

Estudo dos processos de rotomoldagem e injeção na fabricação de produtos poliméricos termoplásticos¹

Study of rotational molding and injection processes in the manufacture of thermoplastic polymeric products

José Eduardo Andreis Posser²
Mauricio Rodrigues Policena³

Resumo

Os polímeros substituíram os metais em diversas aplicações na indústria. O processo de injeção é um dos mais utilizados na transformação de polímeros do país. A rotomoldagem é uma alternativa para a fabricação de determinados produtos. O presente trabalho objetivou a realização de um estudo paralelo entre os dois processos fabris, procurando apresentar as principais características de ambos, em relação às matérias-primas aplicadas, maquinário, ferramental, procedimento operacional, vantagens, desvantagens e produtos fabricados. Uma breve revisão da literatura em livros, artigos e revistas foi realizada, procurando informações relevantes nas duas áreas e tecnologias contemporâneas utilizadas. O estado da arte demonstrou que a redução no tempo de resfriamento dos moldes possui impacto direto no tempo de ciclo para ambas as técnicas. Como conclusões, tem-se a possibilidade de fabricação de peças de dimensão reduzida e grande precisão dimensional na injeção, e o menor tempo de ciclo amplia a capacidade de produção. No processo de rotomoldagem, destaca-se a fabricação de grandes peças como tanques em ciclos mais longos, com grandes reduções nos custos e tempo de fabricação dos moldes.

Palavras-chave: rotomoldagem; injeção; tempo de ciclo.

Abstract

Polymers have replaced metals in a wide range of industrial applications. The injection molding process is one of the most used in polymer processing in the country. Rotational molding is an alternative to the production of determined products. The present work aimed at carrying out a parallel study between the two manufacturing processes, seeking to present the main characteristics of both, in relation to the applied raw materials, machinery, tooling, operational procedure, advantages, disadvantages and manufactured products. A brief literature review in books, articles and journals was conducted, seeking relevant information in both fields, and contemporary technologies used. The state of the art has shown that the reduction of the cooling time of the molds has a direct impact on the cycle time of the two techniques. As conclusions, there is the possibility of manufacturing parts with reduced dimensions and high dimensional accuracy in injection, and the shorter cycle time increases the production capacity. In the rotational molding process, the manufacture of large parts such as tanks in longer cycles stands, with large reductions in costs and manufacturing time of molds.

Keywords: rotational molding; injection molding; cycle time.

1 O presente artigo é resumo de trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica, orientado pelo professor Mauricio Rodrigues Policena, do Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSul), câmpus Passo Fundo, RS, Brasil, aprovado em 11.03.2022.

2 Engenheiro Mecânico pelo Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSul), analista de engenharia na empresa Tecnotri, Vila Maria, RS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2101-7501>. E-mail: jose.eduardo.posser@gmail.com

3 Doutor em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, mestre em Projeto e Processos de Fabricação pela Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, RS. Professor do IFSul. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2902-0908>. E-mail: mauriciopolicena@ifsul.edu.br

Artigo recebido em 14.09.2022 e aceito em 24.10.2022.



1 Introdução

Os historiadores frequentemente classificam as primeiras idades da humanidade de acordo com os materiais utilizados para criar utensílios e auxiliar em outras necessidades básicas. As mais conhecidas desses períodos são a Idade da Pedra, a Idade do Ferro e a Idade do Bronze. Tal sistema de classificação não pode ser usado para descrever períodos subsequentes, pois com o passar do tempo o homem aprendeu a utilizar e manusear outros materiais (GILBERT, 2016). O uso dos polímeros pela humanidade perdura, através de muitos séculos passados. Sabe-se que os egípcios utilizavam resinas de árvores (polímeros naturais), como verniz para os sarcófagos (BIJKER; PINCH; HUGHES, 2012).

O primeiro polímero termorrígido sintético, conhecido como baquelite, foi obtido por Baekeland, no ano de 1907, através do processo poli condensação de fenol com formaldeído e foi primeiramente comercializado em 1909-1910 (FELDMAN, 2008). Desde então, a ciência relacionada aos polímeros evoluiu, ocasionando melhorias mecânicas, físicas e químicas. Dessa forma, a aplicação de polímeros na indústria teve um crescimento exponencial e está presente em diversas áreas das atividades humanas, podendo-se citar como exemplo as indústrias automobilísticas, de embalagens, de revestimentos e de vestuário (HEMAIS; ROSA; BARROS, 2000).

A indústria do polímero movimenta a economia mundial e possui expectativas de grande crescimento. Segundo o sindicato que representa o setor no Brasil, SINDIPLAST (2020), somente no estado de São Paulo, o faturamento da indústria de transformação de plástico, no ano de 2018, alcançou o valor de R\$ 38,5 bilhões. Estima-se que o crescimento do mercado global de polímeros deve passar de \$ 553,6 bilhões em 2019, para \$ 838,5 bilhões até 2030 (REPORTLINKER, 2021). Juntamente com o desenvolvimento e melhoria da matéria-prima, também houve aperfeiçoamento nos processos de fabricação. Existem dezenas de processos básicos conhecidos, cada um possui diferentes características (ROSATO; ROSATO, 2003). Muitos desses processos podem ser empregados para a fabricação de produtos destinados aos mesmos setores, com as mesmas aplicações, embora sejam fabricados, através de maneiras totalmente distintas e com as suas próprias características. Pode-se dizer que o plástico está presente em diversas aplicações e setores do nosso cotidiano. No geral, peças pequenas são fabricadas por injeção e grandes componentes são fabricados por rotomoldagem.

Artigos de revisão de literatura foram publicados para injeção e para a rotomoldagem. No primeiro processo, Kashyap e Datta (2015) apresentaram as diferentes técnicas empregadas para otimizar os parâmetros de injeção. Ogorodnyk e Martinsen (2018) forneceram uma visão geral dos sistemas de monitoramento e controle. Khosravani e Nasiri (2020) revisaram o sistema de inteligência artificial (IA), para o *design* do processo, os parâmetros de processamento, o diagnóstico de falhas e o controle de qualidade. Na rotomoldagem, Tan *et al.* (2011) apresentaram investigações práticas, para minimizar os tempos de ciclo. Ogila *et al.* (2017) analisaram os parâmetros que afetam o acabamento superficial e os sistemas de controle disponíveis. Gupta, Ramkumar e Sangani (2020) expuseram os materiais, os aditivos, a processabilidade e os parâmetros do processo. Há poucos estudos de revisão, comparando os dois processos.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é, através da revisão da literatura, efetuar um levantamento do estado da arte, acerca dos processos de rotomoldagem e injeção, com vista a identificar suas características e peculiaridades na fabricação de alguns produtos termoplásticos. Para garantir a produtividade dos processos, é fundamental conhecer variáveis como: tempo de ciclo, geometria dos moldes, tolerância dimensional, matéria-prima e limitações envolvidas.

2 Desenvolvimento

Neste tópico, serão abordadas características relacionadas aos polímeros e suas propriedades, assim como o detalhamento da rotomoldagem e da injeção, como seus maquinários, matérias-primas, bem como diferenças e limitações individuais. Também foi realizada uma análise do estado da arte sobre os processos, dando ênfase em estudos que avaliaram o tempo de ciclo, visto que ele está diretamente relacionado com a produtividade dos processos.

2.1 Polímeros

Os polímeros estão na base de importantes bens industriais. Ao lado de fatores sociais, seu rápido crescimento de produção é fomentado pela necessidade de substituir materiais tradicionais. Muitos exemplos de polímeros sintéticos podem ser mencionados; alguns do dia a dia, como poliésteres ou náilons, outros menos conhecidos, como os utilizados em aplicações da medicina em órgãos, suturas degradáveis, entre outros (FELDMAN, 2008).

Os polímeros sintéticos são produzidos industrialmente, através de reações químicas que dão

origem aos plásticos, enquanto os polímeros naturais podem ser encontrados em plantas e animais, como: a madeira, o algodão, o látex, entre outros (ZUIM, 2013). Para Matos (2009), polímeros sintéticos são materiais produzidos a partir do petróleo. Hoje em dia, são a principal matéria-prima para fabricação de embalagens e recipientes, assim como para os “plásticos de engenharia”, que são usados em indústrias da construção civil, automobilísticas, entre outras.

