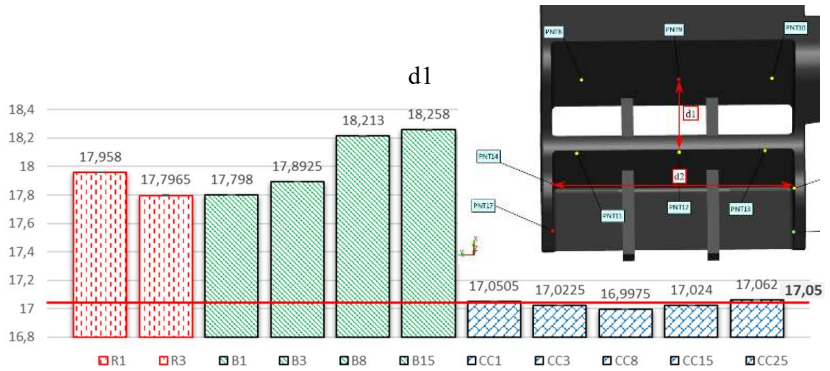
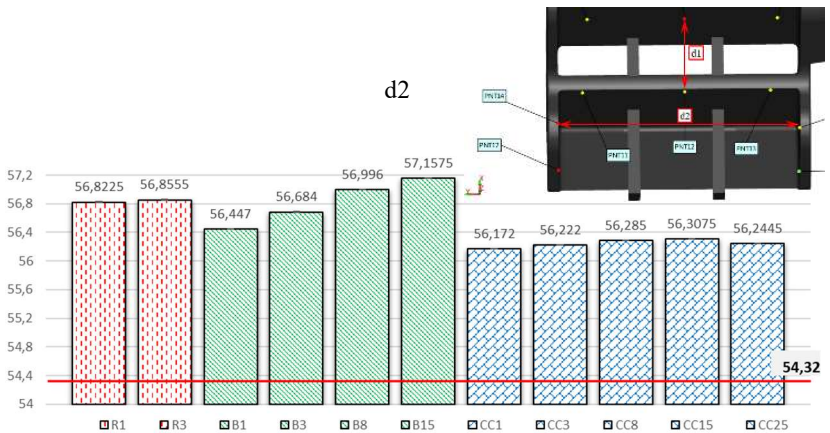


Figura 50 - Distância entre os pontos 14 e 15 do produto medidos com MMC.



Analisando as respostas de deformação de f1, figura 51, verifica-se pouca variação para as três refrigerações, sendo ligeiramente maior para os inserts com refrigeração complexa.

Analisando os resultados obtidos na figura 52 para distorção f2 é possível notar que a refrigeração influenciou no sentido do empenamento do produto, sendo para fora para os inserts mais quentes e para dentro para os inserts com refrigeração complexa. Pode-se relacionar o sentido de deformação com a magnitude das deformações de f3 e f4. Para as

paredes com f3 e f4 mais deformadas, para fora, existe uma maior tendência de f2 estar deformado para o lado de fora.

Figura 51 - Distância em x entre os pontos 8 e 10 em relação ao ponto 9 medidos com MMC.

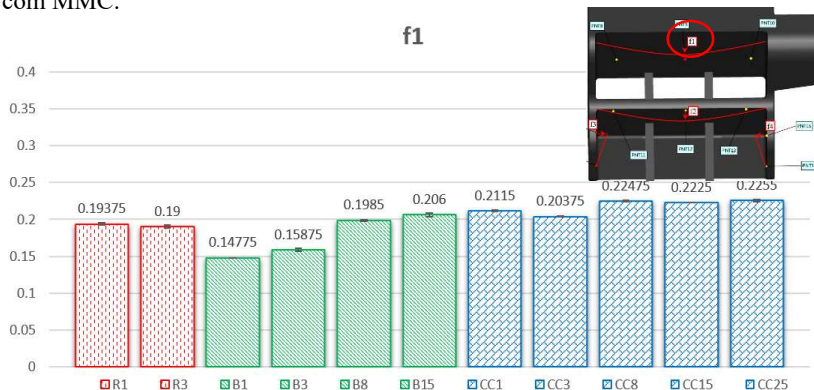
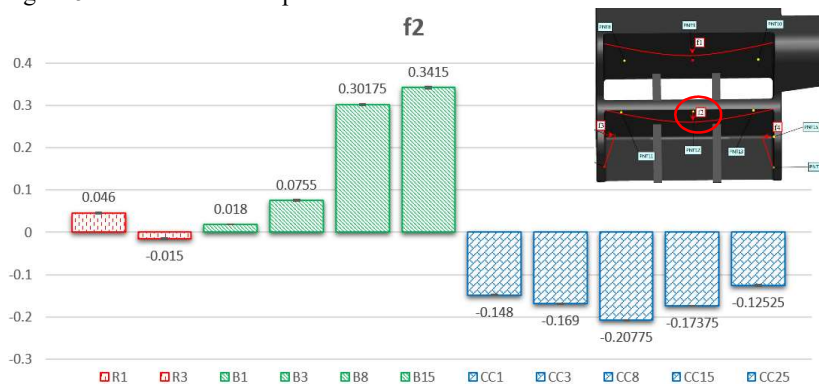


Figura 52 - Distância f2 do produto medidos com MMC.



