

FUNDAÇÃO DE ENSINO “EURÍPIDES SOARES DA ROCHA”
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARÍLIA – UNIVEM
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LETICIA AKEMI PIRES DOS SANTOS

**IMPORTÂNCIA DA APLICAÇÃO DE SOFTWARE DE SIMULAÇÃO
NO PROCESSO DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

MARÍLIA

2015

FUNDAÇÃO DE ENSINO “EURÍPIDES SOARES DA ROCHA”
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARÍLIA – UNIVEM
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LETICIA AKEMI PIRES DOS SANTOS

**IMPORTÂNCIA DA APLICAÇÃO DE SOFTWARE DE SIMULAÇÃO
NO PROCESSO DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

Trabalho de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador:
Prof. Rodrigo Fabiano Ravazi

MARÍLIA

2015

Santos, Leticia Akemi Pires dos

Importância da aplicação de software de simulação no processo de injeção de termoplásticos / Leticia Akemi Pires dos Santos; orientador: Rodrigo Fabiano Ravazi. Marília, SP: [s.n.], 2015.

83 f.

Trabalho de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)
- Curso de Engenharia de Produção, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília –UNIVEM, Marília, 2015.

1. Simulação 2. Injeção 3. Plásticos

CDD: 668.4



FUNDAÇÃO DE ENSINO "EURÍPIDES SOARES DA ROCHA"
Mantenedora do Centro Universitário Eurípedes de Marília - UNIVEM

Curso de Engenharia de Produção.

Leticia Akemi Pires dos Santos - 47847-4

TÍTULO "Importancia da Aplicação de Software de Simulação no Processo de Injeção de Termoplasticos. "

Banca examinadora do Trabalho de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia de Produção da UNIVEM, F.E.E.S.R, para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Nota: 95

ORIENTADOR: Rodrigo Fabiano Ravazi
Rodrigo Fabiano Ravazi

1º EXAMINADOR: Giulianna Marega Marques
Giulianna Marega Marques

2º EXAMINADOR: Geraldo Cesar Meneghelle
Geraldo Cesar Meneghelle

Marília, 01 de dezembro de 2015.

Dedico este trabalho à Deus por me guiar;

Aos meus pais pelo incentivo, amor e carinho;

Aos amigos pela companhia e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar e colocar no meu caminho a oportunidade de começar e concluir este curso, ainda acredito que nada é por acaso e que tudo teve e tem seu propósito.

Agradeço também aos meus pais Maria e Benedito pelo apoio em todas as horas e pelo incentivo aos estudos desde a infância e à minha irmã Katarine, que mesmo do outro lado do mundo sempre esteve presente nesses cinco anos.

Agradeço aos amigos Larissa, Thaise, Anelise, Thalita, Adelle, Samanta, Natália, Bruna, Hiroito, Fernando, Elson, Gabriel, Zavaski, Lucas T., Marcelo e colegas da sala pela companhia e pelas risadas que deixaram esses últimos anos mais animados para continuar e chegar até aqui.

Agradeço a todos os professores pela dedicação em nos transmitir conhecimento, em especial ao professor orientador Rodrigo F. Ravazi pela atenção, amizade e auxílio, sempre disposto a encarar as situações que lhe surge.

Agradeço também à empresa por disponibilizar as informações e os objetos de estudo fundamentais para a realização deste trabalho.

E por último, mas não menos importante, agradeço de coração ao meu amigo, companheiro, namorado e professor Leandro O. Barros por compartilhar seus conhecimentos, pelo apoio, compreensão, carinho e paciência em todos os momentos.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“Todas as verdades são fáceis de perceber depois de terem sido descobertas; o problema é descobri-las”.

Galileu Galilei.

SANTOS, Leticia Akemi Pires dos. Importância da aplicação de software de simulação no processo de injeção de termoplásticos. 2015. 83 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2015.

RESUMO

A crescente demanda por produtos de materiais plásticos que atendam às exigências de diversos setores econômicos e a necessidade das empresas em reduzir custos e melhorar a qualidade de seus produtos faz com que estas busquem meios para garantir sua competitividade no mercado. Os recursos tecnológicos aparecem como importante aliado das empresas para alcançar tal objetivo. A proposta deste trabalho é demonstrar a importância da utilização da simulação computacional na fase de desenvolvimento de produto de forma a prever possíveis defeitos e, com isso, evitar maiores custos. A metodologia utilizada é a pesquisa exploratória e bibliográfica, e estudo de caso confrontando produtos em produção com a sua versão virtual desenvolvida no software de simulação para identificar as aproximações e os distanciamentos entre eles. Com este trabalho é esperado que a comparação demonstre a importância da utilização da ferramenta de simulação na concepção do produto injetado.

Palavras-chave: Simulação. Injeção. Plásticos.

SANTOS, Leticia Akemi Pires dos. Importância da aplicação de software de simulação no processo de injeção de termoplásticos. 2015. 83 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2015.

ABSTRACT

The growing demand for products of plastic materials that meet the requirements of various economic sectors and the need for companies to reduce costs and improve the quality of their products makes these seek ways to ensure their competitiveness in the market. Technological features appear as an important ally of the companies to achieve this goal. The purpose of this study is to demonstrate the importance of using computer simulation in the product development phase to predict possible defects and thereby avoid further costs. The methodology used is exploratory and bibliographic research, and case study confronting products production with its virtual version developed the simulation software to identify the approximations and distances between them. With this work is expected that the comparison demonstrates the importance of using the simulation tool in the design of the injected product.

Keywords: Simulation. Injection. Plastics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Orientação das moléculas dos termoplásticos	20
Figura 2 - Fórmula estrutural do PP	22
Figura 3 – Tipos de arranjos moleculares do PP	23
Figura 4 – Fórmula estrutural do POM	24
Figura 5 - Ciclo de vida do polímero termoplástico.....	25
Figura 6 – Aplicações do plástico por tipo de resina.....	26
Figura 7 – Processos produtivos utilizados na produção de transformados plásticos.....	27
Figura 8 – Representação da composição de uma máquina injetora.....	28
Figura 9 – Unidade de injeção.....	29
Figura 10 – Rosca de três zonas	30
Figura 11 – Representação do ciclo de injeção	32
Figura 12 – Empenamento por resfriamento não uniforme.....	40
Figura 13 – Uso de ferramentas de análise de acordo com o problema	42
Figura 14 – Auxílio do computador nas diferentes etapas do desenvolvimento de produto....	45
Figura 15 – Influência do custo em relação com o grau de incerteza e quantidade de escolha em função do tempo	46
Figura 16 – Custo de modificação no projeto do produto	46
Figura 17 – Representação do objetivo da engenharia simultânea.....	48
Figura 18 – Aplicação da malha de elementos finitos.....	50
Figura 19 – Representação do parelhamento dos nós da malha	51
Figura 20 – Representação da razão de aspecto	51
Figura 21 – Representação de sobreposição de elementos.....	52
Figura 22 – Representação da não conectividade entre os elementos.....	52
Figura 23 - Roldana	55
Figura 24 – Representação gráfica da roldana.....	55
Figura 25 – Equipamento de musculação onde a roldana é utilizada.....	56
Figura 26 – Representação da montagem da roldana com a haste de deslizamento	56
Figura 27 – Sapata	57
Figura 28 – Elíptico	58
Figura 29 – Demonstração da região onde ocorre deformação.....	58
Figura 30– Malha aplicada ao modelo da roldana.....	59

Figura 31 – Resultado da análise da malha da roldana.....	60
Figura 32– Localização dos pontos de injeção	61
Figura 33 – Análise de empenamento para a roldana.....	62
Figura 34 – Demonstração do empenamento da roldana	62
Figura 35 – Detalhamento do empenamento da roldana	63
Figura 36 – Malha aplicada ao modelo da sapata.....	64
Figura 37 – Resultado da análise da malha da sapata.....	64
Figura 38 – Seleção de termoplástico por índice de fluidez.....	65
Figura 39 – Seleção de termoplástico por família	66
Figura 40 – Localização dos pontos de injeção	67
Figura 41 – Análise de empenamento na sapata.....	68
Figura 42 – Detalhamento do empenamento da sapata	68
Figura 43 – Análise de resfriamento da roldana.....	69
Figura 44 – Análise de contração volumétrica	70
Figura 45 – Detalhamento da espessura da sapata	72
Figura 46 – Desenho técnico da sapata	72
Figura 47 – Corte BB do desenho técnico da sapata	73
Figura 48 – Detalhamento do empenamento da sapata	73
Figura 49 – Análise de empenamento com Polyfort FPP 20T	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do Polipropileno CP741	23
Tabela 2 – Propriedades do Poliacetal Celcon M90.....	25
Tabela 3 – Classificação dos termoplásticos segundo o detalhamento dos dados	66
Tabela 4 – Custos do molde para a fabricação da roldana	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D: Três dimensões

ABS: Acrilonitrila-Butadieno-Estireno

CAD: *Computer Aided Design*

CAE: *Computer Aided Engineering*

CAM: *Computer Aided Manufacturing*

EPS: Poliestireno expandido

EVA: Copolietileno – acetato de vinila

PBT: Polibutileno Tereftalato

PC: Policarbonato

PE: Polietileno

PEAD: Polietileno de Alta Densidade

PEBD: Polietileno de Baixa Densidade

PEBDL: Polietileno de Baixa Densidade Linear

PET: Politereftalato de Etileno

POM: Polióxido de Metileno (Poliacetal)

PP: Polipropileno

PS: Poliestireno

PVC: Policloreto de Vinila

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Delimitação do Tema.....	16
1.2 Objetivo	16
1.3 Objetivos Específicos	17
1.4 Justificativa.....	17
1.5 Metodologia.....	18
1.6 Estrutura do Trabalho	18
2 REVISÃO TEÓRICA	19
2.1 Materiais Poliméricos	19
2.1.1 Polipropileno	21
2.1.2 Poliacetal	24
2.1.3 Processamento de termoplásticos	25
2.2 Processo de Moldagem por Injeção.....	27
2.2.1 A injetora	28
2.2.2 O molde	31
2.2.3 Etapas do processo de injeção	32
2.2.4 Parâmetros do processo de injeção	34
2.2.5 Qualidade das peças moldadas por injeção	38
2.3 Simulação Computacional.....	41
2.3.1 Vantagens e limitações	44
2.4 Simulação no Desenvolvimento de Produtos	44
2.4.1 Engenharia simultânea.....	47
2.5 Simulação no Processo de Moldagem por Injeção.....	48
2.5.1 Moldflow	50
3 ESTUDO DE CASO	54
3.1 A Empresa	54
3.2 O Processo	54

3.3 O Produto.....	54
3.3.1 A roldana	55
3.3.2 A sapata	57
3.4 Simulação das Peças em Estudo.....	59
3.4.1 Caso 1 – Roldana.....	59
3.4.2 Caso 2 – Sapata	63
4 RESULTADOS	69
4.1 Caso 1 - Roldana	69
4.2 Caso 2 - Sapata	71
5 CONCLUSÕES	76
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	77
REFERÊNCIAS	78
ANEXO A – FICHA TECNICA DO POLIPROPILENO CP 741	82
ANEXO B – FICHA TECNICA DO POLIACETAL CELCON M90	83

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos de materiais plásticos de diversos setores econômicos se dá devido ao seu potencial de aplicação e de substituição a outros tipos de materiais, como metal, madeira, vidro, entre outros. Nas últimas décadas, as peças injetadas evoluíram em tamanho e complexidade, bem como máquinas, equipamentos e moldes, conforme as necessidades do mercado (HARADA, 2004).

O avanço tecnológico com o desenvolvimento dos sistemas de informação, por meio da utilização de computadores, *softwares* de aplicação e banco de dados, permitiu o desenvolvimento de ferramentas de auxílio ao setor produtivo, otimizando os produtos e serviços gerados, que segundo Ferreira (apud Gao, 2010), além de reduzir o tempo total de desenvolvimento, resultam no aumento dos níveis de qualidade dos produtos obtidos, redução do número de falhas do produto, sua melhor definição e redução no lead time de fabricação.

Segundo Albertin e Albertin (2009, p.33) "os principais fatores que um produto deve ter para que possa ser analisada sua qualidade são: desempenho, características, confiabilidade, conformidade, durabilidade, aparência e percepção". Acrescentam ainda que, a qualidade pode ser desmembrada em qualidade do projeto e qualidade da execução.

A ferramenta abordada nesse trabalho é um *software* de simulação auxiliada por computador que permite, de forma rápida e eficaz, a avaliação dos resultados das decisões, no projeto de concepção do produto, na solução de problemas e na agregação de valor.

Tais ferramentas são utilizadas para reduzir tempo e custo no desenvolvimento de novos produtos, fase em que sua utilização traz resultados mais significativos. No entanto, seu uso não se restringe apenas a esta tarefa, podendo ser aplicada, por exemplo, na otimização de um produto que já está no mercado.

De acordo com Pinto (2002), o processamento e a qualidade do produto moldado por injeção foi considerado, por muito tempo em seus estudos, como arte, formando especialistas por meio de métodos de tentativa e erro no desenvolvimento de suas atividades. Tal fato se deve à complexidade de relacionar as variáveis de processo à qualidade da peça moldada.

Dessa forma, a busca por simulações computacionais está se difundindo cada vez mais devido às vantagens oferecidas, em relação à produtividade, eficiência e competitividade. Podemos citar como vantagens do uso da simulação auxiliada por computador a redução de tempo e custo – correções, aprimoramentos e testes podem ser feitos sem o uso de protótipos; erros podem ser detectados na fase de projeto, eliminando custo de

retrabalho e correção, podendo fazer alterações a qualquer momento. Para D.C. França et al., simular sistemas antecipadamente é mais barato do que a realização de testes experimentais com os mesmos objetivos.

Este trabalho tem como objetivo específico aplicar o *software Moldflow* para identificar problemas em peças já produzidas que poderiam ser evitados com a utilização do *software* na fase de projeto.

A moldagem por injeção é um processo cíclico que consiste, basicamente, em injetar material termoplástico fundido para o interior da cavidade de um molde. A máquina injetora realiza todas as etapas do ciclo de produção, no entanto, a qualidade, produtividade e eficiência do produto obtido são delimitadas pela capacidade dos recursos humanos.

O *software Moldflow* fornece informações precisas, auxilia na solução de problemas, define condições de processos ideais, simula o preenchimento e, através da análise, é possível avaliar e propor mudanças no projeto de forma a garantir a qualidade do produto e o bom desempenho do processo. A previsão do comportamento permite que ajustes e correções sejam feitas, e os resultados em resposta às alterações sejam obtidas instantaneamente.

Considerando os benefícios que as ferramentas computacionais de simulação podem trazer ao setor produtivo, é de fundamental importância a difusão do conhecimento sobre o uso desses meios inovadores alternativos, para garantir a competitividade das empresas. Contudo, a plena utilização dessas ferramentas exige investimentos.

Esse trabalho pretende contribuir com a divulgação dos recursos possíveis da ferramenta foco, bem como, destacar sua importância confrontando um produto disponível no mercado com a sua versão virtual desenvolvida no *software* de simulação para identificar as aproximações e os distanciamentos entre eles.

1.1 Delimitação do Tema

Destacar a importância da aplicação do *software* de simulação no projeto de peças plásticas injetadas.

1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é explorar os recursos de um *software* de simulação utilizando uma peça real e avaliar as vantagens de sua utilização na fase de desenvolvimento de produto.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Explorar os recursos da ferramenta foco;
- Aplicar o *software Moldflow Insight 2015* em peças reais;
- Reproduzir problemas em peças já produzidas que poderiam ser evitados com a utilização do *software* na fase de projeto;
- Ressaltar a importância da utilização da ferramenta no momento em que o custo das mudanças é menor.

1.4 Justificativa

As empresas precisam reduzir custos, melhorar a qualidade de seus produtos e diminuir o tempo de desenvolvimento de produtos, para garantir sua competitividade no mercado. Nesse contexto, os recursos de auxílio ao setor produtivo proporcionados pelo avanço tecnológico aparecem como importante aliado das empresas para alcançar tal objetivo. A utilização do *software* de simulação permite prever problemas, realizar mudanças e testar alternativas no campo virtual, eliminando a necessidade de uma grande quantidade de testes, utilização de matéria-prima e tempo produtivo ocioso, garantindo a qualidade do produto. Dessa maneira a utilização do *software* de simulação pode ser um grande aliado das empresas na busca da competitividade.

Na empresa analisada percebe-se a dificuldade em eliminar defeitos em peças injetadas, cujos projetos dependem exclusivamente do conhecimento e experiência de profissionais da área.

Com a realização desse estudo pretende-se destacar a importância da utilização da simulação computacional nos projetos de peças injetadas identificando as causas dos defeitos e propondo alternativas de solução de forma objetiva visando melhorar a qualidade dos produtos, reduzir custos com mudanças e testes físicos, e reduzir o tempo de desenvolvimento de produto, e com isso contribuir para a competitividade da empresa.

1.5 Metodologia

A metodologia utilizada para a pesquisa pode ser classificada, de acordo com Silva e Menezes (2005) quanto a sua natureza, abordagem do problema, de seus objetivos e procedimentos técnicos.

Este trabalho consiste em uma pesquisa de natureza aplicada, pois “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos” (SILVA; MENEZES, 2005, p. 20)

Quanto à abordagem do problema, consiste em uma pesquisa qualitativa, em que a análise dos dados é feita de forma indutiva de acordo com a interpretação dos fenômenos.

Do ponto de vista dos objetivos é uma pesquisa exploratória, com o objetivo de conhecer melhor sobre o tema. Este tipo de pesquisa possibilita a exploração dos recursos do *software* de simulação de forma a compreendê-lo utilizando a análise de exemplos práticos e levantamento bibliográfico.

Quanto aos procedimentos técnicos e para embasar teoricamente a pesquisa exploratória foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema. Além de assumir a especificidade de um estudo de caso, no qual se realizou o confronto de peças em produção com a sua versão virtual desenvolvida no *software* de simulação para identificar as aproximações e os distanciamentos entre eles.

1.6 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho apresenta-se estruturado em cinco capítulos, onde o Capítulo 1 apresenta os objetivos gerais e específicos, a justificativa e a metodologia utilizada.

O Capítulo 2 contém um referencial teórico sobre os principais conceitos relacionados ao polímero, ao processo de injeção de termoplásticos, à simulação computacional e ao *software* utilizado.

O Capítulo 3 relata o estudo de caso com as informações básicas da empresa, do produto e as análises de simulação realizadas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio da interpretação das análises e sugestões de melhoria.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Materiais Poliméricos

Os polímeros largamente utilizados atualmente evoluíram na busca do homem por materiais com propriedades que atendessem às suas necessidades específicas. Dos polímeros naturais encontrados na natureza e naturais modificados, como a borracha derivada do látex e celulose, aos polímeros sintéticos produzidos pelo homem, ainda se busca materiais cada vez melhores.

Com as propriedades dos materiais naturais, o homem não podia resolver todos os problemas técnicos. Assim procurava-se por novos materiais, que preenchessem as propriedades necessárias. Os químicos avançaram com as pesquisas sobre a estrutura molecular de materiais naturais, como por exemplo a borracha, e apenas neste século chegaram ao ponto de produzir estes materiais artificialmente. (MICHAELI et al., 1995, p. 3)

O primeiro polímero sintético foi descoberto em 1907 por Leo H. Baekeland, químico pesquisador, numa reação química de fenol e formaldeído que resultava num produto sólido (resina fenólica), conhecido por baquelite. A produção do baquelite teve destaque com a empresa *General Bakelite Company* criada em 1911.

A aplicação de moldados com compostos fenólicos marcou a nova era dos plásticos. A utilização de materiais poliméricos e a substituição de outros materiais como metal, vidro, entre outras, se intensificou e marcou o desenvolvimento de materiais que ainda hoje são utilizados.

Segundo Manrich (2013, p. 25), “polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha um alto peso molecular e com variedades estruturais repetitivas, sendo que normalmente esta unidade que se repete é de baixo peso molecular”.

A palavra polímero tem origem grega em que *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição), ou seja, polímero é uma macromolécula formada por muitas unidades menores que se repetem e que são ligadas por ligações químicas, sendo a covalente a mais comum entre os polímeros.

Uma única unidade de repetição é denominada monômero, substância básica para a formação das macromoléculas. Quando o polímero apresenta em sua composição mais de 95% de um mesmo tipo de mero é denominado homopolímero. Enquanto o copolímero é definido por Canevarolo Jr. (2002, p. 45) como o “polímero que apresenta mais de um mero

diferente na cadeia polimérica”, como por exemplo, o copolímero Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS). Para que ocorra a polimerização, reação de formação das macromoléculas, cada monômero deve se combinar com, no mínimo, dois outros monômeros (MICHAELI et al., 1995; MARIN, 2014).