Os polímeros representam a imensa contribuição da Química, para o desenvolvimento industrial do século XX. Em torno de 1920, Staudinger apresentou um trabalho em que considerava, embora sem provas, que a borracha natural e outros produtos de síntese, de estrutura química, até então desconhecida, eram, na verdade, materiais com moléculas de cadeias longas e não agregados coloidais de pequenas moléculas, como se pensava naquela época (MANO; MENDES, 1999). Segundo Canevarolo Jr. (2006), a classificação dos polímeros, quanto ao comportamento e ao desempenho mecânico, pode ser dividida em: plásticos, elastômeros e fibras.

O processamento dos polímeros pode ser visto como uma ferramenta para alcançar a forma, propriedade e desempenho desejados para um objeto polimérico. Isso é feito, através de uma escolha criteriosa, tanto para o material quanto para o processo. O processamento inicia-se, através da moldagem do polímero, por meio de uma variedade de operações existentes. Um dos principais avanços na transformação é a inclusão de características morfológicas no produto final (THOMAS; WEIMIN, 2009).

O objetivo do processamento de polímeros é aumentar o valor agregado da matéria-prima. Os principais processos de fabricação são a extrusão, moldagem por compressão, injeção, sopro, a rotomoldagem e a termoformagem. O sopro é utilizado para fabricar embalagens de refrigerantes, água e produtos cosméticos. Perfis de variadas seções (cilíndricas, retangulares, hexagonais, quadradas, etc.) são obtidos por extrusão. Tanques horizontais e barcos são fabricados por rotomoldagem. Componentes de pequenas dimensões, como brinquedos e peças de aparelhos eletrônicos, são produzidos, através da injeção (THOMAS; WEIMIN, 2009).

2.2 Processo de Rotomoldagem

O princípio básico de formar um revestimento na superfície interna de um molde giratório data de muitos séculos passados, mas o processo não ganhou reconhecimento como método de moldagem

de polímeros até a década de 1940. Antes, o processo de cerâmica, conhecido, hoje, como “*slip casting*”, foi observado no Egito Antigo, nas Artes gregas e chinesas. Na Suíça, em 1600, a fabricação de objetos ocios, como ovos de chocolate, avançou rapidamente com a introdução do cacau para a Europa. Uma patente britânica emitida para Peters, em 1855 (antes que os polímeros existissem), cita uma máquina de rotomoldagem, com rotação em dois eixos, através de um par de engrenagens cônicas. A patente cita o uso de um molde dividido, contendo um tubo de ventilação para saída de gás, água para resfriar o molde e o uso de um material fluido ou semifluido, para produzir um interior oco (CRAWFORD; KEARNS, 2012).

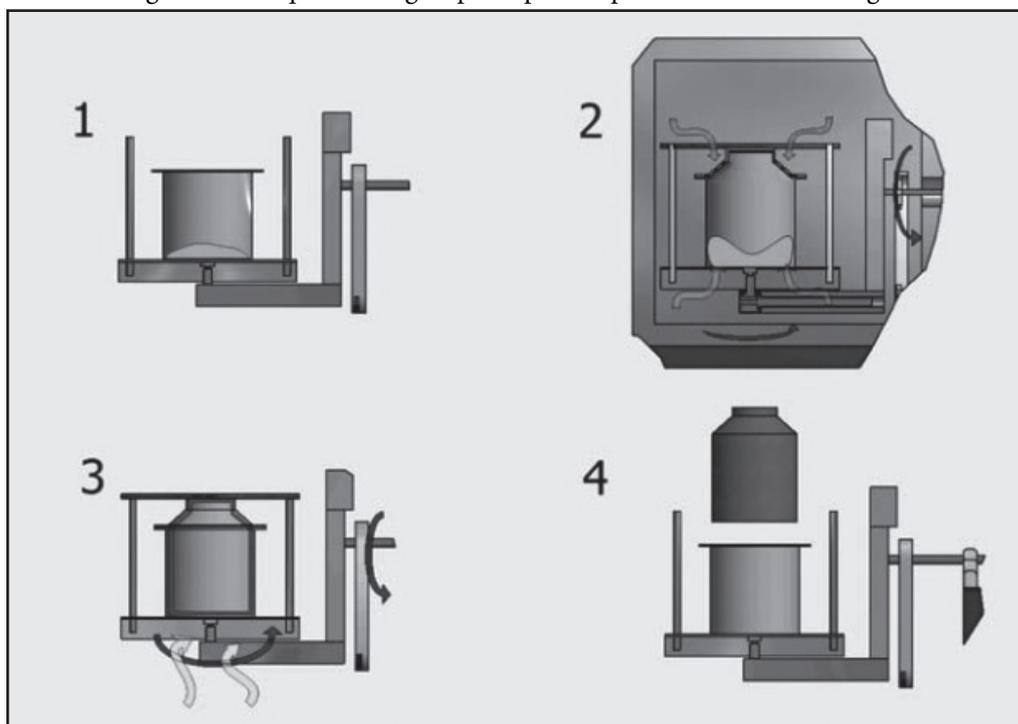
Atualmente, a indústria aplica a moldagem rotacional (popularmente conhecida como rotomoldagem) para fabricar uma variedade de produtos, como: componentes de carrocerias de automóveis e caminhões (incluindo carrocerias inteiras), contêineres industriais, cabines telefônicas, banheiros químicos, contêineres de lixo, baldes de gelo, carcaça de eletrodomésticos, brinquedos e cascos de barco. Esse processo é o mais adequado para produtos grandes e ocios, com curvas complexas, espessura de parede uniforme, bom acabamento e resistência, livre de tensões. O método é aplicável à maioria dos termoplásticos e também foi adaptado para possível uso com os termofixos (CHANDA, 2018).

A aplicação da rotomoldagem ainda é limitada, se comparada com os outros métodos de transformação de termoplásticos. Apesar disso, o processo tem demonstrado notável crescimento, e no ano de 2006 consumiu em torno de 40.000 toneladas de resina (UEKI; PISANU, 2007).

O processo de rotomoldagem pode ser dividido em quatro estágios (figura 1). No primeiro, o molde é carregado com certa quantidade de polímeros em forma de pó (ou líquido), a qual é igual ao peso desejado da peça final. A massa da carga pode ser determinada com base na área superficial do molde, na espessura do produto e na densidade da matéria-prima. No segundo, a outra metade do molde é fixada, e o conjunto começa a girar em um ambiente aquecido, que geralmente é um forno de convecção, porém o molde pode ser aquecido por uma variedade de métodos que incluem eletricidade, infravermelho, óleo ou chamas abertas. No terceiro estágio, o molde é retirado de dentro do forno, e inicia-se o processo de resfriamento. Ele continua a rotacionar, durante esse estágio, com o auxílio de ar em alta velocidade e, às vezes, um fino *spray* de água pode ser utilizado para

aumentar a velocidade de resfriamento, após o polímero ser solidificado. O último estágio, compreende a extração, após a peça ser resfriada, inicia-se um novo ciclo (CRAWFORD; KEARNS, 2012).

Figura 1 – Os quatro estágios principais do processo de rotomoldagem



Fonte: Fletes *et al.* (2015).

Um ciclo é a sequência completa de operações em um processo ou parte dele. É o período de tempo entre o início da fabricação de um produto, término da fabricação e início do próximo ciclo. É o tempo para moldar um componente (ROSATO; ROSATO; ROSATO, 2000).

Segundo Crawford e Kearns (2012), há diferentes tipos de máquinas que podem ser utilizadas, para a fabricação de peças rotomoldadas. Todas devem seguir três requisitos essenciais para o processo: rotação do molde, aquecimento e resfriamento. Cada categoria de máquina possui suas próprias capacidades de aquecimento, resfriamento, rotação, volume, entre outros. Os principais tipos são: a carrossel (longos ciclos de produção), *shuttle* ou lançadeira (economia de espaço no chão de fábrica), *clamshell* ou cofre (eixo horizontal apoiado em ambas as extremidades) e *rock and roll* (produção de peças de grandes dimensões).