Ao analisar f3 e f4 observou-se que os canais complexos de refrigeração tiveram um menor desvio, na média 62,15% em relação a refrigeração convencional por furação e 56,72% a com palhetas, o que indica, desconsiderando o efeito da contração, menor empenamento do produto com canais complexos de refrigeração.

Verifica-se que existe uma maior uniformidade no valor das distorções, indicador de processo mais estável com canais complexos de refrigeração. Pode-se atribuir uma maior variação nas distorções com

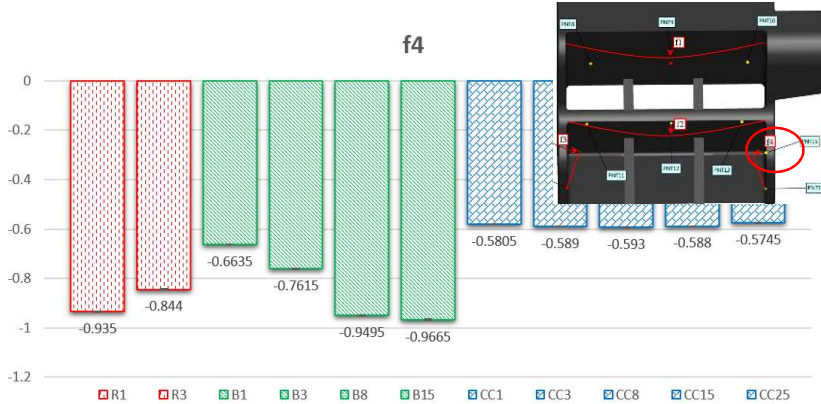
insertos de refrigeração tradicionais ao aumento da temperatura do molde em algumas regiões. O aumento do gradiente de temperatura no molde resulta em uma solidificação com tensões não uniformes e maiores distorções no produto.

Figura 53 - Distância f3 do produto medidos com MMC.



Fonte: Autor.

Figura 54 – Distância f4 do produto medidos com MMC.

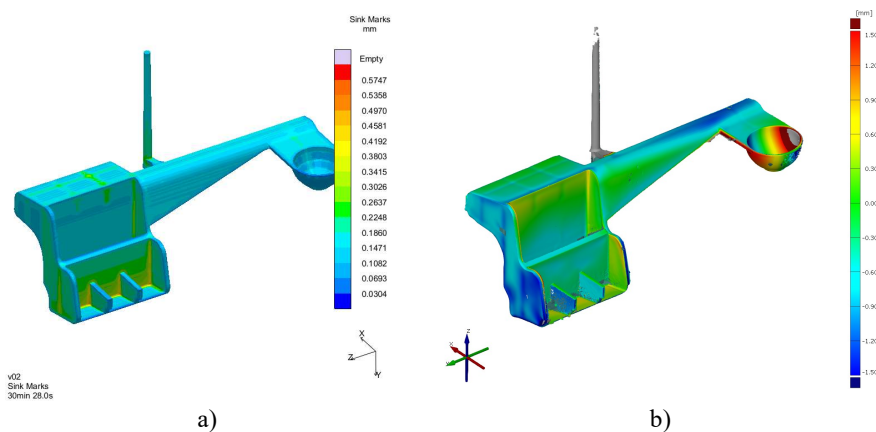


Fonte: Autor.

Foi avaliado através da simulação com programa CAE as marcas de afundamento (*Sink Marks*), a figura 55 apresenta os resultados para o molde com canais complexos, comparando com o produto digitalizado mostrado em (b) verifica-se a acuidade da simulação em prever as regiões de afundamento.

Salienta-se que não houve significativa variação nas marcas de afundamentos para os três sistemas de refrigeração. Atribui-se que a influência geométrica, regiões de acúmulo de massa quente, resultou em contrações similares independentemente da refrigeração. Resultados similares foram obtidos também para linhas de solda, nos produtos reais não foram identificados marcas de junção fria ou linhas de solda. Estes parâmetros são dependentes do molde / geometria e condições de injeção.