Segundo Manrich (2013), os polímeros podem ser classificados de várias maneiras, sendo as classificações mais comuns pela estrutura química, características tecnológicas e comportamento mecânico. Quanto às características tecnológicas os polímeros são classificados em termoplásticos, termorrígidos e elastômeros.

Os termoplásticos, também conhecido apenas por plástico, são formados por macromoléculas de cadeias lineares ou ramificadas, que se unem por forças intermoleculares (força de atração entre moléculas vizinhas), a intensidade dessas forças varia conforme o tipo e a quantidade de ramificações, ou cadeias secundárias (MICHAELI et al., 1995).

A palavra termoplástico origina-se da combinação de termos (calor) e plasto (maleável), “uma vez que nos termoplásticos as forças intermoleculares tornam-se fracas sob a ação de calor e passam a ser, então, maleáveis” (MICHAELI et al., 1995, p. 41).

Dessa forma, os termoplásticos sob aumento de temperatura se tornam mais fluidos, e quando retirado o calor se solidificam, isso permite que estes materiais sejam moldados e reciclados quando há uma nova aplicação de calor. O PP (polipropileno), PE (polietileno) e PVC (policloreto de vinila) são exemplos de termoplásticos.

Os termoplásticos podem ainda ser divididos de acordo com a orientação das moléculas em semi cristalinos, moléculas pouco organizadas e amorfos, moléculas desorganizadas, Figura 1.

Figura 1 - Orientação das moléculas dos termoplásticos



Fonte: Kiam, 2006.

Os elastômeros apresentam cadeias moleculares flexíveis unidas por poucas ligações cruzadas, ou seja, as moléculas individuais se ligam por meio de ligações atômicas formando

os pontos de encadeamento das moléculas, nesses pontos as cadeias possuem movimento muito limitado e as ligações que se rompem sob altas temperaturas, não retornam quando a temperatura é reduzida. Isso torna os elastômeros não maleáveis, mas apresentam elasticidade e têm recuperação rápida da deformação após o esforço, mantendo boa resistência mecânica. Por exemplo, o pneu que utiliza borracha vulcanizada (CANEVAROLO JR., 2002; MICHAELI et al., 1995).

Os termorrígidos, também conhecidos por termofixos, apresentam maiores quantidades de ligações cruzadas em relação aos elastômeros o que torna as moléculas encadeadas mais duras à temperatura ambiente, porém mais frágeis a golpes. O aumento de temperatura provoca amolecimento do material e ao se solidificar, formam-se as ligações cruzadas. Novas aplicações de temperatura não têm mais influencia, tornando-o não reciclável. Sua moldagem é realizada com o pré-polímero, quando o polímero ainda não apresenta ligações cruzadas (antes da cura). São exemplos a resina fenol-formaldeído (baquelite) e o epóxi (araldite) (CANEVAROLO JR., 2002; MICHAELI et al., 1995).

A classificação dos polímeros quanto ao seu comportamento mecânico, considera, segundo Manrich (2013), o desempenho mecânico do polímero quando utilizado em uma peça. Sendo as principais classificações em termoplásticos convencionais, conhecido também por commodities, e termoplásticos de engenharia.

Os convencionais correspondem a 90% da produção total mundial de polímeros por ser apresentar facilidade de processamento, baixo custo e alta produção, como por exemplo, o PP, PS (poliestireno) e PVC (MANRICH, 2013).

Os polímeros de engenharia apresentam alta rigidez, estabilidade dimensional e tenacidade, o que proporciona às peças bom desempenho quando aplicadas em dispositivos mecânicos. São exemplos o PET (politereftalato de etileno), PC (policarbonato), ABS, POM (poliacetal), PBT (polibutileno tereftalato).

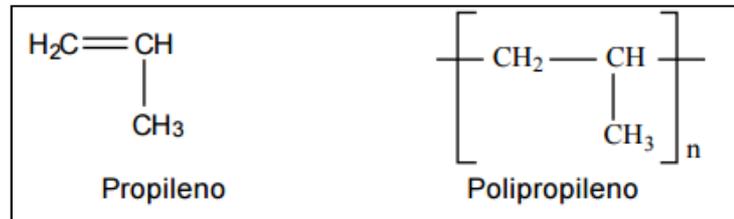
A apresentação geral e as principais características do PP e do Poliacetal (POM) serão abordadas para posterior análise no estudo de caso.

2.1.1 Polipropileno

O Polipropileno, ou polipropeno, $(C_3H_6)_n$ também conhecido como PP, Figura 2, segundo Manrich (2013) é um dos plásticos convencionais de maior crescimento. Isso se deve ao fato do PP apresentar qualidade de plásticos de engenharia com preço dos plásticos convencionais, competindo, até mesmo, com outros plásticos de engenharia quando é

adicionada alguma carga, “componente inerte e fibroso que é adicionado à resina a fim de reduzir o custo de sua fabricação e melhorar as propriedades do material”, cita Harada (2004, p. 22). Compete também com outros termoplásticos por apresentar estrutura molecular versátil e diferentes comportamentos mecânicos.

Figura 2 - Fórmula estrutural do PP



Fonte: Morassi, 2013.

Segundo Manrich (2013, p. 259):

Em 2002, o PP era produzido em quase 180 fábricas, em 48 países, incluindo o Brasil. Cerca de 40 milhões de toneladas/ano de PP foram produzidas pelo mundo, o equivalente a, aproximadamente, 15% de tudo o que é produzido em plástico. No Brasil, o PP representa em torno de 23% dos termoplásticos consumidos.

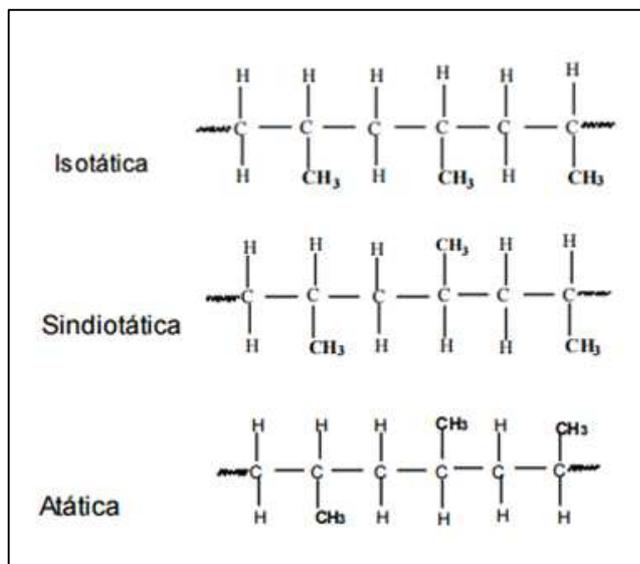
É um termoplástico semi cristalino, obtido pelo craqueamento dos hidrocarbonetos do petróleo e do propano, em sua estabilização são obtidos diferentes formas de arranjo das moléculas, podendo ser isotático, onde as moléculas CH₃ se apresentam do mesmo lado da cadeia, sindiotático, alternam de um lado e de outro, e atático, se apresentam aleatoriamente distribuídos de um lado e de outro da cadeia, demonstrado na Figura 3. Essas configurações proporcionam ao polipropileno diferentes propriedades, como por exemplo, os atáticos têm características próximas às da borracha e são transparentes. No entanto, o PP comercializado é de 90% a 95%, aproximadamente, isotático (MANRICH, 2013; LOKENSGARD, 2013).

Lokensgard (2013) cita algumas propriedades do PP das quais as principais são:

- Boa resistência à fadiga;
- Boa resistência química;
- Excelente isolante elétrico;
- Excelente resistência à flexão;
- Boa resistência ao impacto;
- Fácil processamento nos equipamentos convencionais de termoplásticos.

Algumas propriedades específicas do polímero CP 741 podem ser observadas na ficha técnica no Anexo A e estão resumidas na Tabela 1.

Figura 3 – Tipos de arranjos moleculares do PP



Fonte: Morassi, 2013.

Tabela 1 – Propriedades do Polipropileno CP741

Propriedades ¹	Unidades	Valores
Índice de fluidez (230°C/2,16kg)	g/10min	0,8
Densidade	g/cm ³	0,895
Temperatura de amolecimento Vicat a 10N	°C	147
Resistência ao impacto Izod 23°C	J/m	non-break
Resistência ao impacto Izod -20°C	J/m	39

¹ Ensaios em corpo de prova moldado por injeção conforme ASTM D 4101

Fonte: Adaptado de BRASKEM, 2013.

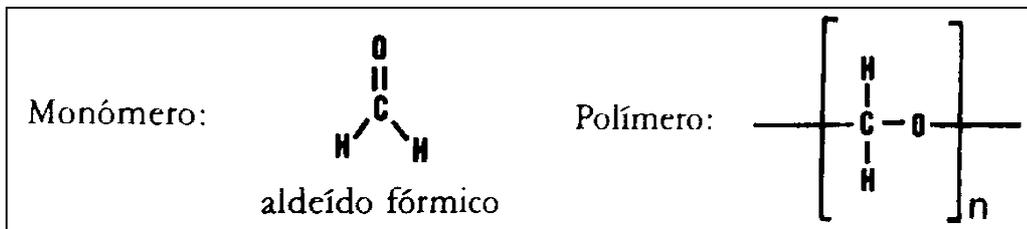
O campo de aplicação do PP mais comum, de acordo com Mano (1991) e Lokensgard (2013), são: para-choques de carro, carcaça de eletrodomésticos, brinquedos,

seringas de injeção descartáveis, pratos, recipientes, itens esterilizáveis, filme de embalagem, isolante elétrico em fio e cabo, entre outros.

2.1.2 Poliacetal

O polioximetileno (POM), mais conhecido por poliacetal, é um polímero cristalino obtido da polimerização do formaldeído (CH_2O), conforme Figura 4, de acordo com Lokensgard (2013, p. 486) “os poliacetais são facilmente fabricados, oferecem propriedades não encontradas nos metais e são competitivos com metais não ferrosos em custo e desempenho”.

Figura 4 – Fórmula estrutural do POM



Fonte: Mano, 1991.

De acordo com Lokensgard (2013), Mano (1991), suas principais propriedades são:

- Excelente estabilidade dimensional;
- Baixa absorção de umidade;
- Elevada rigidez;
- Resistência à abrasão e fricção;
- Resistência térmica;
- Resistência a agentes químicos;
- Alta resistência à fadiga.

Algumas propriedades em específico do poliacetal M90 podem ser observadas na ficha técnica no Anexo B, resumidas na Tabela 2.

O poliacetal é utilizado na fabricação de peças industriais de uso mecânico, como engrenagens, mancais e roldanas, componentes de torneiras, carcaça de chuveiro elétrico, componentes elétricos e eletrônicos, rotores de bomba, esteiras transportadoras, válvulas de aerossol (LOKENSARD, 2013; MANO, 1991).

Tabela 2 – Propriedades do Poliacetal Celcon M90

Propriedades ¹	Unidades	Valores
Índice de viscosidade (Melt Volume Rate)	cm ³ /10min	8
Densidade	kg/m ³	1410
Temperatura de amolecimento	°C	165
Resistência ao impacto Izod 23°C	kJ/m ²	5,7
Absorção de umidade 23°C/50%RH	%	0,2

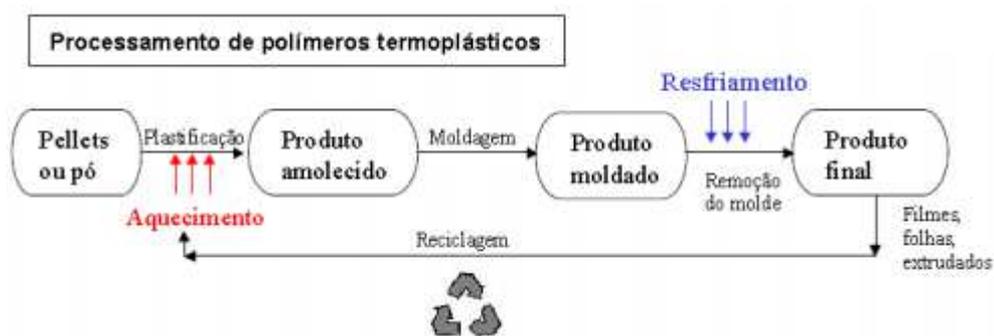
¹ Ensaio em corpo de prova moldado por injeção conforme ISO 9988-2

Fonte: Adaptado de CELANESE, 2012.

2.1.3 Processamento de termoplásticos

Os termoplásticos apresentam a característica de amolecer quando aquecidos, podendo, dessa forma, adquirir a forma do molde quando resfriado. Quando devidamente amolecido e solidificado, o termoplástico não sofre nenhuma alteração em sua estrutura química, o que permite que ele receba novamente aquecimento, sendo reaproveitado. A Figura 5 mostra o ciclo de vida de um termoplástico.

Figura 5 - Ciclo de vida do polímero termoplástico



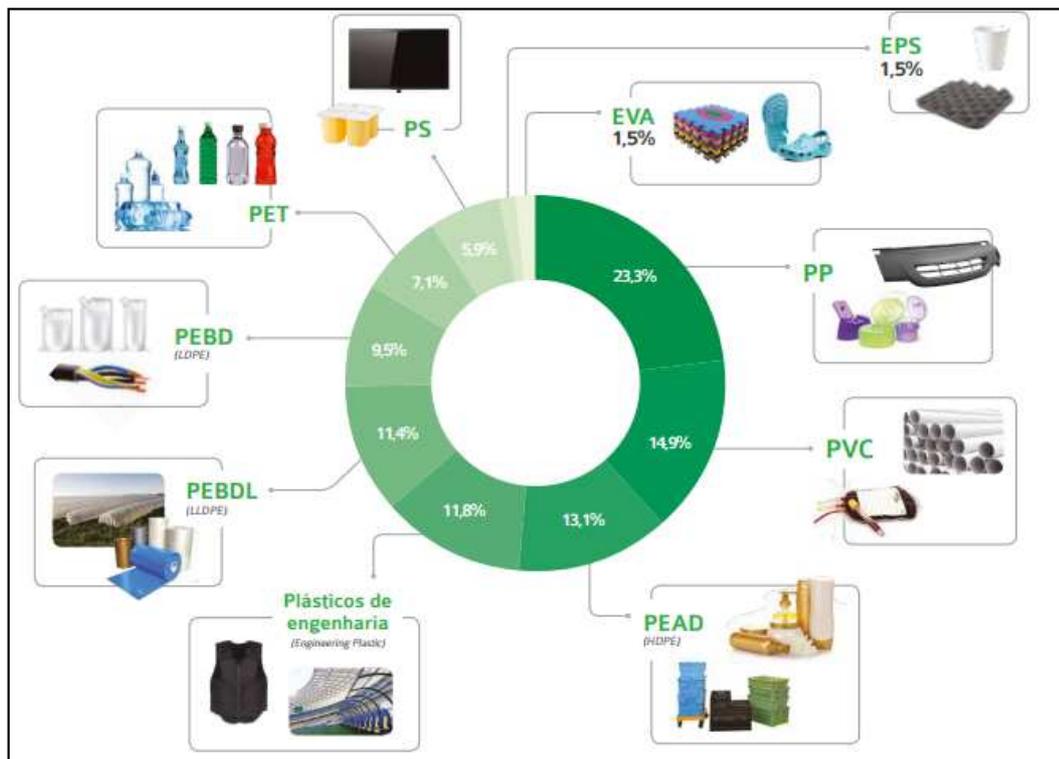
Fonte: Marin, 2014.

A matéria prima do polímero é produzida por processos químicos de polimerização e transformadas em grânulos ou pó que recebem o aquecimento e, então, são moldadas e solidificadas resultando numa peça semimanufaturada, ou seja, que ainda passará por processamento posterior até se tornar um produto final, como filmes, chapas, ou peça pronta,

como embalagens, produtos de utilidade doméstica, componentes para a indústria automotiva, entre outros (MICHAELI et al., 1995; ABIPLAST, 2015).

A Figura 6 mostra as aplicações dos principais termoplásticos no Brasil.

Figura 6 – Aplicações do plástico por tipo de resina



Fonte: ABIPLAST, 2015.

Segundo Canevarolo Jr. (2002, p. 19), “em 2002, existiam no Brasil 7.898 empresas no setor de transformação do plástico empregando 220.000 pessoas [...] a maioria delas são micro e pequenas, normalmente operadas por núcleos familiares”.

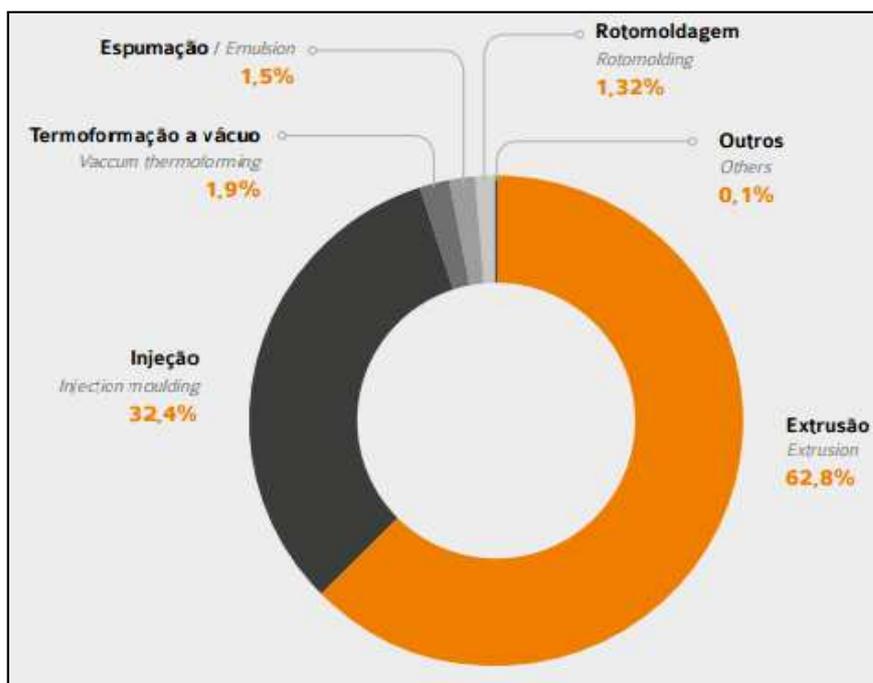
Dados ABIPLAST (2015) declaram:

O setor de transformados plásticos possui mais de 11,5 mil empresas distribuídas por todo o Brasil. Este montante acumulado é composto, predominantemente, por micro e pequenas empresas, com produção limitada e que muitas vezes atendem demandas locais, no máximo regionais.

As empresas de maior porte contemplam 700 unidades, compreendendo 92% do volume de produção, muitas vezes em escala mundial, o que exige padrões produtivos e de qualidade elevados, isso demanda crescimento tecnológico que influencia no direcionamento das micro e pequenas empresas (ABIPLAST, 2015).

Dentre os principais processos produtivos de transformação de termoplásticos em produto intermediário ou final, estão injeção, extrusão, sopro, termoformagem e rotomoldagem. Dados da ABIPLAST (2015) demonstram, na Figura 7, que mais da metade (62,8%) dos produtos transformados plásticos são pelo processo de extrusão, seguido pela injeção (32,4%), totalizando 95,2% dos processos utilizados para transformar plásticos.

Figura 7 – Processos produtivos utilizados na produção de transformados plásticos



Fonte: ABIPLAST, 2015.

Sendo o objeto de estudo prático e um dos processos mais versáteis entre os processos de transformação de termoplásticos, uma explanação mais detalhada do processo de injeção é abordada neste trabalho.

2.2 Processo de Moldagem por Injeção

O processo de moldagem de termoplásticos por injeção consiste, basicamente, em fundir e homogeneizar o polímero, que se apresentam inicialmente em estado sólido na forma de grânulos ou pó, e injetar o material fundido para o interior do molde, que após ser resfriado, se solidifica tomando a forma molde.

A injeção é um processo cíclico, conhecido como “ciclo de injeção”, que pode ser dividido em duas etapas, sendo a da plastificação e a da injeção. Estas podem ocorrer sequencialmente e, por vezes, de forma simultânea em suas ações.