Os moldes são, em sua grande maioria, fabricados em metal – chapas de aço, níquel, alumínio fundido ou alumínio usinado. Normalmente, possuem espessura reduzida, pois as forças aplicadas sobre o molde são ínfimas e as paredes pouco espessas que facilitam a transferência de calor. A complexidade

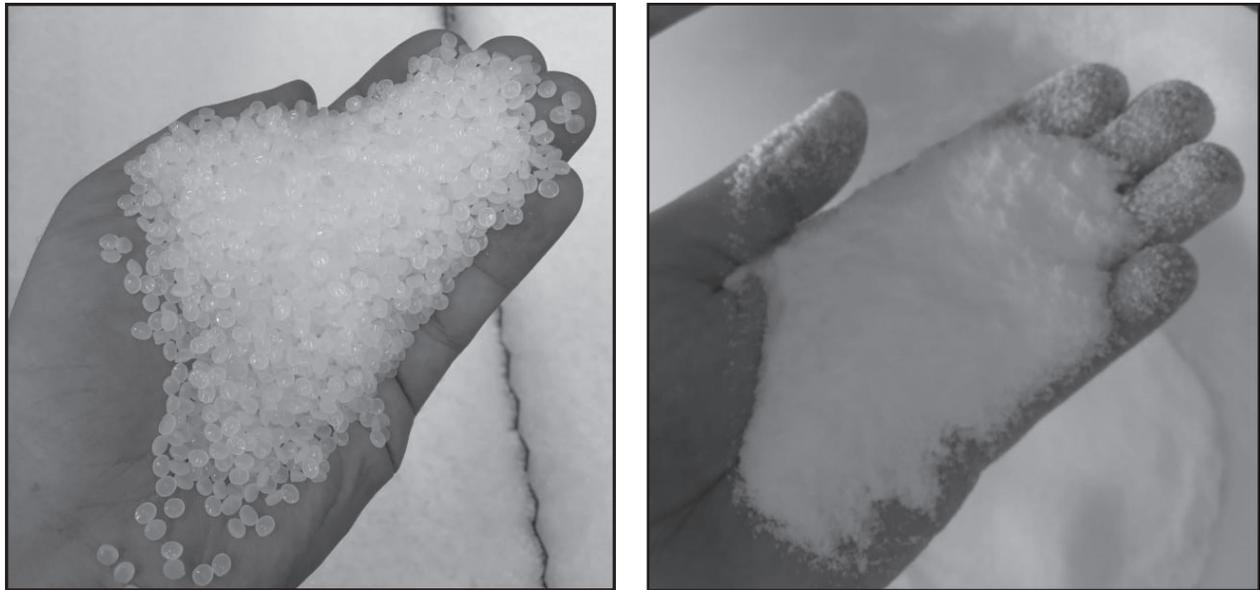
geométrica e o tamanho do produto determinam o material utilizado. O molde pode afetar a qualidade da superfície externa da peça. Não é possível ter um controle sobre a superfície livre (interna) do produto, impedindo o controle sobre a textura e a espessura. Em contrapartida, é possível aumentar a espessura geral de uma peça rotomoldada apenas aumentando a quantidade de pó depositado, sem a necessidade de alterações na geometria do molde, ou fabricação de um novo. Outra forma de controlar a espessura de parede é através da alteração da rotação do molde (CRAWFORD; KEARNS, 2012).

Apesar da vasta gama de polímeros que podem ser utilizados na rotomoldagem, atualmente, o polietileno representa cerca de 90% de todos os polímeros utilizados. O Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) tem bom comportamento de fluxo e apresenta excelente resistência a agentes químicos. O Polietileno de Alta Densidade (PEAD) apresenta maior resistência e rigidez que o PEBD, porém sua resistência ao impacto, quando submetido a baixas temperaturas, é baixa. O Polietileno de Baixa Densidade Linear (PEBDL), representado na figura 2, difere do PEAD pelo fato de apresentar mais ramificações em sua

cadeira molecular, isso evita que as moléculas se acumulem próximas umas das outras como no PEAD. Além de possuir mais ramificações, elas também são mais curtas que o PEBD. Essa característica faz com

que o material apresente maior resistência e rigidez, se comparado ao PEBD, mantendo um excelente desempenho se submetido a baixas temperaturas (CRAWFORD; KEARNS, 2012).

Figura 2 – PEBDL em *pellets* (esquerda); após a micronização (direita)



Fonte: Os autores (2022).

A moagem ou micronização da matéria-prima é realizada de forma mecânica, geralmente em moinho de disco, no qual um disco permanece estacionário e o outro gira em alta velocidade. O pó é alimentado pelo centro do disco e, quando atinge a extremidade, é insuflado para peneiras vibratórias que selecionam o tamanho das partículas. A distribuição das partículas de pó deve ser uniforme, a fim de evitar absorção não homogênea de calor que pode ocasionar a não conformidade na espessura do produto (UEKI; PISANU, 2007).

2.3 Processo de injeção

A injeção é um dos mais importantes, versáteis e modernos métodos de moldagem de termoplásticos. Fundamenta-se na capacidade dos materiais termoplásticos de serem amolecidos pelo calor e de enrijecerem, quando resfriados (CHANDA, 2018). O processo consiste em injetar material polimérico fundido em um molde fechado, permitindo o resfriamento e solidificação do produto acabado. Após, o componente é extraído do molde (BRYCE, 1996).

As máquinas de injeção, atualmente utilizadas, possuem as partes apresentadas na figura 3. Segundo Harada (2004), o conjunto injetor (B) compreende

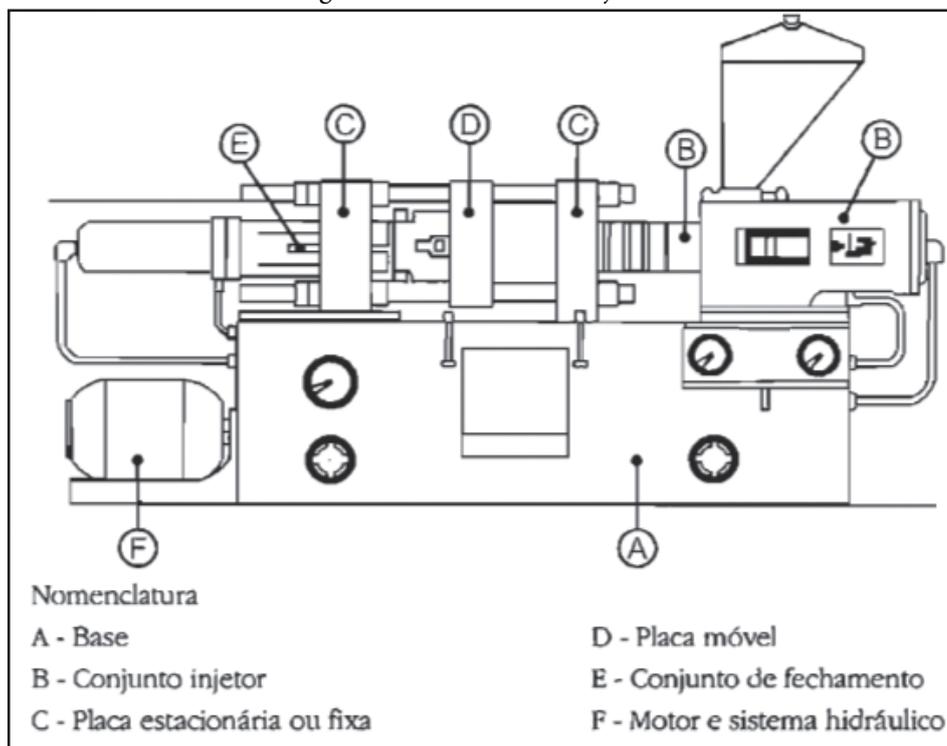
os componentes responsáveis pela injeção. Pode se deslocar para frente ou para trás, a fim de conectar ou afastar o bico de injeção na bucha. Avança na etapa de injeção e retorna, após o término. O conjunto pode ser por êmbolo, por plastificador ou por pré-plastificador. A placa estacionária ou fixa (C) tem sua estrutura fundida e serve de apoio à parte do molde que leva a bucha de injeção, além de suportar as colunas da máquina, nas quais são efetuados os movimentos da placa móvel. Nela é fixado o molde, de forma a manter o alinhamento da bucha de injeção com o bico de injeção da máquina. A placa móvel (D) tem sua estrutura fundida e serve de suporte para a parte do molde, onde se situa o sistema de extração. Seu deslocamento e regulagem são efetuados, através das colunas da máquina. O conjunto de fechamento (E) é responsável pela abertura e fechamento do molde, através de sistemas hidráulicos que movimentam a placa móvel. Nele, encontra-se a parte da máquina injetora e são posicionadas as colunas da máquina e o sistema extrator.

