

## PROJETO DE MOLDE PARA INJEÇÃO APLICADO A FABRICAÇÃO DE TAMPAS DE GARRAFA DO TIPO *SQUEEZE*

**Daniel Pazetto Gava<sup>1</sup>**

**Alexandre Milanez<sup>2</sup>**

**Resumo:** O avanço do setor de injeção de termoplásticos se deve muito ao uso dos *softwares* de engenharia aplicados à otimização de processos e produtos. Através de uma metodologia ativa de aprendizagem, acadêmicos desenvolveram uma garrafa *squeeze* que será destinada ao *marketing* do curso de Engenharia Mecânica, e por isso, têm-se a necessidade projetar um molde de injeção para a tampa da garrafa, utilizando o *SolidWorks*<sup>®</sup> para modelagem, e o *Moldflow*<sup>®</sup> para as simulações ligadas ao processo de injeção. Foram executadas análises de enchimento com foco em encontrar a melhor posição para o ponto de injeção, e análises de resfriamento com intuito de encontrar o melhor *layout* para os canais de refrigeração para que a tampa tenha um resfriamento uniforme. Foram elaborados cálculos para dimensionamento do sistema de extração da tampa, por meio do princípio de núcleo rotativo, onde utilizou-se de pinhões e cremalheiras como elementos para transmissão de potência. Os resultados das simulações se mostraram coerentes com o que foi observado na literatura. A tampa mostrou fácil enchimento, porém apresentou a formação de um pequeno defeito por rechupe em sua parte mais espessa, que equivale a 1,6% da superfície, que não afetará significativamente o resultado final. A variação dos parâmetros de resfriamento ou a mudança no *design* da tampa podem ser considerados para maior redução ou desaparecimento do rechupe.

**Palavras-chave:** Injeção de polímeros. Projeto de molde. Simulação numérica. Núcleo rotativo.

### 1. INTRODUÇÃO

De forma geral, o processo de injeção de termoplásticos consiste em um sistema onde o polímero aquecido é injetado sob pressão dentro de uma cavidade, solidificado e, por fim extraído do molde. Com o crescente avanço e a grande demanda de vários setores industriais, as peças injetadas com material polimérico passaram ser a base de muitos produtos e equipamentos. Suas formas cada vez mais complexas aliadas a alta resistência e baixo peso, necessitam de uma injeção de alta eficiência. Para atingir-se a alta qualidade e rapidez nos processos atuais de injeção,

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: danielpgava@hotmail.com

<sup>2</sup> Prof. Dr. Alexandre Milanez. E-mail: alexandre.milanez@satc.edu.br

houve um avanço em seus processos. As máquinas injetoras evoluíram, tornaram-se maiores e mais rápidas. Os moldes utilizados, cada vez mais resistentes, fabricados de materiais específicos para cada aplicação (HARADA, 2008).

Um dos pontos mais importantes desse avanço foi a implantação *softwares* CAD/CAM/CAE, onde essas ferramentas auxiliam em todas as etapas de processamento de uma peça plástica, desde o *design* inicial, modelagem e dimensionamento do molde ferramenta, até a simulação de preenchimento de cavidade no molde projetado, por exemplo. Com o uso desses *softwares*, consegue-se obter um produto final com muito mais qualidade em muito menos tempo, gerando uma economia final de tempo e dinheiro (SANT ANNA, 2008).

No ano de 2017, acadêmicos em uma disciplina de desenvolvimento de produto criaram vários modelos de garrafa *squeeze*, onde o melhor modelo foi escolhido para ser fabricado, sendo destinado ao *marketing* do curso de Engenharia Mecânica e distribuição nos eventos sociais ministrados pela Faculdade SATC. No primeiro semestre de 2019, um graduando de Engenharia Mecânica buscou em seu TCC desenvolver o corpo da garrafa, utilizando a modelagem por sopro.

Visando a continuidade do projeto, percebeu-se a necessidade da fabricação da tampa da garrafa, onde a mesma será fabricada a partir do processo de injeção termoplástica. A tampa a ser injetada tem grande complexidade, pois possui uma rosca interna, e precisa ter furos para o encaixe da tampa do bico. Por isso, é necessário um estudo minucioso e o auxílio de ferramentas CAD e CAE para o dimensionamento do molde, em especial seu sistema de extração, e simulações dos principais parâmetros de injeção, visando antecipar falhas no processo e otimizá-las antes mesmo da confecção do molde.

O desenvolvimento e conclusão do projeto da garrafa trará para o curso de Engenharia Mecânica uma gama de atribuições sociais para seu uso. Além de servir como objeto de *marketing* para o curso, ela será de grande contribuição para projetos sociais relacionados a doações que a instituição participa. O projeto do molde da tampa também agregará conhecimento sobre a área, por ser uma peça complexa, podendo ser utilizado também na ministração de aulas relacionadas.

Sendo assim, o estudo será voltado ao desenvolvimento do projeto de um molde de injeção para a tampa da garrafa *squeeze*, utilizando o *software SolidWorks®* para modelagem de todos os componentes, dando maior ênfase ao sistema de

extração, devido sua alta complexibilidade. O dimensionamento será sustentado por cálculos propostos pela literatura, e pela simulação no *software Moldflow*<sup>®</sup>, onde serão analisadas as etapas de enchimento e resfriamento do produto, com intuito de detectar possíveis defeitos e encontrar a melhor configuração para as cavidades.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão abordados todos os assuntos relevantes encontrados na literatura para o dimensionamento bem-sucedido do molde.

### 2.1 PROCESSO DE INJEÇÃO

Segundo Manrich (2013), o processo de injeção ocorre de maneira cíclica e intermitente. Este processo se dá pelo funcionamento em conjunto de duas unidades da injetora: a unidade de injeção e de fechamento. Cada unidade é constituída por uma sequência de eventos individuais, mas trabalhando de forma conjunta para completar-se um ciclo de injeção.

#### 2.1.1 Capacidade de Injeção da Máquina

Antes de iniciar o projeto do molde é necessário conhecer a capacidade de injeção da máquina injetora, ou seja, a quantidade de material que a máquina pode injetar por ciclo. Manrich (2013) afirma que não se deve utilizar mais que 80% da capacidade de injeção da máquina, pois sua preservação pode ser comprometida.

Os fabricantes das máquinas utilizam o Poliestireno (PS) como material padrão para dados técnicos. Cruz (2002), fala que para se descobrir a capacidade de injeção ( $C_i$ ) de outro material, deve-se utilizar a Eq. (1).

$$C_i = C_{i_{PS}} \times \left( \frac{P_e}{P_{e_{PS}}} \right) \times \left( \frac{FV_{PS}}{FV} \right) \text{ [g]} \quad (1)$$

A Tab. 1 trata de alguns dados relevantes para com o cálculo de capacidade de injeção.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais com relação a capacidade de injeção.

Material	Peso específico [g/cm³]	Fator volumétrico [cm³]
Poliestireno (PS)	1,04 – 1,06	1,9 – 2,15
Polipropileno (PP)	0,9 – 0,91	1,92 – 1,96

Fonte: Adaptado de Harada (2008)

### 2.1.2 Força de Fechamento

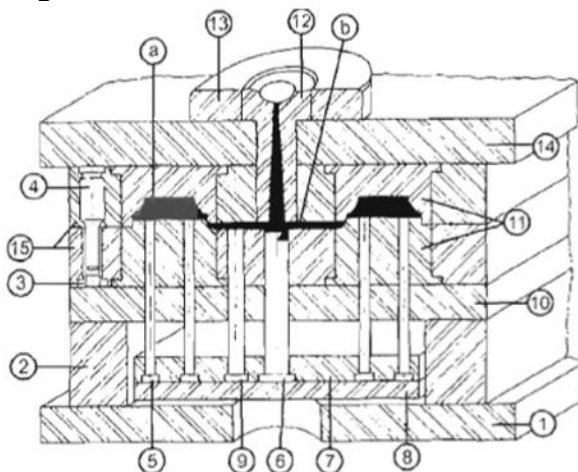
No momento que ocorre a injeção do polímero dentro do molde, suas cavidades sofrem esforços que tendem a abri-las. Essa força está diretamente ligada a área superficial de moldagem. A força de fechamento da máquina é regulada de forma a anular a pressão no momento de injeção e assegurar que as placas não se abram (HARADA, 2008). Levando em conta as perdas de pressões de injeção até nas cavidades, utiliza-se a Eq. (2) para determinar a força de fechamento ( $F_f$ ).

$$F_f = Ap \times \frac{1}{2} \text{ a } \frac{2}{3} P_i \text{ [T]} \tag{2}$$

### 2.2 MOLDE

O molde é um dos componentes mais importantes do processo, é nele que se aloca as cavidades que dão forma as peças injetadas. A Fig. 1 mostra os principais componentes de um molde de injeção.

Figura 1 – Estrutura básica de um molde de injeção.



1, 14 e 15	PLACAS DE FIXAÇÃO
2	CALÇO
3	BUCHA
4	COLUNA
5 à 9	CONJUNTO DE EXTRAÇÃO
10	PLACA SUPORTE
11	CAVIDADES
12	BUCHA DE INJEÇÃO
13	ANEL DE CENTRAGEM

Fonte: Adaptado de Harada (2008)

Em seu conceito básico de funcionamento, o material polimérico fundido entra sob pressão no canal de injeção, fluindo pelos canais de alimentação até a cavidade da peça a ser moldada, onde o termoplástico é solidificado pelo sistema de refrigeração e posteriormente extraído (ZHOW, 2013).