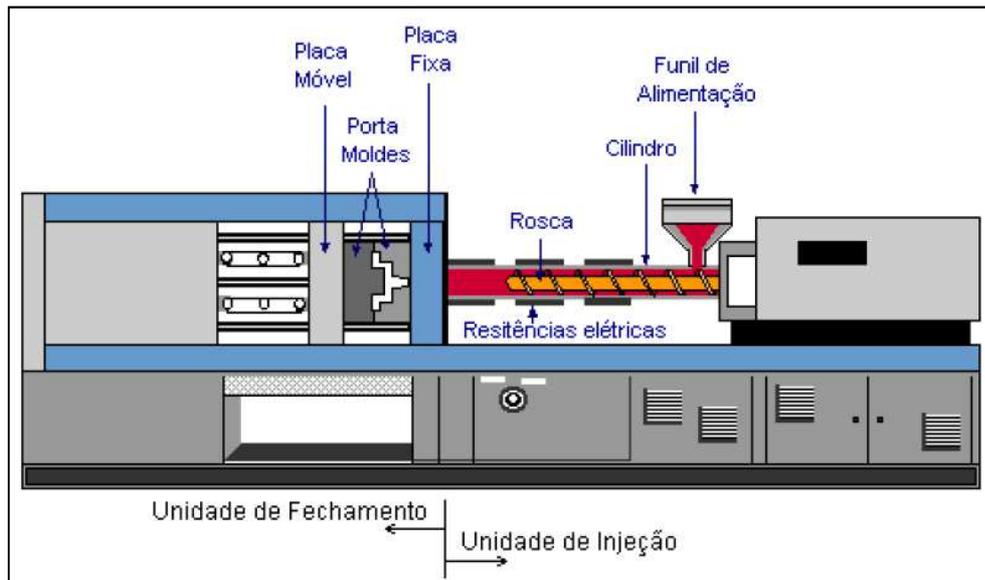
A variedade de máquinas injetoras disponíveis que se desenvolveram conforme o crescimento do processo possibilita a fabricação de peças complexas e de diferentes tamanhos. No entanto, as injetoras seguem um mesmo conceito de processamento, chamado por Michaeli et al. (1995, p. 105) de máquinas universais.

Serão abordados neste trabalho alguns conceitos e princípios básicos para o entendimento do processo de transformação, bem como o conceito dos principais parâmetros que, por decisão humana, interferem diretamente na qualidade e produtividade dos produtos obtidos.

2.2.1 A injetora

A máquina injetora, em seu conceito fundamental, pode ser dividida em duas unidades: a unidade de injeção e a unidade de fechamento, como podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 – Representação da composição de uma máquina injetora



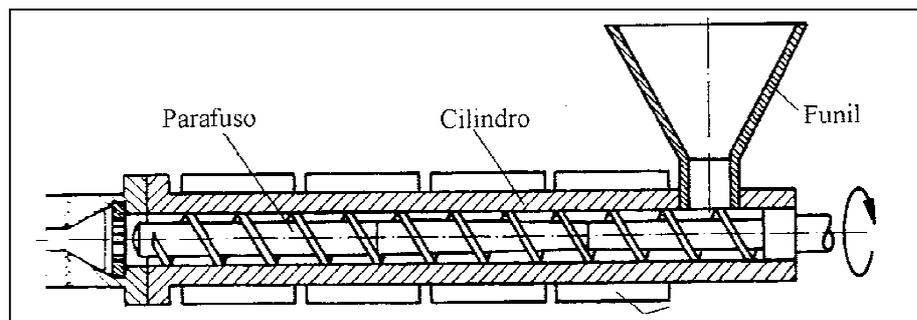
Fonte: Nishimoto, 2001.

a) Unidade de injeção

A unidade de injeção é composta pelo funil de alimentação, rosca sem fim, também conhecida como parafuso sem fim, que gira no interior de um cilindro aquecido por resistências elétricas. Faz parte desse conjunto o bico de injeção, onde o material passa depois de fundido para preencher a cavidade do molde. Todos esses componentes são apoiados sobre a mesa da máquina.

O funil de alimentação, como mostra a Figura 9, é responsável por alimentar o cilindro de plastificação com polímero, que se apresenta na forma de grãos ou pó. Este material é transportado até a parte frontal, próximo ao bico de injeção, pelo movimento de rotação e locomoção da rosca para trás.

Figura 9 – Unidade de injeção



Fonte: Michaeli et al., 1995.

Durante o transporte, o material polimérico sofre cisalhamento pela ação da força de atrito causado pelo contato com as superfícies da rosca, do cilindro e do próprio material, que combinado ao aquecimento pelas resistências elétricas do cilindro se funde, acumulando massa fundida na parte frontal do cilindro.

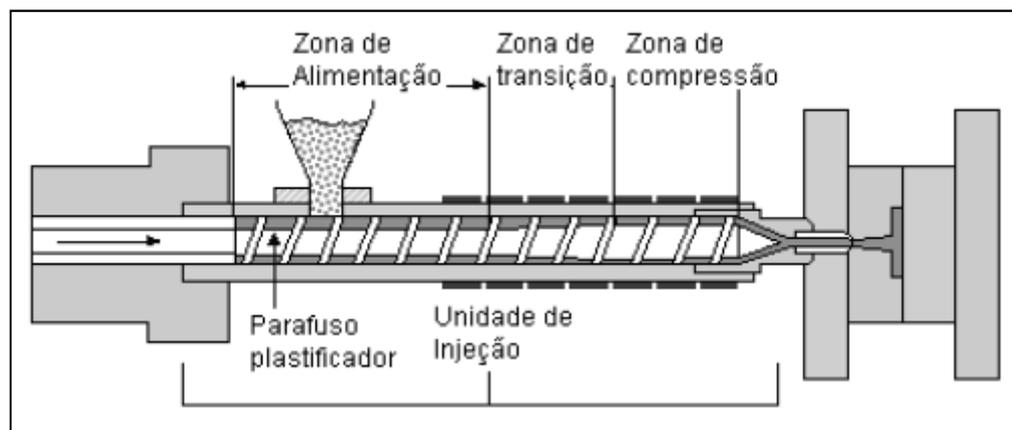
Com o molde devidamente fechado, o material fundido é pressionado para dentro da cavidade por meio do bico de injeção e atuação da rosca como um pistão, em movimento retilíneo, até que o molde esteja totalmente preenchido. O ciclo da unidade de injeção finaliza quando a peça se compacta e a pressão aplicada pelo pistão não é mais necessária, dando início ao processo de resfriamento e solidificação.

A rosca tem como principais funções transportar, plastificar e homogeneizar o polímero, de forma a fornecer uma massa fundida na temperatura e viscosidade ideal para o processo de injeção.

A principal característica da rosca plastificadora, em qualquer tipo de máquina, é a sua capacidade de plastificar o polímero de forma rápida e uniforme, mantendo homogêneas a composição e a temperatura da massa. Uma rosca bem projetada deverá produzir uma massa com viscosidade e temperaturas uniformes, obtendo-se altas produções com um mínimo de degradação térmica (HARADA, 2004, p. 56).

A mais utilizada, de acordo com Michaeli et al. (1995, p. 89), é a rosca de três zonas, Figura 10, por conseguir processar a maioria ente os diversos termoplásticos existentes.

Figura 10 – Rosca de três zonas



Fonte: Kiam, 2006.

A primeira zona é responsável por receber o material polimérico em seu estado inicial e temperatura ambiente, transportando-o para a próxima região da rosca, por isso, essa zona recebe a denominação de zona de alimentação.

A próxima região é a zona de compressão, que devido ao aumento contínuo do diâmetro da rosca, aumenta a compressão e o cisalhamento da massa polimérica, iniciando o processo de plastificação. Essa zona compreende a maior parte da rosca com o intuito de fundir, praticamente, todo o polímero inserido, sendo uma característica importante para ser analisada em relação ao volume e material que se deseja injetar.

A plastificação total do polímero ocorre na zona de homogeneização, que apresenta diâmetro constante, onde são fundidos os grânulos que não foram fundidos na zona de compressão e onde ocorre a completa homogeneização da massa fundida, incluindo seus pigmentos e aditivos.

b) Unidade de fechamento

A unidade de fechamento compreende o molde, as placas fixa e móvel que fixam as repartições do molde e que se deslocam em quatro colunas, responsáveis por permitir o movimento da placa e alinhar o bico de injeção com a bucha de injeção do molde (HARADA, 2004).

A placa do lado do bico de injeção é denominada fixa, enquanto a placa móvel do lado do fechamento se movimenta nas colunas, permitindo a extração da peça pelo sistema de extração. O fechamento é feito por um sistema de alavanca articulada com acionamento hidráulico, utilizada em máquinas de pequeno e médio porte, que fornecem a força necessária para suportar a pressão exercida no molde durante a injeção e rápida movimentação. A força de fechamento do molde deve ser capaz de superar a pressão de injeção gerada pela cavidade no sentido de abertura do molde. Se a compressão da superfície de fechamento for inferior à necessária, o material escoar para fora do molde, reduzindo a pressão interna da cavidade, o que pode provocar defeitos como rebarba, alteração no peso e nas dimensões da peça. A força de fechamento é utilizada como parâmetro de escolha de uma máquina ou, então, fator limitante da área máxima projetada para a peça moldada (MICHAELI et al., 1995; ANDREI, 2007; HARADA, 2004).

2.2.2 O molde

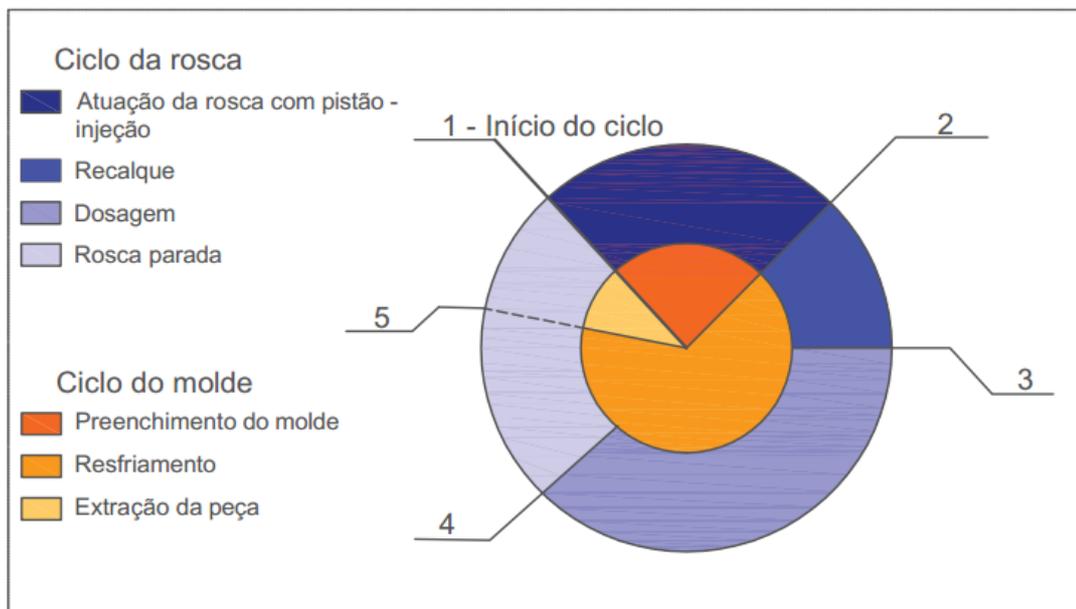
O molde é uma importante ferramenta que compõem a unidade de fechamento, pois é ele que dá forma ao polímero injetado. Para Manrich (2013, p. 312), existem dois tipos comuns, os moldes de duas placas e os de três placas. O molde de duas placas, como o nome já diz, apresenta duas placas sendo uma fixa, com a cavidade fêmea, e uma móvel, macho. Enquanto o de três placas, além das duas placas citadas, fixa e móvel, apresenta uma placa intermediária, que forma o canal de distribuição. Quando ocorre a abertura do molde, o canal é separado da peça moldada.

Para que a peça seja devidamente moldada, o molde precisa ser capaz de realizar algumas funções fundamentais como permitir o fluxo de massa fundida para dentro da cavidade de forma que ela seja bem distribuída (sistema de distribuição ou alimentação), resfriar a massa fundida até que ela se solidifique e seja possível a extração (sistema de resfriamento), extrair a peça moldada por meio da separação das placas e dos pinos extratores (sistema de extração), entre outras funções (MANRICH, 2013).

2.2.3 Etapas do processo de injeção

O processo de injeção é um processo cíclico, denominado ciclo de injeção, definido por Harada (2004, p. 52) como sendo “o intervalo total de tempo entre o instante em que o molde se fecha durante um ciclo e o período correspondente em que ele se encerra no ciclo seguinte”, onde as unidades de fechamento e de injeção atuam de forma sequencial e independente nas principais etapas que são: fechamento do molde, dosagem, preenchimento, recalque, resfriamento e extração, que podem ser observadas na representação do ciclo na Figura 11 (MANRICH, 2013).

Figura 11 – Representação do ciclo de injeção



Fonte: Adaptado de MANRICH, 2013.

Na Figura 11, o círculo interno representa o ciclo da unidade de fechamento, relacionando as etapas do processo com foco na atuação do molde, e o círculo externo representa a unidade de injeção com foco na atuação da rosca durante a execução do processo.

Ao final de 5 e início de 1, onde também se inicia o ciclo de injeção, o molde se fecha e o material fundido está pronto para ser injetado, esta etapa é denominada fechamento do molde. De 1 a 2 o material fundido é injetado com a atuação da rosca como um pistão limitado pela barreira de retorno, que impede o retorno de material fundido, enquanto o molde é preenchido, dando a denominação para esta etapa de preenchimento. De 2 a 3 a rosca exerce

pressão e, quando necessário, injeta mais material de forma a manter o material recalado dentro do molde até que o ponto de injeção solidifique, isolando a peça moldada da pressão de injeção, enquanto o molde resfria, esta etapa é denominada recalque. De 3 a 4, assim que o ponto de injeção se solidifica, ou seja, após o tempo de recalque, a rosca retorna com movimento giratório em direção ao funil de alimentação fundindo e dosando mais material para o próximo ciclo, esta etapa é denominada dosagem. De 4 a 1 a rosca aguarda o ciclo do molde encerrar para que possa iniciar um novo ciclo, isso ocorre quando o tempo de resfriamento da peça moldada, que ocorre de 2 a 5, é maior que o tempo de ciclo do molde. Enfim, de 5 a 1 o molde se abre e a peça moldada, resfriada de modo que possa ser removida da cavidade sem sofrer deformações, é extraída pela ação dos pinos ejetores, etapa denominada de extração. Após a extração, o molde se fecha iniciando um novo ciclo (MANRICH, 2013; LOKENSGARD, 2013).

A etapa de preenchimento da cavidade do molde apresenta três estágios, sendo eles o preenchimento, a compressão e o recalque ou compensação.

O preenchimento consiste em completar a cavidade do molde com material fundido, que segundo Manrich (2013), apenas 75% de material necessário é injetado, pois nessa etapa há em torno de 25% de expansão dependendo do polímero, ou seja, se o material fosse resfriado nessa etapa, sofreria contração de 25% em relação ao tamanho do molde. Por isso, é necessário pressurizar injetando mais material ao molde.

A etapa de compressão se resume em aplicar pressão de maneira controlada sobre a massa fundida de forma a compensar o encolhimento injetando mais material. Isso é possível, pois o polímero no estado fundido tem a propriedade de compressibilidade, o que permite a injeção de 25% a 10% a mais de material além da quantidade injetada na etapa anterior, dependendo do polímero (HARADA, 2004; MANRICH, 2013).

Na etapa de compensação a pressão é reduzida, denominado ponto de comutação o momento em que a pressão deixa de ser de pressurização e passa a ser de recalque. A pressão de recalque é responsável para que a massa, que está sob pressão, seja compactada e não retorne. O tempo de recalque se estende até a solidificação do canal de injeção, quando não é mais possível introduzir ou houver retorno de material (MANRICH, 2013; NISHIMOTO, 2001).

Nestas etapas que compõem o ciclo destacam-se os ciclos de tempo como, tempo de enchimento ou tempo de injeção, segundo Harada (2004, p. 51) “é o intervalo de tempo entre o instante em que a rosca avança e o momento em que a pressão de injeção pára de atuar”,

tempo de recalque e tempo de resfriamento. O tempo que leva para abrir e fechar o molde, somado ao tempo do ciclo de injeção é denominado ciclo da máquina, pois os tempos de abertura e fechamento independem das variáveis de injeção e do material utilizado (LOKENS GARD, 2013; HARADA, 2004).

Assim como cita Nishimoto (2001), os *softwares* que simulam as etapas do processo de moldagem por injeção buscam demonstrar os efeitos na peça moldada após sua extração, seja identificando uma deformação ou confirmando resultados de melhoria. Porém, para que isso seja determinado, o processo conta com diversos parâmetros que determinam a qualidade da peça final e influenciam na otimização dos tempos do processo.

2.2.4 Parâmetros do processo de injeção

Existem algumas variáveis no processo de injeção que determinam seu bom desempenho e peças moldadas de qualidade. A determinação dos valores e combinação entre eles é uma tarefa que exige conhecimento, experiência e testes práticos de tentativa e erro. Numa alternativa de otimizar e/ou definir tais parâmetros são utilizados os *softwares* de simulação.

Manrich (2013) afirma que duas peças moldadas com o mesmo material, na mesma máquina e molde, mas com parâmetros diferentes resultarão em peças finais com características diferentes, bem como comportamentos distintos durante sua utilização, afetando o sucesso do processo e qualidade do produto injetado.

De acordo com Busato (2004), tempo, temperatura e pressão são os parâmetros base do processo de injeção.

Para que ocorra o preenchimento do molde é necessário que o material fundido apresente fluidez, ou seja, baixa viscosidade, e homogeneidade, sem apresentar traços de degradação. A viscosidade varia de acordo com cada tipo de polímero e a quantidade de calor fornecida à massa, seja por cisalhamento ou aquecimento pelas resistências elétricas do cilindro. Quanto maior o calor fornecido, menor a viscosidade do fundido. Dessa forma, para controlar o calor fornecido é preciso observar alguns parâmetros tais como, a temperatura do cilindro, a rotação da rosca, a pressão e velocidade de injeção e a contrapressão.

Assim que o molde é preenchido, variáveis como a pressão de recalque, a temperatura do molde e o tempo de resfriamento complementam os parâmetros básicos de uma máquina injetora.

a) Temperatura do cilindro

As resistências elétricas distribuídas ao longo do cilindro têm como objetivo conduzir calor para o polímero e controlar sua temperatura. Como o atrito entre a rosca e o polímero gera calor, cada região da rosca deve ter a temperatura bem controlada e, se for o caso, as resistências devem ser desligadas para que não cause a degradação do polímero (HARADA, 2004).

As temperaturas ideais, segundo Harada (2004), dependem do tipo de polímero utilizado, entretanto, a maior parte do calor deve provir do atrito, utilizando a temperatura das resistências apenas para controlar a temperatura do polímero.

“Cada resina em particular possui um perfil médio de temperatura característico, o qual pode apresentar variações em função do tempo de residência do material no cilindro” cita Busato (2004, p. 25).

O tempo de residência é o tempo em que o material polimérico fica dentro da rosca até ser injetado. Para Manrich (2013), a dosagem de material varia conforme a peça a ser moldada, quando a quantidade necessária de material é pequena, este percorre a rosca mais lentamente, quando comparado a uma dosagem maior e, conseqüentemente, recebendo mais calor. Logo, se o material polimérico permanecer à altas temperaturas e por muito tempo dentro do cilindro sofrerá superaquecimento e, posteriormente, degradação.

A capacidade de plastificação de uma máquina injetora é a quantidade de calor que pode ser fornecida ao polímero no cilindro em relação ao tempo (MANRICH, 2013).

b) Rotação da rosca

Além do aquecimento do cilindro pelas resistências elétricas, a rotação da rosca causa atrito entre sua superfície e o polímero gerando calor pelo cisalhamento das partículas. Quanto maior a velocidade de rotação, maior o atrito e a temperatura, responsável por plastificar e homogeneizar o material. O aumento da velocidade de rotação da rosca causa, ainda, o aumento na vazão, devido ao arraste de material, diminuindo o tempo de dosagem (BUSATO, 2004; MANRICH, 2013).

Deve-se atentar ao fato de que os termoplásticos, como por exemplo, o PET, PVC e PC, sofrem degradação a altas rotações e temperaturas, dependendo da geometria da rosca e das propriedades reológicas do polímero. Termoplásticos fundidos de alta viscosidade tendem a ser mais sensíveis a mudanças na velocidade de rotação (HARADA, 2004).