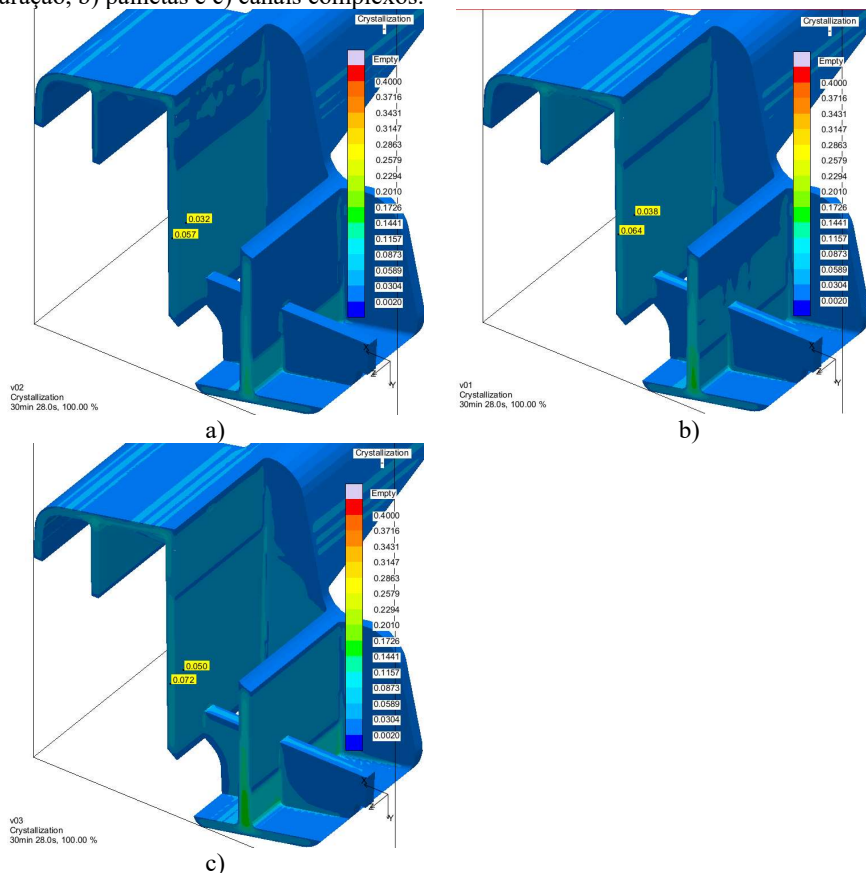
Figura 55 - a) Marcas de afundamento previstas pela simulação, b) digitalização do produto injetado do ciclo 25 com canais complexos de refrigeração.



Fonte: Autor.

A figura 56 apresenta os resultados do CAE para cristalização dos produtos, observa-se que o grau de cristalinidade é menor com canais complexos de refrigeração (maior taxa de refrigeração) que para com palhetas e que é menor para refrigeração por furação convencional (menor taxa de refrigeração).

Figura 56 - Percentual de cristalização previsto em simulação a) regular por furação, b) palhetas e c) canais complexos.



Fonte: Autor.

Os resultados com as curvas obtidas no teste de DSC são mostrados no apêndice III, os resultados obtidos para grau de cristalinidade foram respectivamente 8,12%, 8,68% e 8,40% para as amostras com canais complexos, palhetas e refrigeração convencional por furação. Os resultados comparados a simulação CAE apresentaram divergências estando entre 3,8% e 7,2% - figura 56.

Não foi significativa a mudança de cristalinidade entre os produtos injetados com palhetas ou canais complexos, possivelmente devido a espessura do produto (paredes grossas). Uma outra possível justificativa é o tempo com que foi mensurado as amostras,

aproximadamente dois meses após a injeção, onde o polipropileno continuou o processo de cristalização.

O polipropileno (PP) é um dos materiais mais susceptíveis à cristalização durante cisalhamento, ao percorrer caminhos estreitos dentro da matriz o material sofre deformações acentuadas de cisalhamento. Durante o preenchimento as cadeias de PP se orientam no sentido do fluxo que sob alto cisalhamento orientam-se praticamente todas formando um cristal induzido com vários pontos de nucleação que favorecem a formação de um cristalito (MANRICH, 2005).

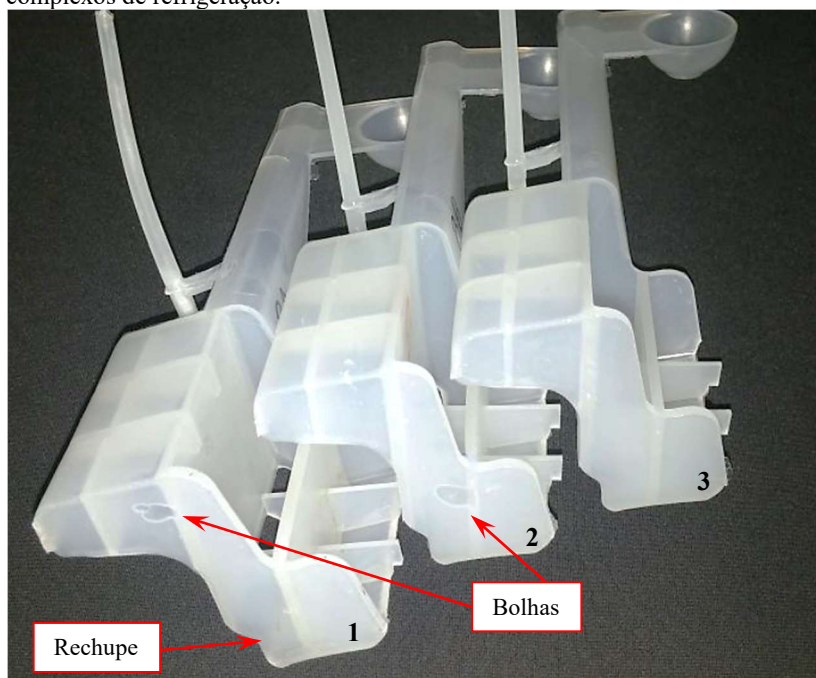
Constata-se que para solidificações com maior taxa de remoção de calor ocorre um menor grau de cristalinidade, atribui-se a isso ao processo de solidificação de termoplásticos que ocorre em duas etapas, uma primeira com predominância de nucleação heterogênea e uma segunda com domínio de crescimento lamelar (formação de cristalitos) ocorrendo devido à restrição de espaços ocupados na primeira etapa (CANEVAROLO, 2010).