Para obter-se um bom projeto de molde, Harada (2008) fala que se deve levar em consideração as condições geométricas da peça, quantas cavidades a máquina consegue comportar (capacidade de injeção) e a capacidade dimensional da máquina (tamanho do molde). Tendo em vista o conhecimento desses parâmetros iniciais, deve-se projetar os sistemas de alimentação do molde, que são de grande importância para um preenchimento eficiente das cavidades (MOAYYEDIAN, 2019).

### **2.2.1 Canal de Injeção e Alimentação**

O canal de injeção geralmente é feito em uma peça postiça, para fácil remoção caso sofra alguma avaria. Recomenda-se uma angulação de 2° a 5° para o canal, de modo que facilite a extração (MANRICH, 2013). A bucha com o canal se encontra na parte fixa do molde, por ela é feita a ligação entre o molde e o canhão da injetora, é recomendada a fabricação em aço AISI 8620 cementado (CRUZ, 2002).

Os canais de alimentação são utilizados como corredores que levam o material plástico fundido do canal de injeção até as cavidades. Seu dimensionamento deve ser feito de maneira que a resistência ao fluxo seja mínima, tendo pouca perda de pressão e minimização o estresse mecânico (ZHOW, 2013).

A seção transversal de um canal mais indicada e que gera menos resistência é a de seção circular, mas requer grande precisão em sua usinagem. Deve-se sempre trabalhar com menores volumes e comprimentos possíveis para evitar o desperdício de material, porém um canal com uma seção muito pequena e/ou um comprimento muito longo, pode acabar solidificando o material antes do enchimento completo das cavidades (MOAYYEDIAN, 2019).

Segundo Harada (2008), recomenda-se seguir a Tab. 2 onde mostra diâmetros recomendados conforme o comprimento dos canais. Sendo que para fluírem o Polipropileno (PP) os diâmetros variam de 4,8 mm a 9,5 mm.

Tabela 2 – Diâmetros de canais recomendados.

Comprimento do canal principal [mm]	Principal [mm]	Secundário [mm]
Até 75	5	4
75 a 150	6	5
150 a 225	8	6
225 a 300	9,5	8
Mais de 300	9,5	8

Fonte: Adaptado de Harada (2008)

### 2.2.2 Ponto de Injeção

O sistema que liga os canais de alimentação às cavidades é denominado de ponto de injeção ou ataque. Seu diâmetro é relativamente menor que o dos canais de alimentação, porém sua dimensão deve ser diretamente proporcional ao tamanho da peça, e especialmente à fluidez do polímero (MANRICH, 2013).

Os pontos de injeção podem ser construídos de diversos formatos, sendo que cada forma tende a atender particularidades específicas da geometria da peça a ser injetada. Também podem ser definidos visando o tipo de corte desejado, podendo ser manual ou automático, e a marca que deixará no produto final (TAVARES, 2016).

### 2.2.3 Cavidades

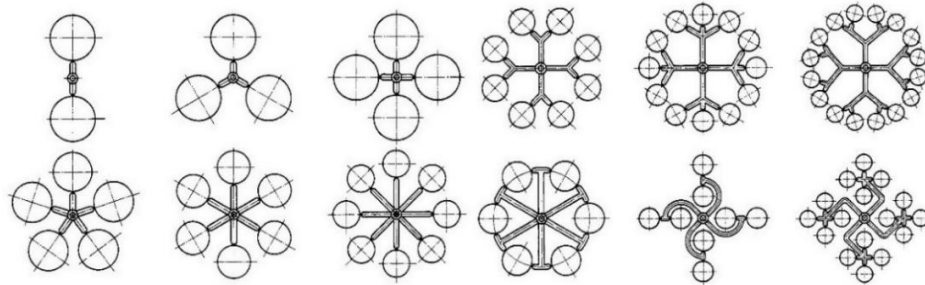
Conforme Zhou (2013), as cavidades dão o formato à peça injetada por meio de geometrias negativas usinadas em aços ferramenta. Geralmente as cavidades são compostas pela unidade fêmea, que dá o formato externo a peça, e a unidade macho, responsável pela parte interna da mesma (HARADA, 2008).

Cruz (2002) e Miranda (2017) falam que o aço recomendado para a confecção das cavidades é o aço AISI P20, que é um aço de boa usinabilidade e de alta polibilidade. Sua dureza se encontra na faixa de 28 a 34 HRc (FAVORIT, 2019).

Os fatores que influenciam na quantidade de cavidades por molde estão relacionados com critérios técnicos e restrições econômicas. Entre os critérios técnicos deve se destacar a capacidade de injeção da máquina, e o tamanho máximo de construção do molde. Os critérios econômicos condizem com os custos de fabricação e a capacidade de produção do molde (ZHOU, 2013).

Manrich (2013) fala que se o molde possui mais de uma cavidade, o preenchimento de todas deve ser simultâneo, evitando a diferença de peso e aspecto visual entre as peças, o ideal é que as cavidades estejam dispostas simetricamente. A Fig. 2 mostra exemplos de *layouts* de cavidades devidamente balanceadas.

Figura 2 – Exemplos de *layouts* de cavidades balanceadas.



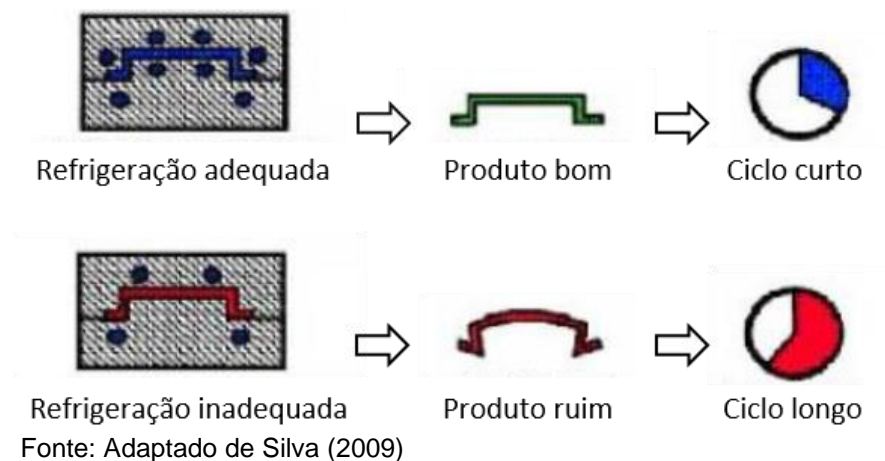
Fonte: Adaptado de Marcello (2014)

#### 2.2.4 Canais de Refrigeração

Malloy (2010) fala que a etapa de resfriamento geralmente é a que consome mais tempo durante o processo de injeção. Os canais de refrigeração do molde são responsáveis por diminuir de forma rápida e constante a temperatura da peça injetada, até uma temperatura mais baixa em que seja possível realizar a extração sem que ocorra danos a mesma (SILVA, 2009).

Um sistema de refrigeração balanceado reflete na melhor qualidade nas peças e também na redução do tempo de resfriamento por ciclo (MALLOY, 2010). A Fig. 3 traz um sistema eficiente, e um não eficiente.

Figura 3 – Exemplos de refrigeração.

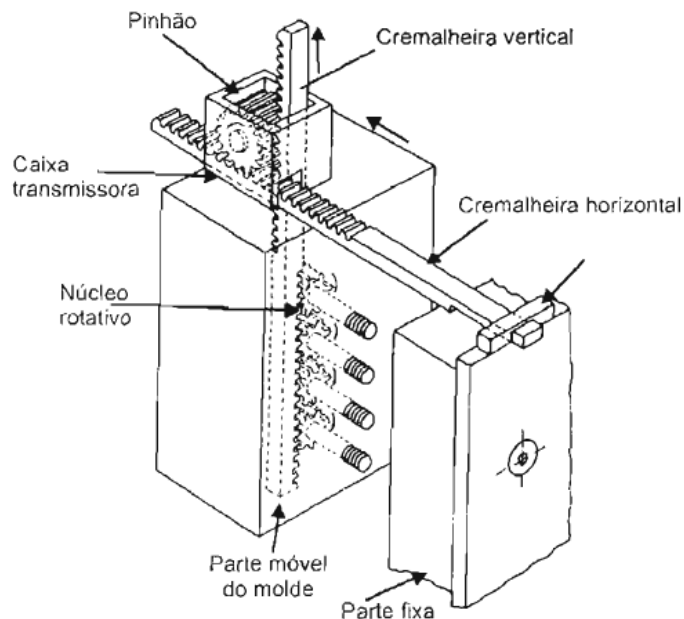


A sequência superior representa uma refrigeração adequada, e um produto de boa qualidade com tempo curto de refrigeração. Já a sequência inferior mostra um processo inadequado, onde a peça resfriou de maneira desigual, com uma grande diferença de temperatura entre as superfícies da cavidade, ocorrendo o defeito de empenamento. Coelho, Santos e Guedes (2018) indicam que a diferença de temperaturas entre as duas superfícies da cavidade (macho e fêmea) deve ficar entre 2 e 5 °C.