Além disso, o polímero que é dosado e que se acumula na frente da rosca tende a apresentar variações de temperatura de acordo com o tempo em que permanece nas diferentes zonas da rosca e as diferentes condições em que o material se encontra durante o transporte a cada rotação entre os filetes da rosca. Essas variações podem ocasionar variação no resfriamento e nas propriedades da peça final. Dessa forma, o controle de rotação e de tempo nas diferentes etapas de plastificação, bem como o tempo de residência, combinada à contrapressão (pressão oposta ao movimento linear de retorno da rosca), modificam o cisalhamento do material, resultando em massa fundida com temperatura semelhante (MANRICH, 2013).

c) Contrapressão

Para Manrich (2013, p. 331), contrapressão é “a resistência imposta à rosca para o seu retorno em direção ao funil”. Quando o material está sendo dosado, a rosca segue em movimento rotatório em direção ao funil de alimentação e força o material a ir para sua parte frontal, próximo ao bico de injeção, onde se acumula e a empurra para trás. Nesse momento, quando se aplica a contrapressão, que atua no sentido oposto ao retorno da rosca, o cisalhamento aumenta gerando calor, melhorando a plastificação e a homogeneização da massa.

d) Pressão de injeção

De acordo com Manrich (2013, p. 323), a pressão de injeção “é a pressão exercida pelo pistão sobre o material durante o preenchimento”, ou então, “é a pressão necessária apenas para preencher o molde sem pressurização”.

Para Nishimoto (2001), existem alguns fatores que influenciam na determinação da pressão de injeção adequada ao preenchimento como, tipo de polímero, complexidade da peça, temperatura do molde e da massa e os sistemas de alimentação e distribuição.

Os termoplásticos com alta viscosidade apresentam maior dificuldade de fluir e, conseqüentemente, preencher a cavidade do molde, exigindo maior pressão de injeção. Dessa forma, a temperatura do fundido relaciona-se diretamente com a pressão de injeção, pois à medida que a temperatura aumenta, observa-se a redução na pressão de injeção necessária para o preenchimento (MANRICH, 2013; NISHIMOTO, 2001).

Outro ponto que interfere na dificuldade de fluidez da massa é a complexidade da peça a ser moldada, curvas, nervuras e paredes finas provocam o resfriamento da massa

quando esta entra em contato com a superfície do molde que, geralmente, apresenta menor temperatura em relação ao fundido, formando camadas solidificadas que dificultam o fluxo de material e aumentam a viscosidade da massa devido a troca de calor, sendo necessário o uso de pressão de injeção mais alta. Entretanto, quando a temperatura do molde é mais alta, a massa fundida em contato com a superfície durante o preenchimento troca calor mais lentamente, o que evita o aumento da viscosidade e a formação de camadas solidificadas, resultando em uma pressão de injeção menor. Além disso, quando os sistemas de alimentação e de distribuição dificultam o fluxo da massa, a pressão de injeção necessária para o preenchimento tende a ser maior (NISHIMOTO, 2001).

A velocidade de injeção é um parâmetro que influencia no tempo de preenchimento do molde e contribui para ciclos de injeção mais curtos. Segundo Harada (2004, p. 62) “é comum usar-se uma pressão de injeção alta para preencher o molde mais rapidamente; obviamente, este tempo de injeção depende do tamanho, do número, e da localização das entradas, dimensões do bico e das propriedades de fluxo do material”.

e) Pressão de recalque

Segundo Manrich (2013, p. 323), pressão de recalque é “a pressão após a pressurização; normalmente a pressão de pressurização comuta para a de recalque, assumindo valores inferiores”. Sua função é manter compactada a massa fundida até que ela se solidifique (BUSATO, 2004).

Para que haja compactação, pode ser injetado ou não mais material para dentro do molde; quando o fluxo de material para dentro do molde ainda é possível, quanto maior a pressão maior é a quantidade de massa que entra de maneira forçada no molde, aumentando o peso da peça e provocando problemas de extração (BUSATO, 2004; MANRICH, 2013).

A aplicação da pressão de recalque se limita ao tempo necessário para a solidificação do canal de injeção (canal que liga o bico de injeção ao canal de alimentação, conhecido como galho, ou diretamente na cavidade), pois após a solidificação a atuação da pressão não surtirá mais efeito. No entanto, o momento da comutação não deve ocorrer cedo ou tarde demais, ocasionando deformações na peça (MICHAELI et al., 1995; MANRICH, 2013).

f) Temperatura do molde

O controle da temperatura do molde ocorre por meio da circulação de um líquido refrigerante, geralmente água ou óleo, em canais distribuídos estrategicamente pelo molde. A

faixa de temperatura do molde, segundo Harada (2004), varia entre 20°C e 70°C, sendo que a quantidade e a temperatura do líquido refrigerante deve ser controlada para que o molde mantenha a temperatura ideal para a solidificação, que varia de material para material. Na opinião de Manrich (2013), a água é o principal líquido refrigerante por ser relativamente barata, possuir baixa viscosidade, estar disponível e ainda ser reciclável por meio de tratamentos. No entanto, para temperaturas mais elevadas, utiliza-se óleo.

A temperatura do molde está diretamente relacionada à velocidade de resfriamento, pois o polímero ao entrar em contato com a superfície da cavidade do molde inicia o processo de resfriamento, formando sucessivas camadas na superfície da cavidade do molde que cresce para o interior da peça. Assim, quanto menor a temperatura, mais rápidos são os ciclos, porém podem causar deformações dependendo do material (HARADA, 2004; MANRICH, 2013).

g) Tempo de resfriamento

De acordo com Michaeli et al. (1995, p. 113), o tempo de resfriamento, no ciclo de injeção, corresponde ao período em que se inicia o preenchimento até o momento da extração da peça moldada, de forma que esta em determinada temperatura de extração se apresente geometricamente estável.

Para Harada (2004, p.52), “o tempo de resfriamento é o mais longo (em relação ao ciclo de injeção) e depende da espessura da peça injetada, da temperatura do molde e das características do termoplástico”. Já Moldflow Insight (2015), considera como fatores principais que afetam o tempo de resfriamento a temperatura do fundido e a temperatura do molde.

2.2.5 Qualidade das peças moldadas por injeção

A ISO 9000:2005 conceitua qualidade como sendo o “grau no qual um conjunto de características inerentes satisfaz a necessidade ou expectativa que é expressa geralmente, de forma implícita ou obrigatória”, ou seja, a qualidade é determinada pelo atendimento ou não das exigências e expectativas que se adéquam ao uso pelo qual é destinado.

As peças moldadas por injeção podem apresentar algum defeito que as torna inutilizável ou prejudica a função para qual foi projetada. Tais defeitos podem ser causados pelo uso incorreto ou inadequado da máquina, do molde ou do material. Esses três fatores devem ser analisados quando se pretende eliminar os defeitos e melhorar as condições do processo de injeção (HARADA, 2004).

Quanto à máquina, deve ser verificado as condições físicas das peças e o seu funcionamento. Além disso, a regulagem dos parâmetros do processo deve estar de acordo com o material e a peça a ser moldada.

O molde é a ferramenta responsável por dar a forma e as dimensões para o produto moldado, dessa forma para obter peças moldadas de qualidade e evitar custos posteriores com correções, o projeto do molde deve analisar os fatores relacionados, entre outros, ao desenho do produto e suas dimensões, ao material, ao tipo de molde, ao processo de modelagem e às características técnicas da aplicação do produto moldado (HARADA, 2004).

O desenho do produto, de acordo com Harada (2004) pode trazer sérios problemas na construção do molde, o que pode resultar em produtos defeituosos e de baixa qualidade. As formas complexas e paredes espessas devem ser evitadas, devido ao resfriamento não uniforme que provoca defeitos.

Além disso, para que o produto plástico moldado apresente as dimensões desejadas, o molde deve ser projetado considerando o encolhimento, também denominado por contração, comum aos polímeros. Esse efeito ocorre, pois, a massa polimérica ao ser aquecida sofre expansão térmica e se contrai cessado o aquecimento. Os valores de encolhimento variam de acordo com o tipo de polímero e o nível de tensões internas na peça moldada (MANRICH, 2013).

Segundo Harada (2004, p. 69):

A modelagem de peças de material plástico requer geralmente ferramentas muito caras [...] e o custo do material plástico empregado representa uma grande porcentagem do custo total da peça, razão pela qual é interessante diminuir ao máximo seu peso, sem comprometer a solidez.

Nesse contexto, o desenho do molde deve ser projetado com base em estudos detalhados para que custos adicionais com alterações sejam evitados e peças de qualidade sejam obtidas.

Um dos principais defeitos que afetam a qualidade da peça moldada, na aparência ou na utilização, que pode ser causado por um ou pela combinação dos fatores máquina, molde, material, projeto do molde, projeto do produto e meio ambiente é o empenamento.

a) Empenamento

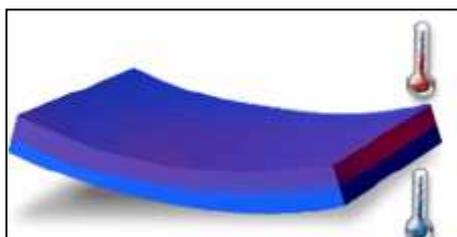
É a distorção ou deformação em relação ao formato original da peça moldada acima dos valores especificados, dificultando a montagem ou inutilizando a peça. Pode ocorrer em consequência do encolhimento diferente nas regiões da peça, alta contração volumétrica,

resfriamento não uniforme, partes finas e espessas em uma mesma peça que sofrem troca de calor diferentes, projeto dos canais de refrigeração não são adequados ou então o desenho da peça não permite um resfriamento uniforme (MANRICH, 2013).

O empenamento pode ocorrer devido à espessura ao longo da peça, pois a massa de polímero fundido ao entrar em contato com a superfície do molde se resfria antes da massa fundida central do fluxo. Quando a massa fundida do centro sofre resfriamento, ela se contrai mesmo com as camadas mais externas da superfície solidificadas, gerando tensões internas que causam a deformação na peça (HARADA, 2004).

É possível observar essa situação na Figura 12, abaixo, onde a superfície inferior, apoiada numa base mais fria, se refria primeiro e contrai. Tempo depois, a superfície superior também se refria e contrai, mas a superfície inferior que já está sólida faz com que a contração gere tensões internas, causando a deformação ou empenamento da peça.

Figura 12 – Empenamento por resfriamento não uniforme



Fonte: Kiam, 2006.

As tensões internas são, segundo Manrich (2013, p. 395), “o conjunto de forças instáveis sendo exercidas intermolecularmente devido a muitas moléculas estarem estiradas. Moléculas estiradas estão em um estado de desequilíbrio termodinâmico, no qual estas procuram voltar ao estado de equilíbrio”. Dessa forma, as moléculas exercem tensão intermolecular e qualquer energia externa que aumente a energia do sistema faz com que essas tensões arrastem um conjunto de moléculas que mudam de posição causando o empenamento.

É possível, ainda, ocorrer empenamento durante a sua utilização, quando a peça moldada é submetida a um trabalho com elevadas temperaturas, produtos químicos ou sistemas de montagem onde há aperto de um parafuso.

Em alguns casos é possível controlar o defeito com refrigeração em temperaturas diferentes conforme a necessidade da peça ou então criar um perfil de recalque para equilibrar as contrações da peça (KIAM, 2006).

Para Manrich (2013, p. 445), “é um defeito que ocorre no moldado e um dos maiores desafios no processo de injeção, exigindo bons conhecimentos por parte do projetista do molde para eliminá-lo”.

Em último caso, optar por outro tipo de material que sofra menos contração, pois materiais semicristalinos sofrem maiores contrações, conseqüentemente, são mais susceptíveis a empenamento.

Na prática, para encontrar as causas do defeito, Harada (2004) sugere que todas as possibilidades relacionadas à máquina devem ser verificadas, ou seja, avaliar se os parâmetros envolvidos na injeção podem ser a causa do defeito. Eliminadas as possíveis causas da máquina, os fatores relacionados ao molde devem ser analisados e, por último, se o material pode ser uma causa potencial.

“Uma análise sistemática das possíveis causas dos problemas e a aplicação das correções necessárias fornecerá as bases para a produção de peças de boa qualidade” (HARADA, 2004, p. 276).

Entretanto, a causa do problema, para Harada (2004), tende a ser encontrada mais rápido do que fazer a sua correção, por exemplo, se for verificado que é necessário ajustar as temperaturas do cilindro para solucionar defeitos causados pela cavidade incompleta, os ajustes devem ser realizados de 10°C em 10°C, de forma que o material se estabilize depois de dez a doze injeções para cada alteração.

A correção, geralmente, demanda muito tempo, custo e retrabalho. E esse trabalho pode ser minimizado, até mesmo eliminado, com o auxílio de ferramentas de simulação quando utilizados na fase de desenvolvimento de produto.

2.3 Simulação Computacional

De acordo com Silva (1998, p. 143):

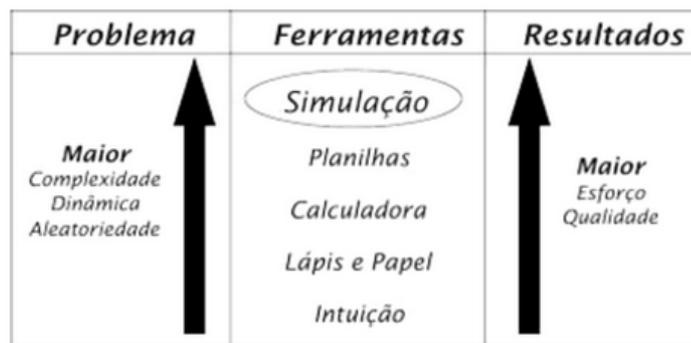
Simular significa reproduzir o funcionamento de um sistema, com o auxílio de um modelo, o que nos permite testar algumas hipóteses sobre o valor de variáveis controladas. As conclusões são usadas então para melhorar o desempenho do sistema em estudo.

Segundo Chwif e Medina (2015), a simulação pode ser classificada em simulação computacional e não computacional. A simulação computacional, foco deste trabalho, é

realizada com o auxílio do computador, enquanto a não computacional utiliza um protótipo físico para simular uma situação de estudo. Os dois tipos de simulação são realizados com o mesmo objetivo, de testar ou experimentar o comportamento de um sistema em situações que são definidas por dados de entradas, premissas e restrições.

Para Chwif e Medina (2015), a simulação muitas vezes é utilizada em casos em que não deveria ser aplicada, vista como a “cura para todos os males”, situações onde outras ferramentas de análise mais simples resolveriam o problema. Diante disso, o uso da simulação tem maior aplicabilidade quando se tem um problema mais complexo, dinâmico e que apresenta aleatoriedade, conforme a Figura 13. É frequente a tomada de decisões de problemas complexos a partir da intuição ou experiência que acabam por levar a resultados desastrosos.

Figura 13 – Uso de ferramentas de análise de acordo com o problema



Fonte: Chwif e Medina, 2015.

“Além de uma ferramenta de análise de problemas, a simulação é uma ferramenta que promove uma melhor compreensão sobre os sistemas, servindo de meio de comunicação entre analistas, gerentes e pessoas ligadas a sua operação” (CHWIF e MEDINA, 2015).

A simulação não fornece, de imediato, soluções otimizadas para o problema, no entanto, é possível testar diferentes condições e escolher aquela que proporciona melhores resultados (GAVIRA, 2003).

A maior disponibilidade de recursos de tecnologia e computacionais contribuiu para a automatização da construção de modelos e dos cálculos das simulações, resultando em soluções cada vez mais rápidas (GAVIRA, 2003).

Graças ao aperfeiçoamento do computador eletrônico, com sua grande velocidade de cálculo, poder de armazenamento de dados e capacidades de decisões lógicas, o ramo experimental da simulação tem se tornado um

instrumento de pesquisa e planejamento cada vez mais importante (GAVIRA, 2003, p. 58 apud SHIMIZU, 1975).

Dentre os recursos da simulação computacional estão os *softwares* CAE (*Computer Aided Engineering*), ferramentas de engenharia auxiliadas por computador que tem por objetivo analisar o comportamento e desempenho físico de uma peça ou processo em diferentes condições, sendo possível, até mesmo, prever problemas e defeitos.

O CAE é apoiado por ferramentas CAD (*Computer Aided Design*), ou desenho assistido por computador, que facilitam desenhos técnicos e projetos, dando suporte aos projetos utilizados nas ferramentas CAE.

A ferramenta CAE, em geral, utiliza o método de análise por elementos finitos (FEA), em que se aplicam métodos numéricos para modelar, em ambientes virtuais, modelos físicos reais, e analisar, por meio de simulações, diversos fenômenos físicos da engenharia.

De modo geral, para realizar uma análise é necessário construir ou importar o projeto gráfico realizado no CAD e gerar a malha de elementos finitos, informar os dados da peça, como material e restrições de propriedades, de acordo com o objetivo da análise a ser realizada.

A malha de elementos finitos representa formulações matemáticas relacionadas com o fenômeno físico que será simulado, aproximando o modelo do fenômeno real. A malha pode ser formada por elementos unidimensionais, uma viga, bidimensionais, um pouco mais complexos que os anteriores por conter mais informações, são representados como “placas” ou planos nas formas triangular ou quadrilátero, e por fim, tridimensionais, elementos sólidos (hexaédrico) que podem representar o modelo da forma mais próxima do real. Por sua vez, cada elemento é interligado a outro formando os nós, que representam os pontos de ligação entre os elementos da malha responsáveis por transmitir as informações processadas nos elementos e uni-las de modo a formar uma única região (MECATRÔNICA ATUAL, 2001; MOLDFLOW INSIGHT, 2015).

A malha gerada deve ser tratada de forma a reproduzir todos os detalhes, sendo necessário realizar correções na forma dos seus elementos para que o resultado da simulação seja o mais confiável possível. Esta etapa de processamento é considerada a que mais demanda tempo, cerca de 70% do tempo de análise, segundo a Mecatrônica Atual (2001), entretanto, é a responsável por definir o grau de confiabilidade dos resultados obtidos.

A quantidade de elementos finitos gerados pela malha que forma a peça também contribui para a confiabilidade dos resultados, ou seja, quanto maior a quantidade de

elementos gerados, maior é a precisão dos resultados, no entanto, maior é o tempo de processamento.

2.3.1 Vantagens e limitações

Dentre as vantagens do uso da simulação Gavira (2003) enumera alguns como: construção de modelos mais realistas; possibilita, ao invés de buscar uma solução, observar as consequências de um conjunto de decisões; é um meio de obter soluções rápidas; pode ser aplicado em vários problemas; permite a análise do que um efeito local poderá causar no sistema como um todo; permite realizar diversas mudanças sem comprometer recursos; facilita o entendimento da interação entre as variáveis; diagnóstico eficiente dos problemas; auxilia no entendimento da atuação dos componentes no sistema; permite visualizar a operação por meio de animações; auxilia na decisão de mudanças quando o custo é elevado; possibilita maior aprendizado por meio de erros e acertos realizados na simulação.

No entanto, Gavira (2003) apresenta algumas desvantagens em relação ao uso da simulação, citados a seguir:

- Necessidade de treinamento especial para a construção de modelos;
- Resultados difíceis de interpretar e de implementar;
- Modelagem e análise requerem tempo e recursos financeiros;
- Pode ser usada de forma inapropriada;
- Dificuldade na construção do modelo;
- Necessita de recursos computacionais apropriados.

