

Estudo de um sistema de fechamento de unidade de fundição por pressão utilizando ferramentas de CAD e CAE¹

Study of a die casting unit closing system using CAD and CAE tools

Elienai Josias Brum Dutra²
Josimar Souza Rosa³
Anderson Braun⁴

Resumo

A fundição sob pressão consiste na injeção de um metal líquido para o interior de uma cavidade de um molde, submetendo o sistema a altas pressões e posterior resfriamento até sua solidificação. Entender o funcionamento de máquinas injetoras, assim como os fatores que influenciam para o bom desenvolvimento dessas máquinas, é fundamental para a área da engenharia mecânica, em geral. Assim, a proposta deste trabalho foi avaliar o projeto da unidade de fechamento de uma mini-injetora didática, utilizando-se de ferramentas de CAD (desenho assistido por computador) e CAE (engenharia assistida por computador). Através de uma pesquisa experimental, foi possível observar o comportamento do projeto, quanto à análise de movimentos e estática. Os resultados mostram um projeto eficiente, quanto ao modelamento e análise de movimentos, entretanto, a análise estática de tensões aponta para melhorias necessárias no modelo, como, redimensionamento das barras de articulação, nas quais as tensões ficaram sobrecarregadas.

Palavras-chave: Fundição sob pressão. Injetora de bancada. Unidade de fechamento.

Abstract

The die casting consists of the injection of a liquid metal into a mold cavity, submitting the mechanism to high pressures and subsequent cooling until its solidification. Understanding the operation of injection molding machines, as well as the factors that influence the good process development of these machines, it is important for the mechanical engineering area, in general. Thus, the purpose of this work was to evaluate the closing unit design of a mini-injection moulding machine, using CAD (computer-aided design) and CAE (computer-aided engineering) tools. Through an experimental research, it was possible to observe the behavior of the project, in terms of motion and static analysis. The results have shown an efficient project, regarding the modeling and analysis of movements, however, the tension static analysis points to needed improvements in the model, such as resizing of the articulation bars, in which the tensions were overloaded.

Keywords: Die casting. Bench injector. Closing unit.

¹ Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, orientado por Anderson Braun e defendido em 05/12/2019.

² Acadêmico de Engenharia Mecânica pela Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil. <https://orcid.org/0000-0003-4154-5237>. E-mail: elienaijosias@gmail.com

³ Doutor em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), área de concentração Fenômenos de Transporte, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS. Professor titular do PPG em Tecnologias de Materiais e Processos Industriais da Feevale. <https://orcid.org/0000-0002-9663-6438>. E-mail: js-rosa@hotmail.com

⁴ Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais pela Feevale. Professor do curso de Engenharia Mecânica na Feevale. <https://orcid.org/0000-0001-7833-9918>. E-mail: abraun@feevale.br

1 Introdução

O processo de fundição é uma das formas mais antigas de obtenção de peças e acessórios metálicos. Nesse processo, o metal é vazado ou pressurizado, em seu estado líquido, dentro de um molde com o formato da peça final. Amplamente aplicada na produção de peças que apresentam geometrias complexas ou que exigiriam o uso de diversos processos de fabricação, elevando o custo, a fundição sob pressão permite, em um processo com moldes precisos e bem-acabados, produzir peças em escala com ótimo acabamento superficial e tolerâncias finas (NUNES; KREISCHER, 2010).

A fundição de ligas de baixo ponto de fusão tem ganhado mercado como alternativa de qualidade para fabricação de peças que vão desde aplicações no ramo automobilístico até indústria de vestuários e calçados. Com essa preferência de aplicação no mercado, aumentou-se também o fornecimento de máquinas para injeção, com equipamentos para variados tipos de peças e produtividade (YOSHINO; SOUZA; MALAVAZI, 2010).

Compreender o funcionamento de máquinas injetoras e os fatores que influenciam para o desenvolvimento do processo é fundamental para a indústria. Considerando que injetoras são máquinas complexas, constituídas de unidades e subconjuntos que exigem diversas análises, a proposta deste trabalho foi realizar uma análise do projeto preliminar da unidade de fechamento de uma mini-injetora, por meio de ferramentas de desenho assistido por computador e engenharia assistida por computador que proporcionará entender o desenvolvimento dessa unidade e seu funcionamento junto a injetora.

2 Fundição sob pressão

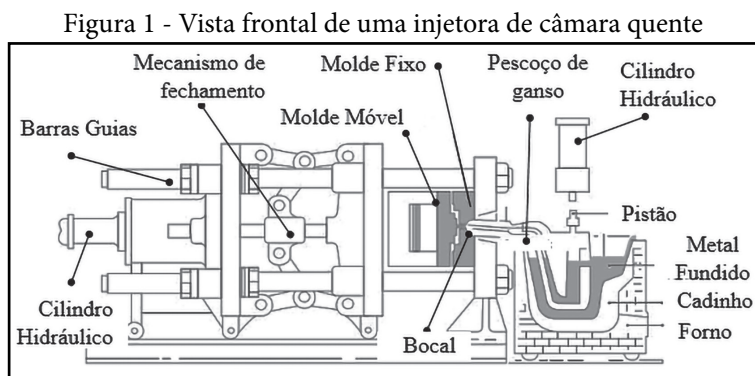
Fundição sob pressão, do inglês *squeeze casting*, é a denominação para o processo de fabricação em

que um determinado material, em estado líquido, é empurrado por um canal e comprimido, dentro de um molde com formatos de produtos finais variados, à determinada pressão hidrostática, posteriormente, sendo resfriado, até sua solidificação. O histórico do processo de injeção vem de longa data, com Chernov (1878), utilizando vapor para exercer pressão e empurrar o metal fundido, em direção ao molde e manter a pressão até a solidificação (GHOMASHCHI; VIKHROV, 1998).

Em geral, o processo de injeção de metais é semelhante à injeção de polímeros, entretanto, devido ao desgaste excessivo dos moldes metálicos, resultante da agressividade de corrosão, o processo fica limitado para ligas de metais não ferrosos, de baixo ponto de fusão (SOARES, 2000). O processo pode ser classificado como sendo a injeção direta, quando o metal líquido é submetido à pressão direta de um êmbolo, contramolde ou punção, até sua solidificação, ou ainda, fundição indireta, quando a pressão é aplicada por meio de um canal de alimentação, direcionando o metal líquido para a cavidade do molde (YUE; CHADWICK, 1996). Quando a fundição é indireta, pode ser realizada em máquinas com câmara quente ou câmara fria.

2.1 Máquinas injetoras

Nas injetoras de câmara quente, o metal é fundido em um forno ou recipiente de aquecimento, adjunto à máquina, e um pistão é acionado, fazendo o êmbolo direcionar o metal líquido, sob alta pressão, para dentro da cavidade do molde (TÂMEGA, 2017). Para Berna e Alberro (2000), como o metal líquido envolve os elementos do sistema de injeção, com o tempo, tende a atacar o êmbolo e as paredes da câmara e, para evitar a corrosão, devem ser fabricados de ligas de aço. A figura 1 mostra uma máquina de injeção indireta com câmara quente, com fechamento de molde horizontal e injeção vertical.

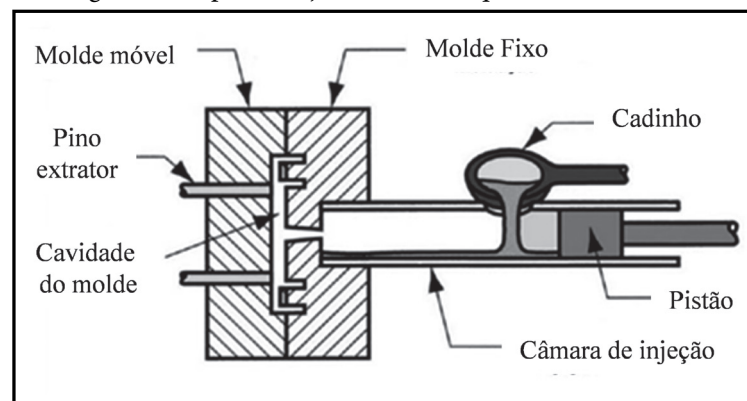


Fonte: Adaptado de Yoshino, Souza e Malavazi (2010).

Na injetora, representada pela figura 1, o metal fundido está em contato direto com as paredes do cadinho e do pistão que, quando fabricados em ligas de aço, tende a apresentar corrosão. Dessa forma, a aplicação do processo fica restrita a ligas de zinco, estanho, magnésio, chumbo e algumas ligas de alumínio. As pressões de trabalho normalmente são entre 3 e 35 MPa, obtendo-se em média de 7 a 10 injeções/min, considerada alta (SOARES, 2017; YOSHINO; SOUZA; MALAVAZI, 2010).

No processo de injeção em máquinas com câmara fria, a diferença está no processo de aquecimento do metal, que é realizado até temperatura de fusão em um forno auxiliar e, após, é despejado na câmara de injeção manualmente, por meio de um cadinho. Por esse motivo, o processo é aplicado para ligas não ferrosas de maior ponto de fusão (BALDAN; VIEIRA, 2013). A figura 2 mostra o procedimento do metal líquido, sendo vazado na câmara fria.