### 2.2.5 Extração

Após o resfriamento, a peça precisa ser retirada do molde. Além do sistema de extração por placa extatora, que é o mais comum utilizado em moldes, para os produtos com rosca interna é comum utilizar um sistema de extração de núcleo rotativo, que consiste na rotação da cavidade macho no mesmo passo da rosca do produto, promovendo o desenroscamento do mesmo. O sistema de rotação pode ser acionado mecanicamente, aproveitando o movimento de abertura do molde (Fig. 4), ou por meio de motores e atuadores hidráulicos (HARADA, 2008).

Figura 4 – Exemplo de extração por núcleo rotativo com acionamento mecânico.



Fonte: Harada (2008)

Para a transformação de movimento linear em movimento rotativo, ou vice-versa, utiliza-se um conjunto pinhão e cremalheira (NORTON, 2010).

Lopes e Galdino (2013) falam que a Eq. (3) calcula o deslocamento da cremalheira com base em uma rotação do pinhão.

$$e = \pi \times dp \text{ [mm]} \quad (3)$$

Para descobrir o diâmetro primitivo do pinhão ou engrenagem utiliza-se a Eq. (4), que relaciona o módulo com o número de dentes (NORTON, 2010).

$$dp = m \times Z \text{ [mm]} \quad (4)$$

Dependendo do curso necessário para a cremalheira, necessita-se de uma relação de transmissão entre engrenagens, e para isso é necessário conhecer a relação de transmissão dada na Eq. (5) (MELCONAIN, 2008).

$$I = \frac{n1}{n2} = \frac{Z1}{Z2} \text{ [adm]} \quad (5)$$

A engrenagem deve suportar os esforços de sua aplicação. Para consolidar seu dimensionamento, utiliza-se a Eq. (6) para calcular a tensão no pé do dente (MELCONAIN, 2008).

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F \times q \times \varphi}{b \times m} \leq \sigma_{material} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

### 2.3 DEFEITOS DE PROCESSAMENTO

Um único defeito de injeção pode estar associado com inúmeros fatores que o influenciam. Os defeitos mais comuns observados geralmente estão relacionados com a construção do molde, temperatura do molde e polímero e pressão de injeção (BLASIO, 2007 *aplud* MOREIRA, 2015).

O aprisionamento de gases acontece geralmente quando o ar presente dentro da cavidade não tem por onde escapar, quando comprimido pelo avanço da

frente de fluxo, podendo até mesmo ocorrer um preenchimento incompleto da cavidade. Para evitar esse problema é usual fazer pequenos pontos de escape, feitos geralmente na linha de fechamento do molde com dimensões recomendadas (DSM, 2005).

Os defeitos de rechupe estão ligados praticamente ao projeto do molde e produto. Deve-se evitar peças com paredes e nervuras muito espessas, pois nesses casos o resfriamento não é uniforme, causando um encolhimento excessivo nessas regiões, dando origem aos rechupes. Manrich (2013) e Harada (2008) recomendam que as nervuras presentes no projeto não ultrapassem 60% da menor espessura do produto.

## 2.4 SIMULAÇÃO CAE

Os atuais *softwares* de simulação CAE são capazes de simular numericamente as inúmeras variáveis envolvidas no processo de injeção, apresentando resultados que antecipem os possíveis problemas já na fase de desenvolvimento do molde e produto, evitando assim posteriores ajustes, e otimizando seu tempo de confecção (MOREIRA, 2017).

O *software MoldFlow® Adviser* dispõe de uma série de análises que podem ser executadas, como: o comportamento de fluxo polimérico durante o preenchimento das cavidades, as condições de resfriamento, análise de defeitos, e muitas outras ferramentas (AUTODESK, 2019).

A partir de um modelo CAD, o *MoldFlow®* gera uma malha de elementos finitos, preparando o modelo. Após deve-se alimentar o programa com os parâmetros necessários ou utilizar parâmetros pré-determinados pelo *software*. Com todos os dados fornecidos as análises podem ser executadas e seus resultados analisados (PIRES, 2015).

## 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção encontram-se todos os procedimentos necessários para o projeto do molde. Dentre eles cálculos observados na literatura, modelagem CAD e simulações numéricas.

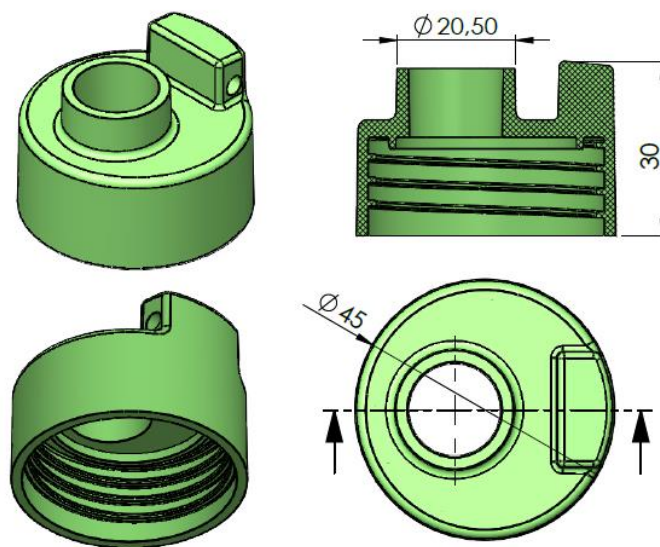
### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA PROJETO

Os tópicos descritos a seguir são essenciais para o início do projeto de um molde de injeção. Essas definições darão as diretrizes iniciais para o projeto, bem como tudo que precisará ser desenvolvido a partir delas.

#### 3.1.1 Especificações do Produto

Como o modelo da tampa da garrafa já foi projetado juntamente com todo seu conjunto, procurou-se manter seu *design* inicial para injeção. A tampa possui uma geometria complexa e pode ser observada na Fig. 5, juntamente com suas dimensões principais.

Figura 5 – Tampa da garrafa e suas dimensões.



Fonte: Do autor (2020)

#### 3.1.2 Escolha do Material Polimérico

Para a fabricação da tampa foi selecionada a resina de Polipropileno EP 445L da empresa fabricante de resinas BRASKEM. Essa resina é um copolímero heterofásico, especialmente desenvolvida para a fabricação de tampas de bebidas por conter em sua composição a adição de nucleantes e clarificantes, além de adição de agentes deslizantes e antiestáticos (BRASKEM, 2019).

O polímero EP 445L também apresenta uma média fluidez, sendo indicada para o processo de injeção (BRASKEM, 2019). As propriedades relevantes para o projeto são observadas na Tab. 3.

Tabela 3 – Propriedades do Polipropileno EP 445L.

<b>Características</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>
Índice de fluidez (230°C/2,16kg)	6,0	g/10 min
Densidade	0,9	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de flexão secante a 1%	1450	MPa
Resistência à tração no escoamento	32	MPa
Alongamento no escoamento	7	%
Dureza Rockvell (escala R)	90	-
Temperatura de deflexão térmica a 0,455 Mpa	105	°C
Contração	1,2 - 2,2	%

Fonte: Adaptado de BRASKEM (2019)

### 3.1.3 Parâmetros da Injetora

Para a realização bem sucedida do projeto do molde da tampa, precisa-se conhecer a injetora a ser utilizada. A Faculdade SATC possui uma máquina injetora que está localizada no Laboratório de Conformação Mecânica e Processamento de Polímeros (LACOMP). A máquina é uma Pavan Zanetti, modelo NFN – 150P onde suas especificações técnicas podem ser observadas na Tab. 4.

Tabela 4 – Especificações técnicas da Injetora Pavan Zanetti mod. NFN – 150P.

<b>Características</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>
Capacidade de plastificação	11	g/s
Volume de injeção	170	cm <sup>3</sup>
Pressão específica de injeção	139,6	MPa
Peso de injeção do PS	153	g
Força de fechamento	980	kN
Distância entre colunas (espaço útil)	344 x 184	mm
Altura mínima e máxima do molde	120 - 320	mm
Curso de abertura	300	mm
Vazão máxima de resfriamento	40	l/min

Fonte: Adaptado do manual técnico da injetora (2020)

### 3.1.4 Cálculos Iniciais Para Projeto

Após ter conhecimento da máquina injetora a ser utilizada, e do polímero em questão, tem-se os dados necessários para dar sequência no cálculo da capacidade de injeção do polipropileno. Essa informação é de grande importância para a determinação da quantidade máxima de cavidades no molde.

Utilizando a Eq. (1) com os dados das Tab. 1 e 3, obtêm-se o valor para  $Ci_{pp} = 136,89$  g. Atentando à orientação de Manrich (2013), considerando 80% da capacidade para projeto, temos então  **$Ci_{pp} = 109,51$  g.**

O volume da tampa obtido por sua modelagem no *SolidWorks*<sup>®</sup>, é de 12,44 cm<sup>3</sup>. Relacionando o volume com a densidade informada na Tab. 3, tem-se a massa total da tampa, que é **11,196 g**. Associando a capacidade de injeção da máquina para o polipropileno ( $Ci_{pp}$ ), com a massa total da tampa, conclui-se que a injetora comporta de oito à nove cavidades, dependendo da massa dos canais de alimentação.

Sabe-se que o molde não será destinado à produção de larga escala, então não se justificam os custos para a fabricação do mesmo com oito ou nove cavidades. Outro fator determinante é que a injetora não conseguiria comportar as dimensões de um molde com esse porte. Então, por esses motivos, foi definido que o molde terá duas cavidades.