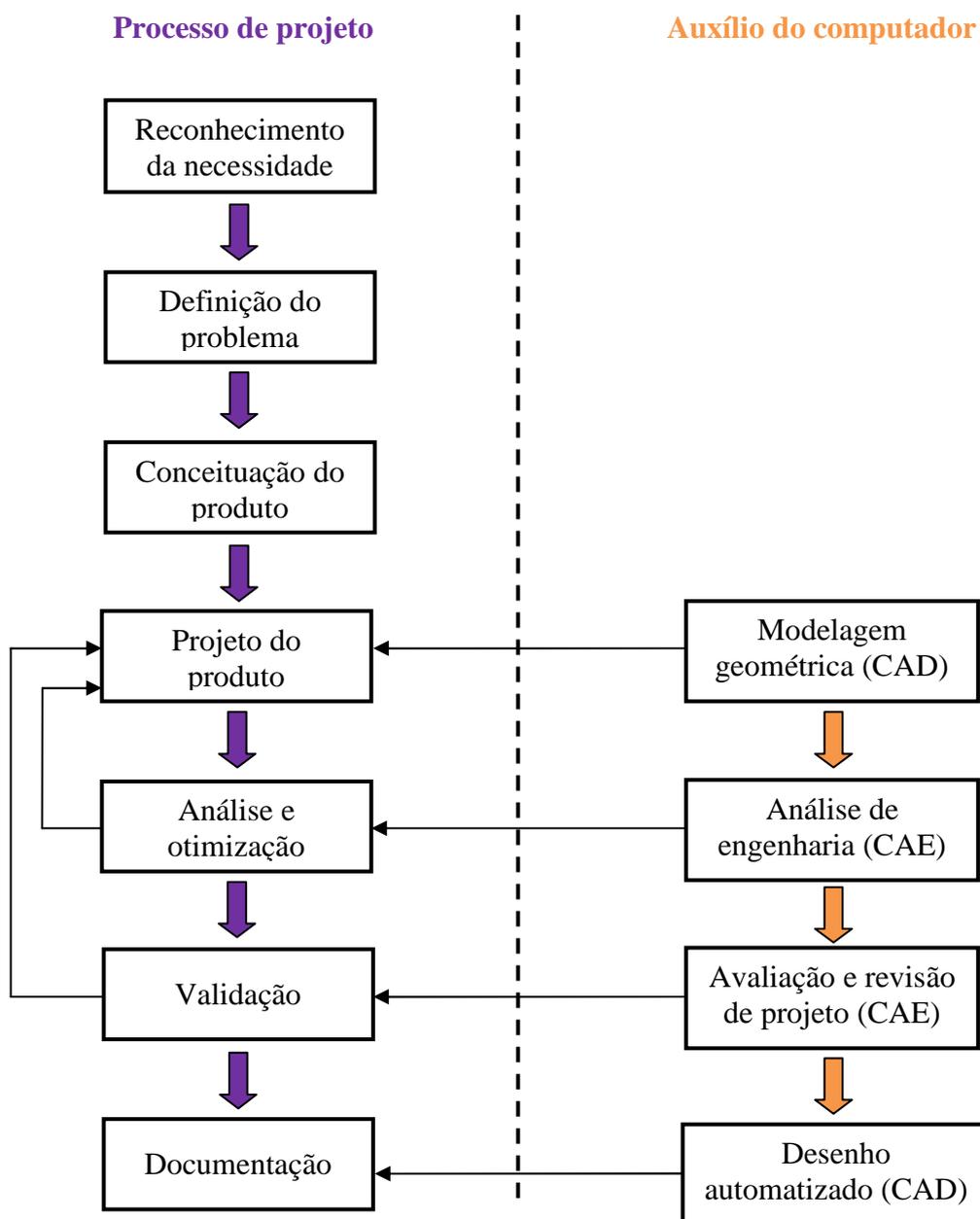
2.4 Simulação no Desenvolvimento de Produtos

O projeto do produto engloba uma sequência típica de etapas que varia, em relação ao conceito, de autor para autor, e na prática, conforme o tipo de produto, a cultura e estratégia da empresa, e o momento competitivo enfrentado pela empresa. No entanto, o conjunto das etapas apresentam alguns pontos em comum e uma lógica semelhante (FERREIRA, 2010).

O modelo de referência, denominação dada à estruturação das etapas e atividades relacionadas ao desenvolvimento de produto, apresenta, em geral, as fases de geração de ideias, conceituação do produto, projeto do produto e do processo, validação e testes, lançamento e produção.

Na fase de projetar produto e processo ocorre o detalhamento, a verificação e a otimização do projeto num ciclo que perdura até homologação do produto. A verificação do conceito do produto é feita por meio de protótipos, onde é possível analisar se o conceito inicial do projeto do produto poderá executar as funções exigidas como previsto. É nessa fase em que as ferramentas CAD/CAE têm maior importância, como pode ser observado na Figura 14, pois automatizam as atividades operacionais que seriam inviáveis, em tempo e custo, se fossem realmente produzidas (DYM et al., 2010).

Figura 14 – Auxílio do computador nas diferentes etapas do desenvolvimento de produto



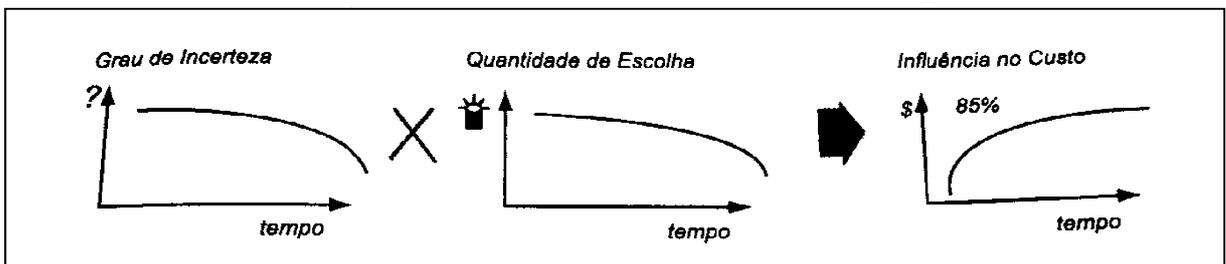
Fonte: Adaptado de MECATRÔNICA ATUAL, 2001.

O desenvolvimento de protótipos tem como finalidade melhorar o projeto, testar todas as métricas que definem como o produto deveria ser, de forma que os resultados sejam utilizados para promover a qualidade do produto. Os protótipos podem ser desde modelos de argila até análises de simulação. No entanto, a construção de um protótipo físico leva tempo, aumentando o tempo de desenvolvimento, e lançamento, do produto, além de gerar custos (SLACK et al., 2013; DYM et al., 2010).

Em muitos casos, no entanto, não podemos desenvolver nem testar um protótipo, talvez por causa do custo, tamanho ou perigo. Nesses casos, frequentemente contamos com a simulação, na qual utilizamos um modelo analítico de computador ou físico de um projeto proposto, para simular seu desempenho sob um conjunto de condições determinado (DYM, et al., 2010, p. 56).

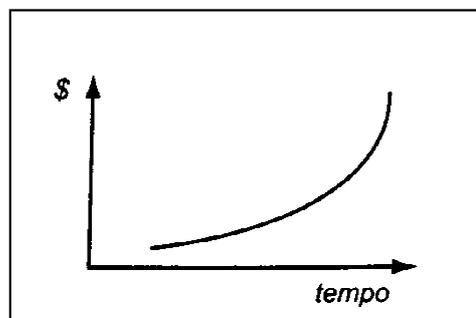
Além disso, à medida que o processo de desenvolvimento progride o grau de incerteza e a quantidade de escolhas diminui, a complexidade e a porcentagem do custo final envolvidos aumentam, como pode ser observado na Figura 15 e Figura 16.

Figura 15 – Influência do custo em relação com o grau de incerteza e quantidade de escolha em função do tempo



Fonte: Rozenfeld et al., 2013.

Figura 16 – Custo de modificação no projeto do produto



Fonte: Rozenfeld et al., 2013.

Rozenfeld et. al (2013) cita:

No início, o grau de incerteza é grande, porém, é neste momento que são realizadas as escolhas de soluções de projeto (materiais, conceitos, processos de fabricação), que determinam aproximadamente 85% do custo final do produto. [...] Mudanças sempre ocorrem, dada a natureza do processo de desenvolvimento, e o importante é fazer com que elas ocorram no início do desenvolvimento, quando o custo das alterações é menor.

Dessa forma, a utilização de ferramentas CAD/CAE utilizadas nas fases iniciais do projeto do produto, permite que erros de projeto sejam identificados e corrigidos no momento em que o custo de modificação é menor. Além de possibilitar que o produto, quando produzido, tenha a qualidade desejada.

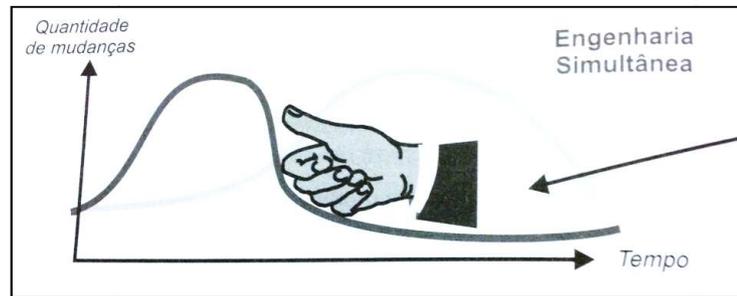
2.4.1 Engenharia simultânea

“O uso de sistemas de auxílio ao projeto de produto está muito relacionado ao advindo da engenharia simultânea, também denominada concorrente ou paralela” (FERREIRA et al., 2010, p. 93).

O termo engenharia simultânea (*Concurrent Engineering*) é utilizado para definir a realização simultânea de atividades de desenvolvimento de produto e planejamento de processo, buscando integrar o projeto do produto com o processo que será utilizado para produzi-lo (ROZENFELD et al., 2013).

A utilização de sistemas computacionais, como CAD, CAE e CAM (*Computer Aided Manufacturing* ou Manufatura Auxiliada por Computador), na engenharia simultânea vincula ao projeto do produto restrições dos processos de fabricação, montagem e manutenção que só seriam observadas numa fase posterior de aprovação do projeto do produto causando custos de revisões e correções. Com isso é possível antecipar os problemas que poderiam ocorrer na fabricação, ou seja, fazer com que as mudanças ocorram no início da fase de desenvolvimento, como mostra a Figura 17, e não na fase de execução como nos projetos tradicionais (FERREIRA et al., 2010; ROZENFELD et al., 2013).

Figura 17 – Representação do objetivo da engenharia simultânea



Fonte: Rozenfeld et al., 2013.

2.5 Simulação no Processo de Moldagem por Injeção

A aplicação do CAE no projeto de uma peça injetada prevê o comportamento do material polimérico desde o preenchimento da cavidade do molde até o seu resfriamento. Fornece informações das variáveis do processo, além de detectar defeitos nas peças e falhas no projeto, que podem ser comparadas com alterações no projeto do molde, da peça e do material, análise que na prática se torna inviável, devido ao tempo do projeto e elevados custos (CORAZZA, 2012 apud KENNEDY, 2008).

Marin (2014 apud PINTO, 2002) destaca a importância do uso de ferramentas CAE quanto à redução da quantidade de experimentos e visualização mais detalhada do processo, como pressão, temperatura, velocidade de preenchimento, tempos do processo.

O estudo do uso de *softwares* no processo de injeção teve maior destaque após 1970 quando o consumo de plásticos aumentou significativamente. A possibilidade de se obter peças de geometria mais complexa com precisão por meio da injeção em moldes tinha baixo custo o que era muito atrativo para as empresas. A partir daí se desenvolveram estudos de modelos matemáticos do processo de modelagem por injeção até a comercialização do primeiro *software* comercial, em 1976 na Austrália, o *Moldflow*, que permitia a determinação dos parâmetros do processo, como temperatura de injeção, temperatura do molde e tempo de injeção (NISHIMOTO, 2001).

Em 1986, era possível realizar a análise de qualquer grau de complexidade, sendo lançado nesse mesmo ano o *C_Flow*, criado por V. W. Wang e K. K. Wang. Estudos sobre malhas adaptativas e simulação utilizando elementos finitos se desenvolveram na mesma época.

Atualmente, os *softwares* simulam aspectos além da fase de preenchimento do molde, como era anteriormente, e estão cada vez mais precisos em representar a realidade.

A simulação do processo de modelagem por injeção tornou-se uma importante ferramenta no desenvolvimento de produtos e otimização de processos.

Atualmente, a otimização através da simulação tem sido uma exigência de várias empresas do ramo automotivo e eletrônico para com seus fornecedores de peças plásticas e moldes. Isto porque a simulação tem sido entendida como ferramenta fundamental para redução de custos e prazos de desenvolvimento (NISHIMOTO, 2001, p. 7).

A simulação do processo de injeção no desenvolvimento de produtos pode ser considerada uma ferramenta de engenharia simultânea, pois além de analisar aspectos físicos do produto, também analisa parâmetros e condições do processo de injeção, podendo ser aplicadas ao processo real, garantindo qualidade ao produto e reduzindo o *tryout*, período de ajuste dos parâmetros da máquina para iniciar a produção do produto.

No entanto, segundo Nishimoto (2001), a simulação de injeção de termoplásticos apresenta algumas dificuldades, como a falta de banco de dados de resinas, principalmente as nacionais, as modelagens requerem muitos dados relacionando as propriedades, reológicas e térmicas, por exemplo, às condições de temperatura, pressão, resfriamento e deformação. Além disso, o resguardo de informações sobre os programas devido à concorrência limita até mesmo informações dos manuais teóricos.

Corraza (2012 apud Sacchelli e Cardoso, 2007) cita alguns programas que simulam a injeção de termoplásticos, como *Moldflow*, *Moldex 3D*, *Moldcae*, *3D-Sigma* e *CadMold*. Além do *MAPS-3D*, *SolidWorks Plastics*, *Simpoe-Mold* e *3D TIMON* citados por Marin (2014) entre os simuladores de preenchimento de cavidade de molde.

Zarechian (2008) comparou as análises de suas peças diferentes a partir de dois materiais nos *software Moldflow* e *Moldex3D* e verificou variações logo no início, nas definições dos parâmetros, que influenciam diretamente nos resultados da análise. Segundo o estudo, que incluiu a comparação do tempo de preenchimento, da velocidade de injeção, da temperatura e da pressão de injeção, o autor concluiu que as previsões do *software Moldex3D* apresentou resultados mais próximos dos reais, e que características menores existem para diferenciá-los, no entanto, o que realmente faz a diferença são os conhecimentos de engenharia para aplicar os resultados da simulação e obter uma influência positiva no processo de injeção.

Segundo Pinto (2002, p. 30), “os sistemas CAE, direcionados para injeção de termoplásticos se bem empregados podem reduzir consideravelmente problemas que podem

ocorrer durante o preenchimento de moldes e cavidades” antecipando possíveis falhas, de modo a determinar as melhores condições do processo na obtenção de um moldado de qualidade (CORAZZA, 2012).

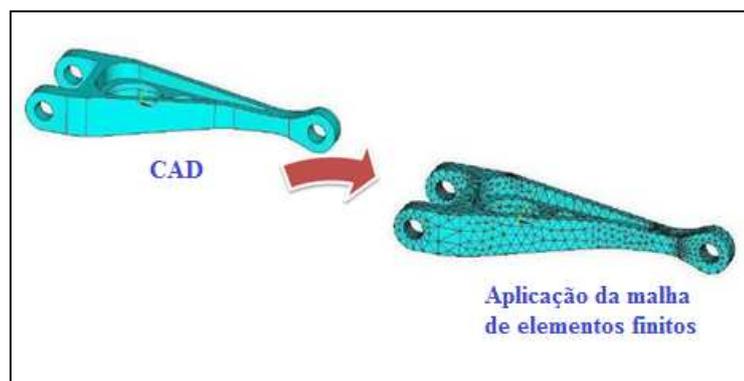
2.5.1 *Moldflow*

De modo geral, o *software Moldflow* analisa o comportamento do fluxo durante o preenchimento e recalque do material termoplástico fundido dentro da cavidade do molde, além do perfil de resfriamento, a partir de predeterminações de material e das variáveis do processo ou, então, fornecendo tais variáveis em uma condição ideal de processamento. Com essa análise é possível detectar pontos críticos do produto e do processo, como defeitos e tempo necessário para completar o ciclo (tempo de preenchimento, recalque e resfriamento), de forma a determinar condições otimizadas de processo.

O projeto de simulação é realizado, basicamente, em três etapas: pré processamento, processamento e pós processamento.

A etapa de pré-processamento consiste em criar um modelo em três dimensões (3D) numa plataforma CAD que seja compatível com o *Moldflow* e gerar uma malha de elementos finitos na peça, conforme Figura 18 (PINTO, 2002).

Figura 18 – Aplicação da malha de elementos finitos

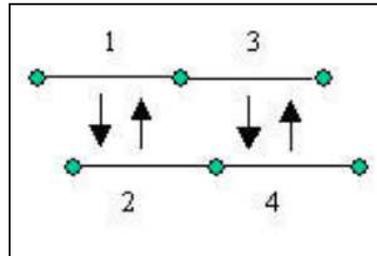


Fonte: Adaptado de MIONI, 2012.

Após a geração da malha é necessário ajustá-la ou corrigi-la de acordo com o mapeamento realizado pelo *software* que indica pontualmente os defeitos, que podem ser, entre outros (MIRANDA, 2005; MOLDFLOW INSIGHT, 2015):

- Parelhamento da malha (*Fusion mesh match*): correção utilizada na malha unidimensional, em que vigas representam a superfície do modelo. Quando estas vigas se apresentam paralelas, os nós de um lado devem coincidir com os nós do outro lado, como na Figura 19. O parelhamento recomendado é de 80% a 85%.

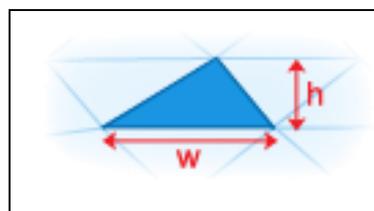
Figura 19 – Representação do parelhamento dos nós da malha



Fonte: Miranda, 2005

- Razão de aspecto (*Aspect ratio*): é a relação entre a largura e a altura da área de cada elemento da malha representada por elementos triangulares, Figura 20. A razão de aspecto para um triângulo equilátero é 1, no entanto, a faixa de trabalho recomendada pelo *software* é de no mínimo 6, o que representa triângulos mais pontiagudos. Deve ser corrigida para a malha bidimensional *dual domain*. Quando a malha é gerada, parte dos elementos não apresenta a proporção desejada, sendo necessário corrigi-las, pois a representação da malha afeta a precisão da análise.

Figura 20 – Representação da razão de aspecto

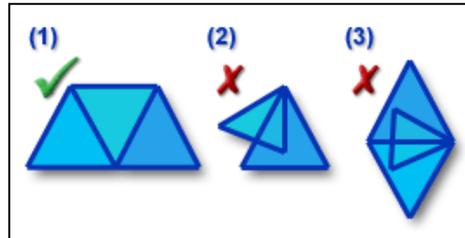


Fonte: Moldflow Insight, 2015.

- Elementos sobrepostos (*Overlapping elements*): a malha não pode conter elementos sobrepostos, pois eles interferem em análises precisas. Na Figura 21, o diagrama 1 mostra os elementos que não se sobrepõem, o diagrama 2 mostra os elementos que se

sobrepõem parcialmente e o 3 a malha de elementos que se sobrepõem totalmente. Esse defeito ocorre em malhas bidimensionais (*dual domain*).

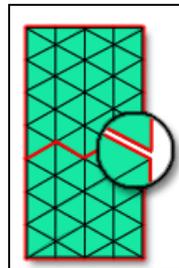
Figura 21 – Representação de sobreposição de elementos



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

- Conectividade dos elementos (*Connectivity elements*): são os elementos de malha que não estão ligados ao resto do modelo, Figura 22, para que ocorra a troca de informações é preciso que todos os elementos estejam conectados entre si. Deve ser corrigida nas malhas bidimensionais e tridimensionais (3D).

Figura 22 – Representação da não conectividade entre os elementos



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

Com a malha devidamente corrigida, o próximo passo é informar os dados de entrada. Caso o projeto já tenha um modelo de molde determinado, é preciso construir os canais de refrigeração do molde, bem como o canal de alimentação, determinando o ponto, ou os pontos, de injeção (*gate location*). O *software* também pode fornecer a refrigeração e o ponto de injeção mais adequados para a peça (MIRANDA, 2005).

Informações como o tipo de fluido refrigerante, a especificação da máquina e as condições de processo, podem ser informadas ou, então, quando se deseja analisar o processo ideal, essas informações são retornadas após o processamento da análise.

No processamento, o *software* realiza os cálculos das etapas que se deseja analisar, sendo o preenchimento (*fill*), preenchimento + recalque (*fill + pack*), resfriamento (*cool*), preenchimento + recalque + empenamento (*fill + pack + warp*), resfriamento + preenchimento + recalque + empenamento (*cool + fill + pack + warp*), que são determinadas nas configurações de análise (MOLDFLOW INSIGHT, 2015).

Com a simulação realizada, a etapa de pós processamento consiste em analisar, interpretar, comparar os resultados obtidos de acordo com o propósito inicial estabelecido para a simulação.

Para Pinto (2002, p. 33), os resultados da simulação fornecem “gradientes de temperatura e pressão, força de fechamento, taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento, tempo de injeção, linhas de solda, bolhas de ar, balanceamento de canais de injeção, preenchimento”. O *software* ainda auxilia na determinação de valores ótimos para as variáveis de processamento, prevê problemas de processo, possibilita testes com diferentes materiais, além de recomendar melhores configurações para o molde (NISHIMOTO, 2001; MARIN, 2014).

3 ESTUDO DE CASO

3.1 A Empresa

O estudo de caso foi realizado em uma empresa da região de Marília, interior do estado de São Paulo, que atua como desenvolvedora e produtora de produtos no segmento *fitness*, com equipamento de ginástica e musculação e de produtos no segmento agrícola, com equipamentos de jardinagem, agrícola, agropecuário, doméstico, entre outros.

A empresa que inicialmente desenvolvia e produzia equipamentos agrícolas conhecida no mercado por seus produtos de alto padrão de qualidade passou a desenvolver também equipamentos de ginástica, devido ao crescimento na demanda por esses produtos influenciado pela tendência norte americanos.