Figura 2 - Representação de uma máquina de câmara fria



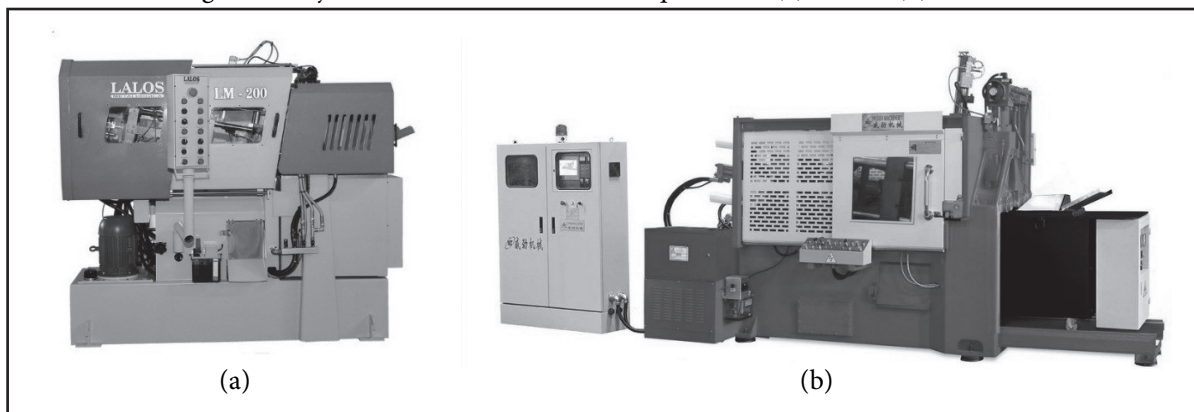
Fonte: Adaptado de Gattonbrass (2015).

A injeção é iniciada com o movimento controlado do pistão que direciona o metal líquido de forma laminar para entrada do molde quando, então, aumenta a velocidade de tal maneira que a cavidade do molde é preenchida de forma rápida. Esse processo não utiliza o bico de injeção, pois, quando o pistão chega no final do curso, comprime o restante do material existente no final da câmara, formando um tarugo que é extraído junto com a peça (BRAGA, 2015; SOARES, 2017).

2.2 Características das máquinas injetoras

De acordo com a NBR 13536 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), as injetoras consistem em máquinas formadas por unidade de fechamento, unidade de injeção e sistema de acionamento e controle. Conforme Ghomashchi e Vikhrov (1998) podem apresentar configurações vertical e horizontal, com moldes, abrindo também na vertical ou na horizontal. A figura 3 mostra duas máquinas injetoras de câmara quente existente no mercado.

Figura 3 - Injetoras de zamac com câmara quente de: (a) 12 ton; (b) 400 ton



Fontes: Lalos (2019), TC Máquinas (2019).

A força de fechamento está atrelada diretamente à área projetada de injeção, e essa, por sua vez, ao volume de material injetado no ciclo (LALOS, 2019; TC MÁQUINAS, 2019). Como a unidade de fechamento é o objeto de estudo desta pesquisa, ela será mais detalhada a seguir.

2.3 Sistema de fechamento ou unidade de fechamento

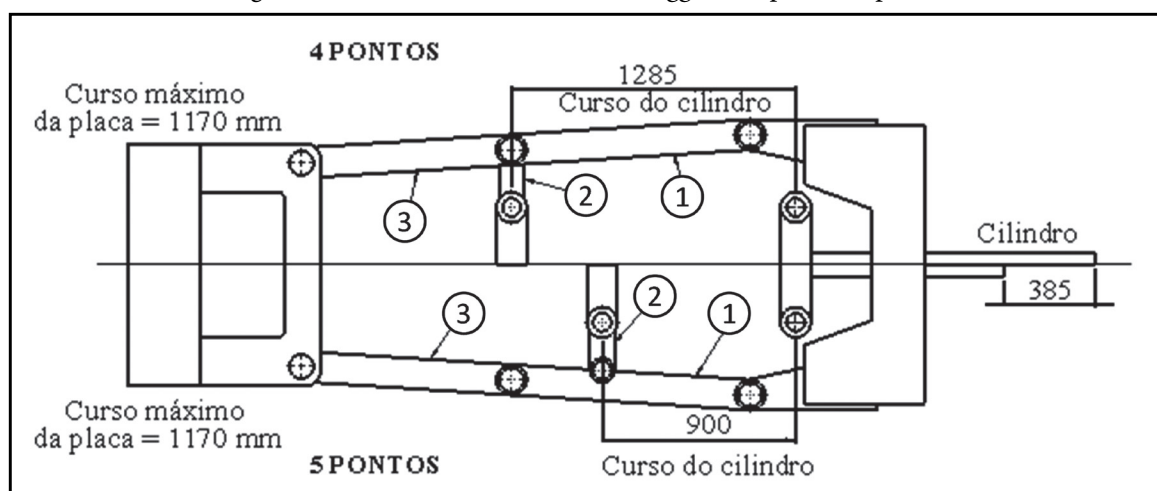
A unidade de fechamento é responsável pelo movimento do molde móvel, nos sentidos de avanço e recuo, e deve ser projetada de forma a suportar a pressão exercida pelo material, dentro da cavidade, mantendo o avanço máximo. Os tipos de fechamento mais usuais são o mecânico, o hidráulico de pistão e o hidráulico mecânico. Grande parte das máquinas injetoras, fornecidas no mercado, utilizam o sistema de fechamento hidráulico mecânico, no qual um cilindro hidráulico transmite movimento para um mecanismo de articulações, denominadas tesouras ou braçagens que executam o movimento da placa móvel. Quando há necessidade de uso de moldes com espessuras diferentes, o conjunto todo pode ser avançado, por meio

do acionamento de motor elétrico ou hidráulico, de modo a garantir o ajuste e o fechamento entre os moldes (TORRES, 2007).

O sistema articulado permite ciclos mais rápidos, porém possibilita fratura das colunas e deformações nos moldes metálicos, quando não ajustados corretamente. O sistema hidráulico tem como vantagem a precisão do fechamento, garantindo a não deformidade dos componentes, entretanto, possui baixas velocidades de avanço, comparado ao sistema articulado (SENAI, 2005). A força de fechamento varia de acordo com a necessidade do projeto.

Máquinas injetoras de fechamento hidráulico mecânico, podem ser classificadas quanto à configuração das articulações. As mais simples, e pouco aplicadas, são as de joelhos simples (*mono-toggle*), que têm somente um conjunto de articuladores responsável pelo fechamento e travamento. As de joelho duplos (*bi-toggle*), além de mais aplicadas, são mais eficientes e são caracterizadas por ter dois conjuntos de articuladores responsáveis pelo fechamento e travamento, podendo ser de quatro (4) pontos ou cinco (5) pontos, conforme ilustrado na figura 4 (ROCHA JÚNIOR, 1999).

Figura 4 - Sistemas de fechamento *bi-toggle* de 4 pontos/5 pontos

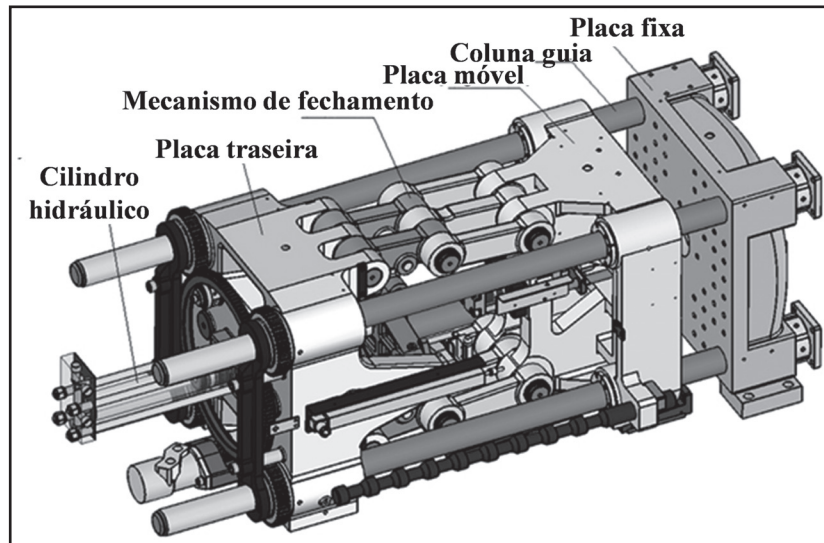


Fonte: Adaptado de Rocha Júnior (1999).

Uma das diferenças entre os dois sistemas de fechamento de joelho duplo está no deslocamento da cruzeta. Na configuração de quatro (4) pontos, a cruzeta avança até ficar perpendicular com a junção das barras 1-2-3. Com isso, é necessário um cilindro hidráulico de maior alcance. Na configuração de cinco (5) pontos, a barra dois (2) tem ligação somente com a barra um (1) que passa a ter três junções de articulação (ROCHA JÚNIOR, 1999). A característica

mais importante de um sistema de fechamento é a capacidade do mecanismo transformar força de entrada baixa em força relativamente alta (HUANG; LIN; FUNG, 2011). Além do mecanismo de fechamento, fazem parte do conjunto: as placas porta molde fixa, porta molde móvel e traseira (ou de ancoragem), as colunas guias (ou tirantes) e o extrator (SENAI, 2005). A figura 5 mostra os principais componentes do sistema de fechamento de uma injetora sob pressão.

Figura 5 - Componentes do sistema de fechamento de uma injetora sob pressão



Fonte: Adaptado de Chan (2016).