## 3.2 PROJETO DAS CAVIDADES

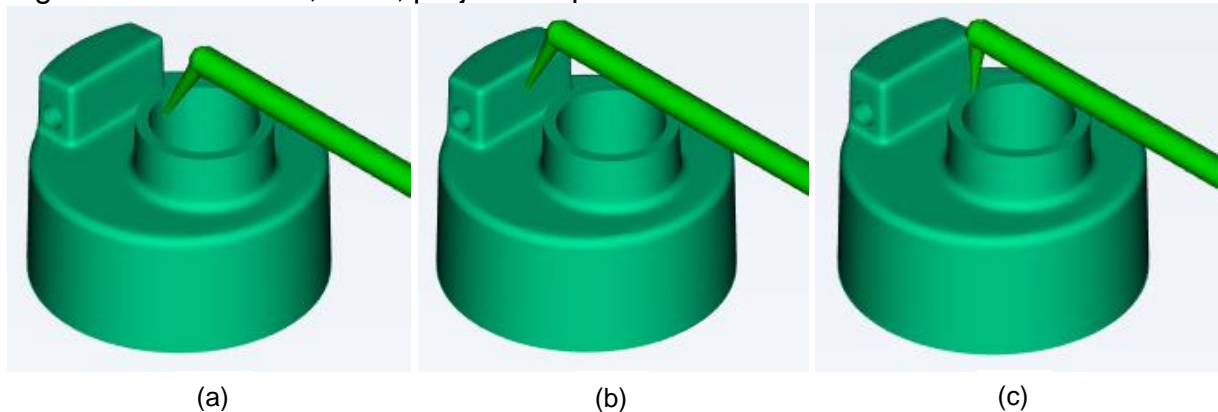
Para o projeto das cavidades, primeiramente serão executadas uma série de análises com *software MoldFlow*<sup>®</sup> *Adviser 2019*. As simulações tem intuito de encontrar o melhor *layout* para as cavidades, canais de alimentação e canais de refrigeração, observando parâmetros que serão relevantes para a escolha dos modelos.

### 3.2.1 Descrição da Análise de Enchimento

Nesta etapa foram preparados três modelos com diferentes posições para o ponto de injeção. Posteriormente serão simulados em uma análise de enchimento

com auxílio do *MoldFlow*<sup>®</sup>. A análise mostrará qual o melhor modelo para dar sequência no dimensionamento das cavidades. A Fig. 6 mostra os modelos projetados para a análise.

Figura 6 – Modelos a, b e c, projetados para as análises de enchimento.



Fonte: do autor (2020)

Os pontos de injeção foram posicionados próximos ao centro de massa da peça, Harada (2008) afirma que essa é a posição mais indicada. Para construção dos canais de alimentação, seguiu-se um padrão de dimensões da Tab. 2 para todos os modelos.

É necessário selecionar o tipo de polímero para a análise. O programa contém uma biblioteca de polímeros de diversos fabricantes. O polímero selecionado na etapa 3.1.2 não está contemplado na biblioteca do *software*, por isso, atentou-se em escolher o polipropileno CP401XP, do mesmo fabricante, que tem suas propriedades semelhantes ao selecionado.

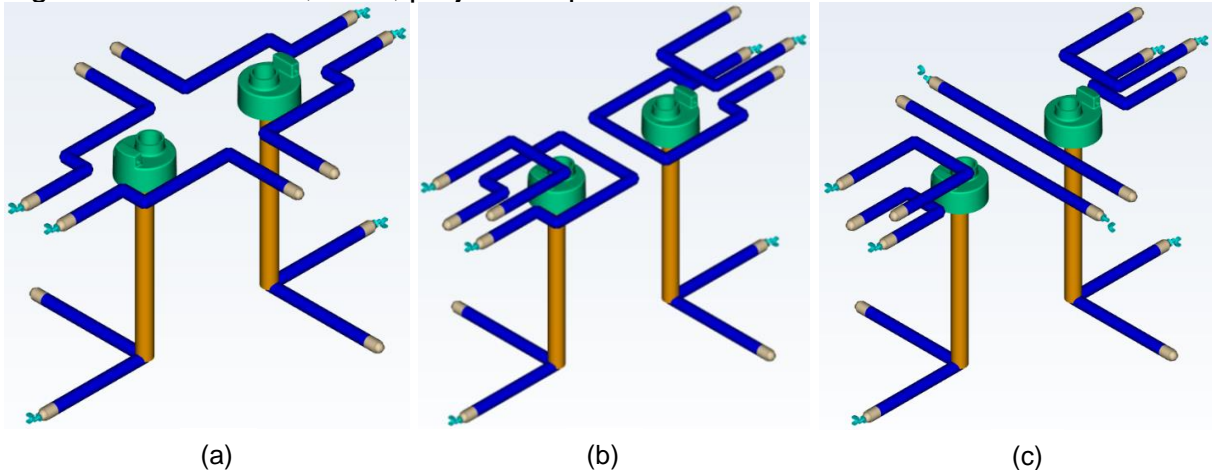
Outro parâmetro informado foi a pressão específica de injeção, dado obtido na Tab. 4. O *MoldFlow*<sup>®</sup> também seleciona dados pré-definidos pelo fabricante do polímero, como a temperatura ideal do molde e do polímero, com valores de 30 °C e 230 °C, respectivamente. Para esses parâmetros, optou-se por utilizar os dados pré-definidos pelo *software*.

### 3.2.2 Descrição da Análise de Resfriamento

Para a análise de enchimento, procurou-se seguir o mesmo procedimento da etapa 3.2.1. Com o *MoldFlow*<sup>®</sup> foram preparados três *layouts* de canais de

refrigeração, com intuito de encontrar o melhor modelo. A Fig. 7 mostra os três modelos projetados.

Figura 7 – Modelos a, b e c, projetados para as análises de resfriamento.



Fonte: do autor (2020)

Para a análise, o software pede alguns dados de entrada, como o tipo de fluido utilizado para o arrefecimento, sua temperatura e vazão. O fluido mais comum a ser utilizado é a água, em temperatura ambiente de 25 °C, com vazão obtida na Tab. 4, de 40 l/min. Os canais foram dimensionados com um único diâmetro de 10 mm.

Para a refrigeração do macho é necessário criar um sistema de cascata, onde a água sobe por um tubo interno de 10 mm de diâmetro e desce por um diâmetro externo de 14 mm, seguindo uma razão de diâmetros de 0,7 recomendada pelo próprio *software*. A Fig. 8 exemplifica o sistema de cascata utilizado.

Figura 8 – Sistema de cascata.



Fonte: Adaptado de Autodesk (2020)

### **3.2.3 Descrição da Construção das Cavidades**

Tendo o modelo polimérico já definido e devidamente otimizado, a próxima etapa será dimensionar as placas cavidades, com o auxílio da ferramenta de modelagem CAD, o *SolidWorks® 2016*. As placas também seguirão as recomendações geométricas existentes na Tab. 4, para garantir a adequação e a funcionabilidade junto à máquina injetora.

## **3.3 PROJETO DO MOLDE**

Com as cavidades projetadas, a próxima etapa é desenvolver o restante do molde, todos os componentes e mecanismos necessários para seu bom funcionamento.

O molde precisará ter três placas, para extração automática dos canais e para as movimentações das gavetas. É importante seguir os dados da Tab. 4, para que o molde não extrapole as dimensões da máquina injetora.

### **3.3.1 Dimensionamento do Sistema de Extração**

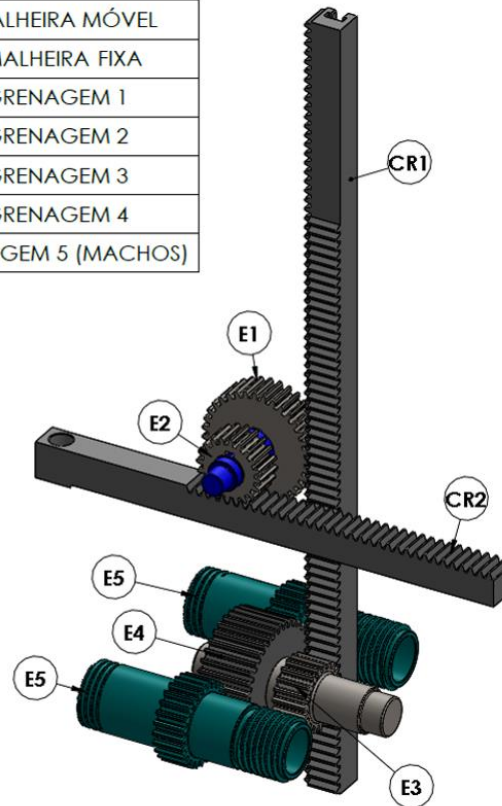
Por se tratar de um produto com rosca interna, o sistema de extração precisa ser baseado no conceito de núcleo rotativo. Optou-se por utilizar um sistema que aproveite o movimento linear de abertura, convertendo-o em movimento rotativo para o desenroscamento das cavidades, com a utilização de cremalheiras e engrenagens de dentes retos.

O sistema de potência também poderia ser acionado por um motor hidráulico, mas precisaria também de uma unidade hidráulica externa para alimentação, elevando assim os custos de fabricação.