Com o desenvolvimento e lançamento da primeira bicicleta ergométrica com resistência magnética no Brasil, a empresa conquistou um lugar de destaque no mercado *fitness*, o que foi um marco para a empresa e para o mercado.

A empresa tem o propósito de oferecer aos seus clientes produtos, serviços e soluções inovadoras de forma a satisfazer as necessidades de lazer, bem-estar e conforto, com comprometimento e alto padrão de qualidade.

3.2 O Processo

Na referida empresa os processos de transformações de termoplásticos são bastante empregados sendo o processo de injeção o mais representativo. O setor de injeção de termoplásticos é composto por nove máquinas de vários tamanhos e modelos, cujas forças de fechamento variam de 20 t a 320 t, podendo injetar peças de 10 g até, aproximadamente, 600g.

3.3 O Produto

Os produtos analisados no estudo de caso são duas peças componentes de montagem em equipamentos do segmento *fitness* da empresa em estudo.

3.3.1 A roldana

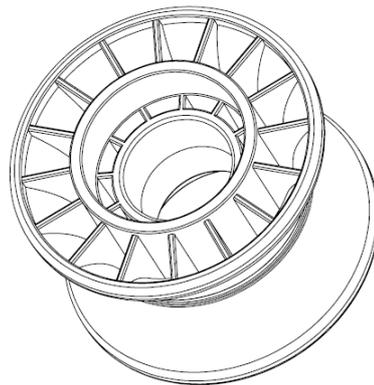
A primeira peça do objeto de estudo é uma roldana, conforme Figuras 23 e Figura 24, utilizada em um equipamento de musculação específico para pernas como visualizado na Figura 25. São empregadas seis peças para realizar o deslizamento do banco do produto sobre as hastes de deslizamento.

Figura 23 - Roldana



Fonte: a empresa.

Figura 24 – Representação gráfica da roldana



Fonte: a empresa.

Figura 25 – Equipamento de musculação onde a roldana é utilizada



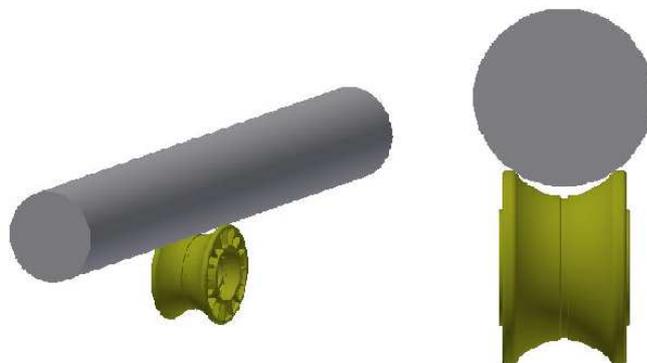
Fonte: a empresa.

A roldana injetada com o material poliacetal (POM) Celcon M90, do fornecedor Celanese, deve permitir a montagem de dois rolamentos e resistir ao desgaste por abrasão durante a utilização do equipamento.

O projeto da roldana foi desenvolvido com a finalidade de substituir uma peça de plástico usinada e de alto custo. Portanto, com a utilização desta peça injetada em material plástico, o custo do produto final seria reduzido consideravelmente.

Entretanto, no encaixe da roldana de plástico e da haste há uma folga, observada na Figura 26, que dificulta a movimentação da roldana, o que não ocorria nas peças usinadas. Este defeito impede que a peça injetada em plástico seja utilizada.

Figura 26 – Representação da montagem da roldana com a haste de deslizamento



Fonte: o autor.

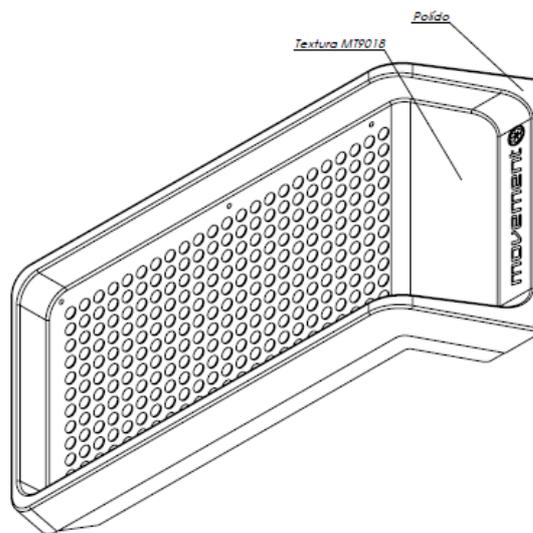
Dessa forma, para que a roldana apresentasse a dimensão e a forma de encaixe correta está sendo utilizado um processo adicional de usinagem, o que acarreta maiores custos e processo desnecessário.

O objetivo de simular o comportamento do fluxo nesta peça é reproduzir o defeito em ambiente virtual, verificar a causa do defeito, e quais as alternativas de solução para a correção do mesmo.

3.3.2 A sapata

Outra peça que constitui o estudo em questão é a sapata representada na Figura 27. Onde duas peças são utilizadas em um equipamento de ginástica como base para assento dos pés.

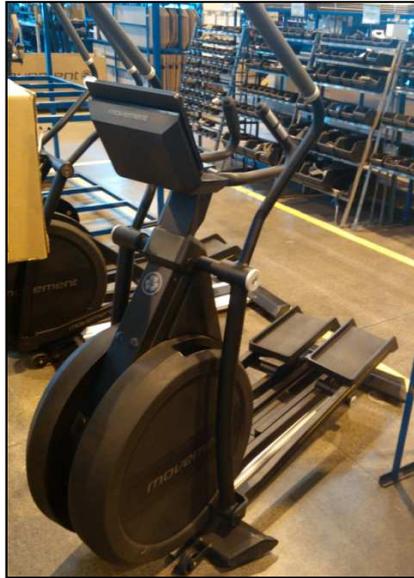
Figura 27 – Sapata



Fonte: a empresa.

O equipamento é um simulador de caminhada sem impacto onde seus pedais durante o exercício se movimentam no formato de elipse, o que se assemelha ao nome do equipamento denominado elíptico, conforme Figura 28.

Figura 28 – Elíptico



Fonte: a empresa.

Para realizar sua função a sapata deve suportar o peso dos usuários, além de resistir à montagem por parafuso, proporcionar estética ao equipamento e evitar o escorregamento dos pés dos usuários.

A sapata injetada com material polipropileno (PP) CP 741, do fornecedor Braskem, apresenta após o resfriamento deformações que curvam as laterais de acabamento, indicadas na Figura 29, o que não impede que a peça seja utilizada, mas afeta a estética do produto.

Figura 29 – Demonstração da região onde ocorre deformação



Fonte: a empresa.

Dessa forma, o objetivo de simular o modelo desta peça em estudo é visualizar o defeito em ambiente virtual, analisar possíveis causas e definir alternativas de solução para o problema encontrado buscando proporcionar maior qualidade à peça e, conseqüentemente, ao produto final.

3.4 Simulação das Peças em Estudo

As simulações do estudo de caso foram realizadas por meio do *software* da Autodesk® Moldflow Insight 2015 e com os modelos virtuais das peças 3D em escala disponibilizados pela empresa.

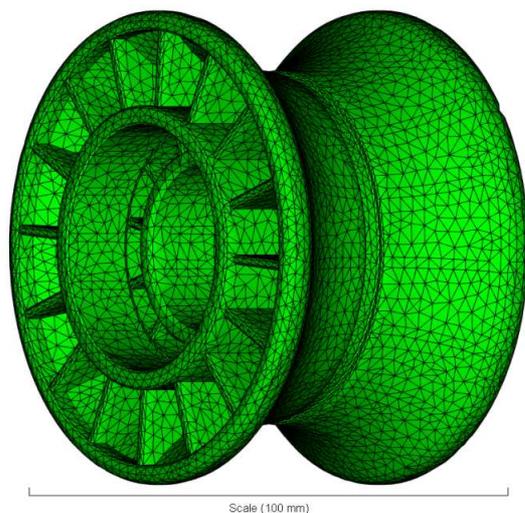
3.4.1 Caso 1 – Roldana

Com o modelo CAD em três dimensões, se iniciou o pré processamento com a geração da malha de elementos finitos, utilizando a ferramenta *mesh* (malha) do *Moldflow*. As configurações da malha utilizada foram:

- Formato dos elementos: tetraedro
- Tipo de malha: 3D (sólido)

O modelo da roldana com a aplicação da malha de elementos finitos pode ser visualizada na Figura 30.

Figura 30– Malha aplicada ao modelo da roldana



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

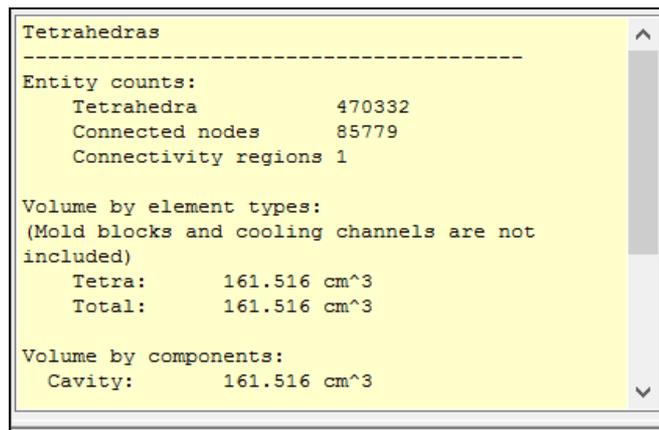
Antes de realizar a configuração dos parâmetros para a simulação foi verificado por meio do ícone *mesh repair wizard* (assistente de reparação da malha) que não havia nada a ser corrigido na malha gerada, ou seja, não havia elementos desconectados nem com defeito.

A análise da malha, utilizando o ícone *mesh statistics* (estatística da malha), forneceu os seguintes resultados, conforme Figura 31:

- Quantidade de elementos finitos: 470.332
- Quantidade de nós: 85.779
- Quantidade de região: 1
- Volume da peça: 161,516 cm³

A quantidade de elementos finitos indicada na análise corresponde ao número de tetraedros que interligados entre si, por meio dos nós, constituem todo o volume da roldana.

Figura 31 – Resultado da análise da malha da roldana

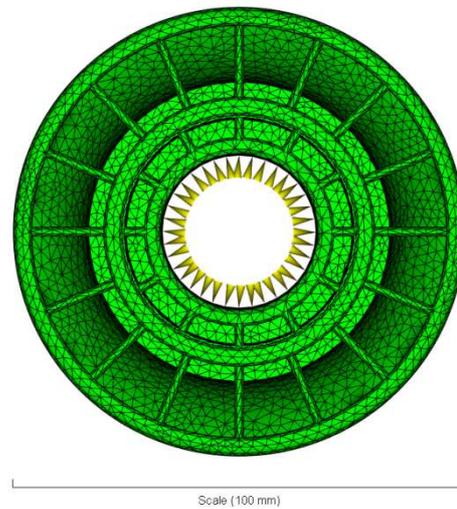


Fonte: Moldflow Insight, 2015.

Foi verificado nos resultados obtidos para a malha 3D que a quantidade de regiões conectadas (*connectivity regions*) encontrada é única, pois a malha deve ter todos os seus elementos conectados em uma só região para que as informações possam ser trocadas.

Após a verificação da malha, os parâmetros para a o processamento da simulação foram informados conforme os dados fornecidos pela empresa como, o material polimérico utilizado (POM Celcon M90) e ponto de injeção em leque, ou seja, entrada de material fundido de forma circular, indicados na Figura 32, por trinta e seis cones amarelos ao centro da peça.

Figura 32– Localização dos pontos de injeção



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

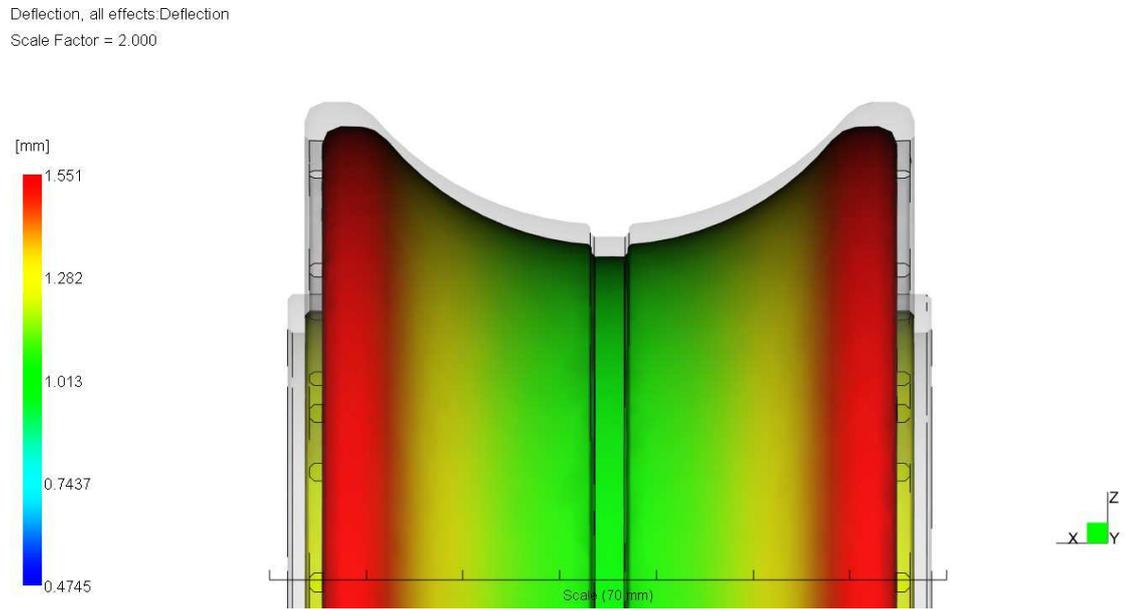
Dados como o canal de resfriamento, pressão de injeção, pressão de recalque, tempo de injeção, de recalque e de resfriamento, e força de fechamento não foram informados, de modo que após a análise esses dados serão obtidos da forma mais otimizada de acordo com o projeto da peça apresentado.

Para o processamento foi escolhida a análise *cool + fill+ pack + warp*, que fornece resultados gráficos de acordo com a análise de resfriamento, preenchimento, recalque e empenamento, respectivamente.

Para verificar a ocorrência do defeito na roldana em produção foram analisados os resultados do processamento para o empenamento (*warp*), conforme Figura 33, este tipo de análise é recomendada para diagnosticar a deformação.

Na Figura 33, a deformação na roldana é apresentada em escalas de cor, onde a região em vermelho apresenta a maior deflexão encontrada de 1,551 mm, ou seja, a região em vermelho se distanciou 1,551 mm da posição original que deveria estar de acordo com o modelo inicial, enquanto a região em azul representa a menor deflexão encontrada de 0,4745 mm.

Figura 35 – Detalhamento do empenamento da roldana

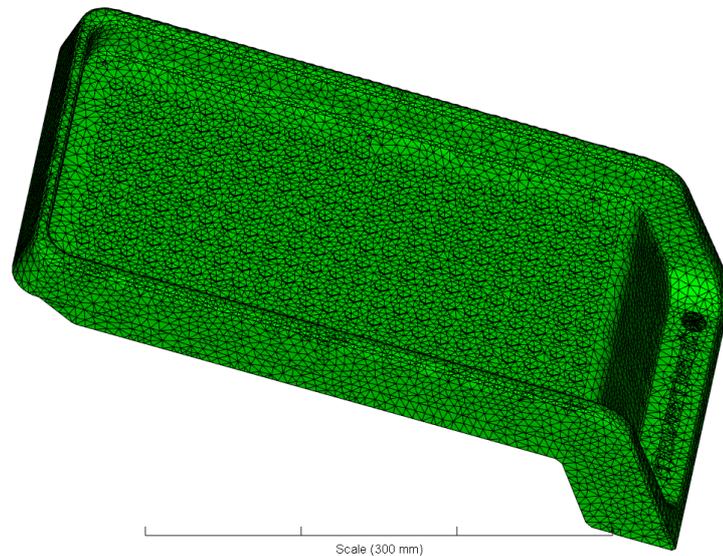


Fonte: Moldflow Insight, 2015.

3.4.2 Caso 2 – Sapata

Assim como na simulação da peça anterior, na etapa de pré processamento, o modelo 3D da sapata em escala, disponibilizado pela empresa, foi importado para o *Moldflow* e aplicado a malha de elementos finitos, Figura 36, nas configurações de elementos tetraédricos e malha 3D. Foram escolhidas essas configurações para a malha dos estudos, pois esta por meio de elementos sólidos na representação do modelo possibilita resultados mais próximos do real.

Figura 36 – Malha aplicada ao modelo da sapata



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

O diagnóstico da malha não encontrou elementos a serem corrigidos, fornecendo os seguintes resultados:

- Quantidade de elementos finitos: 626.312
- Quantidade de nós: 114.952
- Quantidade de região: 1
- Volume da peça: 492,854 cm³

Estes resultados também podem ser observados na Figura 37.

Figura 37 – Resultado da análise da malha da sapata

```
Tetrahedras
-----
Entity counts:
  Tetrahedra          626312
  Connected nodes     114952
  Connectivity regions 1

Volume by element types:
(Mold blocks and cooling channels are not
included)
  Tetra:              492.854 cm^3
  Total:              492.854 cm^3

Volume by components:
  Cavity:             492.854 cm^3
```

Fonte: Moldflow Insight, 2015.

Quanto aos parâmetros utilizados na simulação da peça, foi configurado o material polimérico e os pontos de injeção de acordo com os mesmos parâmetros utilizados na fabricação real.

Ao realizar a seleção do material polimérico (polipropileno PP CP 741) fornecido pela Braskem não foi encontrado entre opções disponíveis no programa Neste caso, para realizar a simulação foi realizado a busca de outro material polimérico PP com o mesmo índice de fluidez apresentado na ficha técnica do polímero fornecido pela Braskem, cujo valor corresponde a 0,80g/10min obtido pelos métodos de ensaio da norma ASTM.

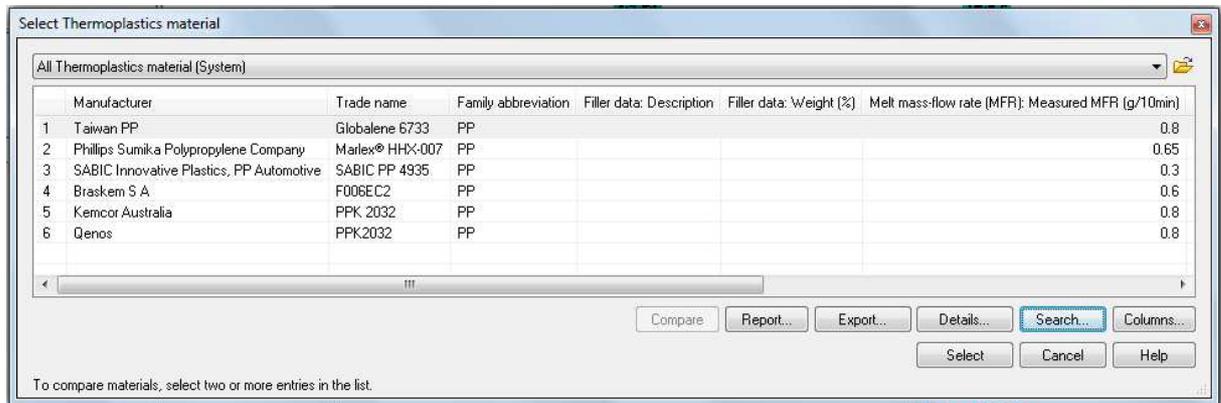
Ao pesquisar os materiais considerando máximo índice de fluidez 0,80g/10min, foram retornadas dezessete opções, conforme Figura 38, dos quais apenas seis opções da família PP foram analisados, Figura 39.

Figura 38 – Seleção de termoplástico por índice de fluidez

	Manufacturer	Trade name	Family abbreviation	Filler data: Description	Filler data: Weight (%)	Melt mass-flow rate (MFR): Measured MFR (g/10min)	Res
1	Taiwan PP	Globalene 6733	PP				0.8
2	Targor	Hostalen GM 5050	HDPE				0.75
3	Chevron Phillips	Marlex® HMM 5502 PE	HDPE				0.35
4	Chevron Phillips	Marlex® HMM 5502BN PE	HDPE				0.35
5	Chevron Phillips	Marlex® EHM 6007 PE	HDPE				0.7
6	NOVA Chemicals	Dylark 480P16	SMA	Glass Fiber	16		0.5
7	Diamond Polymers Inc	ASA T-120 Green 7078	ASA				0.5
8	Phillips Sumika Polypropylene Company	Marlex® HHX-007	PP				0.65
9	SABIC Innovative Plastics, PP Automotive	SABIC PP 4935	PP				0.3
10	Sumitomo Chemical Company	Sumipex MM	PMMA				0.6
11	Braskem S A	F006EC2	PP				0.6
12	Ineos Olefins & Polymers USA	K38-20-188	HDPE				0.2
13	Ineos Olefins & Polymers USA	K38-20-188 with Gray colorant	HDPE				0.2
14	Chi Mei Corporation	Polyac PA-709	ABS				0.5
15	Kemcor Australia	PPK 2032	PP				0.8
16	Qenos	PPK2032	PP				0.8
17	Cheil Industries Incorporated	Starex HR-0370FM	ABS				0.7

Fonte: Moldflow Insight, 2015.