De acordo com Rosato, Rosato e Rosato (2000), o processo de fabricação de moldagem por injeção pode ser dividido em estágios: o primeiro, na plastificação, tem-se o aquecimento e fusão da matéria-prima; em seguida, ocorre a injeção sob pressão de um volume

controlado de plástico fundido no interior de um molde fechado, com o início da solidificação na cavidade do molde; logo depois, na etapa de pós-preenchimento, o material injetado é mantido sob pressão por um determinado período de tempo, para evitar refluxo do material fundido e compensar a diminuição do

volume, durante a solidificação; depois acontece o resfriamento do termoplástico, no interior do molde, até que o componente esteja suficientemente rígido para ser ejetado; por fim, ocorre a ejeção da peça, com abertura do molde, retirada do produto final e fechamento, para início de um novo ciclo de injeção.

Figura 3 – Partes de uma injetora



Fonte: Harada (2004).

Na injeção, pode-se considerar como tempo de ciclo o período entre o momento em que o molde inicia a abertura para a extração do produto injetado e o mesmo ponto de abertura do molde no próximo ciclo. Durante esse período, ocorrem todas as etapas descritas acima.

A maioria dos moldes de injeção é fabricada em aço ferramenta, projetados e construídos por fabricantes qualificados, de acordo com padrões exigentes, capazes de suportar as altas pressões de injeção e temperaturas elevadas do processo, juntamente com ciclos rápidos (CAMPO, 2006).

Atualmente, existem diversos tipos, modelos e tamanhos de máquinas de injeção, sendo cada uma delas recomendada para aplicações específicas. De acordo com Harada (2004), há dois tipos para a unidade de injeção: máquina a pistão e máquina com rosca-pistão e dois tipos para a unidade de fechamento: cilindro hidráulico e fechamento com articulação. Os

tipos e os tamanhos do maquinário utilizados dependem das dimensões dos produtos e da necessidade de fabricação que determinam os requisitos do processo, como: o volume de preenchimento, a pressão requerida e o comportamento do material. A injeção também pode utilizar uma grande variedade de termoplásticos como matéria-prima. Aproximadamente, 90% do volume de polímeros utilizados na injeção são termoplásticos. As peças moldadas por injeção podem, no entanto, incluir combinações de termoplásticos e termofixos, bem como: termoplásticos rígidos e flexíveis, plásticos reforçados e elastômeros (ROSATO; ROSATO; ROSATO, 2000).

De acordo com a Allied Market Research (2016), os principais polímeros termoplásticos usados na moldagem por injeção são: polipropileno, polietileno de baixa e alta densidade, policarbonato, poliestireno, cloreto de polivinila (PVC), poliuretano e acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS).

O processo de injeção e suas variáveis como tempo de injeção, pressão de injeção, temperatura de fusão, afetam as propriedades do produto final. Dependendo das propriedades viscoelásticas do termoplástico, o produto pode ser elasticamente tensionado no molde, ocasionando concentrações de tensão nas propriedades anisotrópicas, que variam de peça para peça.

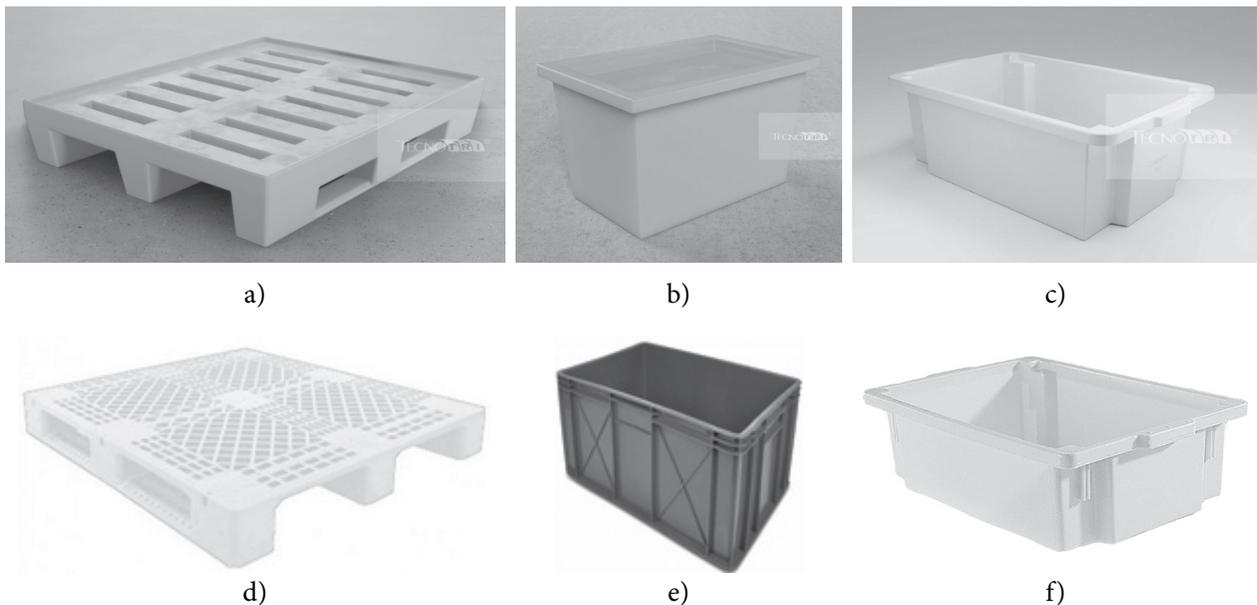
A formação de rebarbas no processo pode ocorrer e está relacionada a alguns fatores pontuais, como: a baixa força de fechamento do molde e o não paralelismo entre as faces da matriz de injeção. O primeiro permite que o material escorra para fora dos canais de injeção, e o segundo proporciona pontos de vazamento durante a injeção.

2.4 Produtos fabricados

Entre os principais produtos comercializados que

podem ser fabricados por ambos os métodos, pode-se citar paletes (figura 4a e 4d), caixas (figura 4b e 4e), contentores (figura 4c e 4f) e bandejas. A figura 4 apresenta um palete fabricado pelo processo de rotomoldagem (figura 4a) e outro fabricado pelo processo de injeção (figura 4d). Ambos são utilizados principalmente para acomodar grandes e variados tipos de cargas, em armazéns e centros de distribuição. Os paletes de plástico vêm substituindo os de madeira, pois oferecem mais higiene e possuem maior vida útil. As caixas (figura 4b e 4e) auxiliam na organização dos ambientes domésticos e no armazenamento de produtos diversos em lojas e indústrias. Contentores e bandejas (figura 4c e 4f) podem ser amplamente utilizados dentro do processo de produção em abatedouros, proporcionando ergonomia e facilitando o manuseio dos produtos.

Figura 4 – Produtos fabricados pelo processo de rotomoldagem (a, b, c) e injeção (d, e, f)



Fonte: a), b), c) Tecnotri (2022); d) Maisplast (2022); e) Cobasi (2022); f) Pisani (2022).

Tanto o processo de injeção como a rotomoldagem podem ser aplicados para a fabricação de certa gama de produtos. Apesar de o processo fabril ser diferente, alguns desses produtos possuem a mesma aplicação, porém podem apresentar características visuais e construtivas diferentes, devido aos próprios métodos de fabricação. Injeção possui um custo reduzido com mão-de-obra, além de poder ser totalmente automatizada. É uma produção de alto

rendimento, milhares de peças podem ser fabricadas antes de ser necessária a manutenção no maquinário. Por outro lado, o processo de rotomoldagem é mais difícil de automatizar, e os ciclos de produção são mais longos, porém é possível moldar gravuras de alta qualidade nos produtos (ROSATO; ROSATO; ROSATO, 2000). A tabela 1 apresenta algumas vantagens e desvantagens dos processos.