A Fig. 9 mostra como será o conceito da transmissão da extração, e os componentes nomeados que serão dimensionados.

Figura 9 – Sistema de transmissão da extração.

CR1	CREMALHEIRA MÓVEL
CR2	CREMALHEIRA FIXA
E1	ENGRENAGEM 1
E2	ENGRENAGEM 2
E3	ENGRENAGEM 3
E4	ENGRENAGEM 4
E5	ENGRENAGEM 5 (MACHOS)



Fonte: do autor (2020)

A cremalheira fixa (CR2) será responsável pelo aproveitamento do movimento de abertura das placas, esse curso está limitado à no máximo 300 mm, conforme indica a Tab. 4. Uma relação de transmissão terá de ser dimensionada através dos conjuntos de engrenagens, para que os machos (E5) consigam dar 3,5 voltas, e conseqüentemente se desenroscarem da tampa. Os demais dados iniciais para o dimensionamento são: distância entre os machos, 126 mm; diâmetro primitivo mínimo do macho, 50 mm; velocidade linear de abertura das placas, que é ajustável e será regulada em 0,05 m/s.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados todos os resultados obtidos provenientes da etapa de procedimento experimental. Os resultados apresentados foram obtidos através de cálculos e simulações computacionais.

#### 4.1 ANÁLISE DE ENCHIMENTO

Além de um resultado visual, as simulações geram uma sequência de dados que estão diretamente relacionados com os parâmetros iniciais de processo e com o modelo simulado. Esses dados foram reunidos na Tab. 5, para uma melhor análise e discussão de seus resultados.

Tabela 5 – Dados obtidos com a simulação de enchimento dos modelos a, b e c.

<b>Dados</b>	<b>Modelo a</b>	<b>Modelo b</b>	<b>Modelo c</b>
Tempo de enchimento (s)	1,05	1,06	1,05
Confiança de enchimento (%)	100	100	100
Alta qualidade superficial (%)	70,1	68,2	70,4
Média qualidade superficial (%)	28,2	32,5	28,0
Baixa qualidade superficial (%)	1,7	1,3	1,6
Pressão de injeção (Mpa)	31,68	31,54	29,88
Força de fecho máxima (T)	2,854	2,919	2,916
Temperatura média do polímero no enchimento (°C)	243,0	243,9	241,5
Tempo até atingir a temperatura de extração (s)	73,11	75,46	72,18
Volume de injeção (cm <sup>3</sup> )	27,1045	27,3970	27,1792
Volume do sistema de alimentação (cm <sup>3</sup> )	2,2765	2,5674	2,3518

Fonte: do autor (2020)

Visando os parâmetros de pressão, todos os modelos tiveram a pressão de enchimento de maneira balanceada em cada cavidade. O modelo que precisou de uma menor pressão para o enchimento foi o da Fig. 6c, sendo 5,7% menor se comparado ao modelo da Fig. 6b. Tendo menor pressão, tem-se uma preservação maior da máquina injetora e pode-se trabalhar com espessuras menores para as placas cavidades.

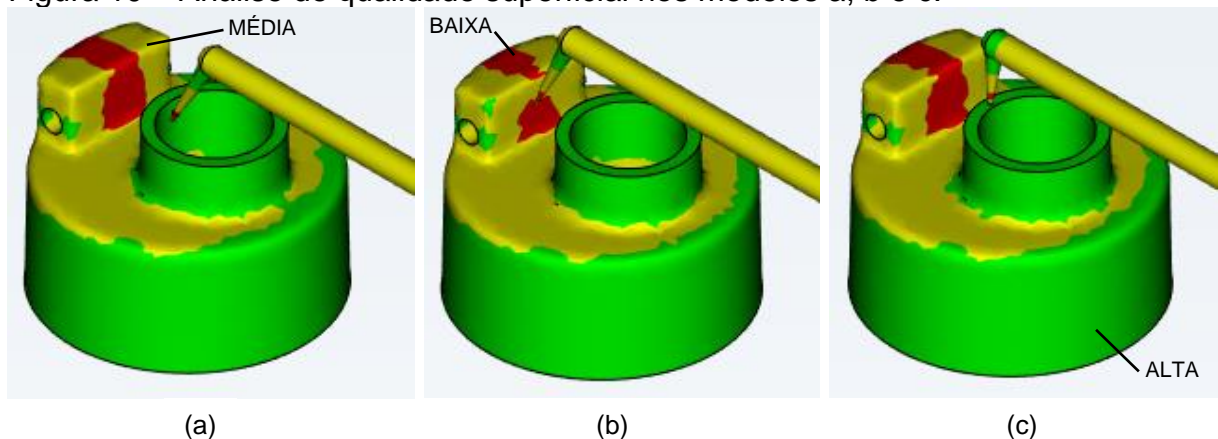
Os dados de tempo de enchimento e de tempo até atingir a temperatura de extração também são relevantes. Quanto menor o tempo demandado por ciclo, maior será a produtividade por hora. Para o tempo de enchimento, todos os modelos da Fig. 6 se mostraram praticamente iguais, sendo que os menores tempos foram os da Fig.6a e 6c, com 1,05 segundos.

Com relação ao tempo até a extração, o modelo da Fig. 6c foi o melhor, com 72,18 segundos. Os resultados de resfriamento que serão expostos na próxima

etapa, tendem a diminuir de maneira significativa o tempo para chegar na temperatura de extração.

Todos os modelos analisados possuem facilidade de enchimento. Os três apresentaram uma pequena região onde a qualidade superficial é baixa, conforme o exemplo mostrado na Fig. 10.

Figura 10 – Análise de qualidade superficial nos modelos a, b e c.



Fonte: do autor (2020)

Conforme a Fig. 10, a região na cor verde representa alta qualidade, a amarela média, e a vermelha corresponde à superfície com baixa qualidade. O teste que apresentou o maior valor para a qualidade baixa foi o da Fig. 10a, com 1,7%, sendo considerado uma porcentagem baixa com relação ao todo. O modelo que obteve o maior percentual de alta qualidade foi o modelo da Fig. 10c, com 70,4%.

Analisando todos os dados da Tab. 5, conclui-se que o modelo “b” apresentou os piores resultados, já que tem seu ponto de injeção localizado mais afastado do centro de massa da tampa, validando assim a afirmação de Harada (2008). Dos onze dados analisados da Tab. 5, o modelo “c” se mostrou melhor em sete deles, sendo assim optou-se por seguir o projeto a partir do modelo “c”.

## 4.2 ANÁLISE DE RESFRIAMENTO

Os resultados obtidos com a análise de resfriamento foram reunidos na Tab. 6 para um melhor entendimento dos mesmos e posteriormente serem discutidos.

Tabela 6 – Dados obtidos com a simulação de resfriamento dos modelos a, b e c.

Dados	Modelo a	Modelo b	Modelo c
Varição máx. da temperatura do fluido (°C)	0,02	0,02	0,07
Alta qualidade de arrefecimento (%)	71,5	71,1	71,0
Média qualidade de arrefecimento (%)	14,8	15,3	15,4
Baixa qualidade de arrefecimento (%)	13,7	13,6	13,6
Varição de tempo de arrefecimento (s)	32,35	31,83	31,96
Maior temperatura da peça (°C)	65,62	64,65	65,27
Menor temperatura da peça (°C)	30,60	30,40	31,67
Tempo até atingir a temperatura de extração (s)	41,44	40,76	40,97

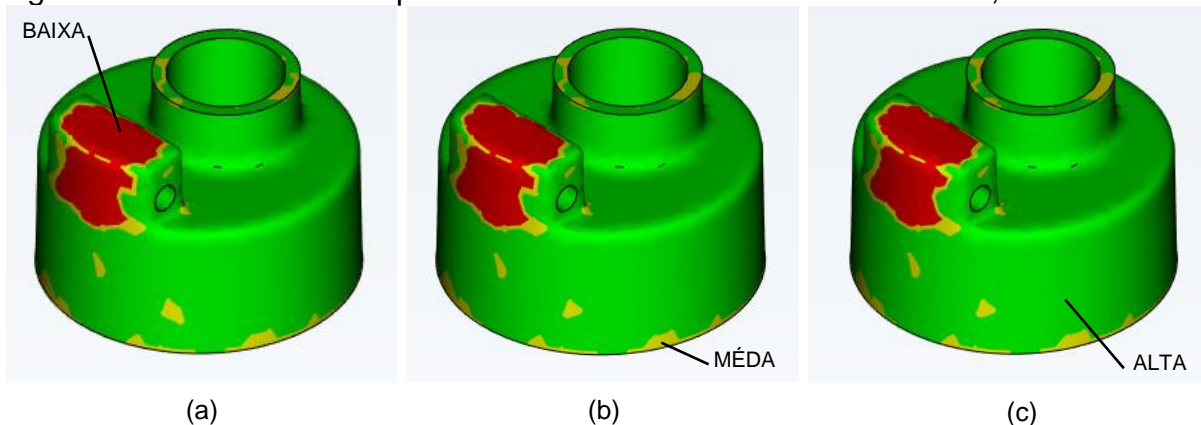
Fonte: do autor (2020)

Comparando os dados obtidos dos três modelos, percebe-se que não há uma grande diferença entre os valores, mas ainda assim pode-se interpretar seus resultados e chegar a um modelo final.