Figura 39 – Seleção de termoplástico por família



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

Para a escolha entre as seis opções do material polimérico PP, foi analisado o indicador de qualidade apresentado pelo *software* que classifica os dados sobre preenchimento, recalque e empenamento de cada termoplástico em *gold* (ouro), *silver* (prata) e *bronze* (bronze) de acordo com o nível de detalhes dos dados que são utilizados no processamento, ou seja, os termoplásticos com classificação *gold* apresentam maior detalhamento de dados e quantidade de informações para simular o preenchimento, recalque e empenamento comparado a um termoplástico com classificação *silver*.

A classificação dos termoplásticos em *gold*, *silver* e *bronze* pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos termoplásticos segundo o detalhamento dos dados

Classificação	Fabricante	Nome comercial	Família	Índice de fluidez (g/10min)
Gold	Braskem SA	F006EC2	PP	0,60
Gold	SABIC Innovative Plastics	SABIC PP 4935	PP	0,30
Silver	Phillips Sumika Company	Marlex HHX-007	PP	0,65
Bronze	Taiwan PP	Globalene 6733	PP	0,80
Bronze	Kemcor Australia	PK 2032	PP	0,80
Bronze	Qenos	PK2032	PP	0,80

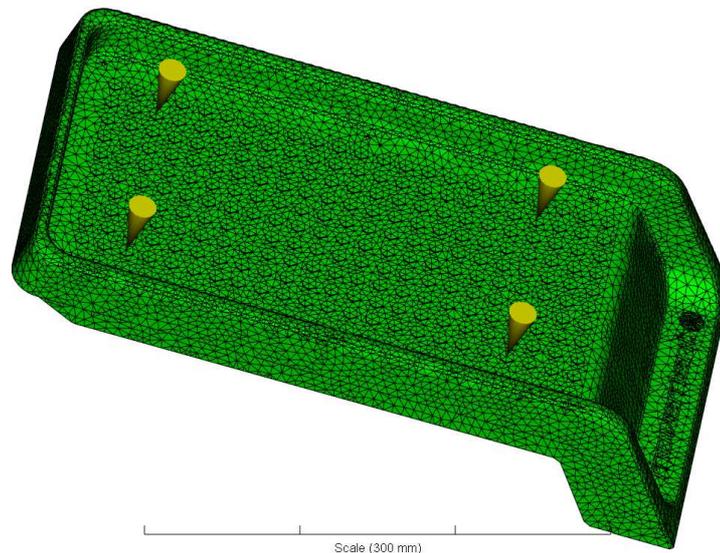
Fonte: Adaptado de MOLDFLOW INSIGHT, 2015.

Conforme a classificação da qualidade dos dados foi escolhido, para realizar a simulação da sapata, o polipropileno F006EC2 da Braskem, mesmo este apresentando um índice de fluidez inferior ao utilizado na fabricação da peça, mas com maior detalhamento de dados necessários ao processamento das análises.

O termoplástico polipropileno F006EC2 apresenta-se comercialmente ativo, segundo dados da Prospector (2015), o mais completo banco de dados de materiais poliméricos, processos de transformação de plásticos, normas, entre outros.

Os locais dos pontos de injeção foram alocados conforme a posição dos mesmos na fabricação da peça real, como na Figura 40.

Figura 40 – Localização dos pontos de injeção



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

Os demais parâmetros relativos ao processo foram admitidos conforme as condições otimizadas pelo *software* de acordo com o modelo da peça.

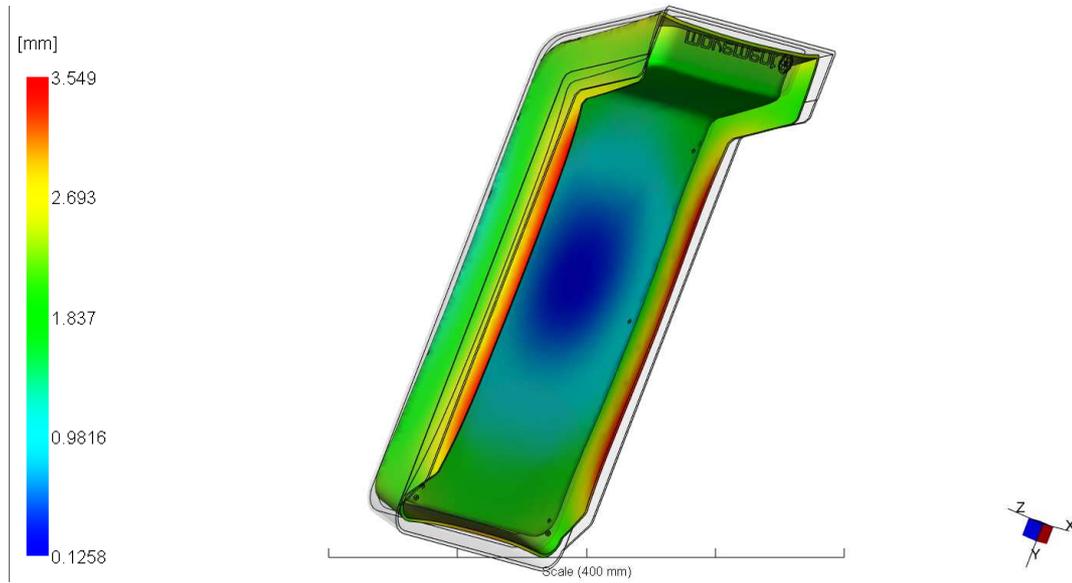
Para o processamento dessa peça foi escolhida a análise *cool + fill + pack + warp* para que o estudo tivesse maior abrangência das causas possíveis do defeito.

Os dados que resultaram do processamento da simulação da sapata mostraram que a peça apresenta empenamento na mesma região que a peça real, como pode ser observado na Figura 41.

Na Figura 41, o empenamento é verificado na peça em escalas de cor, onde a região em vermelho representa a maior deflexão de 3,549 mm e a região em azul a menor deflexão,

0,1258 mm, ou seja, a região em vermelho está 3,549 mm distante da sua posição original, assim como as demais regiões da peça.

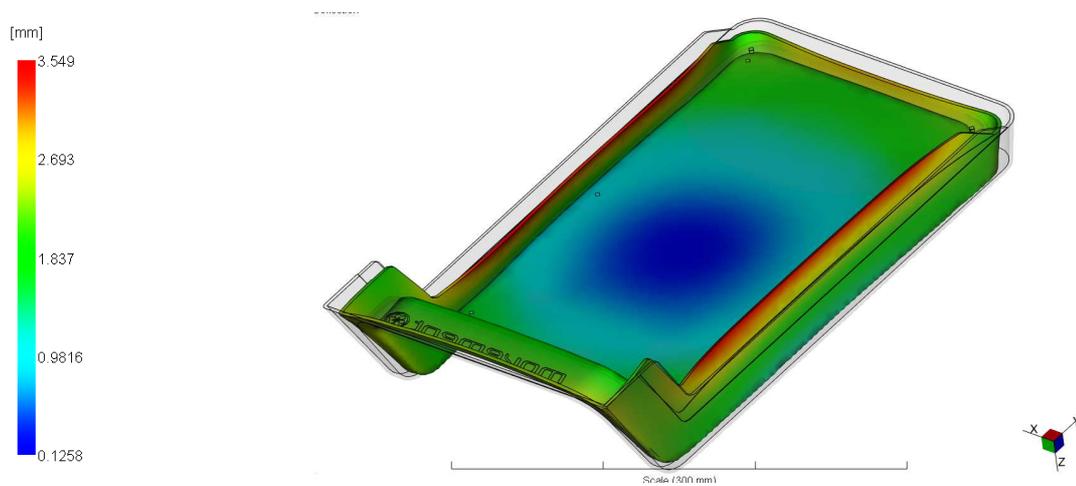
Figura 41 – Análise de empenamento na sapata



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

O defeito pode ser melhor visualizado pelo sombreamento que contorna a peça na Figura 42.

Figura 42 – Detalhamento do empenamento da sapata



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

4 RESULTADOS

A aplicação do *software* de simulação de injeção *Moldflow Insight* nas peças do estudo em questão explorou as possibilidades da ferramenta em detectar problemas, de forma que suas análises permitiram os resultados à seguir.

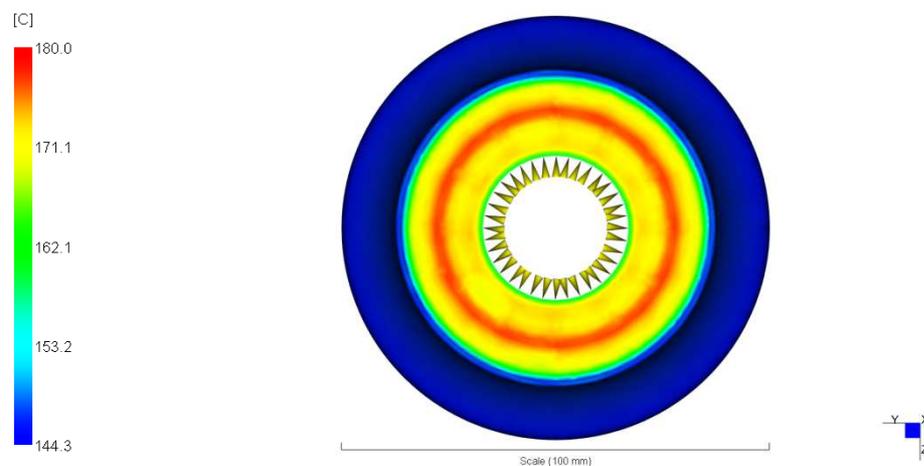
4.1 Caso 1 - Roldana

A deflexão sofrida pela roldana após o resfriamento na peça real foi o mesmo apresentado pela simulação. Como os parâmetros de processamento para a roldana foram deixados a critério do *software* para que este determinasse os melhores valores, informando apenas os pontos de injeção e o material, verificou-se que o defeito ocorreu com as melhores condições de processamento possíveis, isso significa que, a causa do defeito não está relacionada com variáveis de processo.

Como já visto, o material polimérico POM Celcon M90 utilizado apresenta boas propriedades de estabilidade dimensional, o que não favorece a ocorrência do defeito apresentado.

É possível observar na análise de resfriamento da roldana, Figura 43, o resfriamento é apresentado em escalas de cor, onde a região em vermelho, no interior da peça, apresenta maior temperatura com 180°C e, conseqüentemente, representa a região que leva maior tempo para se resfriar e se solidificar, comparado à região de menor temperatura com 144,3°C.

Figura 43 – Análise de resfriamento da roldana



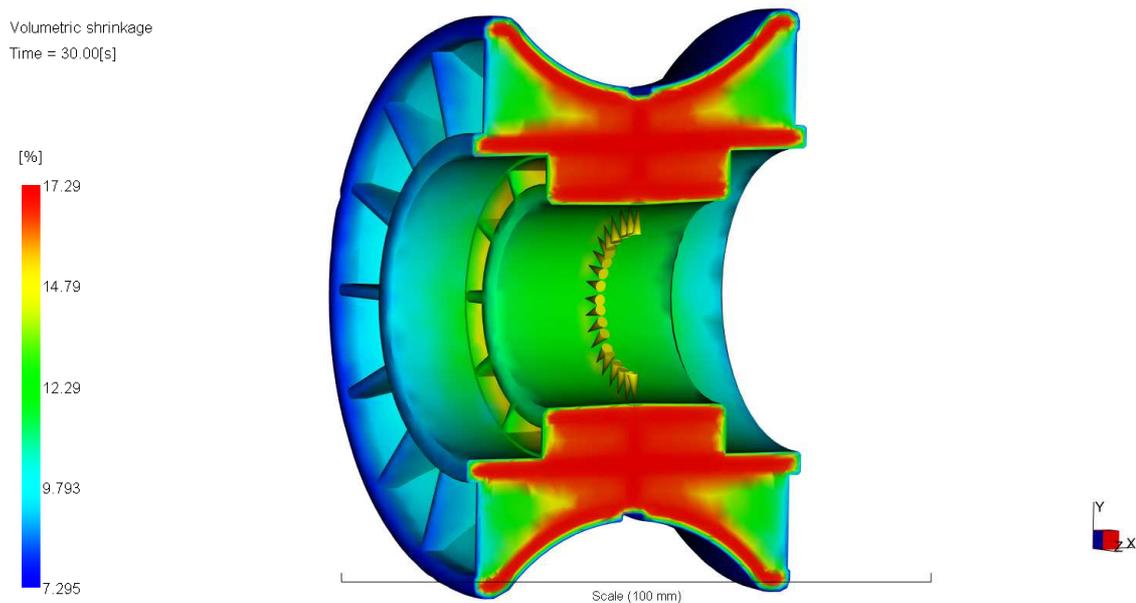
Fonte: Moldflow Insight, 2015.

A região ao centro da peça em vermelho apresenta maior temperatura com 35,7°C mais quente que a região periférica, mesmo com a melhor opção para o sistema de resfriamento apresentado pelo *software*. Essa região se resfria, solidifica e contrai depois das regiões mais frias já terem contraído, provocando a formação de tensões internas que causam o empenamento.

Dessa forma, é possível determinar que, a causa para o empenamento da roldana está relacionada com o projeto do desenho da peça que não permite o resfriamento uniforme na região interna.

Na Figura 44 verifica-se que a região em vermelho apresenta 17% de contração em relação ao volume total da peça, sendo esta a região mais crítica que contribui para a ocorrência do defeito, visto que altas contrações volumétricas provocam o empenamento.

Figura 44 – Análise de contração volumétrica



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

O projeto da peça deve considerar as limitações e as capacidades do processo pela qual será produzida. Portanto, para reduzir a contração volumétrica e eliminar o defeito, é necessário alterar o projeto da peça.

Segundo as informações cedidas pela empresa, organizadas na Tabela 4, o custo para a fabricação do molde foi de R\$38.000,00 e o custo para modificá-lo corresponde a 36,8% do

custo de fabricação, ou seja, R\$14.000,00 a mais será gasto para realizar as alterações necessárias para contornar o defeito.

Estas alterações consistem apenas em aprofundar as cavidades do molde para que a peça moldada apresente dimensões maiores e, assim, com o efeito da contração alcancem dimensões próximas das requeridas.

Tabela 4 – Custos do molde para a fabricação da roldana

Descrição	Valor
Custo para fabricação do molde	R\$38.000,00
Custo adicional de modificação	R\$14.000,00
Custo total	R\$52.000,00

Fonte: o autor.

Dessa forma, as modificações no molde geram custos adicionais e não eliminam a causa raiz do problema.

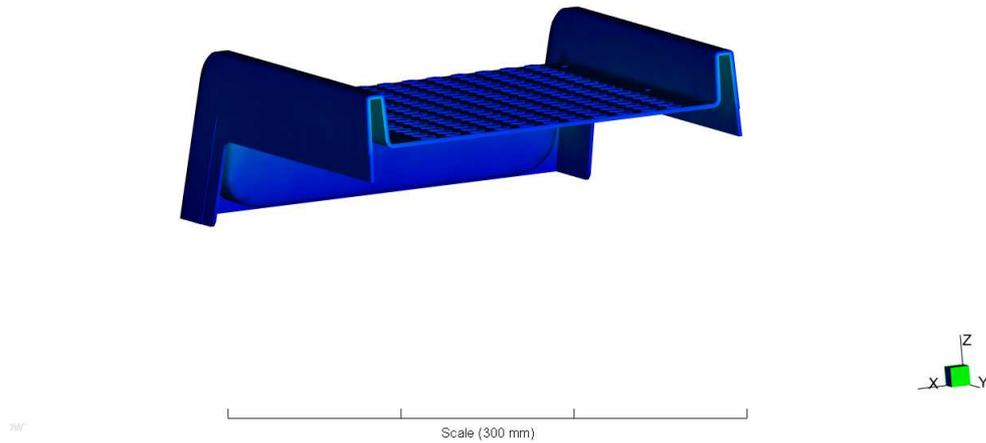
4.2 Caso 2 - Sapata

O empenamento da peça real foi evidenciado na simulação computacional. Como no primeiro caso, a sapata foi analisada com os parâmetros de processo otimizados pelo *software* com os melhores valores possíveis e, ainda assim, apresentou deformação. Isso significa que os parâmetros do processo não contribuem para a causa do defeito.

Quanto ao material polimérico F006EC2 utilizado, em geral, o polipropileno apresenta baixa estabilidade dimensional, podendo representar alguma influência para a ocorrência do defeito.

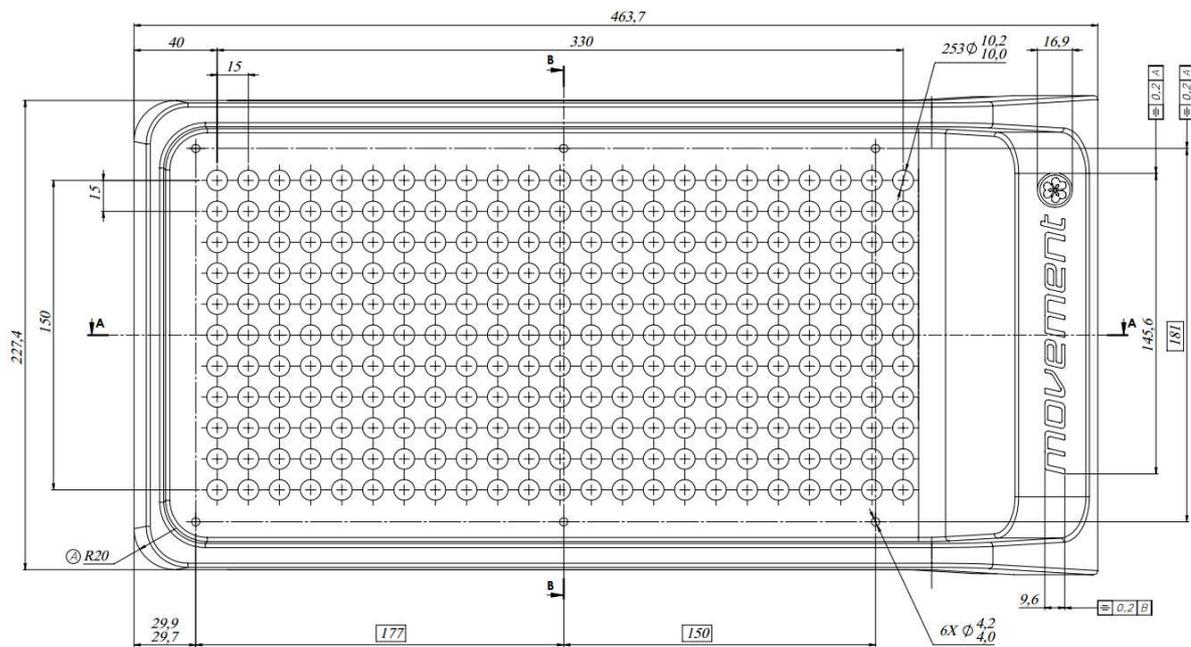
Analisando as formas da peça na Figura 45, Figura 46 e Figura 47, é possível observar que os pontos em que o empenamento ocorre com mais intensidade, detalhado na Figura 48, apresenta paredes longitudinais finas e sem reforços.