Dos componentes ilustrados na figura 5, a placa fixa é presa na base da máquina e deve suportar a força de fechamento, exercida pelo conjunto móvel, no momento do fechamento. A placa móvel desliza livremente nos tirantes em movimentos de abertura e fechamento. Quando fechada, exerce maior trabalho, uma vez que recebe a pressão do mecanismo de fechamento e transmite essa pressão para os moldes, mantendo e garantindo a vedação. As placas fixas e móveis são responsáveis também por suportar e centralizar, de forma precisa, os moldes fixo e móvel, respectivamente. A placa traseira é a base para o sistema de articulação trabalhar. O cilindro hidráulico é fixado ao centro, pelo lado de fora da placa, enquanto as articulações são presas no lado interno da placa. A placa de ancoragem também tem a possibilidade de movimentação, quando necessário, para realizar ajustes e trabalhar com moldes de tamanhos variados, entretanto, quando o sistema estiver atuando em regime de forças, deve estar bem fixa, evitando deslizamentos. As colunas guias ou tirantes, ao mesmo tempo que dão robustez à máquina, guiam e sustentam o molde móvel. Dessa forma, devem ser projetadas com materiais de resistência mecânica que suportam o estiramento, quando em regime de força, resistência à tração, ao empenamento, provocado pelo peso da placa móvel, e resistência à flexão (COLLINS, 2013; SENAI, 2005).

2.4 Dimensionamento de máquinas injetoras

Abdu *et al.* (2016) e Rajasekar e Priya (2015) e selecionaram uma injetora, partindo de uma pressão específica de injeção e do dimensionamento do

componente injetado. A pressão específica de injeção é determinada, a partir da força de injeção (F_i), exercida pelo óleo hidráulico, sobre o pistão hidráulico (TC MÁQUINAS, 2019), representada pela equação 1, em que: P_o é a pressão do óleo hidráulico, e \varnothing_{PH} é o diâmetro do pistão hidráulico.

$$F_i = P_o (\pi \varnothing_{PH}^2 / 4) \quad (1)$$

A força de injeção (F_i), quando aplicada pelo pistão hidráulico (ou êmbolo) sobre o metal líquido, empurra o mesmo para dentro do molde, gera a pressão específica de injeção (P_E), calculada por meio da equação 2, na qual \varnothing_e é o diâmetro do pistão. Fabricantes usam pressão específica de 24 MPa para até 63 cm² de área projetada (TC MÁQUINAS, 2019).

$$P_E = F_i / (\pi \varnothing_{PH}^2 / 4) \quad (2)$$

Durante a injeção, o metal líquido é empurrado para dentro do molde, exercendo pressão em duas regiões: cavidade e canais de alimentação. A soma das áreas das paredes dessas regiões é denominada como área projetada (A_p). Esse dado pode ser obtido, a partir do modelo tridimensional do molde ou por fatores que multiplicam a área superficial do componente. Rajasekar e Priya (2015) utilizam fator de 1,3, enquanto Abdu *et al.* (2016) utilizam fator de 1,5 vezes a área do produto, para definir a área projetada. Com esses dados, é possível determinar a força que irá atuar dentro do molde, ou seja, a força necessária para abrir o molde (ABDU *et al.*, 2016). A força de abertura (F_A) do molde é determinada, usando-se a equação 3, em que A_p é a área projetada.

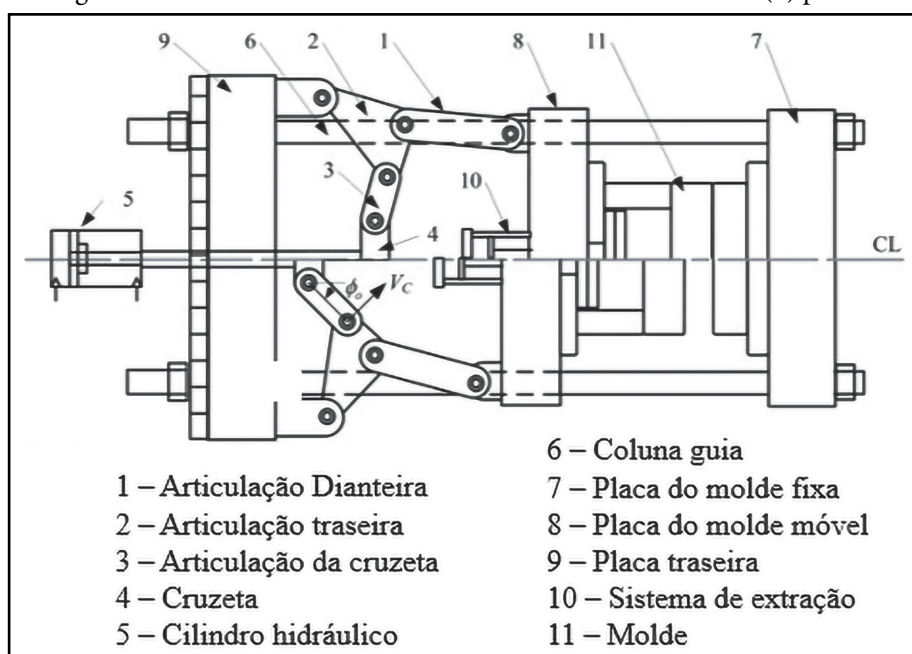
$$F_A = P_E \cdot A_p \quad (3)$$

Abdu *et al.* (2016) consideram a eficiência das máquinas nos cálculos de pressão de injeção, assim, a força de abertura também pode ser multiplicada por fatores de eficiência. Uma vez definida a força de abertura dos moldes (F_A), é possível determinar a força de fechamento (F_F) de tal modo que F_F seja sempre maior que F_A ($F_F > F_A$) e, para isso, é necessário estimar um fator de segurança, em que F_F pode ser de 4 a 20 vezes maior que F_A , dependendo diretamente da área projetada. Em máquinas de médio porte, é possível trabalhar com injeção de componentes de grandes áreas superficial, elevando assim a força de abertura (LALOS, 2019; TC MÁQUINAS, 2019). A equação 4 expressa a força de fechamento, em toneladas, em que F_S é o fator de segurança.

$$F_F = F_A \cdot F_S \quad (4)$$

O sistema de fechamento é um mecanismo de força, combinado de uma união de dois mecanismos, sendo um de quatro barras e um de manivela deslizante. A análise cinemática de ambos deve ser realizada separadamente (MARTIN, 1982; WILSON; SADLER, 1993). Huang, Lin e Fung (2011) fazem uma análise do curso do cilindro hidráulico, necessário para fixação da velocidade de fechamento do molde, do perfil de velocidade da placa móvel e da relação de ampliação de força. A figura 6 mostra a identificação e representação das posições das barras em um sistema de fechamento *bi-toggle* de cinco pontos.

Figura 6 - Estrutura de um mecanismo de fechamento de cinco (5) pontos



Fonte: Adaptado de Huang, Lin e Fung (2011).

Na parte superior à linha central, observa-se o mecanismo em curso máximo de fechamento, enquanto na parte inferior, o mecanismo está em seu recuo máximo. As articulações um (1) e dois (2), quando avançadas totalmente, ficam estendidas em linha reta, produzindo um esforço de tração nas guias, em um posicionamento denominado ponto morto. A força de fechamento é aplicada pelo cilindro que movimentava a cruzeta, e ela transmite o movimento para as demais barras. A relação de ampliação de força é a razão entre a força de saída projetada e a força de entrada dada pelo cilindro hidráulico. (HUANG; LIN; FUNG, 2011). Para determinar as forças atuantes em

cada ponto do mecanismo, é necessário conhecer as velocidades e acelerações envolvidas no sistema, que podem ser determinadas pela análise de movimentos em *softwares* de simulação (FUNG *et al.*, 1997).

2.5 Análise por elementos finitos

A análise por elementos finitos, do inglês *finite element analysis* (FEA), é um recurso disponível em *softwares* de desenho tridimensional ou, até mesmo, *softwares*, para a aplicações específicas. Permite a transferência direta do modelo tridimensional para o programa de FEA, visando realizar análises de movimentos, tensões, deformações, vibrações, transferência

de calor, entre outros fenômenos. Para realizar as análises, alguns *softwares* geram uma malha de elementos finitos, isto é, o modelo é dividido em um grande número pequenos elementos. Quanto mais fina a malha, maior o número de elementos ou nós, mais perto da realidade está o resultado, em contrapartida, maior o tempo de cálculo e resposta do programa. O processo de análise de forças, tensões, deformações entre outros fenômenos, em um *software* de FEA, é denominado engenharia auxiliada por computador ou *computer aided engineering* (CAE) (NORTON, 2013).

O *Motion* é a plataforma FEA do *software SolidWorks* que dispõem da simulação e análise de movimentos, oferecendo uma abordagem conceituada na cinemática e dinâmica de corpos rígidos. Permite determinar as velocidades linear e angular, bem como acelerações em função do tempo, em pontos específicos de articulações. Na análise de movimento, um dos elementos é identificado como fixo, representando na prática, as estruturas fixas das máquinas, as bases ou o próprio solo. Também são criados os posicionamentos e condições de movimentos para o conjunto, os quais o *Motion* converte automaticamente em juntas internas, nas quais o grau de liberdade de cada eixo está ligado à condição de posicionamento. Já o *Simulation* é uma outra plataforma, na qual estudos estáticos permitem analisar a tensão linear de peças ou conjuntos, submetidos a cargas estáticas, mostrando, por meio de um gradiente de cores correspondente às tensões, a condição que o modelo está submetido (DS *SolidWorks*, 2010).