A figura 57 apresenta uma foto com 3 produtos injetados (1) com refrigeração convencional por furação, (2) palhetas e (3) com canais complexos. Observa-se que para os produtos com refrigeração tradicional ocorreu a presença de bolhas na região prevista pela simulação CAE – Figura 43.

Especula-se que a principal causa para o aparecimento da bolha está relacionada à alta contração do PP durante a solidificação, como nos moldes mais quentes (palheta e convencional) o interior do material demora mais para solidificar acaba formando uma bolha de vácuo, interior ao produto. Como a taxa de refrigeração para os canais complexos é muito alta, provavelmente, a solidificação no centro é rápida o suficiente para evitar o surgimento da bolha. Uma forma para corrigir esse defeito é aumentando a pressão de recalque.

Na figura 57 também é possível observar a presença de rechupe proveniente da alta temperatura do inserto com refrigeração regular.

Figura 57 - Produtos injetados (1) convencional, (2) palheta e (3) canais complexos de refrigeração.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de três sistemas de refrigeração para injeção de uma componente plástica com refrigeração crítica. Foram comparados os sistemas de refrigeração para molde de injeção tradicionais, por furação e com palhetas, com canais complexos de refrigeração (*conformal cooling*), apenas fabricados por processos de manufatura aditiva metálica. Para isso foi projetado, simulado e manufaturado um molde com mudança de tipo onde insertos intercambiáveis com esses sistemas de refrigeração foram empregados.

O estudo contribuiu para o desenvolvimento de conhecimentos para aplicação do processo de fusão seletiva a laser (Selective laser Melting - SLM) para o projeto de moldes de injeção de plástico. Os principais pontos do trabalho foram:

- Avançando no conhecimento do projeto de canais complexos de refrigeração, o trabalho apresenta uma nova proposta de canais complexos, conciliando canais em series e paralelos. Pela simulação esta nova proposta apontou ganho de tempo de ciclo de 57,1% em relação a refrigeração com palhetas e 103,5% a furação.

- Esta nova proposta de projeto de canais complexos, além de ganhos de processo, permitiu a fabricação híbrida, empregando fresamento e posteriormente fusão seletiva a laser - SLM. Isso representa uma redução de custo significativa pois o processo SLM é muito mais caro que fabricação por fresamento. O projeto demonstrou plena viabilidade de manufatura híbrida para moldes de injeção.

- O empregos de canais complexos de refrigeração do tipo série-paralelo permitiu melhorar a homogeneidade de temperatura no molde. Reduziu o gradiente de temperatura na superfície dos insertos, mantendo temperatura inferior e mais homogênea do que quando comparado à fabricação convencional por furação. Para peça estudada e o mesmo tempo de ciclo, o gradiente diminuiu em até 600%.

- Com o emprego de canais complexos de refrigeração foi possível, para um mesmo tempo de ciclo e fluxo de água, manter ciclo produtivo em 28 segundos, com as mesmas configurações apenas se produziu 16 produtos com palhetas e 4 para refrigeração convencional.

- A qualidade dos produtos injetados com canais complexos de refrigeração foi superior aos injetados com os outros insertos. Houve redução de distorções do produto e não se constatou bolhas. A análise de empenamento mostrou redução de 62,15% em relação a refrigeração convencional por furação e 56,72% em relação ao molde com palhetas.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS:

Sugere-se para trabalhos futuros realizar uma análise de custos. Fazer a instrumentação do molde com sensores de temperatura e pressão para auxiliar no entendimento dos fenômenos que ocorrem no interior do molde.

Fabricar novos insertos para estudar novos materiais e canais de refrigeração. Verificar o desempenho dos canais complexos em relação a outras configurações ou materiais para moldes.

Alterar o material a ser injetado e verificar o comportamento dos canais complexos para materiais mais sensíveis a solidificação como poliamida e policarbonato.

Estudar a fabricação de canais de refrigeração com controle de perda de carga e turbulência (Reynolds), verificar a influência de obstáculos, alteração de secções e modificação de rugosidade.