Analisando o dado de variação máxima da temperatura do fluido, os três modelos obtiveram ótimos resultados, sendo que Harada (2008) e Autodesk (2019) indicam que uma variação de temperatura maior que 3°C deve ser evitada, afim de dar mais uniformidade à temperatura do molde.

Sobre a qualidade de arrefecimento, o melhor resultado foi observado no modelo da Fig. 7a, com 71,5%. Porém como pode ser observado na Fig. 11, a região em vermelho, com baixa qualidade, se mostra em um percentual praticamente constante em todos os modelos, localizando-se na parte mais espessa da tampa, onde o *software* indica que poderá ocorrer o defeito de rechupe.

Figura 11 – Resultados de qualidade de arrefecimento nos modelos a, b e c.

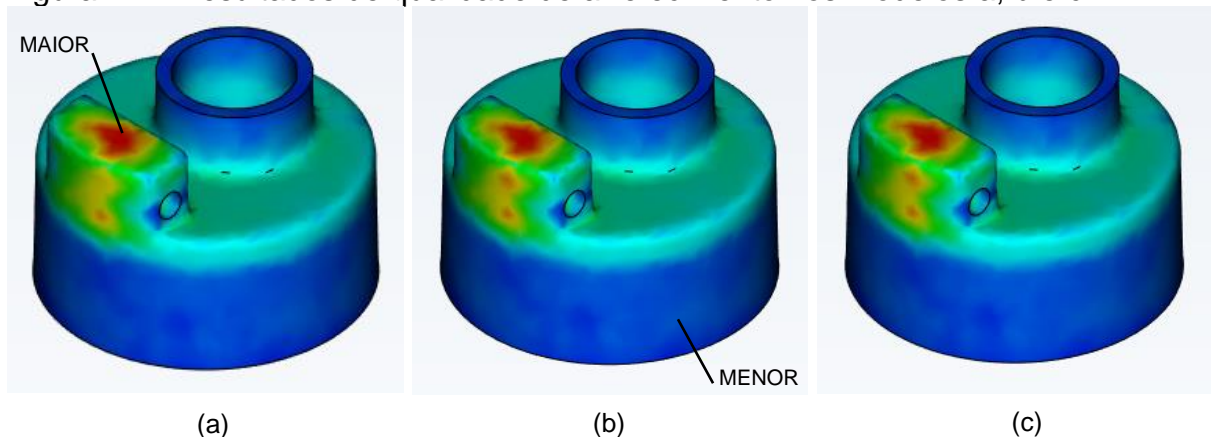


Fonte: do autor (2020)

A região de baixa qualidade que teve um menor percentual foi a dos modelos da Fig. 11b e 11c, com 13,6%.

Para o parâmetro de tempo para atingir a temperatura de extração, o melhor resultado obtido foi o da Fig. 7b, com 40,76 segundos. Se comparado ao mesmo parâmetro obtido na etapa 4.1, analisando somente o enchimento do modelo escolhido da Fig. 6c, percebe-se uma redução de 43,53% no tempo de resfriamento. A Fig. 12 mostra a variação do tempo entre as regiões da peça, onde o esquema de cores varia do azul ao vermelho, representando o menor tempo e maior tempo, respectivamente. Como se pode perceber nas imagens a seguir, os três modelos se mostram praticamente iguais.

Figura 12 – Resultados de qualidade de arrefecimento nos modelos a, b e c.



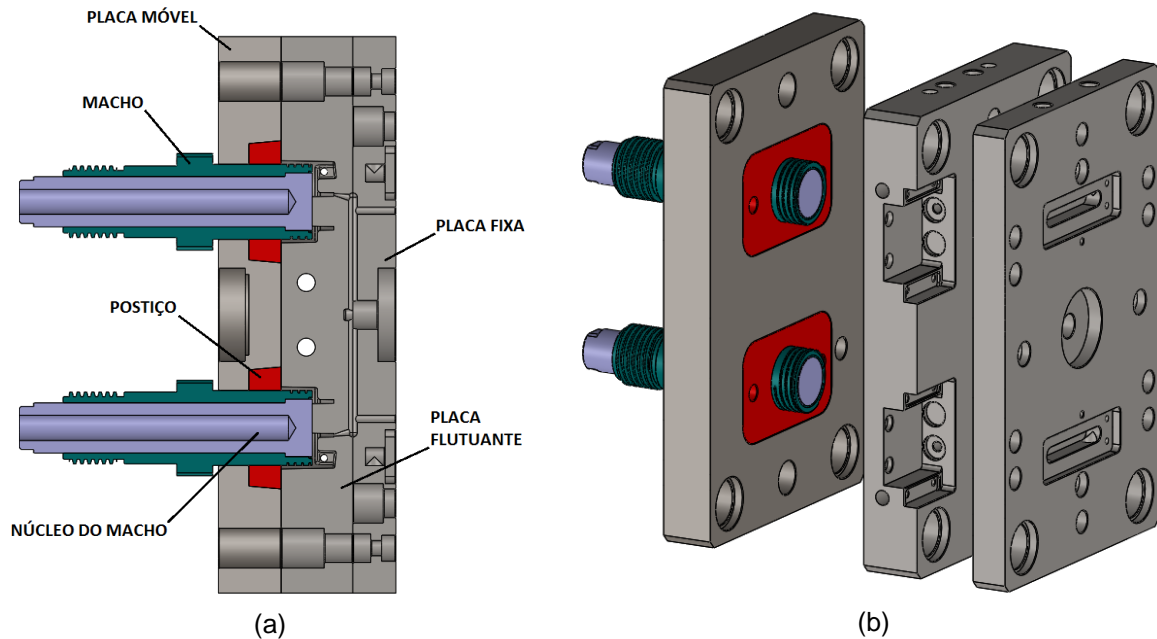
Fonte: do autor (2020)

Por fim, o modelo que obteve uma menor variação de temperatura ao fim do resfriamento foi o da Fig. 7b, variando entre seu máximo e mínimo, mostrando uma diferença 34,25 °C. Todos os modelos apresentam a maior temperatura na parte mais espessa da peça. Observando os 8 dados obtidos através da simulação, o modelo “b” se comportou melhor em 6 deles, e será utilizado para dar sequência no projeto.

#### 4.3 PROJETO DAS CAVIDIDADES

Com o *SolidWorks*<sup>®</sup>, foi dimensionado e as placas e machos que darão forma às cavidades do molde. A Fig. 13 mostra o conjunto de componentes.

Figura 13 – Conjunto de placas cavidades e machos em corte e em vista isométrica.



Fonte: do autor (2020)

As placas tem dimensões de 200 x 310 mm, variando somente as espessuras. A placa fixa tem espessura de 24 mm, nela está parte dos canais de alimentação e a bucha de injeção. Já a placa flutuante tem espessura de 40 mm, já que ela aloca toda a cavidade externa da tampa. Sua construção também compõe de rebaixos e encaixes para as gavetas que fazem o furo na parte superior da tampa. A placa móvel tem espessura de 35 mm, e foi construída em aço SAE 1045. Os demais itens apresentados na Fig. 13 foram construídos em aço AISI P20, pois estarão em contato direto com o polímero.

Os machos foram construídos de forma que a parte externa possa ser movimentada e seu núcleo sempre fique na posição correta. Isso facilita os ajustes de fechamento, e com os canais de refrigeração.

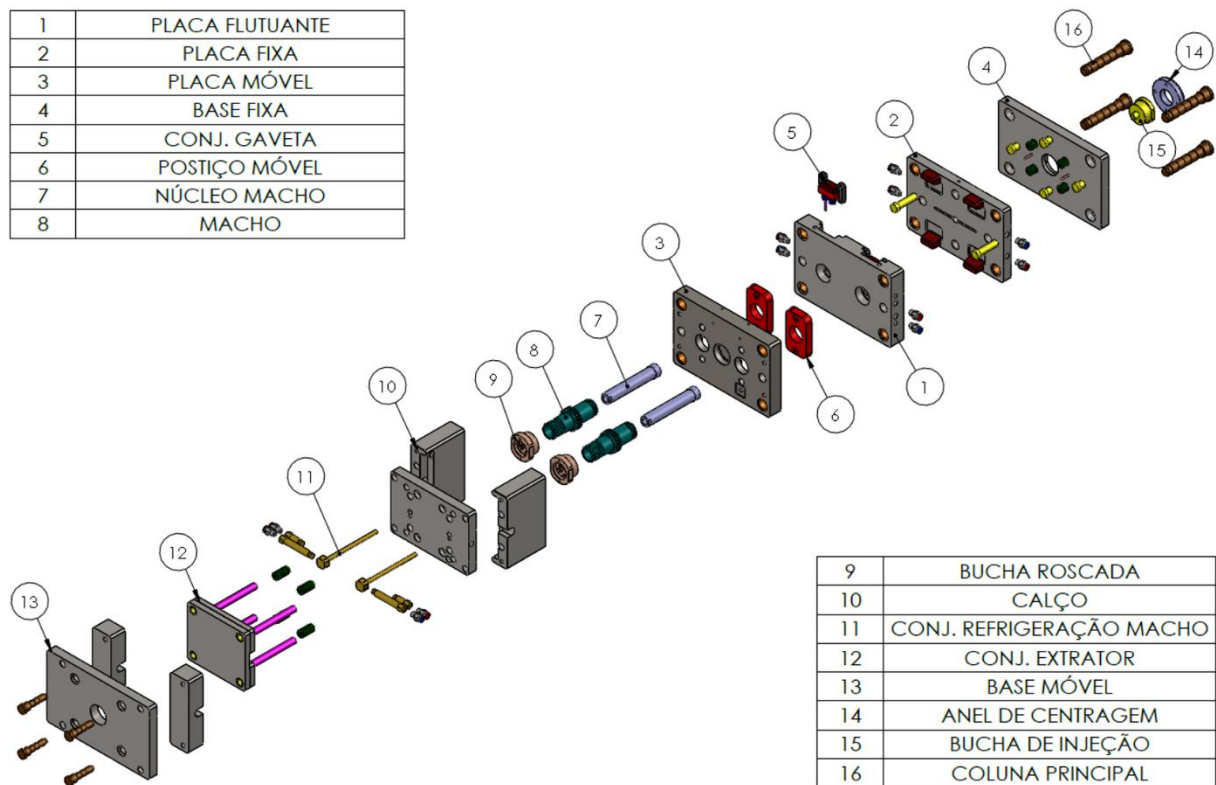
#### 4.4 CONSTRUÇÃO DO MOLDE

Os demais componentes do molde foram dimensionados no *SolidWorks*<sup>®</sup>, com base nas medidas das placas cavidades e na altura máxima permitida pela máquina injetora. As dimensões finais do molde são de 200 x 330 x 317 mm, se