3 Metodologia

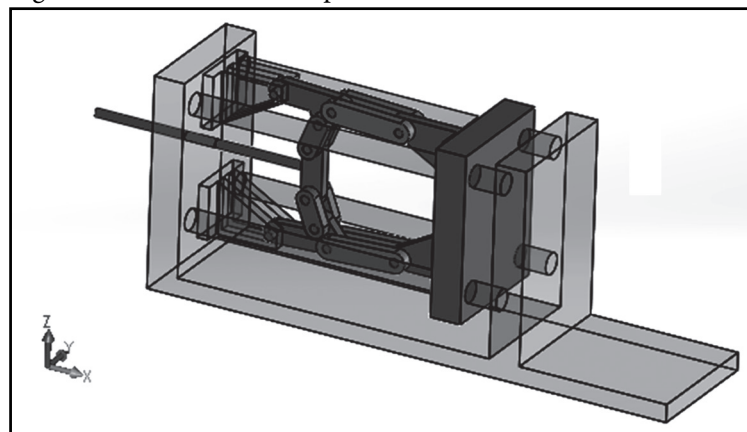
O sistema de fechamento, avaliado nesta pesquisa, foi baseado em um sistema hidráulico mecânico multiplicador de forças de cinco (5) pontos, estudado

por Huang, Lin e Fung (2011), sistema esse, viável de construir dentro do setor tecnológico de uma instituição de ensino, com materiais e maquinários normalmente disponíveis nessas instituições. A área de injeção máxima, estimada para o projeto, foi a do corpo de prova de tração, conforme ASTM E8, especificação 3, extraída da modelagem do corpo de prova no *software SolidWorks*, versão 2016/2017.

Neste estudo não foram dimensionados os cilindros atuadores do sistema de injeção. Portanto, para calcular a força de abertura (F_A) nas placas, foi estimada uma pressão específica de injeção $P_E = 30$ MPa, superior à utilizada por fabricantes para máquinas de pequeno porte. Com isso, através da equação 3, pode-se calcular a força de abertura (F_A). O fator de eficiência, considerado no cálculo, foi de 90% e, para a força de fechamento (F_F), foi considerado um fator de segurança (F_s), igual a quatro (4) vezes a força de abertura, levando em conta que a máquina é de pequeno porte, e a área de injeção é de pequena aplicação, seguindo modelos de fabricantes.

A modelagem estrutural da mini-injetora foi realizada no *software SolidWorks Estrutural*, versão 2016/2017, licença educacional, disponível na universidade. O material definido para a simulação foi o aço estrutural SAE 1008, para fins de estudo das ferramentas de simulação. Para uma aplicação do projeto, devem ser utilizados materiais de maior resistência mecânica e que suportem a fadiga térmica. Componentes, tais como o cilindro hidráulico e unidade hidráulica não foram definidos neste trabalho. Para a análise de movimento, foi utilizada a extensão *Motion* no próprio *software SolidWorks*. Na análise, para melhor visualização do modelo, foi alterada a aparência da estrutura fixa para transparente, conforme modelo ilustrado na figura 7.

Figura 7 - Modelo utilizado para análise de movimentos no *Motion*



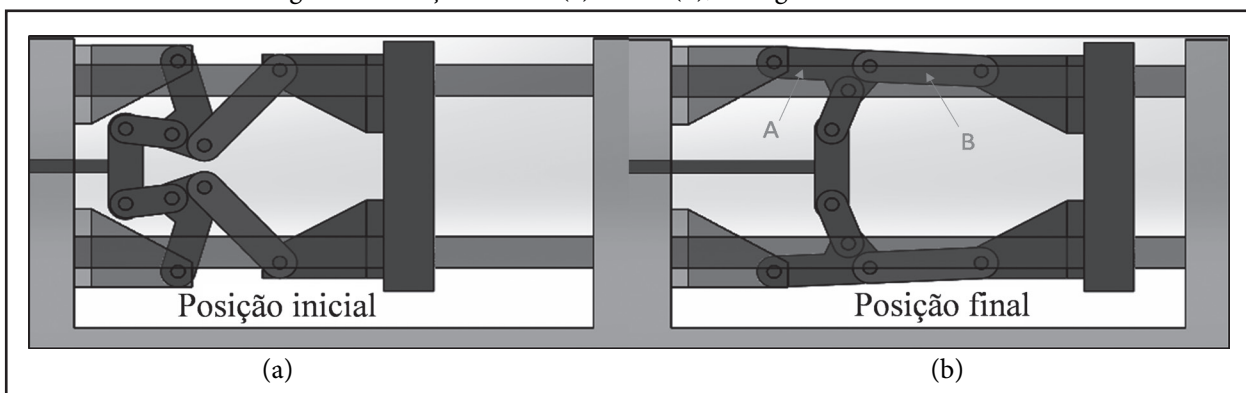
Fonte: Os autores (2019).

No *Motion*, com as chaves de fixação, foram determinadas as posições inicial e final do mecanismo. O cilindro hidráulico, que movimentava a cruzeta, foi representado pela função “motor”, configurado com velocidade constante de 8 mm/s, representando cerca e 10% da velocidade de máquinas injetoras comerciais. A referência foi a face da haste do cilindro, com direção paralela ao eixo x , avançando no sentido de fechamento do conjunto. A função “gravidade” foi configurada no plano frontal do conjunto, que representa o plano perpendicular ao eixo z , de modo que a gravidade fique direcionada para baixo. O valor correspondente à aceleração da gravidade ajustado foi

de 9806,65 mm/s². Na função “força”, foi configurada a força de fechamento calculada (F_F), usando como referência, a face da placa móvel.

O movimento é executado por um motor configurado. Quando acionada, a haste avança do ponto inicial até o final, em regime de velocidade constante, levando o tempo necessário. Os ajustes finos são realizados em cima da placa móvel, em relação ao seu máximo avanço ou ponto final. Esse ponto é configurado, quando as barras A e B, ilustradas na figura 8, cruzam o ponto morto de 180°, alcançando a condição de travamento. A figura 8 mostra também o modelo nas posições inicial (a) e final (b).

Figura 8 - Posições inicial (a) e final (b), configuradas no modelo



Fonte: Os autores (2019).

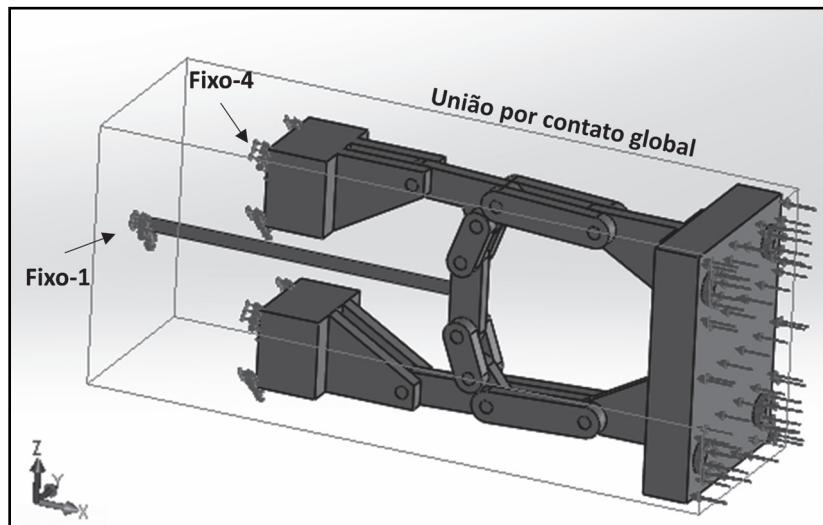
Configurados os parâmetros de movimentos, foi possível plotar os gráficos de deslocamento/velocidade/aceleração, de um ponto em relação a um eixo, em função do tempo ou deslocamento. Para a análise do movimento de deslocamento, da velocidade e da aceleração, a referência pode ser uma base fixa ou uma face diferente da peça. Para análise na cruzeta, foi selecionada a face da cruzeta como ponto de análise e a componente z , da haste do cilindro, como referência. Para análise da placa móvel, foi selecionada a face da placa como ponto de análise e a componente x da base fixa, como referência. Para os dois cenários, os parâmetros foram analisados em função do tempo.

A análise estática também foi realizada com o *software SolidWorks*, porém, utilizando a extensão *Simulation*, suplemento do *software* que permite realizar estudos de análise estática, dinâmica, frequência, fadiga, flambagem, entre outros. Especificamente para analisar as condições de tensão do sistema, foi utilizado um modelo simplificado do mecanismo. Não estão compondo esse modelo, as guias, a base e as placa traseira e dianteira, uma vez que o estudo

despreza o efeito de atrito no deslizamento da placa móvel sobre as guias. Com isso, o estudo fica mais compacto e permite melhor avaliar as tensões atuantes nas articulações e pinos, em função da força aplicada na placa móvel. O modelo representa as condições mais crítica a que o sistema será submetido, que é o momento em que a placa móvel é submetida a uma força de abertura máxima a que foi projetado.