Tabela 1 – Características dos processos de rotomoldagem e injeção

Processo	Vantagens	Desvantagens
Rotomoldagem	Peça monobloco, sem a necessidade de soldas ou elementos de fixação na mesma	Longos tempos de fabricação
	Produto final praticamente livre de tensões residuais	Disponibilidade limitada de matéria-prima
	Moldes relativamente baratos e com curto tempo de fabricação	Custos elevados com matéria-prima, devido à inclusão de aditivos e ao processo de micronização
	Possibilita a fabricação de produtos com parede dupla	Algumas características geométricas (como nervuras) são difíceis de serem reproduzidas
	Diferentes produtos podem ser fabricados utilizando-se o mesmo maquinário	A contração térmica é diretamente proporcional ao tamanho do produto
Injeção	Variedade e disponibilidade de matérias-primas e cores	Custo elevado com ferramental
	Custo reduzido com matéria-prima	Longos prazos de <i>setup</i> do processo, requer a produção de moldes protótipo para ajustes no processo
	Ciclos rápidos de produção	Produções de poucas unidades podem ser economicamente inviáveis
	Produção de peças rígidas ou flexíveis com geometrias complexas, como engrenagens, com grande precisão dimensional	Alterações nos moldes são praticamente impossíveis, visto que são fabricados, através de fundição e/ou usinagem
	As peças produzidas são extraídas praticamente prontas, sem necessidade de acabamento. Desperdício de material quase inexistente	O produto final pode apresentar tensões residuais que podem ser prejudiciais a suas aplicações, dependendo da utilização do produto

Fonte: Os autores (2022).

2.5 Estudos desenvolvidos nos processos

2.5.1 Rotomoldagem

Ogila *et al.* (2017) realizaram uma revisão a respeito de melhorias relacionadas a moldes e maquinário, buscando relacioná-los à redução dos tempos de ciclo, que normalmente podem variar de 40 a 80 minutos, dependendo da espessura de parede necessária.

Monzón *et al.* (2012) propuseram um novo *design* de molde construído, a partir de uma casca metálica eletroformada, na qual um fluido térmico pode ser aquecido ou resfriado diretamente. Utilizaram um *software* de mecânica dos fluidos computacional para simulação numérica. O tempo necessário para o ar interno no molde atingir a temperatura máxima foi

56% menor do que para um molde com convecção forçada e 55% menor do que um molde aquecido com óleo. Ensaios experimentais mostraram boa concordância com a simulação. Entretanto, a distribuição uniforme de calor no molde foi dificultada, fato que pode prejudicar a distribuição de material polimérico nas paredes do molde, causando irregularidade nas espessuras do produto final.

Khoury (2004) estudou a redução do tempo de ciclo, através do resfriamento interno do molde com aplicação de diferentes métodos: utilização de um variador de velocidade do ar (tubo *venturi*); instalação de uma serpentina para circulação do fluido resfriado e, através do uso de dióxido de carbono (CO₂) líquido, para resfriar o interior do molde. Como

resultado, foram obtidas reduções de aproximadamente 25% no ciclo de resfriamento e de 14% no ciclo total, através do método de aplicação de tubo *venturi*, o qual demonstrara os melhores resultados. Todavia, a aplicação de resfriamento interno ainda não é tão desenvolvida, devido a diversos motivos, especialmente no caso da utilização de serpentina. Fatores como a limitação de espaço e possibilidade de aderência de material polimérico na serpentina ainda são um empecilho.

McCourt e Kearns (2009) também aplicaram resfriamento interno no molde, com borrifos de água, na sua cavidade interna, utilizando um bocal pneumático. Ao final do estágio de aquecimento, uma abertura na parede do molde possibilitou o borrifo de água por um período de 40 segundos; após esse tempo, somente o resfriamento externo foi aplicado, até a desmoldagem. O experimento alcançou uma redução de 30% na duração do período de resfriamento, se comparado com um molde resfriado a ar.

Amaral (2019) analisou a energia desperdiçada pelas chamas de uma máquina do tipo *rock and roll*, o que pode minimizar o tempo de ciclo da rotomoldagem. Utilizaram óleo como fluido térmico, para aquecimento integrado do molde. Como resultado, obtiveram uma redução de 10% nos custos de produção, 12% nos custos energéticos e cerca de 50% de redução no tempo de ciclo. Tal mudança requer uma adequação nos moldes existentes ou fabricação de novos para adaptação ao processo.

Abdullah, Bickerton e Bhattacharyya (2007) realizaram modificações no molde, ao adicionar saliências na superfície do mesmo, a fim de melhorar a transferência de calor por convecção. Após, compararam as taxas de transferência de calor de um molde simples, com moldes contendo elementos em forma de pirâmide e pinos quadrados. Não foi informada a rotação do molde e o peso da carga. Concluíram que as maiores reduções no tempo de ciclo foram apresentadas na disposição no formato de pinos, alcançando valores de 25% a 32%.

Liu e Fu (2008) usinaram três conjuntos com quantidades iguais de aletas na forma de pinos, retângulos e triângulos, nas placas de base, fixando as aletas em um molde de alumínio. Não foi informada a espessura de parede do produto. Concluíram que as maiores reduções no tempo de ciclo foram apresentadas na disposição no formato de pinos e triangular.

Medições de temperatura feitas, durante os ciclos de rotomoldagem padrão, mostraram uma significativa redução do tempo de ciclo entre os

regimes com moldes não modificados e com superfície aprimorada nos estudos de Abdullah, Bickerton e Bhattacharyya (2007) e de Liu e Fu (2008). As geometrias de pino e triângulo obtiveram desempenho semelhante.

2.5.2 Injeção

Park *et al.* (2019) estudaram um molde de injeção, para aumentar a eficiência do resfriamento. Utilizando fórmulas analíticas e modelagem computacional, foram definidas as localizações ideais para o posicionamento dos canais de resfriamento, considerando a eficiência e a capacidade de produção. Através da impressão 3D, fabricaram os canais de resfriamento para o molde em questão e, após, realizaram um ensaio experimental. Como resultado, o ciclo de resfriamento reduziu de 42 segundos para 13 segundos (cerca de 69%), e o ciclo total reduziu de 56 segundos para 27 segundos (aproximadamente 52%). Em contrapartida, para obter a máxima eficiência de resfriamento, realizaram simulações individuais de cada molde o que levou um grande tempo de modelagem. Concluíram que a possibilidade de minimizar o tempo de resfriamento está diretamente relacionada à geometria da peça injetada.

Saifullah e Masood (2007) também seguiram nessa linha de pesquisa, considerando o tempo de resfriamento do processo de injeção, com o auxílio de análise de elementos finitos. O estudo teve como objetivo determinar um projeto ideal para os canais de resfriamento, para redução no tempo de resfriamento. Utilizando o *software ANSYS*, foram realizadas análises de transferência de calor, para analisar o comportamento de um molde com canais de resfriamento convencionais e canais de resfriamento determinados pelo estudo. Obtiveram uma redução de 4 segundos para o tempo de resfriamento, que é equivalente a 20% do tempo total de ciclo, para o produto em questão.

Khan *et al.* (2014), estudaram a redução do tempo de resfriamento até a temperatura de extração, mediante a construção de canais que acompanhavam a geometria da cavidade do molde (canais conformes), com o objetivo de obter uniformidade no resfriamento. Primeiramente, a representação 3D do produto a ser estudado foi modelada, utilizando o *software Creo Elements/Pro 5.0* e, posteriormente, foram posicionados os canais de resfriamento em 4 disposições diferentes. Após, simularam o escoamento do fluido no interior dos canais de refrigeração, utilizando o *software Autodesk Mold Flow Advisor 2013*. Analisaram o tempo para atingir a temperatura ideal de extração, temperatura

de solidificação do polímero, contração volumétrica e variação da temperatura. Os resultados da simulação demonstraram que o tempo de resfriamento para extração foi de 15,63 segundos para os canais de resfriamento uniformes, 14,63 segundos, para os canais de resfriamento uniformes paralelos e 14,13 segundos nos canais uniformes com adição de linhas. A redução no tempo de ciclo foi de 9,5%, considerando o pior cenário na comparação com o melhor.