7. REFERÊNCIAS

- AGAZZI, A.; SOBOTKA, V.; LEGOFF, R.; JARNY, Y. (2013). **Optimal cooling design in injection moulding process—A new approach based on morphological surfaces**. Applied Thermal Engineering, 52(1): 170-178.
- ALTAF, K.; RAGHAVAN, V. R.; RANI, A. M. A. **Comparative thermal analysis of circular and profiled cooling channels for injection mold tools**. Journal of Applied Sciences, v. 11, p. 2068-2071, 2011.
- ARMILLOTTA, A.; BARAGGI, R.; FASOLI, S. (2014). **SLM tooling for die casting with conformal cooling channels**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(1-4): 573-583.
- AU, K. M.; YU, K. M.; CHIU, W. K. (2011). **Visibility-based conformal cooling channel generation for rapid tooling**. Computer-Aided Design, 43(4): 356-373.
- AU, K. M.; YU, K. M. (2007). **A scaffolding architecture for conformal cooling design in rapid plastic injection moulding**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34(5-6): 496-515.
- BEAUMONT, J. P. **The Runner and Gating Design Handbook**. Munich: Hanser Publishers, 2004. 286p.
- BEARD, Robert A. (2014) **Why Conformal Cooling Makes Sense**. Plastics Technology. Gardner Publications Inc, p 35-37.
- BOUJELBENE M.; MOISAN A.; TOUNSI N.; B. BRENIER (2004). **Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(1), 101-107.
- BRASKEM. **Folha de dados - Braskem H105**. Brasil, 2017. 1 p.
- BRITO, M. A.; MATOS, A.; MENDES, S. S. **Manual do projectista para moldes de injeção de plásticos: Sistema de controlo de temperatura**. Marina Grande: Centimfe, 2003.

CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2010. 280 p. ISBN 8588098105.

CAVALHEIRO, Andrei Zwetsch. **Influência dos parâmetros de moldagem na estrutura e propriedades de peças de paredes espessas e finas de polipropileno isotático injetadas em moldes-protótipo fabricados por vazamento de resina epóxi**. 2007. 246 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

CONCEPT LASER GmbH, **M2 cusing operating manual**, version 1.0.11, Lichtenfels, Germany, 2011.

DANG, Xuan-Phuong; PARK, Hong-Seok. **Design of U-shape Milled Groove Conformal Cooling Channels for Plastic Injection Mold**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 12 (1), p. 73-84.

DIAS, Kelly Patrícia. **Proposta de modelo para a gestão do conhecimento no projeto de moldes de injeção**. 2008. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

DIMLA, D. E.; CAMILOTTO, M.; MIANI, F. (2005). **Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools**. Journal of Materials Processing Technology, 164: 1294-1300.

EIAMSA-ARD, K.; WANNISSORN, K. (2015). **Conformal bubbler cooling for molds by metal deposition process**. Computer-Aided Design, 69: 126-133.

FONTANELLA, Luís Henrique Guarnieri. **Análise da ligação metalúrgica entre peça fabricada por fusão seletiva a laser e metal base**. 2017. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017

GOU Gang; XIE Pengcheng; YANG Weimin; DING Yumei. (2011) **Online measurement of rheological properties of polypropylene**

based on an injection molding machine to simulate the injection-molding process. *Polymer Testing* 30 (2011) 826–832.

HSU, F. H.; WANG, K.; HUANG, C. T.; CHANG, R. (2013). **Investigation on conformal cooling system design in injection molding.** *Advances in Production Engineering & Management*, 8(2): 107-115.

JAUREGUI-BECKER, J. M.; TOSELLO, G.; VAN HOUTEN, F. J.; Hansen, H. N. (2013). **Performance evaluation of a software engineering tool for automated design of cooling systems in injection moulding.** *Procedia CIRP*, 7: 270-275.

KOVÁCS, J. G.; SZABÓ, F.; KOVÁCS, N. K.; SUPLICZ, A.; ZINK, B.; TÁBI, T.; HARGITAI, H. (2015). **Thermal simulations and measurements for rapid tool inserts in injection molding applications.** *Applied Thermal Engineering*, 85: 44-51.

LI, C. L. (2001). **A feature-based approach to injection mould cooling system design.** *Computer-Aided Design*, 33(14): 1073-1090.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros.** 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. XVI, 191 p. ISBN 8521202474.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia.** São Paulo: Edgard Blucher, c1991. 197 p. ISBN 8521200609.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos:** rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. 2.ed. São Paulo: Artliber, 2013. 485 p. ISBN 9788588098725.

MARIN, F.; de MIRANDA, J. R.; de SOUZA, A. F. (2017). **Study of the design of cooling channels for polymers injection molds.** *Polym Eng Sci.* doi:10.1002/pen.24769

MARQUES, Sabrina. **Estudo da influência da espessura da camada e velocidade do laser na microestrutura e propriedades de peças fabricadas por fusão seletiva a laser no aço maraging 300.** 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Centro Universitário Tupy – Unisociesc, Joinville, 2014.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J. R.; SANTOS, R. F. F. (2014, June). **Evaluating the conformal cooling system in moulds for plastic injection by CAE simulation.** In Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies. Ljubljana: Slovenian Tool and Die Development Centre. Retrieved in (Vol. 14).

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; de MIRANDA, J.; YADROITSAU, I. (2015). **Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation.** *Polímeros*, 25(6): 564-574.

MAYER, S. (2005). **Optimised mould temperature control procedure using DMLS.** EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd: 1-10.

MAZUR, M.; LEARY M.; MCMILLAN M.; ELAMBASSERIL J.; BRANDT M. (2016) **SLM additive manufacture of H13 tool steel with conformal cooling and structural lattices.** *Rapid Prototyping Journal*, 22 (3) p. 504-518.

MENGES, G.; MOHREN, P (1993). **“How to make Injection Molds”.** Munich. 2ed Hanser Publisher.