As condições de contorno para uma análise estática passam pela configuração de diversos parâmetros. Com o modelo carregado, o material de cada peça foi configurado como aço carbono simples. Em seguida, como se trata de um conjunto, é necessário configurar, na função “conexões - contato de componente” que os componentes são conectados por contato global. O programa cria eixos de união entre os componentes. Na função “acessórios de fixação”, as faces rígidas do modelo foram configuradas, mostrados na figura 9, que deverão suportar as forças atuantes. O “Fixo-1”, aplicado na face da haste do cilindro, representa o cilindro no seu avanço máximo, exercendo a força de fechamento. O “Fixo-4” representa a face da placa móvel no avanço máximo.

Figura 9 - Definições das conexões do modelo e pontos fixos



Fonte: Os autores (2019).

As forças de entrada para simulação do modelo foram configuradas na função "cargas externas". Para a análise realizada, foi configurada a força de fechamento calculada (F_F), representando a força que o metal líquido exercerá no molde, de modo que ele empurre a placa móvel para atrás, e o mecanismo sofra as tensões nas articulações.

A elaboração da malha é a última função e ser configurada e, por se tratar de uma análise preliminar, não foram realizadas verificações, em relação ao refinamento de malha e à avaliação de erro. Para o melhor refinamento possível, com maiores números de elementos finitos, buscou-se configurar uma malha padrão, com densidade fina de 16 pontos jacobianos. A partir da configuração, a malha foi calculada, através do *solver*. O *solver* é a ferramenta que calcula todos os parâmetros, tensões e deslocamentos, resolvendo a simulação programada. Para isso, seleciona-se o teste de análise estática e executa-se a simulação. Uma vez executada a simulação, o *software* mostra como

resultado o modelo analisado em forma de gradiente de cores, representando as tensões e deslocamentos, dentro de uma escala.

4 Resultados e discussões

Após a etapa de desenvolvimento do sistema do mecanismo, modelagem em CAD, simulação de movimentos e de esforços (CAE), foram obtidos os resultados, apresentados nesta seção, dispostos de acordo com o desenvolvimento da metodologia.

A área projetada (A_P), ponto de partida para a definição da força de fechamento, extraída do plano médio da peça ou seção do modelo, ficou estimada em aproximadamente $515,42 \text{ mm}^2$, representando a máxima área usinada no molde. Nessa dimensão, estão inclusas as áreas do corpo de prova e do canal de alimentação. Para determinação da Força de Abertura (F_A), foi utilizada equação 3, em que a pressão específica de injeção, estimada na metodologia, é $P_E = 30 \text{ MPa} = 3,06 \text{ kgf/mm}^2$. Assim, tem-se:

$$F_A = 3,06 \text{ kgf/mm}^2 \times 515,42 \text{ mm}^2 = 1577,18 \cong 1580 \text{ kgf} \cong 1,58 \text{ toneladas-força}$$

Considerando que o sistema terá a eficiência estimada na metodologia de 90%, a força de abertura calculada foi multiplicada pelo fator de 1,1, conforme vemos a seguir:

$$F_A = 1,58 \text{ t} \times 1,1 = 1,738 \cong 1,75 \text{ toneladas-força}$$

Dessa maneira, com a pressão de trabalho estimada e a área projetada, dentro das condições normais de trabalho, a força que o metal líquido exercerá sobre o molde, tendendo a abri-lo, será de 1,75 toneladas-força. A força de fechamento (F_F) foi

estimada, multiplicando a força de fechamento pelo fator de segurança (F_s), estipulado na metodologia, conforme equação 4 do referencial.

$$F_F = 1,75 \text{ t} \times 4 = 7 \text{ toneladas-força}$$

Sendo assim, temos $F_F > F_A$, em conformidade com os estudos apresentados por Abdu *et al.* (2016) e Rajasekar e Priya (2015), uma vez que, para força de abertura do molde de 1,75 toneladas, há a necessidade de 7 toneladas-força para mantê-lo fechado, considerando os fatores de segurança. Portanto, as simulações

foram configuradas de modo que o projeto suportasse a força de fechamento estimada.

Quanto às modelagens, desenvolvidas no *software*

SolidWorks Estrutural, a tabela 1 apresenta a descrição, quantidade e dimensões do material bruto das peças modeladas que compõem a estrutura da injetora.

Tabela 1 - Seleção de materiais para estrutura da injetora

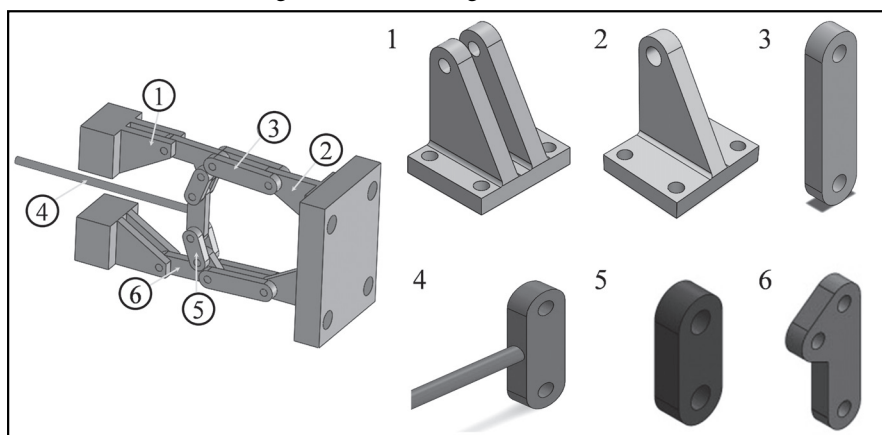
Descrição	Quantidade	Material disponível em estoque
Base	1	Aço ABNT 1020 - 19,1 mm x 63,5 mm x 350 mm
Placa porta-molde fixa	1	Aço ABNT 1020 - 180 mm x 125 mm x 30 mm
Placa porta-molde móvel	1	Aço ABNT 1020 - 180 mm x 125 mm x 30 mm
Placa traseira	1	Aço ABNT 1020 - 180 mm x 125 mm x 30 mm
Molde	2	Aço ABNT 1020 - 19,1 mm x 63,5 mm
Coluna guia	4	Aço ABNT 1020 - Ø 25,4 mm x 350 mm

Fonte: Os autores (2019).

Com a estrutura montada, projetou-se o mecanismo de fechamento, com base no modelo de Huang, Lin e Fung (2011). Esse modelo é composto de seis (6) elementos, sendo dois (2) de base (um fixo e um móvel), três (3)

de articulação e um (1) de acionamento. Algumas peças são duplicadas ou quadruplicadas, variando de acordo com a simetria do conjunto. A figura 10 mostra a modelagem dos componentes do sistema de fechamento.

Figura 10 - Modelagem da base fixa



Fonte: Os autores (2019).

O componente um (1) corresponde à base do articulador traseiro do mecanismo, sendo a única peça que não transmite nenhum movimento. Nela está fixada o articulador traseiro seis (6), mecanismo ternário com movimento de rotação que recebe movimento do articulador da cruzeta cinco (5) e transmite para o articulador dianteiro três (3). Ambos componentes três (3) e cinco (5) realizam o movimento de uma biela.

Analisando por pontos, o P(2-3) e P(4-5) executam movimentos retilíneos, enquanto os pontos P(5-6) e P(3-6) executam movimentos de rotação. O componente dois (2) corresponde à base do articulador dianteiro, ou seja, é o ponto de ancoragem do

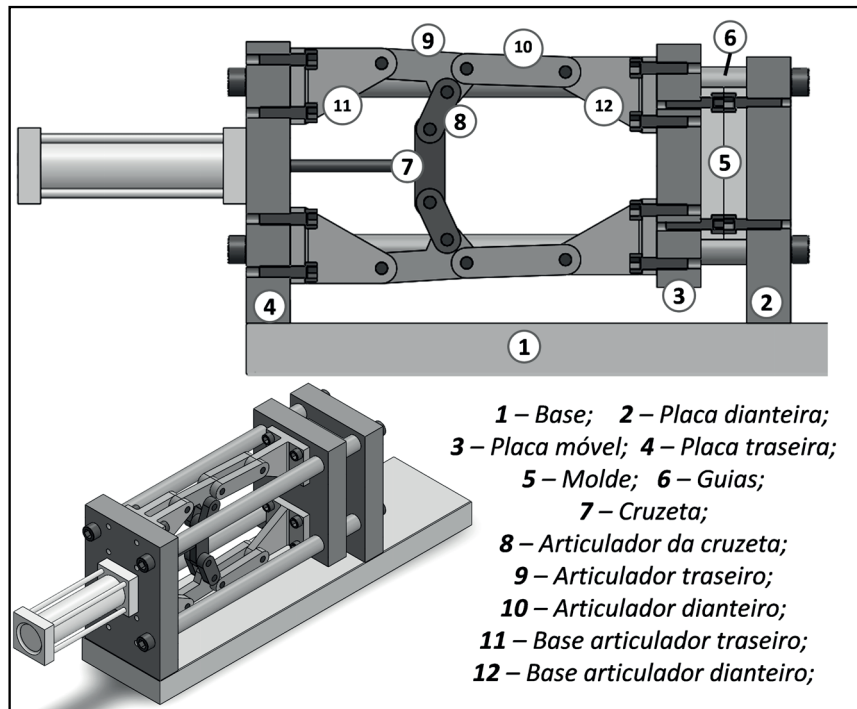
articulador dianteiro. Entretanto, essa base executa o papel de uma corredeira, pois está fixada à placa móvel que, por sua vez, desliza nas colunas guias, caracterizando assim, o movimento. A cruzeta (2), que vai fixada à haste do cilindro, recebe o movimento de avanço direto e foi projetada para ser fixada simetricamente ao centro. Cada extremidade da articulação é ligada a dois articuladores da cruzeta (5). O deslocamento da cruzeta e da placa móvel foram avaliados na sequência deste trabalho.