adequando aos dados da Tab. 4 que se referem às dimensões comportadas pela máquina.

O molde conta com quatro gavetas, placa extratora, núcleos rotativos, buchas e colunas guias, limitadores de curso, entre outros componentes. A maioria dos componentes foram projetados em aço SAE 1020 e 1045. Buchas, colunas e limitadores, em aço SAE 8640 beneficiado com têmpera. Seu projeto e principais componentes podem ser observados na Fig. 14.

Figura 14 – Molde de injeção e seus principais componentes.

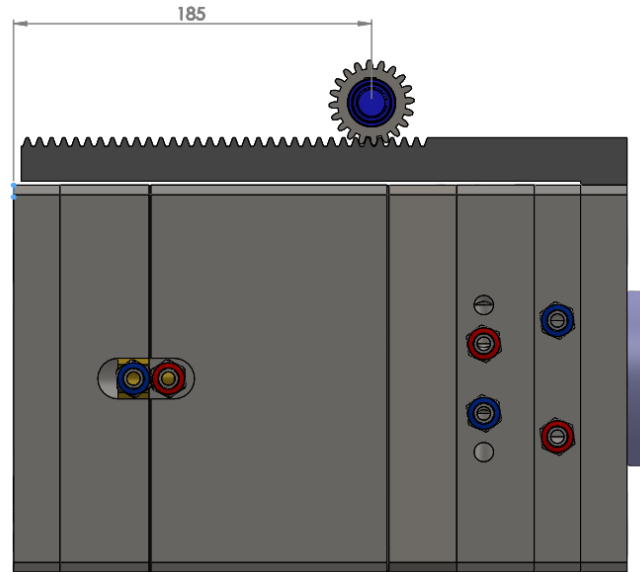


Fonte: do autor (2020)

#### 4.5 PROJETO DO SISTEMA DE EXTRAÇÃO

Para o dimensionamento do sistema de extração, toma-se como base o modelo da Fig. 9 e as nomenclaturas dadas aos componentes para melhor identificação. Além dos dados iniciais apresentados na etapa 3.3.1, definiu-se que o módulo utilizado para o sistema será de 2 mm. Outro dado importante pode ser observado na Fig. 15, onde têm-se também a limitação de tamanho para a cremalheira (CR2), pois ela não pode ultrapassar a medida final do molde.

Figura 15 – Limitação da cremalheira.



Fonte: do autor (2020)

Como pode ser observado na Fig. 15, o posicionamento da engrenagem (E2), e a altura do molde, limita o curso da cremalheira em 185 mm. Obviamente procurou-se utilizar um curso útil menor que o máximo, a fim de não deixar as relações no limite.

Através das Eq. (3), (4) e (5), elaborou-se uma tabela com as relações de transmissão, diâmetros primitivos e números de dentes que cada componente do sistema de extração deve obedecer para que o objetivo das 3,5 voltas no macho seja possível. Os dados de dimensionamento foram calculados partindo das engrenagens do macho (E5) e seguindo sua linha de engrenamento, chegando no curso necessário para a cremalheira fixa (CR2). A Tab. 7 mostra os dados obtidos através de cálculos, para a transmissão.

Tabela 7 – Dados calculados para o sistema de transmissão.

Componente	Equações	Curso (mm)	Diâm. Primitivo (mm)	Rotações	Núm. dentes
E5	4	---	50	3,5	25
E4	4 e 5	---	76	2,3	38
E3	4 e 5	---	40	2,3	20
CR1	3 e 5	289,36	---	---	---
E1	3, 4 e 5	---	70	1,315	35
E2	4 e 5	---	40	1,315	20
CR2	3 e 5	165,25	---	---	---

Fonte: do autor (2020)

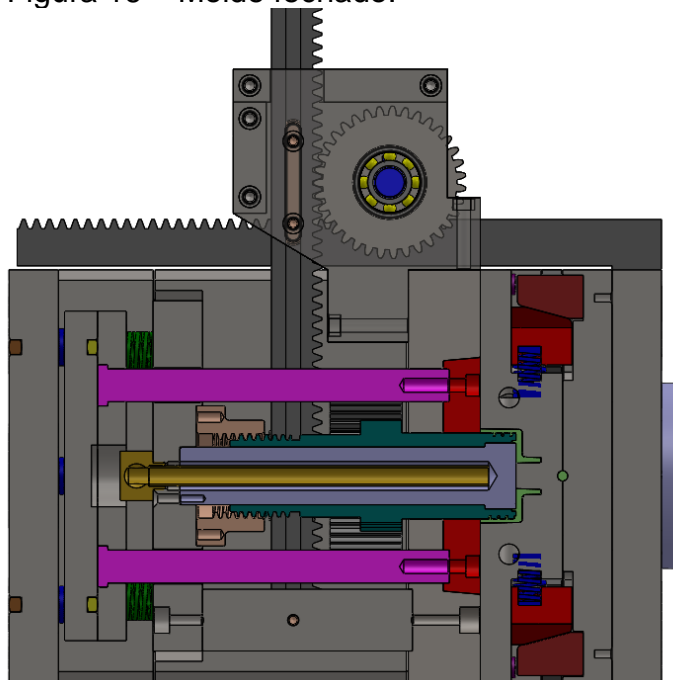
Outro ponto essencial para o dimensionamento é a espessura das engrenagens e cremalheiras. A espessura é diretamente proporcional à tensão no pé do dente, por isso estipulou-se um torque de segurança partindo da engrenagem dos machos (E5), sendo de 40 Nm. A partir desse dado foi calculado a relação de torque através das engrenagens. A engrenagem (E4) apresenta o maior torque do sistema, 60,8 Nm, então a espessura mínima foi calculada por ela.

As engrenagens e as cremalheiras foram projetadas em aço SAE 8620, beneficiadas com cementação nos dentes, tendo uma dureza superficial de 52 HRc, deixando os dentes mais resistentes ao desgaste.

Utilizando a Eq. 6, tem-se a espessura mínima de 18,85 mm. Para questão de padronização, utilizou-se a espessura padrão de 20 mm para as engrenagens e cremalheiras.

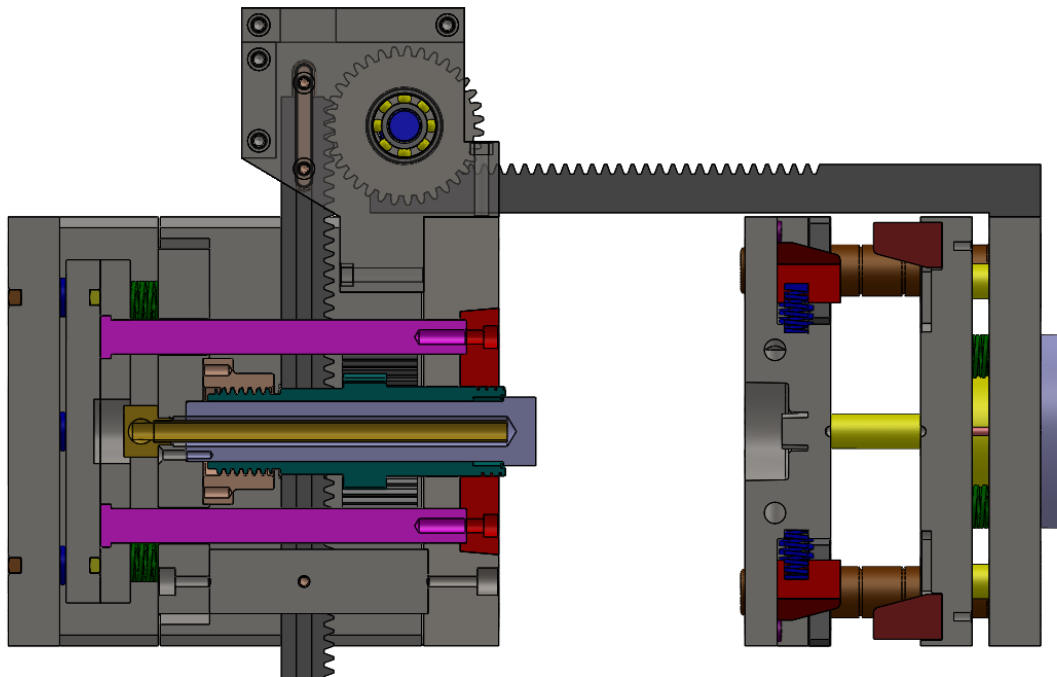
Com resultado final do dimensionamento do sistema de extração projetado no *SolidWorks*<sup>®</sup>, tem-se o funcionamento completo do sistema. A Fig. 16 mostra o molde fechado, e a Fig. 17, aberto, sendo que as duas imagens foram seccionadas no centro de uma das cavidades, onde pode-se observar com mais detalhes o funcionamento do mesmo.