MICHAELI, W.; POTSCH, G., **Injection Molding – An Introduction.** Ed. Hanser, Munique, Alemanha, 1995

MIRANDA, J. R. **“Estudo da influência da viscosidade do polímero, da velocidade de injeção e do material da cavidade do molde sobre a pressão e temperatura durante o processo de injeção.”**2012. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Tupy, Joinville, 2012.

MOLDFLOW. **Base de dados de matérias.** Sem Local: Autodesk Moldflow, 2014.

PARK, H. S.; DANG, X. P. (2010). **Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold.** *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(6): 879-890.

PARK, H. S.; PHAM, N. H. (2009). **Design of conformal cooling channels for an automotive part**. International Journal of Automotive Technology, 10(1): 87-93.

RÄNNAR, L. E., GLAD, A.; GUSTAFSON, C. G. (2007). **Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting**. Rapid Prototyping Journal, 13(3): 128-135.

RÄNNAR, L. **“On Optimization of Injection Molding Cooling.”**2008. 150 f. Tese (Doutorado) - Department Of Engineering Design And Materials, Norwegian University Of Science And Technology, Trondheim, 2008.

RAO, N. S.; SCHUMACHER, G.; SCHOTT, N. R.; O'BRIEN, K. T. (2002). **Optimization of cooling systems in injection molds by an easily applicable analytical model**. Journal of reinforced plastics and composites, 21(5): 451-459.

RAHIM S. Z. A.; SHARIF S.; ZAIN A. M.; NASIR S. M.; SAAD R. M. (2016). **Improving the Quality and Productivity of Molded Parts with a New Design of Conformal Cooling Channels for the Injection Molding Process**. Advances in Polymer Technology, 35(1), 1-10.

RENÉ Hubert. Construction Department. **“Training Manual CAD designing of CUSING® - cooling”**. Lichtenfels: Hofmann Innovation Group Ag, 2013. 70 slides, color.

RENÉ Hubert. Construction Department. **“Building up a cooling with LaserCusing® technology”**. Lichtenfels: Hofmann Innovation Group Ag, 2006. 17 slides, color.

SACCHELLI, C. M. **Sistematização do processo de desenvolvimento integrado de moldes de injeção de termoplásticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SAIFULLAH, A. B. M.; MASOOD S.H. **Finite element thermal analysis of conformal cooling channels in injection moulding**. In: Proceedings of the 5th Australasian congress on applied mechanics. Engineers Australia, 2007. p. 337.

SILVA, S. L. **Sistemática para o projeto do sistema de refrigeração de moldes para injeção de polímeros**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

THOMAZI, E. **Introdução ao projeto de ferramentas**. ETFAR. Farroupilha - RS, 2009. 108p.

SOUZA, Adriano Fagali de; ULBRICH, Cristiane Brasil Lima. Engenharia integrada por computador e sistemas CAD / CAM / CNC: Princípios e aplicações. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 358 p.

TSAI, Kuo-Ming; LAN, Jun-Kai. Correlation between runner pressure and cavity pressure within injection mold. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, n. 1-4, p. 273-284, 2015.

UDDEHOLM, Informativo Técnico: **Corrax**. Disponível em: <https://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_corrax_english.pdf>. Acesso em: 21 out. 2017.

VIETRI, U.; SORRENTINO, A.; SPERANZA, V.; PANTANI, R. (2011). **Improving the predictions of injection molding simulation software**. *Polymer Engineering & Science*, 51(12), 2542-2551.

WANG, Y.; YU, K. M.; WANG, C. C.; ZHANG, Y. (2011). **Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling**. *Computer-Aided Design*, 43(8), 1001-1010.

WANG, Y.; YU, K. M.; WANG, C. C. (2015). **“Spiral and conformal cooling in plastic injection molding.”** *Computer-Aided Design*, 63, 1-11.

XU, X.; SACHS, E.; ALLEN, S. (2001). **“The design of conformal cooling channels in injection molding tooling.”** *Polymer Engineering & Science*, 41(7): 1265-1279.

YADROITSEV, I.; BERTRAND P.; SMUROV, I. **Parametric analysis of the selective laser melting process**. *Applied Surface Science*, v. 253, i. 19, p. 8064-8069, 2007.

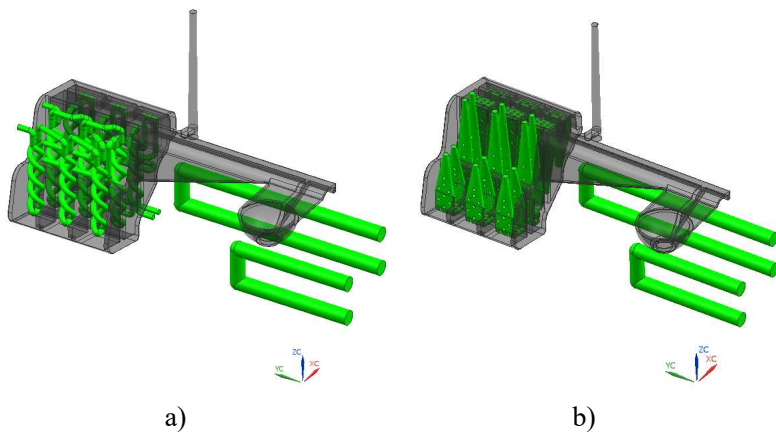
YADROITSEV I.; SMUROV I. (2011). **Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders**. Physics Procedia 12 (2011) 264–270.