Uma vez modeladas todas as peças, foi realizada a montagem do mecanismo, a partir do conjunto preliminar. Para cada peça inserida no conjunto, foram verificados os posicionamentos e a simetria

com a linha central. Também foi ajustado o posicionamento avançado da cruzeta de modo que os deslocamentos não excedessem as dimensões projetadas. Também foi estipulado que o limite máximo de fechamento dos moldes não ultrapassasse o zero, correspondendo aos moldes fechados. Com o conjunto montado, foi possível testar a movimentação e

a aceleração nos pontos de ligação das articulações. Foi possível também determinar as forças em pontos específicos e verificar as tensões nas articulações, pinos e base. A figura 11 mostra o corte parcial do projeto, para representação das peças e articulações montadas e uma vista 3D do conjunto, para uma noção espacial.

Figura 11- Corte parcial do projeto 3D da mini-injetora

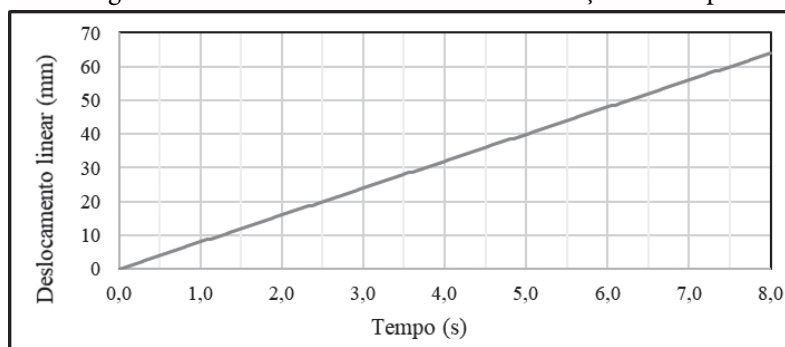


Fonte: Os autores (2019).

Quanto à análise de movimento, referente ao deslocamento da cruzeta, que representa também o deslocamento da haste do cilindro hidráulico, da posição inicial até a posição final, o tempo de deslocamento do modelo, obtido pelo *Motion*, foi de 8 s. Partindo do princípio de que a velocidade configurada no cilindro

é a mesma da cruzeta, ou seja, 8 mm/s, em 8 s, o percurso percorrido pela cruzeta foi de 64 mm. A figura 12 mostra o deslocamento linear da cruzeta, em função do tempo, onde se nota um perfil de reta linear, o que evidencia a velocidade da cruzeta ser constante, durante todo o deslocamento.

Figura 12 - Deslocamento da cruzeta em função do tempo

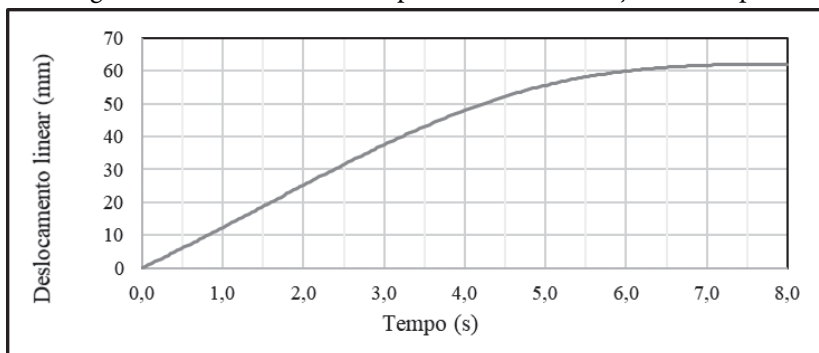


Fonte: Os autores (2019).

Com relação ao deslocamento da placa móvel, verificou-se, através do *Motion* que, inicialmente a placa tem um perfil semelhante à cruzeta. Contudo, ao se aproximar dos instantes finais do

curso, o deslocamento diminui, tendendo à variação zero no final. A figura 13 ilustra o perfil de curva do deslocamento da placa móvel em relação ao tempo.

Figura 13 - Deslocamento da placa móvel em função do tempo

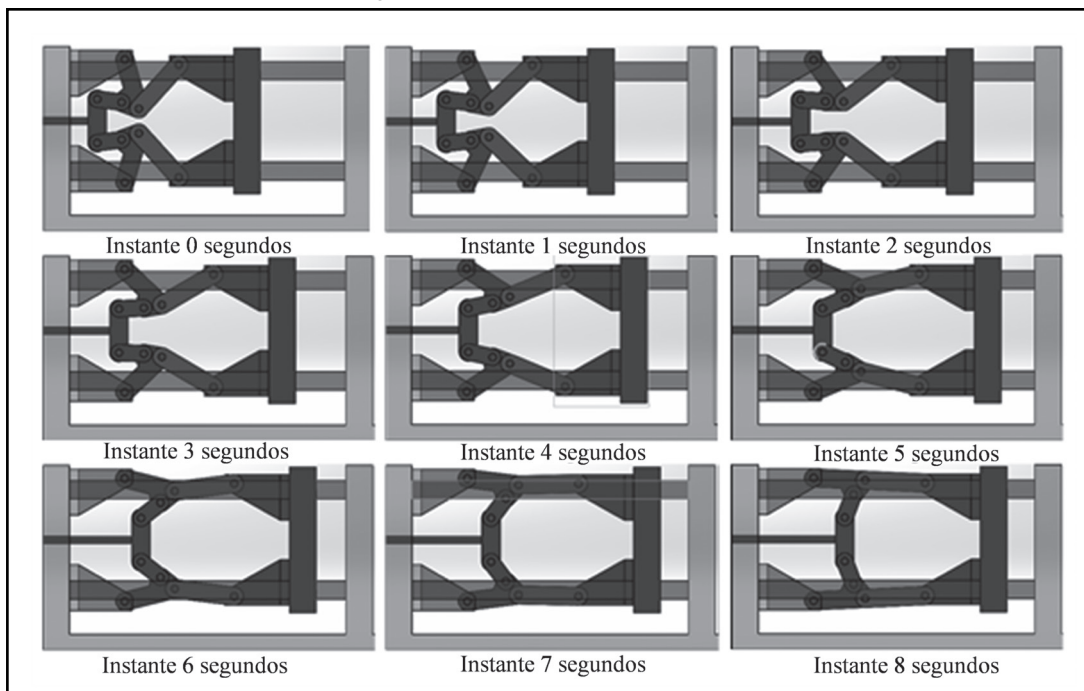


Fonte: Os autores (2019).

Comparando os perfis, ilustrados nas figuras 12 e 13, pode ser observado que, no instante de 4 s, a placa móvel deslocou 48 mm, enquanto a cruzeta havia deslocado somente 32 mm. Contudo, o deslocamento final da cruzeta, 64 mm, é maior que o da placa móvel, 62 mm, ou seja, a relação entre

os movimentos de deslocamentos varia ao longo do tempo. Essa diferença de deslocamento pode ser melhor visualizada na figura 14, que mostra a evolução do modelo, com intervalo incremental de 1 segundo, partindo da posição inicial (0 s) até a posição final (8 s).

Figura 14 - Evolução do fechamento



Fonte: Os autores (2019).

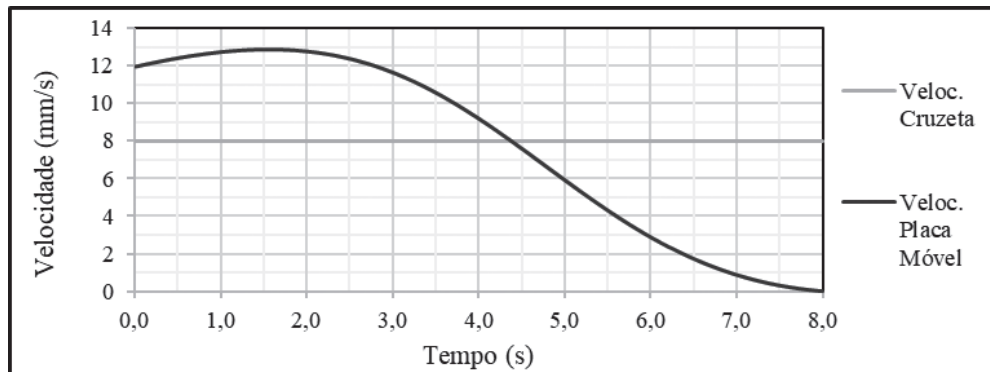
A posição da placa móvel é superior à da cruzeta até o instante 7,75 s, quando as duas se equivalem. Analisando a figura 14, chama a atenção o deslocamento

da placa móvel, em relação do deslocamento da cruzeta, nos instantes de 6 a 8 s, onde se percebe que a placa móvel está praticamente fechada, enquanto a

cruzeta precisa exercer o trabalho de travamento das articulações. Rocha Júnior (1999) percebeu resultados semelhantes aos apresentados, nesta pesquisa, em sua avaliação na cinemática e dinâmica de uma máquina injetora, atrelando à baixa velocidade e ao deslocamento final da placa móvel, como modo de garantir um

fechamento suavizado e preciso dos moldes. A figura 15 compara a velocidade da placa móvel e a velocidade da cruzeta. Nota-se que a velocidade da placa móvel é maior até o instante 4,4 s, quando a relação é de 1:1 e, a partir desse ponto, a velocidade da placa móvel reduz, sendo praticamente nula no final.