Vishnuvarthanan, Panda e Ilangovan (2013) utilizaram o *software Moldflow* para simular a moldagem por injeção. Um modelo 3D do produto foi desenvolvido em um *software* de modelagem e, posteriormente, exportado para o *Moldflow*. Em uma primeira análise, o *software* indicou os melhores pontos para o canal de injeção. Oito (8) desses pontos foram avaliados no estudo e alguns dados, como: tempo de preenchimento e empenamento foram avaliados. Em uma segunda análise, foram elencados e variados alguns parâmetros do processo como temperatura de fusão, temperatura do molde e tempo de injeção. O resultado da otimização do tempo de ciclo, através da combinação dos parâmetros, forneceu a temperatura de fusão, temperatura de molde e tempo de injeção. Os parâmetros fornecidos pelo *software* foram utilizados para a fabricação de um protótipo. Não foi especificado o método utilizado para avaliar a qualidade final do produto. Obteve-se uma redução de 35 para 24 segundos no tempo de ciclo.

Purav, Singraur e Sudhakar (2021) realizaram uma análise comparativa, através de simulação com canais de resfriamento tradicionais, convencionais e canais que acompanham a geometria da cavidade (canais conformes) de uma peça em polipropileno moldada por injeção, a qual apresenta variação de espessura de parede. Foi analisada qual configuração forneceria melhores resultados em termos de tempo de resfriamento da peça, contração volumétrica e empenamento. A peça foi modelada em 3D, com o *software SolidWorks*, e simulações de resfriamento foram realizadas. Concluíram que os canais conformes obtiveram redução de 18,7% no tempo de resfriamento, 7,8% na temperatura do molde, 16,6% no tempo de solidificação, 52,6% na contração volumétrica e 16,5% no empenamento total da peça, porém não realizaram o desenvolvimento experimental. Todavia, a fabricação de canais de refrigeração conformes é um processo trabalhoso, além da sinterização direta de metal a *laser* ser muito cara o

que torna o processo inviável para muitas empresas.

Karagöz (2021) estudou a influência da temperatura superficial do molde sobre as propriedades de partes injetadas fabricadas em PEAD. As amostras foram injetadas com variações na temperatura (160°C, 170°C, 180°C e 190°C) nas zonas de aquecimento e do bico de injeção. As temperaturas na superfície do molde variaram (40°C, 50°C e 60°C), enquanto outros parâmetros foram mantidos constantes. Analisaram a rugosidade, o brilho, a resistência à flexão, a dureza, o impacto e o empenamento. Alterando apenas a temperatura do molde, as resistências à tração e à flexão aumentaram, mas a resistência ao impacto diminuiu. Além disso, a temperatura do molde está diretamente ligada ao empenamento e ao brilho do produto. O incremento de 10°C, na temperatura de superfície do molde, aumentou em 2% o empenamento, porém o produto apresentou maior brilho. Mantendo-se outros parâmetros fixados e variando apenas a temperatura da superfície do molde, verificou-se que a mesma apresenta grande influência: empenamento e brilho do material injetado.

O quadro 1 apresenta de forma resumida as relações entre os estudos de revisão deste trabalho.

2.6 Variáveis dos processos

A partir do estado da arte, observa-se o desenvolvimento de técnicas para redução no tempo de ciclo de ambos os processos. A redução no tempo de resfriamento diminui o tempo de ciclo total, aumentando a produtividade de ambos os processos. Além disso, o processo de rotomoldagem ainda corresponde a uma pequena parcela do setor de transformação de polímeros, diferentemente do processo de injeção, que já é difundido amplamente e possui inclusive *softwares* para simulação de desempenho de moldes. O tempo de ciclo e outras características serão melhor abordados nesta seção.

Na rotomoldagem, é necessário realizar um controle, acerca da qualidade da superfície do molde, fator que influencia diretamente no produto moldado. Processos de lixamento e polimento podem ser realizados posteriormente, porém aumenta o retrabalho e o tempo de produção. A uniformidade na espessura da parede do produto rotomoldado pode ser controlada, através do corte de peças produzidas, analisando os locais em que as paredes se encontram mais ou menos espessas e, após, fixando chapas extras na parte externa do molde, o que dificulta a transferência de calor nos locais em que

as paredes apresentam maior espessura. Ainda, é necessário utilizar gabaritos nos produtos rotomoldados, a fim de controlar a contração que ocorre, durante o resfriamento. Além disso, o processo de

rotomoldagem não utiliza pressão, durante a transformação do polímero, permitindo que o produto fique livre de tensões o que é benéfico do ponto de vista estrutural.

Quadro 1 – Relação entre os estudos de rotomoldagem e injeção

Processo	Autor	Parâmetro analisado	Método utilizado	Resultados encontrados
Rotomoldagem	Monzón <i>et al.</i> (2012)	Eficiência global do molde	Simulações computacionais e ensaio experimental	Redução de 50% no tempo de ciclo e 70-90% de economia no consumo de energia.
	Khoury (2004)	Tempo de ciclo	Ensaio experimentais, utilizando tubos <i>venturi</i> , serpentina com água resfriada e CO ₂ líquido.	Redução de 45% no tempo de ciclo, aplicando as técnicas estudadas.
	McCourt e Kearns (2009)	Tempo de resfriamento	Ensaio experimental com borrifos de água no interior do molde	Redução de 30% no tempo de resfriamento, se comparado com resfriamento a ar.
	Amaral (2019)	Redução do desperdício da energia calorífica das chamas e tempo de ciclo	Aplicação de óleo como fluido térmico de aquecimento	Redução de 10% nos custos de produção, 12% nos custos energéticos e 50% no tempo de ciclo.
	Abdullah, Bickerton e Bhattacharyya (2007) Liu e Fu (2008)	Tempo de ciclo	Utilização de aletas/saliências na superfície do molde	Reduções de até 32% no tempo de ciclo entre as diferentes geometrias de aletas analisadas.
Injeção	Park <i>et al.</i> (2019) Saifullah e Masood (2007)	Tempo de resfriamento	Modelagem computacional e ensaio experimental Aperfeiçoamento de canais de resfriamento, através de modelagem computacional de elementos finitos	Redução de 69% no ciclo de resfriamento e 52% no ciclo total. Redução de 20% no tempo do ciclo total do produto em estudo.
	Khan <i>et al.</i> (2014)	Tempo de resfriamento	Simulação da construção de canais de resfriamento ao longo das cavidades do molde	Redução de 9,5% no tempo de resfriamento.
	Vishnuvarthanan, Panda e Ilangovan (2013)	Tempo de ciclo	Modelagem/simulação computacional com variação de parâmetros e ensaio experimental	Redução de 31% no tempo de ciclo.
	Purav, Singraur e Sudhakar (2021)	Tempo de resfriamento, contração volumétrica e empenamento	Modelagem e simulação computacional	Reduções de 18,7% no tempo de resfriamento e 16,5% no empenamento total da peça.
	Karagöz (2021)	Rugosidade, brilho, resistência mecânica	Ensaio experimentais	Temperatura do molde diretamente ligada ao empenamento e brilho do produto.

Fonte: Os autores (2022).

Na injeção, é possível realizar um monitoramento dos parâmetros como tempo de injeção, pressão de injeção, temperatura de fusão, a fim de controlar as concentrações de tensão e propriedades anisotrópicas que podem variar conforme a peça, devido às diferentes propriedades viscoelásticas dos termoplásticos aplicados. O controle de tais parâmetros foi realizado em alguns dos estudos presentes no estado da arte. A injeção pode ser realizada, sob elevadas pressões, o que proporciona a formação de tensões no produto acabado.

2.6.1 Tempo de ciclo

De uma forma geral, constatou-se que o processo de injeção possui um tempo de ciclo por peça produzida, muito menor do que na rotomoldagem, o que o torna mais indicado para grandes volumes de produção. Além disso, a injeção pode ser automatizada, necessitando mão-de-obra apenas para possíveis acabamentos. Verificou-se que, na rotomoldagem, grande parte dos estudos existentes está focada na redução do tempo de resfriamento, visto que, se comparando os dois processos, a grande desvantagem da rotomoldagem está na capacidade de produção. Sendo assim, o tempo de ciclo é o fator que pode ser elencado como o principal diferencial entre os processos. Para fabricação de um palete rotomoldado, pode-se ultrapassar os 60 minutos, enquanto em um palete injetado, o ciclo pode ser inferior a 2 minutos.