ZHANG, B.; DEMBINSKI, L.; CODDET, C. **The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder**. Materials Science and Engineering A, v. 584, p. 21- 31, 2013.

ZHENG Zhong; ZHANG Hai-ou; WANG Gui-lan; QIAN Ying-ping (2011). **Finite Element Analysis on the Injection Molding and Productivity of Conformal Cooling Channel**. J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 16(2), 231-235.

APÊNDICE I

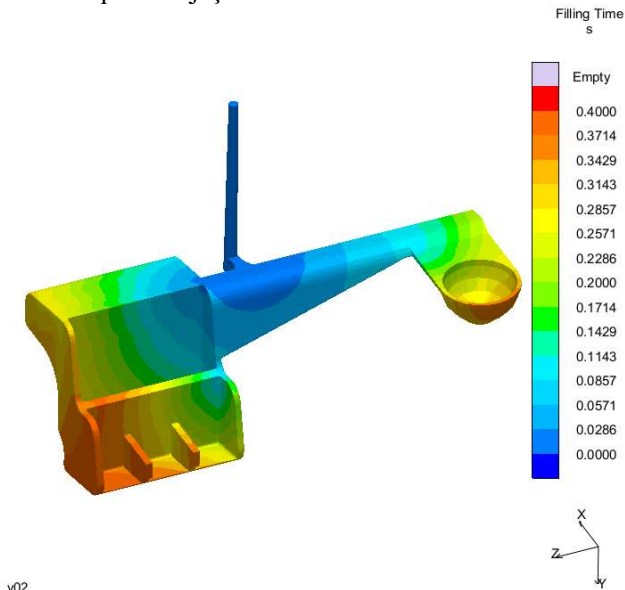
Figura 58 – Canais complexos de refrigeração a) em série e b) FFCC.



Fonte: Autor.

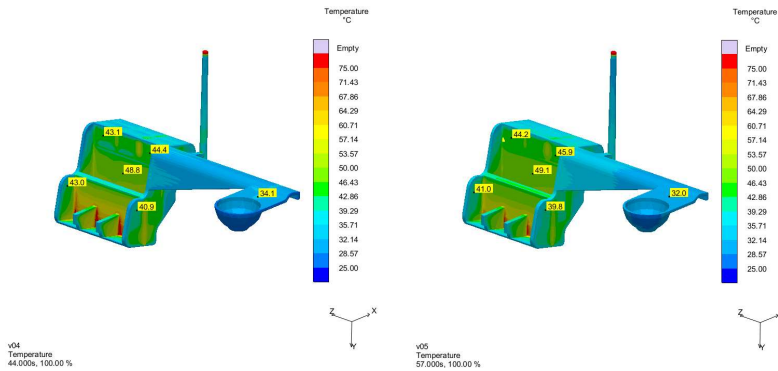
APÊNDICE II

Figura 59 - Tempo de injeção.



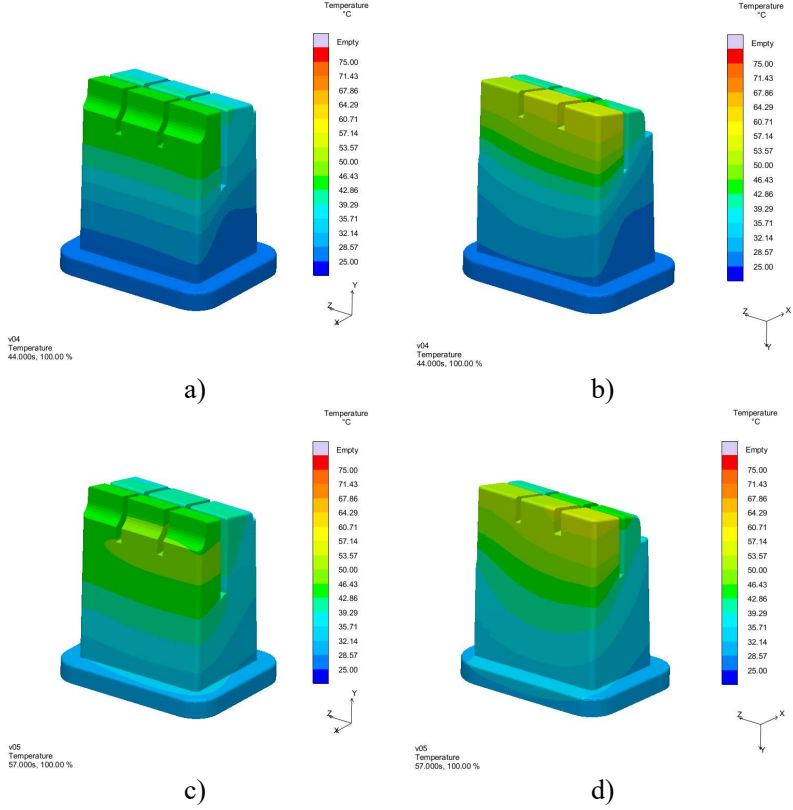
Fonte: Autor.