Figura 15 - Velocidades da cruzeta e da placa móvel



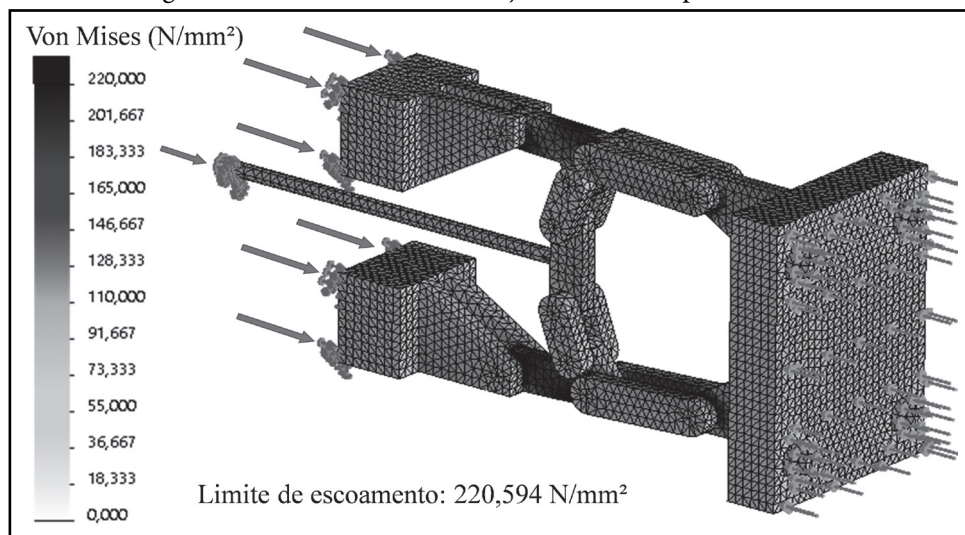
Fonte: Os autores (2019).

Huang, Lin e Fung (2011) fazem uma análise aprofundada no mecanismo de cinco pontos, avaliando o comportamento das velocidades e a força do cilindro, para diferentes tamanhos de articuladores. Analisando os principais efeitos no desempenho mecânico, verificaram que articulações dianteiras maiores reduzem a velocidade inicial da placa móvel, aumentando, no entanto, no final. Analisando também a influência do tamanho

das articulações na força do cilindro, observaram que a relação alta entre as articulações dianteira e traseira exigem uma força menor do cilindro de fechamento.

Quanto à análise estática no Simulation, a resolução do modelo em malha sólida de alta qualidade, com tamanho de elemento de 5,13 mm, resultou em 63741 elementos e 98937 nós. A figura 16 mostra a distribuição das tensões no modelo.

Figura 16 - Resultados de simulação das tensões por Von Mises



Fonte: Os autores (2019).

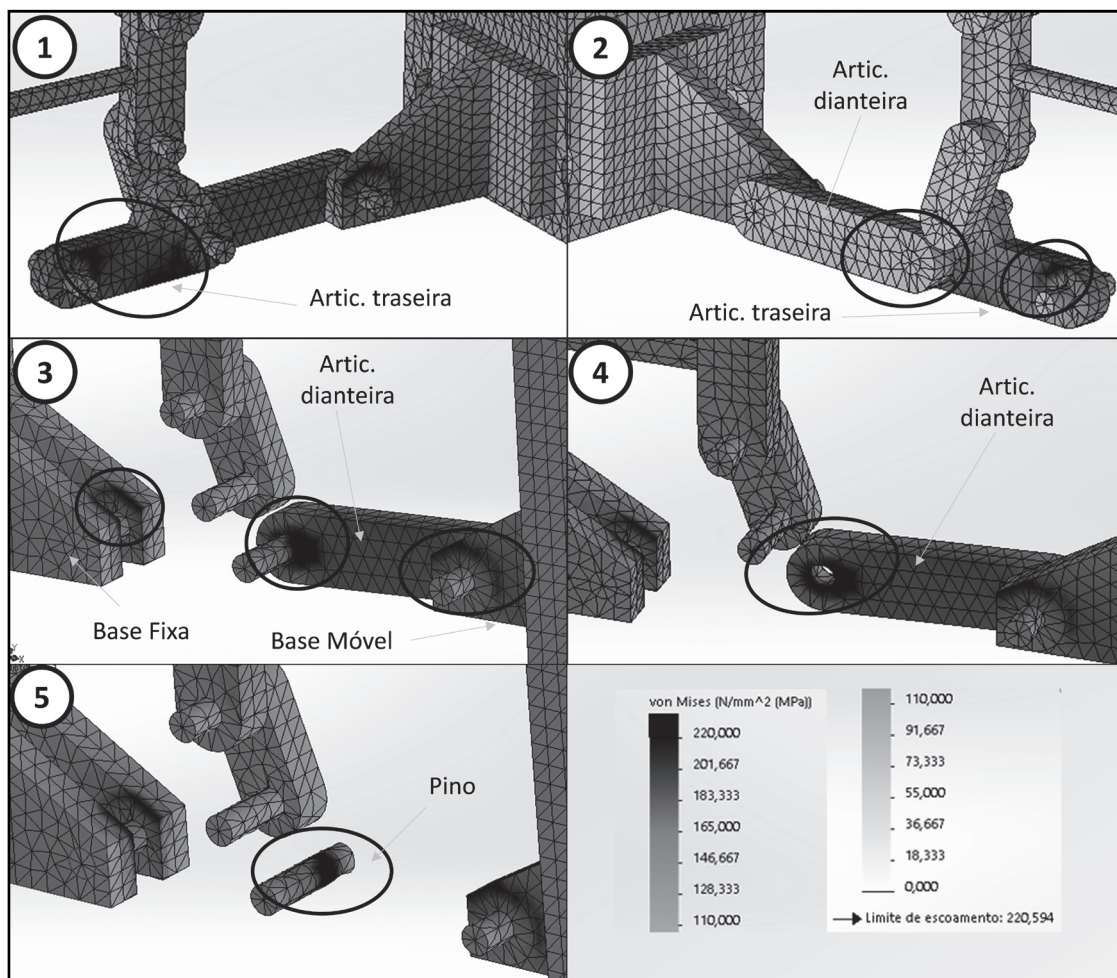
Importante ressaltar que para essa simulação, foi considerado o modelo mais crítico do ciclo de injeção que seria uma situação em que a força de injeção é

dimensionada, extrapolando o coeficiente de segurança, igualando-se à força de fechamento a que foi projetada. Assim sendo, trata-se de um estudo estático,

de carga gradual e lenta. Todos os materiais do modelo são baseados em aço estrutural SAE 1008, com tensão de escoamento de 220 MPa. A figura 16 mostra que, na maior parte do modelo, as tensões predominantes ficaram próximas de zero, representadas em azul forte. Na placa móvel, região mais próxima do ponto que recebe a força de abertura, as tensões são praticamente nulas. Na placa traseira, que sustenta o mecanismo, bem como nos articuladores da cruzeta, foram observados os mesmos resultados. Isso se deve à espessura dimensionada e, para esses casos, podem ser realizados estudos de otimização, aplicados no projeto de peças mecânicas, para diminuição da massa (SILVA, 2002).

Na haste, não houve tensões significativas acumuladas, ou seja, para uma aplicação prática, um cilindro dessa geometria seria satisfatório. A cruzeta e os articuladores da cruzeta tiveram tensões registradas no intervalo de até 73 MPa, ficando abaixo da tensão de escoamento. Na cruzeta, as tensões mais significativas estão na face frontal, oposta a face de contato com a haste do cilindro, representadas pela cor azul esverdeado. Para as bases do mecanismo, demais articulações e pinos, ocorreram tensões mais significativas e até críticas. Em alguns casos, como os articuladores dianteiros, as tensões estão nas faces internas do modelo, como mostra a figura 17.

Figura 17 - Resultados das tensões nas articulações



Fonte: Os autores (2019).