2.6.2 Geometria dos moldes

Ambos os processos oferecem a possibilidade de trabalhar com partes que apresentam geometrias complexas, contudo, esse fator está diretamente relacionado ao custo do molde. No geral, moldes utilizados na injeção possuem um valor mais elevado, devido aos materiais empregados, como aços ferramentais. A fabricação dos mesmos requer sofisticados centros de usinagem, com controle numérico computadorizado (CNC) de elevada rigidez. Isso se deve ao fato de os moldes suportarem elevadas pressões de trabalho durante a injeção. Em contrapartida, para geometrias mais simples, como bandejas lisas ou paletes, os moldes de rotomoldagem apresentam um menor custo de produção, pois para os produtos supracitados, é possível que se fabrique um molde, utilizando chapas de aço carbono dobradas, calandradas, soldadas ou parafusadas.

Considerando um produto igual, o molde para injeção pode custar até cinco (5) vezes mais do que um molde para rotomoldagem. Para um palete, por

exemplo, o molde de rotomoldagem pode ser fabricado por inteiro em chapas de aço, fator que reduz o custo de produção do molde.

2.6.3 Tolerância dimensional

Como visto anteriormente, o polímero que passa pelo processo de fusão apresenta uma deformação volumétrica no seu resfriamento, a contração. Em ambos os processos, a contração está diretamente relacionada à espessura da peça produzida: quanto maior a espessura, maior a contração apresentada. Na injeção, é possível alterar parâmetros do processo como as temperaturas: do molde, fusão do polímero e de resfriamento, o que reduz a contração. Para produtos de menor dimensão, tal fenômeno é insignificante. As peças de LEGO são exemplos de produtos fabricados, através de injeção. Elas necessitam de precisão dimensional, sem variação nas medidas, o que garante um encaixe satisfatório.

Na rotomoldagem, os produtos fabricados apresentam áreas e espessuras maiores, o que favorece o incremento da contração. Uma opção, para o controle da contração, é a utilização de gabaritos que são posicionados no produto, após o processo de extração, mantendo as dimensões desejadas.

2.6.4 Matéria-prima

O processo de injeção oferece uma maior variedade de polímeros para serem utilizados como matéria-prima. Além disso, o fato dele ser utilizado na forma de *pellets*, torna-se vantajoso, pois não necessita de uma etapa prévia, como acontece na rotomoldagem que, além de não apresentar a mesma variedade de matéria-prima, necessita passar pela micronização, etapa necessária para transformar os *pellets* do polímero em pó.

2.6.5 Comparação entre produtos

Nas figuras 5 e 6, estão apresentados dois paletes e seus respectivos moldes, o primeiro, fabricado através de rotomoldagem e, o segundo, por injeção.

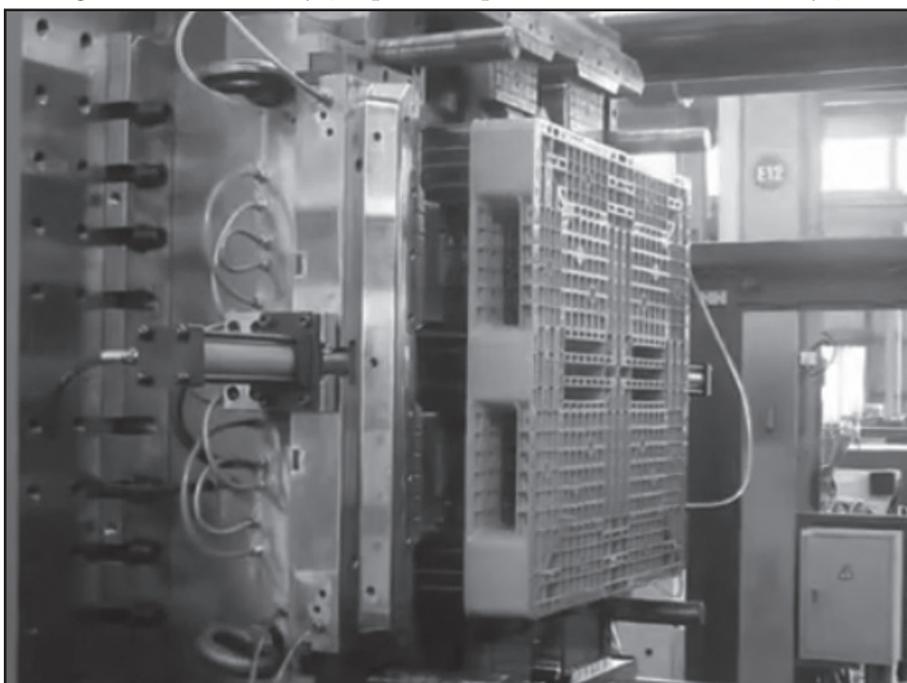
Nos paletes rotomoldados, o molde é mais simples e de menor custo, composto por chapas de aço carbono. O produto necessita de acabamento, após a extração. O ciclo de fabricação (do carregamento do molde ao final do acabamento) pode durar mais de uma hora. Tal molde pode ser utilizado para a fabricação do palete que suporta diferentes massas (18 kg a 25 kg). Apenas varia-se a adição da matéria-prima dentro do molde.

Figura 5 – Interior do molde, utilizado para a fabricação de palete rotomoldado e produto, após extração



Fonte: Os autores (2022).

Figura 6 – Molde de injeção plástica e palete fabricado, através da injeção



Fonte: Kemal (2022).

Para paletes injetados, tem-se um molde complexo, fabricado através de usinagem, necessitando materiais mais resistentes, devido às pressões submetidas, durante a injeção. Injetoras comuns variam de 100 a 400 toneladas para a força de fechamento. Em máquinas maiores, a força pode chegar a milhares

de toneladas. O produto deixa o molde praticamente pronto, em alguns casos, necessitando um rápido acabamento. O ciclo de fabricação pode durar menos de 2 minutos. Porém, tem-se a necessidade de fabricação de um novo molde, caso seja necessário aumentar a capacidade de carga (massa) suportada pelo palete.

No caso dos paletes, a rotomoldagem pode tornar-se mais relevante em suprir uma pequena demanda de produtos, somado à capacidade de trabalhar com um único molde, para fabricação de paletes que atendam diferentes categorias de cargas. Essa questão, somada ao fato de o molde utilizar materiais e processos mais baratos, representa um menor investimento em moldes. Em contrapartida, na injeção, é possível obter automação do processo, ocasionando um menor custo com mão-de-obra.

3 Conclusão

O propósito do presente trabalho foi realizar um estudo, abordando as peculiaridades e principais características dos processos de rotomoldagem e de injeção, o que pode auxiliar a comunidade acadêmica e interessados no processamento de polímeros a tomarem conhecimento, acerca das características individuais de cada processo, contribuindo de forma benéfica com o entendimento de qual processo se aplica às necessidades fabris.

A rotomoldagem corresponde a uma pequena parcela do setor de transformação de polímeros, é pouco conhecida e estudada, o uso do processo está em crescimento. É possível utilizar um único molde para fabricação de um produto com diferentes capacidades de carga. A injeção se encontra consolidada no mercado, possuindo mais pesquisas acadêmicas e informações técnicas. O processo oferece maior produtividade, devido ao seu reduzido tempo de ciclo, porém possui moldes e maquinário de elevado valor agregado. Ambos os processos possibilitam a fabricação de produtos com geometrias variadas. Produtos de pequenas dimensões como componentes de aparelhos eletrônicos são injetados, pois são impraticáveis através da rotomoldagem. Da mesma forma que grandes reservatórios e produtos com elevadas dimensões, como tanques horizontais e barcos, são inviáveis, através do processo de injeção, sendo rotomoldados. Quanto à tolerância dimensional, a injeção possibilita a fabricação de produtos com maior precisão. Com respeito à matéria-prima, a injeção possui uma maior variedade, além de não necessitar a etapa de micronização.

4 Referências

ABDULLAH, M. Z.; BICKERTON, S.; BHATTACHARYYA, D. Rotational molding cycle time reduction through surface enhanced molds part B: experimental study. **Polymer Engineering and Science**, v. 47, n. 9, p. 1420-1429, 2007. DOI: 10.1002/pen.20834.