Figura 60 -Temperatura do produto ao final do ciclo de injeção a) palhetas 44s e b) convencional por furação 57s.



Fonte: Autor.

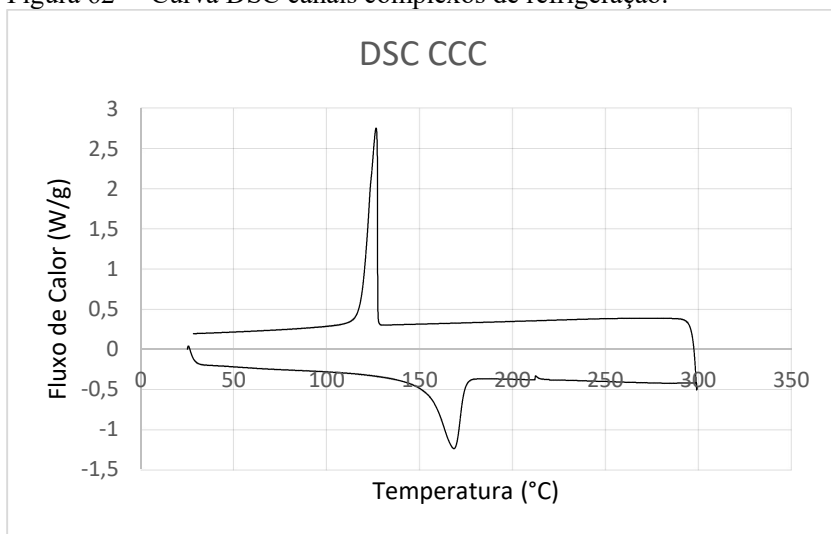
Figura 61 – Temperaturas nos insertos para ciclos mais longos.



Fonte: Autor.

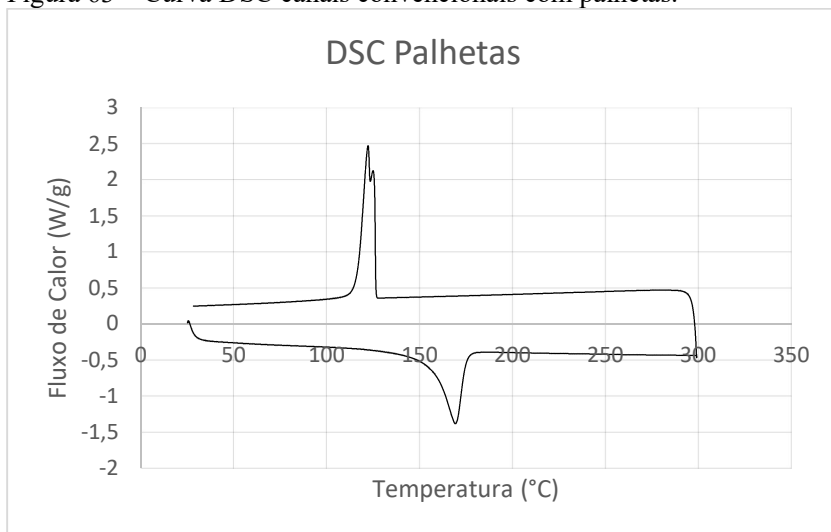
APÊNDICE III

Figura 62 – Curva DSC canais complexos de refrigeração.



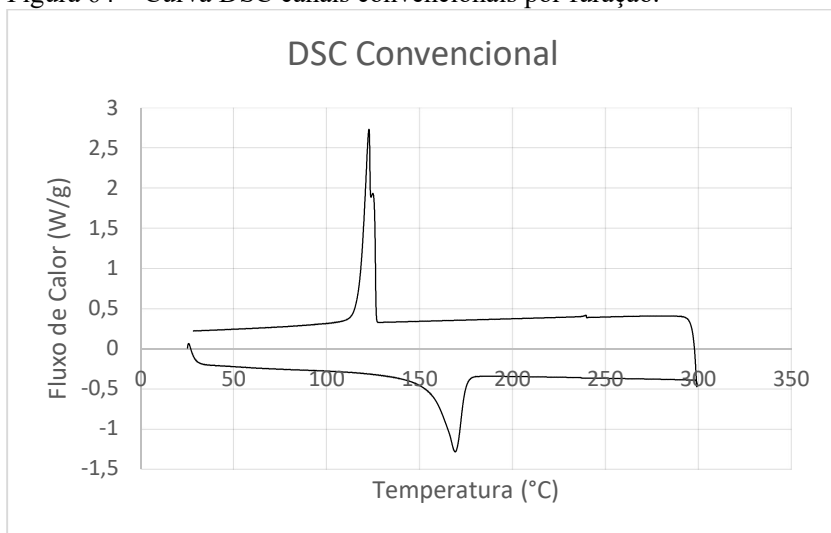
Fonte: Autor.

Figura 63 – Curva DSC canais convencionais com palhetas.



Fonte: Autor.

Figura 64 – Curva DSC canais convencionais por furação.



Fonte: Autor.