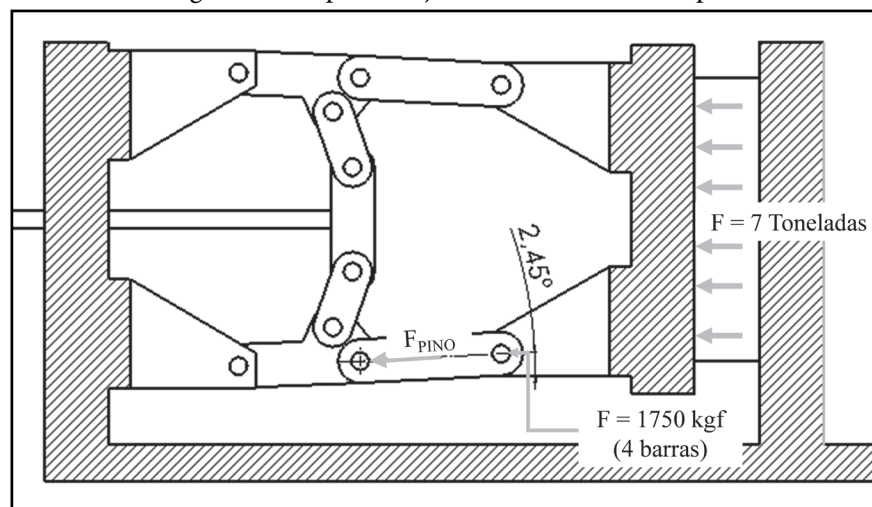
É possível observar o acúmulo de tensões críticas na articulação traseira, na região de montagem, com a base fixa do mecanismo (figura 17.1). No instante do esforço, essa região da articulação está sujeita aos esforços de compressão, e a tensão se mantém nos dois

lados da articulação (figura 17.2) e também nas arestas da base fixa (figura 17.3). Aumentar levemente a espessura da articulação traseira pode ser uma solução para diminuir esses esforços. A articulação traseira e da base móvel compõem o mecanismo com barra

simples, enquanto as demais, são articulações duplas ou pares. Esse fator é predominante para o acúmulo de tensões em componentes simples. Em projetos mais complexos de injetoras, como o avaliado por Rocha Júnior (1999), os componentes do mecanismo são todos com, no mínimo, duas áreas de contatos com os pinos, e algumas articulações são triplas, ligadas entre elas. As articulações dianteiras (figura 17.2) são exemplos de peças que poderiam ser interligadas entre si, compondo uma peça única e sólida. Isso diminuiria a tensão interna da peça, em contrapartida, poderia ser reduzida a massa da parte externa da articulação,

em que as tensões são mínimas. Também pode ser aumentada a espessura na região que envolve os pinos médio e traseiro (figura 17.3). Na base móvel, as tensões estão abaixo da tensão de escoamento do material configurado, entretanto, sugere-se aumento da espessura na região que envolve o pino. O ponto mais crítico, avaliado no mecanismo, está no pino de ligação da articulação traseira e dianteira, no qual a tensão de escoamento foi excedida. Desse modo, foi calculada a tensão nesse ponto, considerando um mecanismo estático, de carga gradual e lenta, conforme diagrama ilustrado na figura 18.

Figura 18 - Representação da tensão teórica no pino



Fonte: Os autores (2019).

Para o cálculo da tensão teórica que o pino médio das articulações traseira e dianteira está submetido, foi considerado a força de 7 toneladas-força, aplicada na placa, dividida entre as quatro articulações

dianteiras, ou seja, cada articulação está submetida a 1,75 toneladas-força. Considerando o ângulo de inclinação, no instante do fechamento, de $\alpha = 2,45^\circ$, a força teórica que atua no pino:

$$F_{\text{Pino}} = F_{\text{Art.Dianteira}} / \text{Cos } \alpha = 1750 \text{ kgf} / \text{Cos } (2,45^\circ) = 1751,6 \text{ kgf}$$

$$F_{\text{Pino}} (\text{N}) = F_{\text{Pino}} * 9,81 = 1751,6 \text{ kgf} * 9,81 = 17183,2 \text{ N} = 17,1 \text{ kN}$$

Considerando que o diâmetro do pino é 8 mm, e sua área de $A = 50,26 \text{ mm}^2$, a tensão no pino, em MPa, é:

$$\sigma_{\text{Pino}} = F_{\text{Pino}} / A_{\text{Pino}} = 17183,2 \text{ N} / 50,26 \text{ mm}^2 = 341,85 \text{ MPa}$$

Verifica-se, assim, que a tensão teórica no pino (341 MPa) excedeu o limite de escoamento do material (220 MPa). Isso pode ser solucionado, aumentando o diâmetro do pino. Para a análise das tensões, não foi aplicado fator de segurança no limite de escoamento do material, uma vez que ele foi inserido no cálculo da força de fechamento.

5 Considerações finais

Através da engenharia assistida por computador, foi possível avaliar um sistema de fechamento de cinco pontos de uma máquina injetora de pequeno porte, para aplicação como equipamento didático, por meio das análises de movimento e análise estática,

entendendo, através dos resultados, a influência das variáveis aplicadas no estudo. O desenvolvimento do projeto preliminar permitiu avaliar a movimentação do sistema de fechamento, durante um ciclo de operação, realizando a análise de movimentos. Através da análise estática, foi possível entender o comportamento das tensões ao longo do mecanismo, oriundo da simulação da aplicação da força de fechamento pré-estabelecida para o projeto.

No geral, o desenvolvimento deste estudo foi satisfatório, uma vez que foi possível realizar o projeto preliminar do sistema de fechamento proposto, utilizar e entender as ferramentas de desenho assistido por computador e engenharia assistida por computador. No entanto, de acordo com resultados de simulação, o projeto requer ajuste e melhorias no dimensionamento das barras de articulação, em que as tensões ficaram sobrecarregadas, bem como avaliação do mecanismo com materiais específicos para a aplicação.

Referências

- ABDU, Y. A. *et al.* Design and analysis of pressure die casting die for automobile component. **Global Journal Of Researches In Engineering: A Mechanical and Mechanics Engineering**, v. 16, n. 3, p. 1-8, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13536**: máquinas injetoras para plástico e elastômeros: requisitos técnicos de segurança para o projeto, construção e utilização. Rio de Janeiro, 1995.
- BALDAN, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. São Paulo: Érica, 2013.
- BERNA, X. S.; ALBERRO, A. N. **Tecnología mecánica**. Barcelona: Universitat Politècnica Catalunya, 2000.
- BRAGA, E. M. G. F. **Otimização do processo de injeção de Zamak**. 2015. 262 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.
- CHAN, A. **Injection molding machines**. 2016. Disponível em: <https://plasticsformingtech.com/injection-molding-machines/>. Acesso em: 5 maio 2019.
- COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de máquinas**: uma perspectiva de prevenção da falha. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- DS SOLIDWORKS. **Uma introdução a aplicações de movimento com SolidWorks Motion**: livro de exercícios. Massachusetts: Dessault Systèmes SolidWorks Corporation, 2010.
- FUNG, R. F. *et al.* Inverse dynamics of a toggle mechanism. **Computers and Structures**, v. 63, n. 1, 1997. DOI: 10.1016/S0045-7949(96)00330-6.
- GATONBRASS. **Hot chambre die casting machine**. 2015. Disponível em: <https://www.gatonbrass.com/wp-content/uploads/2015/12/Hot-chamber-die-casting-machine.png>. Acesso em: 20 mar. 2019.
- GHOMASHCHI, M. R.; VIKHROV, A. Squeeze casting: an overview. **Journal Materials Processing Technology**, v. 101, n. 1-3, p. 1-9, 1998. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00291-5.
- HUANG, M.-S.; LIN, T.-Y.; FUNG, R.-F. Key design parameters and optimal design of a five-point double-toggle clamping mechanism. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 9, p. 4304-4320, 2011. DOI: 10.1016/j.apm.2011.03.001.
- LALOS. **Máquina de fundição e injeção de Zamac sob pressão - LM 200**. 2019. Disponível em: <http://lalos.com.br/portfolio-item/maquina-de-fundicao-e-injecao-de-zamac-sob-pressao-lm-200/>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- MARTIN, G. H. **Kinematics and dynamics of machines**. New York: McGraw Hill, 1982.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.
- NUNES, L. P.; KREISCHER, A. T. **Introdução à metalurgia e aos materiais metálicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 376 p.
- RAJASEKAR, K.; PRIYA, G. Design and development of pressure die casting parts. *In*: NATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCEMENTS AND INNOVATIONS IN MECHANICAL, 2015, Erode. **Proceedings [...]**. Gandhinagar: IJERT, 2015.
- ROCHA JÚNIOR, J. C. F. **Cinemática e dinâmica de uma máquina injetora de plásticos**. 1999. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- SENAI. **Plásticos**: processo de transformação I. São Bernardo do Campo: Escola SENAI Mario Amato, 2005.
- SILVA, E. C. N. Técnicas de otimização aplicadas no

- projeto de peças mecânicas. **Máquinas e Metais**, v. 38, n. 436, p. 106-137, 2002.
- SOARES, G. A. **Fundição: mercado, processos e metalurgia**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000.
- SOARES, J. A. A. **Tratamentos térmicos de ligas de alumínio obtidas por fundição injetada**. 2017. 89 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2017.
- TÂMEGA, F. **Fundição e processos siderúrgicos: processo de fundição de ligas metálicas**. Londrina: Educacional, 2017.
- TC MÁQUINAS. **Injetora de Câmara Quente Evolution 19T**. 2019. Disponível em: <https://www.tcmaquinas.com.br/injetora-wj-400ton-->. Acesso em: 30 abr. 2019.
- TORRES, J. **Dossiê técnico: prevenção de acidentes em máquinas injetoras de plástico**. Esteio: SENAI Nilo Bettanin, 2007.
- WILSON, C. E.; SADLER, J. P. **Kinematics and dynamics of machinery**. New York: HarperCollins College, 1993.
- YOSHINO, N. Y.; SOUZA, A. G. O.; MALAVAZI, J. **Manual de fundição sob pressão**. São Paulo: Votorantim Metais, 2010.
- YUE, T. M.; CHADWICK, G. A. Squeeze casting of light alloys and their composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 58, n. 2-3, p. 302-307, 1996. DOI: 10.1016/0924-0136(95)02148-5.