Figura 16 – Molde fechado.



Fonte: do autor (2020)

Figura 17 – Molde aberto.



Fonte: do autor (2020)

Através de um recurso de posicionamento do *SolidWorks*<sup>®</sup>, consegue-se atrelar os movimentos de abertura do molde com o engrenamento das engrenagens, podendo assim simular os movimentos e ter um resultado visual do comportamento dos componentes, como pode ser visto na Fig. 17 já apresentada. Assim tem-se a validação de que o sistema conseguirá desenroscar-se com sucesso da tampa.

## 5. CONCLUSÃO

Com o término do deste trabalho, conclui-se que o projeto de um molde de injeção engloba diversas áreas da Engenharia, necessitando também de conhecimentos específicos sobre o processo.

As simulações CAE contribuíram muito neste aspecto, pois auxiliaram para a otimização do projeto. Os resultados das simulações indicaram que a tampa tem grande facilidade de ser injetada, porém apresentará em sua seção mais espessa, o defeito de rechupe, representando 1,6% da superfície da tampa. As informações encontradas na literatura também chamam atenção defeitos oriundos de espessuras maiores que a nominal da peça.

As simulações de resfriamento, executadas com intuito de encontrar o melhor *layout* de canais, não se mostraram de grande relevância para o desaparecimento ou diminuição do defeito de rechupe, ainda que, nas simulações a imperfeição se mostre em baixo percentual, não afetando de forma significativa o aspecto visual da tampa. Mesmo assim, com o resfriamento, reduziu-se o tempo de resfriamento em 43,53%.

Com o auxílio do *SolidWorks*<sup>®</sup>, conseguiu-se validar os cálculos do projeto da transmissão de movimento de maneira satisfatória, onde o mecanismo sacará a tampa de maneira eficiente, tornando o molde funcional. As cremalheiras e engrenagens devem suportar os esforços, seu fator de segurança relacionado à tensão no dente é superior à 1,35.

Trabalhos futuros podem através do *layout* escolhido, variar outros parâmetros de resfriamento e otimizar, se necessário, o resfriamento na região defeituosa. Outra sugestão para otimização da qualidade da tampa, seria alterar seu *design*, reduzindo a espessura da região que apresenta o defeito. Com a manufatura do molde, também poderá ser desenvolvido um novo estudo, relacionando os dados obtidos das simulações com os dados reais de injeção.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Milanez, pelo acompanhamento e auxílio prestado durante todo o trabalho. Aos meus colegas e familiares, por todo apoio e incentivo para a conclusão deste artigo.

## **REFERÊNCIAS**

AUTODESK, Moldflow: Plastic Injection and Compression Mold Simulation for Design and Manufacturing, 2019. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/moldflow/overview>. Acesso em: 13 de novembro de 2019.

AUTODESK, Moldflow: Length of cooling channels, 2020. Disponível em: <http://help.autodesk.com/view/MFAA/2019/PTG/?guid=GUID-569467DB-E39A-4B6D-8EC3-B4F293B9AC38>. Acesso em: 26 de abril de 2020.

BRASKEM, Folha de dados do Polipropileno EP 445L, 2017. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/europe/ModuloProduto/DownloadFolhaDados?idFolha=EOpOhL/u8VY=&idIdioma=YrltVniimrc=&idTipo=YrltVniimrc=&idProduto=mdD2+XCijYc=&pasta=T46EDfq+gkM=>. Acesso em: 6 de setembro de 2019.

COELHO, J. P. S., SANTOS, P. S., GUEDES, A. E. D. S., 2018, “A Ferramenta CAE na Simulação de Moldes de Injeção Plástica: Um Estudo Bibliográfico”. Revista Científica Semana Acadêmica, Vol. 1, Nº 145, 2018, 14 p.

CRUZ, S., “Moldes de Injeção Termoplásticos: Termofixos, Zamak, Alumínio e Sopro”. Ed. Hemus, 2ª Edição, Curitiba, Brasil, 2002, 242 p.

DSM, “Design Guide: Performance and Value with Engineering Plastics”. DSM Engineering Plastics, Evansville, USA, 2005, 48 p.

FAVORIT, Aços ferramenta, Aço AISI P20, 2019. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-ferramenta/aco-aisi-p20>. Acesso em: 2 de novembro de 2019.

HARADA, J., “Moldes para Injeção de Termoplásticos: projetos e princípios básicos”. Ed. Artliber, 2ª Edição, São Paulo, Brasil, 2008, 308 p.

LOPES, J. C. L., GALDINO, L., 2013, “Dimensionamento do Sistema Cremalheira-pinhão de Dentes Retos”. Augusto Guzzo Revista Acadêmica, Nº 12, 2013, 127-139 p.

MALLOY, R. A., “Plastic Part Design for Injection Molding: An introduction”. Ed. Hanser Publications, 2th Edition, Ohio, EUA, 2010, 549 p.

MANRICH, S., “Processamento de Termoplásticos: Rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes”. Ed. Artliber, 2ª Edição, São Paulo, Brasil, 2013, 485 p.

MARCELLO, R. R., 2014, “Projetos de Moldes de Injeção” – Apostila de graduação, Faculdade SATC – FASATC, Departamento de Engenharia Mecânica, Criciúma/SC, 64 p.

MELCONAIN, S. “Elementos de máquinas”. Ed. Érica, 9ª Edição, São Paulo, Brasil, 2008, 375 p.

MIRANDA, D. A., 2017, “Estudo Experimental e de Simulação Computacional para Análise e Melhoria da Eficiência de um Molde de Injeção de Termoplásticos”. Dissertação de Mestrado, Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Joinville/SC, Brasil, 112 p.

MOAYYEDIAN, M., “Intelligent Optimization of Mold Design and Process Parameters in Injection Molding”. Ed. Springer Theses, Adelaide, Austrália, 2019, 145 p.

MOREIRA, M. M. M., 2015, “Projeto de Molde para a Injeção de Peça Plástica Complexa para a Indústria Automóvel”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, Porto, Brasil, 372 p.

NORTON, R. L., “Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos”. Ed. AMGH, 1ª Edição, Porto Alegre, Brasil, 2010, 800 p.

PIRES, L., A., “Importância da Aplicação de Software de Simulação no Processo de Injeção de termoplásticos”. Monografia de Graduação, Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM, Marília/SP, Brasil, 83 p.

SANT ANNA, J. P., CAE-CAD-CAM – Softwares garantem eficiência no desenvolvimento das peças. Plástico, 2008. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/cae-cad-cam-sofwares-garantem-eficiencia-no-desenvolvimento-das-pecas/>. Acesso em: 17 de agosto de 2019.

SILVA, S. L., 2009, “Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para a Injeção de Polímeros”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, 136 p.

TAVARES, M. F. N., 2016, “Moldes de Injeção com Desenroscamento Automático: Casos de Estudo”. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Leiria – IPL, Leiria, Portugal, 137 p.

ZHOW, H., “Computer Modeleling for Injectoin Molding: Simulation, Optimization and Control”. Ed. Jonh Wiley & Sons INC, New Jersey, USA, 2013, 405 p.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$PS$	[---]	Poliestireno
$PP$	[---]	Polipropileno
$C_i$	[g]	Capacidade de injeção
$C_{i_{PS}}$	[g]	Capacidade de injeção de poliestireno
$C_{i_{PP}}$	[g]	Capacidade de injeção de polipropileno
$Pe$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Peso específico do material a ser injetado
$Pe_{PS}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Peso específico do poliestireno
$VF_{PS}$	[cm <sup>3</sup> ]	Fator volumétrico do poliestireno
$VF$	[cm <sup>3</sup> ]	Fator volumétrico do material a ser injetado
$Ap$	[cm <sup>2</sup> ]	Área projetada nas moldagens
$P_i$	[MPa]	Pressão de injeção
$e$	[mm]	Espaço percorrido em uma rotação do pinhão
$dp$	[mm]	Diâmetro primitivo
$m$	[mm]	Módulo
$Z$	[adm]	Número de dentes
$I$	[adm]	Relação de transmissão
$n_1$	[rpm]	Rotação da engrenagem motora
$n_2$	[rpm]	Rotação da engrenagem movida
$Z_1$	[adm]	Número de dentes da engrenagem motora
$Z_2$	[adm]	Número de dentes da engrenagem movida
$\sigma_{máx}$	[MPa]	Tensão máxima de flexão no pé do dente
$\sigma_{mat}$	[MPa]	Tensão admissível do material
$F$	[N]	Força tangencial
$q$	[adm]	Fator de forma
$\varphi$	[adm]	Fator de serviço