Figura 45 – Detalhamento da espessura da sapata



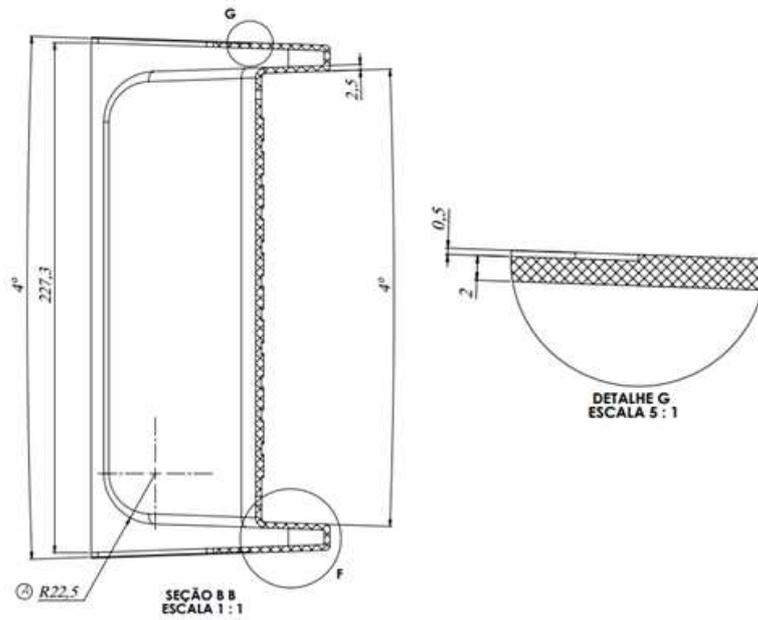
Fonte: Moldflow Insight, 2015.

Figura 46 – Desenho técnico da sapata



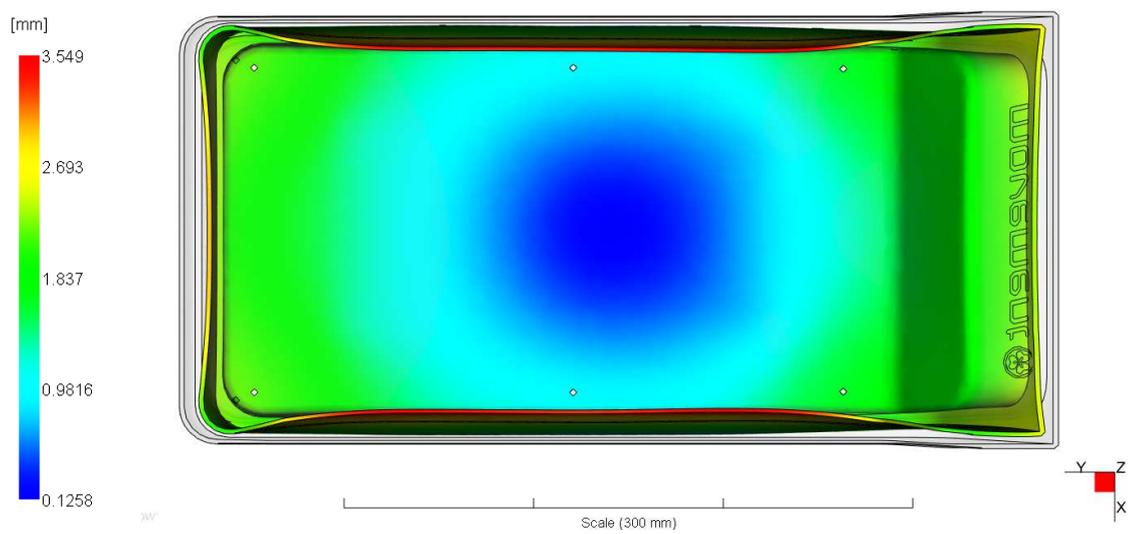
Fonte: a empresa.

Figura 47 – Corte BB do desenho técnico da sapata



Fonte: a empresa.

Figura 48 – Detalhamento do empenamento da sapata



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

A parede onde ocorre maior empenamento apresenta 463,7 mm de comprimento e 2,5 mm de espessura. Essa parede fina com o resfriamento se contrai sem nenhuma sustentação ou reforço no sentido longitudinal, implicando no empenamento da mesma.

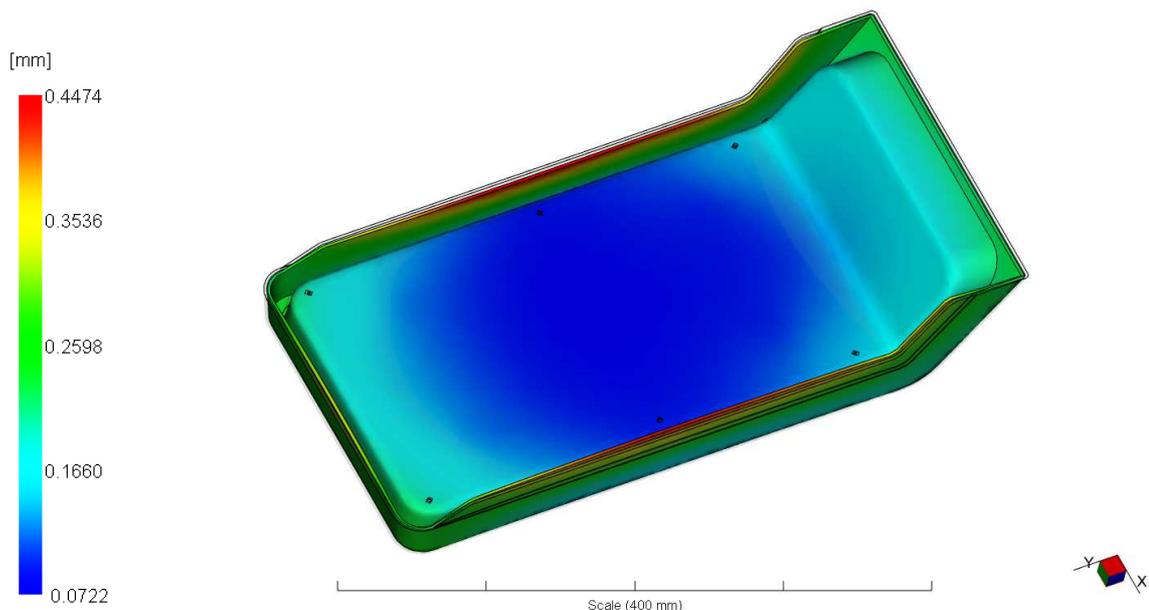
Dessa forma, foi possível definir que a causa para o empenamento ocorrido na sapata está relacionada com o projeto do desenho da peça.

A modificação do molde é a maneira mais apropriada para se corrigir o problema, no entanto, outra alternativa para solucionar este caso foi sugerida para conter o empenamento.

Para a alternativa de solução, foi realizado uma nova simulação nas mesmas condições da primeira, no entanto, o material polimérico polipropileno F006EC2 foi substituído por outro com a adição de carga, com a finalidade de reduzir o empenamento. Foi escolhido o polipropileno com 20% de talco, sugerido pelos profissionais da área, para realizar o experimento e analisar seus resultados. O termoplástico utilizado Polyfort FPP 20T da A. Schulman está disponível comercialmente, segundo dados da Prospector (2015).

A simulação para o polipropileno F006EC2, sem talco, resultou numa deflexão de 3,549 mm, enquanto para o polipropileno Polyfort FPP 20T, com talco, a deflexão máxima analisada foi de 0,4474 mm, conforme Figura 49. A redução do empenamento foi de, aproximadamente, 87% utilizando o material polimérico polipropileno Polyfort FPP 20T.

Figura 49 – Análise de empenamento com Polyfort FPP 20T



Fonte: Moldflow Insight, 2015.

Observando a Figura 49, é possível verificar que apesar da redução significativa do empenamento da peça, a região mais crítica em que o defeito ocorre é a mesma nas duas situações, ou seja, o defeito pôde ser reduzido, entretanto não foi eliminado, demonstrando que a causa raiz não está apenas no material utilizado, mas na relação deste com o desenho da peça.

Por meio da avaliação dos casos apresentados foi observado que os defeitos presentes nas peças reais poderiam ter sido evitados, uma vez que a simulação possibilita prever o mesmo resultado que se verifica na peça real, além demonstrar as consequências de diferentes sugestões de melhoria para aumentar a qualidade do produto.

5 CONCLUSÕES

O mercado globalizado demanda, cada vez mais, produtos de qualidade, preços atrativos e alta produtividade, exigindo a adaptação das empresas para se manterem competitivas.

O processo de injeção, o segundo entre os processos de transformação de polímeros, apresenta versatilidade na produção de peças de diferentes tamanhos e geometrias, além de poder substituir peças de outros materiais por peças mais leves e de baixo custo, podendo ainda ser considerado um processo de alta produtividade, desde que as condições de processamento sejam adequadas.

Dessa forma, a moldagem por injeção e os produtos obtidos por esse processo são tendências para as empresas que buscam se manter competitivas no mercado.

A combinação de parâmetros do processo, máquina, molde, projeto e material, tornam a moldagem por injeção complexa diante das inúmeras possibilidades e variáveis que podem afetar a produção de peças de qualidade e o bom desempenho do processo. Entretanto, são nesses casos que a simulação computacional apresenta sua maior aplicabilidade.

Diante desse contexto, a realização do presente trabalho proporcionou maior conhecimento sobre as possibilidades da simulação computacional aplicada ao processo de injeção de termoplásticos, e os desafios em representar o modelo virtual o mais próximo da realidade e também de interpretar os resultados da análise para aplicar no processo, o que influencia diretamente na eficiência da utilização da ferramenta computacional.

A utilização dessa ferramenta pode auxiliar na identificação de falhas relacionadas ao projeto do produto e o planejamento do processo de forma simultânea, encontrando a causa do problema de forma rápida e sem a necessidade de testes físicos, evitando maiores gastos, impactos no processo produtivo e na mão de obra. No processo produtivo, a simulação evita que ocorra defeitos nos produtos, aumentando a qualidade do produto, além de otimizar o processo, eliminando tempos desnecessários. Na mão de obra, a ferramenta é utilizada como uma opinião impessoal, em casos que apenas a experiência do profissional é levada em consideração para definir o projeto das peças.

O estudo demonstrou, ainda, as dificuldades e perdas em uma empresa que não utilizou a simulação na fase de desenvolvimento de produto, momento em que as modificações custam menos e que a simulação pode ter maior aplicabilidade e melhor aproveitamento.

Com base na pesquisa teórica e nas análises obtidas pela simulação computacional observou-se nos estudos de caso que os mesmos defeitos apresentados nas peças reais foram reproduzidos pela simulação computacional.

Isso permite concluir que, tal ferramenta utilizada na fase de desenvolvimento do projeto das peças evitaria que esses defeitos ocorressem, evitando também os gastos com correções. No entanto, é de suma importância que o profissional tenha conhecimentos sobre o processo de injeção e de engenharia, de modo geral, para que as análises obtidas na simulação sejam aplicadas e possam, dessa forma, proporcionar os benefícios propostos.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Estudar a utilização do *software* no desenvolvimento de produtos, desde as etapas iniciais, simulando a melhor localização do ponto de injeção, balanceamento de canal de injeção, sistema de refrigeração, escolha do material polimérico mais adequado, entre outras e;
- explorar os recursos do *software* para definir parâmetros de processo adequados que garantam maior produtividade.

REFERÊNCIAS

ALBERTIN, A. L.; ALBERTIN, R. M. M. **Tecnologia de informação e desempenho empresarial**. 2.ed - São Paulo: Atlas, 2009.

Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Org.). **Perfil 2014**: Indústria brasileira de transformação de material plástico. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/links/2015/perfil_abiplast_2014_web.pdf>. Acesso em: 06 set. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9000**: Sistemas de gestão da qualidade. Rio de Janeiro: Abnt, 2005. Disponível em: <<https://qualidadeuniso.files.wordpress.com/2012/09/nbr-iso-9000-2005.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2015.

AUTODESK Simulation Moldflow Insight, versão 2015 [S.I.]: Autodesk, 2015. Conjunto de programa

BUSATO, Fábio André. **Parâmetros de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes fabricados por estereolitografia com resina somos 7110**. 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87832/213444.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21 jul. 2015.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V.. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2002.

CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso. **Modelagem e simulação de eventos discretos**: teoria e aplicações. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=wZmoBQAAQBAJ&dq=simulação&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s>. Acesso em: 08 out. 2015.

CORAZZA, Emerson José. **Influência do tratamento de nitretação em cavidades de aço P20 em moldes de injeção de termoplásticos**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processo, Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2012. Disponível em: <http://univille.edu.br/community/mestrado_ep/VirtualDisk.html?action=downloadFile&file=Dissertacao_Emerson_Corazza_-_MEP.pdf;=/Dissertacoes_Turma_IV>. Acesso em: 15 out. 2015.

DYM, Clive L. et al. **Introdução à engenharia: Uma abordagem baseada em projeto.** Porto Alegre: Bookman, 2010. Tradução de: João Tortello. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=IDqcNiSpeNsC&dq=simula%C3%A7%C3%A3o+no+projeto+de+desenvolvimento+de+produto&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s> . Acesso em: 07 out. 2015.

FERREIRA, Cristiano Vasconcellos et al. **Projeto do produto.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

GAVIRA, Muriel de Oliveira. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento.** 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-20052003-004345/pt-br.php>>. Acesso em: 09 out. 2015.

HARADA, Júlio. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos.** São Paulo: Artliber, 2004.

KIAM, Thyago M.. **Defeitos em peças plásticas injetadas: causas e soluções.** Jaraguá do Sul: Smarttech Plástico Serviços e Sistemas, 2006. Color.

LOKENS GARD, Erik. **Plásticos industriais: teoria e aplicações.** São Paulo: Learning, 2013.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia.** São Paulo: Blucher, 1991.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos.** 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

MARIN, Felipe. **Análise de sistemas de alimentação com auxílio de simulação de injeção.** 2014. 96 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/122014>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

MECATRÔNICA ATUAL. São Paulo: Saber, n. 1, 2001. Bimestral. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/993-cadcaecam?showall=&start=2>>. Acesso em: 02 out. 2015.

MICHAELI, Walter et al. **Tecnologia dos plásticos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1995. Tradução de: Christian Dihlmann.

MIONI, Rodrigo. **Você sabe o que é CAD/CAE/CAM?** 2012. Disponível em: <<http://sistemasdeengenharia.com.br/2012/02/voce-sabe-o-que-e-cad-cae-cam/>>. Acesso em: 02 out. 2015.

MIRANDA, J. R. **Engenharia auxiliada por computador – CAE**. SOCIESC: Joinville, 2005.

MOLDFLOW CORPORATION (Org.). **Moldflow Design Guide: a resource for plastics engineers**. Disponível em: <http://marciaswan.weebly.com/uploads/1/3/5/8/13585698/mfdg_low-res_proof_part1.pdf>. Acesso em: 11 maio 2015.

MOLDFLOW INSIGHT (Org.). **Help**. 2015. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/MFIA/2015/ENU/?guid=GUID-66B3B0E8-DB05-4DC5-8E8F-CCA29A11A7ED>>. Acesso em: 02 out. 2015.

MORASSI, Odair José. **Polímeros termoplásticos, termofixos e elastômeros**. São Paulo: Conselho Regional de Química Iv Região, 2013. Color. Disponível em: <http://www.crq4.org.br/sms/files/file/apostila_polimeros_0910082013_site.pdf>. Acesso em: 06 set. 2015.

NISHIMOTO, Akiko Rocha. **Simulação numérica da injeção de termoplásticos em moldes: estudo comparativo de alguns modelos computacionais**. 2001. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/82193>>. Acesso em: 11 maio 2015.

PINTO, Ubiratan Schuch. **Avaliação de critério para a determinação de contratipos de termoplásticos aplicável em simulação da moldagem por injeção**. 2002. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/83803/188084.pdf?...1>>. Acesso em: 11 set. 2015.

ROZENFELD, Henrique et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SILVA, Ermes Medeiros da; et al. **Pesquisa operacional: programação linear e simulação**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 1998.

SILVA, Edna Lucia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: Ufsc, 2005. 138 p. Disponível em: <https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes_4ed.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2015.

SLACK, Nigel et al. **Gerenciamento de operações e de processos: princípios e práticas de impacto estratégico**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ZARECHIAN, Brendan Arash. **A quantitative comparison and validation of computer aided engineering softwares simulating the plastics injection molding process**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Science In Engineering, University Of Massachusetts Lowell, Ann Arbor, 2008. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=vryuvFq-h94C&pg=PA24&dq=computer+aided+engineering+software+simulating+the+plastics&hl=pt-BR&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 07 dez. 2015.

ANEXO A – FICHA TECNICA DO POLIPROPILENO CP 741



Folha de Dados

Revisão 16 (Abril/13)

Polipropileno CP 741

Subfamília:

Copolímero Heterofásico

Descrição:

O CP 741 é um copolímero heterofásico de propeno e eteno, de baixo índice de fluidez. Possui distribuição ampla de peso molecular e é aditivado para uso geral. O CP 741 é um produto que possui baixa transferência de odor e sabor. Apresenta elevada resistência do fundido, boa processabilidade e excelente resistência ao impacto.

Aplicações:

Embalagens termoformadas com elevada resistência ao impacto; Embalagens e peças técnicas sopradas em geral; Extrusão de chapas

Processo:

Termoformagem
Moldagem por Sopros
Extrusão Geral

Propriedades de Controle:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (230°C/2,16 kg)	D 1238	g/10 min	0,80

Propriedades Típicas^a:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Densidade	D 792	g/cm ³	0,895
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	1100
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	26
Alongamento no Escoamento	D 638	%	12
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	-	65
Resistência ao Impacto Izod a 23°C	D 256	J/m	NB ^b
Resistência ao Impacto Izod a -20°C	D 256	J/m	39
Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 MPa	D 648	°C	50
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	90
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	D 1525	°C	147

a) ENSAIO em corpo de prova moldado por injeção conforme AS IM U 4101

b) NB: non-Break

Observações Finais:

- Esta resina atende à regulamentação FDA (*Food and Drug Administration*) para polímeros plásticos do CFR 21 seção 177.1520, vigente na data de publicação desta especificação. Os aditivos presentes são sancionados por regulamentação apropriada da FDA.
- As informações aqui contidas são dadas de boa fé, indicando valores típicos obtidos em nossos laboratórios, não deverão ser consideradas como a base para ou como garantia. Apenas as propriedades e os valores que constam da certificação de qualidade devem ser considerados como garantia do produto.
- Em algumas aplicações a Braskem tem desenvolvido resinas *in-house* para alcançar características específicas.
- Em caso de dúvida na utilização ou para discutir outras aplicações, entre em contato com a Área de Serviços Técnicos.
- Para informações de segurança, manuseio, proteção individual, primeiros socorros e disposição de resíduos, consultar a FISPQ – Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Número de registro no CAS: 9010-79-1
- Os valores constantes neste documento poderão sofrer alterações sem comunicação prévia da Braskem.
- A Braskem não recomenda o uso desse produto para fabricação de embalagens, peças ou qualquer outro tipo de produto, que será utilizada para o armazenamento ou contato com soluções parenterais ou que terá qualquer tipo de contato interno com o corpo humano.
- Esta resina não contém a substância Bisfenol A (BPA, CAS #80-05-7) em sua composição.

ANEXO B – FICHA TECNICA DO POLIACETAL CELCON M90

**CELCON® M90™ | POM | Unfilled****Description**

Celcon acetal copolymer grade M90™ is a medium viscosity polymer providing optimum performance in general purpose injection molding and extrusion of thin walled tubing and thin gauge film. This grade provides overall excellent performance in many applications.

Chemical abbreviation according to ISO 1043-1: POM

Please also see Hosiiform® C 9021.

Physical properties	Value	Unit	Test Standard
Density	1410	kg/m ³	ISO 1183
Melt volume rate (MVR)	8	cm ³ /10min	ISO 1133
MVR test temperature	190	°C	ISO 1133
MVR test load	2.16	kg	ISO 1133
Mold shrinkage - parallel	2	%	ISO 294-4
Mold shrinkage - normal	1.9	%	ISO 294-4
Water absorption (23°C-sat)	0.75	%	ISO 62
Humidity absorption (23°C/50%RH)	0.2	%	ISO 62

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus (1 mm/min)	2760	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile stress at yield (50mm/min)	66	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile strain at yield (50mm/min)	10	%	ISO 527-2/1A
Tensile creep modulus (1h)	2450	MPa	ISO 899-1
Tensile creep modulus (1000h)	1350	MPa	ISO 899-1
Flexural modulus (23°C)	2550	MPa	ISO 178
Charpy impact strength @ 23°C	188.0	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength @ -30°C	181.0	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength @ 23°C	6.0	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength @ -30°C	6.0	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Notched impact strength (Izod) @ 23°C	5.7	kJ/m ²	ISO 180/1A

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (10°C/min)	165	°C	ISO 11357-1,-2,-3
DTUL @ 1.8 MPa	101	°C	ISO 75-1/-2
DTUL @ 0.45 MPa	158	°C	ISO 75-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion (parallel)	1.2	E-4/°C	ISO 11359-2
Coeff. of linear therm. expansion (normal)	1.2	E-4/°C	ISO 11359-2

Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Volume resistivity	8E12	Ohm*m	IEC 60093
Surface resistivity	3E16	Ohm	IEC 60093

Test specimen production	Value	Unit	Test Standard
Processing conditions acc. ISO	9983-2	-	Internal