ALLIED MARKET RESEARCH. **Injection molded plastics market overview**. 2016. Disponível em: <https://www.alliedmarketresearch.com/injection-molded-plastic-market>. Acesso em: 12 dez. 2021.

AMARAL, A. S. L. **Contributo para a metodologia de projeto de moldes de rotomoldagem com aquecimento integrado**. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, 2019.

BIJKER, W.; PINCH, T.; HUGHES, T. P. (ed.). **The social construction of technological systems: new directions in the sociology and history of technology**. Cambridge: MIT, 2012. 470 p.

BRYCE, D. M. **Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1996. v. 1, 282 p.

CAMPO, A. E. **The complete part design handbook: for injection molding of thermoplastics**. Munique: Hanser Gardner, 2006. 870 p.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.

CHANDA, M. **Plastics technology handbook**. 5th ed. Boca Raton: CRC, 2018. 1012 p.

COBASI. **Caixa plástica vermelha fechada 50 L**. 2022. Disponível em: <https://www.cobasi.com.br/pesquisa?terms=caixa-plastica-50-litros-vermelha>. Acesso em: 2 abr. 2022.

CRAWFORD, R. J.; KEARNS, M. P. **Practical guide to rotational moulding**. 2. ed. Shrewsbury: Smithers Rapra Technology, 2012. 244 p.

FELDMAN, D. Polymer history. **Designed Monomers and Polymers**, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2008. DOI: 10.1163/156855508X292383.

FLETES, R. C. V. *et al.* Preparation and characterization of multilayer foamed composite by rotational molding. **Polymer Engineering and Science**, v. 56, n. 3, p. 278-286, 2015. DOI: 10.1002/pen.24253.

GILBERT, M. (ed.). **Brydson's plastics materials**. 8. ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2016. 863 p.

GUPTA, N.; RAMKUMAR, P. L.; SANGANI, V. An approach toward augmenting materials, additives, processability and parameterization in rotational

- molding: a review. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 35, n. 14, p. 1539-1556, 2020. DOI: 10.1080/10426914.2020.1779934.
- HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber, 2004. 308 p.
- HEMAIS, C. A.; ROSA, E. O. R.; BARROS, H. M. Observações sobre o desenvolvimento tecnológico e os ciclos da indústria de polímeros no Brasil. **Polímeros**, v. 10, n. 3, p. 149-154, 2000. DOI: 10.1590/S0104-14282000000300011.
- KARAGÖZ, I. An effect of mold surface temperature on final product properties in the injection molding of high density polyethylene materials. **Polymer Bulletin**, v. 78, n. 6, p. 2627-2644, 2021. DOI: 10.1007/s00289-020-03231-2.
- KASHYAP, S.; DATTA, D. Process parameter optimization of plastic injection molding: a review. **International Journal of Plastics Technology**, v. 19, n. 1, p. 1-18, 2015. DOI: 10.1007/s12588-015-9115-2.
- KEMAL. **Pallet mold manufacturing capabilities**. 2022. Disponível em: <https://www.kemalmfg.com/pallet-parts/>. Acesso em: 17 out. 2022.
- KHAN, M. *et al.* Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design. **International Scholarly Research Notices**, 2014. DOI: 10.1155/2014/968484.
- KHOSRAVANI, M. R.; NASIRI, S. Injection molding manufacturing process: review of case-based reasoning applications. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 4, p. 847-864, 2020. DOI: 10.1007/s10845-019-01481-0.
- KHOURI, R. M. **Reducing cycle times in rotational molding of plastics: a theoretical and experimental analysis**. 2004. 408 f. Doctorate in Philosophy – Queen's University of Belfast, Belfast, 2004.
- LIU, S.-J.; FU, K.-H. Effect of enhancing fins on the heating/cooling efficiency of rotational molding and the molded product qualities. **Polymer Testing**, v. 27, n. 2, p. 209-220, 2008. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2007.10.004.
- MAISPLAST. **Pallet vazado 3 Runners 1,0m x 1,2m**. 2022. Disponível em: <https://www.maisplast.com.br/pallet-vazado-3-runners-10m-x-12m-branco>. Acesso em: 8 jan. 2022.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução à polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 208 p.
- MATOS, T. F. L. **Avaliação da viabilidade de reintegração de resíduos PET pós-consumo ao meio produtivo**. 2009. 287 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2009.
- MCCOURT, M. P.; KEARNS M. P. The development of internal water cooling techniques for the rotational moulding process. *In*: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE, 67., 2009, Chicago. **Proceedings** [...]. Danbury: SPE, 2009.
- MONZÓN, M. D. *et al.* Global efficiency of innovative rotational mold directly heated by thermal fluid. **Polymer Engineering and Science**, v. 52, n. 9, p. 1998-2005, 2012. DOI:10.1002/pen.23139.
- OGILA, K. O. *et al.* Rotational molding: a review of the models and materials. **EXPRESS Polymer Letters**, v. 11, n. 10, p. 778-798, 2017. DOI:10.3144/expresspolymlett.2017.75.
- OGORODNYK, O.; MARTINSEN, K. Monitoring and control for thermoplastics injection molding: a review. **Procedia CIRP**, v. 67, p. 380-385, 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.229.
- PARK, H.-S. *et al.* Design of advanced injection mold to increase cooling efficiency. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 7, n. 2, p. 319-328, 2019. DOI: 10.1007/s40684-019-00041-4.
- PISANI. **Caixa plástica para pescados – CN 36**. 2022. Disponível em: <https://www.pisani.com.br/produtos/linha-completa/caixa-plastica-para-pescados-cn-36>. Acesso em: 2 abr. 2022.
- PURAV, A. C.; SINGRAUR, D. S.; SUDHAKAR, D. S. S. Investigations into performance of conventional and conformal cooling channels of a plastic injection mold. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT INNOVATIONS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2020, Tamil Nadu, 2020. **Proceedings** [...]. Bristol: IOP, 2021.
- REPORTLINKER. **Polymer market research report: by type, base material, application – global industry analysis and growth forecast to 2030**. 2021. Disponível em: <https://www.reportlinker.com/p06036130/Polymer-Market-Research-Report-By-Type-Base->

- Material-Application-Global-Industry-Analysis-and-Growth-Forecast-to.html?utm_source=GNW. Acesso em: 10 set. 2021.
- ROSATO, D.; ROSATO, D. **Plastics engineered product design**. [S. l.]: Elsevier Science, 2003. 588 p.
- ROSATO, D.; ROSATO, D.; ROSATO, M. Injection molding handbook. 3. ed. Norwell: Kluwer Academic, 2000. 1457 p.
- SAIFULLAH, A. B. M.; MASOOD, S. H. Finite element thermal analysis of conformal cooling channels in injection moulding. *In: AUSTRALASIAN CONGRESS ON APPLIED MECHANICS*, 5., 2007, Brisbane. **Proceedings** [...]. Brisbane: Engineers Australia, 2007.
- SINDIPLAST. **A indústria do plástico no estado de São Paulo**. 2020. Disponível em: <http://www.sindiplast.org.br/dados-do-setor/>. Acesso em: 13 set. 2021.
- TAN, S. *et al.* Internal cooling in rotational molding: a review. **Polymer Engineering and Science**, v. 51, n. 9, p. 1683-1692, 2011. DOI:10.1002/pen.21973.
- TECNOTRI. **Produtos**. Disponível em: <https://tecnotri.com.br/produto/caixa-plastica-52-litros-c-tampa/>. Acesso em: 2 abr. 2022.
- THOMAS, S.; WEIMIN, Y. **Advances in polymer processing: from macro to nano scales**. Oxford: Woodhead, 2009. 752 p.
- UEKI, M.; PISANU, L. Fundamentos do processo de rotomoldagem. **Revista Ferramental**, v. 3, n. 13, p. 27-35, 2007.
- VISHNUVARTHANAN, M.; PANDA, R.; ILANGOVAN, S. Optimization of injection molding cycle time using Moldflow analysis. **Middle East Journal of Scientific Research**, v. 13, n. 7, p. 944-946, 2013. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.13.7.2934.
- ZUIM, B. B. **Reaproveitamento energético dos refugos industriais do processo de rotomoldagem a partir da gaseificação**. 2013. 140 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2013.