

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

ROGER CALZA MENEGON

AVALIAÇÃO DAS FORÇAS REQUERIDAS E DOS PARÂMETROS DE PROCESSO
QUE AFETAM A DESMOLDAGEM DE PEÇAS DE PVC DE MOLDES
METÁLICOS

BENTO GONÇALVES

2023

ROGER CALZA MENEGON

**AVALIAÇÃO DAS FORÇAS REQUERIDAS E DOS PARÂMETROS DE PROCESSO
QUE AFETAM A DESMOLDAGEM DE PEÇAS DE PVC DE MOLDES
METÁLICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Vagner Grison

BENTO GONÇALVES

2023

ROGER CALZA MENEGON

**AVALIAÇÃO DAS FORÇAS REQUERIDAS E DOS PARÂMETROS DE PROCESSO
QUE AFETAM A DESMOLDAGEM DE PEÇAS DE PVC DE MOLDES
METÁLICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Vagner Grison

Aprovado em / /

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Matheus Poletto
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência dos parâmetros físicos sobre o PVC no processo de desmoldagem em etiquetas de roupas injetadas. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os níveis de temperatura do PVC em 40 °C, 60 °C, 79 °C, 93 °C e 107 °C na etapa de resfriamento, seguido de ensaios mecânicos de tração para coletar os dados de forças de desmoldagem requeridas. Além disso, foi realizada a análise superficial das peças para verificar a qualidade em diferentes temperaturas de resfriamento. A partir dos resultados obtidos, buscou-se validar a utilização de ventosas pneumáticas específicas para a desmoldagem. Os dados revelaram uma relação direta entre a temperatura de resfriamento e as forças de desmoldagem, assim como alterações na qualidade superficial das peças. Por meio dessas análises, selecionou-se a ventosa mais adequada para o processo de desmoldagem. Temperaturas de resfriamento superiores a 60 °C causaram prejuízo à integridade das peças e das ventosas, além de promover pouco efeito nas forças de desmoldagem. A temperatura de 60 °C apresentou os melhores resultados, com força de desmoldagem pelo menos 77% inferiores à requerida em temperatura ambiente, além de deixar as peças isentas de qualquer marca proveniente do processo de desmoldagem. Este estudo contribui para o aprimoramento dos processos de desmoldagem em indústrias que utilizam uma determinada geometria e o PVC como material principal.

Palavras-chave: PVC, Temperatura de Resfriamento, Força de Desmoldagem, Análise Superficial.

ABSTRACT

The aim of this study was to analyze the influence of physical parameters on PVC in the demoulding process of injected clothing labels. To achieve this goal, the PVC temperature levels were set at 40 °C, 60 °C, 79 °C, 93 °C and 107 °C in the cooling stage, followed by mechanical tensile tests to collect the required release force data. Surface analysis of the parts was also carried out to check their quality at different cooling temperatures. The results obtained were used to validate the use of specific pneumatic suction cups for demolding. The data revealed a direct relationship between cooling temperature and demolding forces, as well as changes in the surface quality of the parts. These analyses led to the selection of the most suitable suction cup for the demolding process. Cooling temperatures above 60 °C caused damage to the integrity of the parts and the suction cups, as well as having little effect on the release forces. The temperature of 60 °C showed the best results, with release forces at least 77% lower than those required at room temperature, as well as leaving the parts free of any marks from the release process. This study contributes to the improvement of demolding processes in industries that use PVC as their main material.

Keywords: PVC, Cooling Temperature, Demolding Strength, Surface Analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Influência da temperatura na força de desmoldagem do PVC..... | 15 |
| Figura 2: Micrografias eletrônicas de varredura da superfície do perfil extrudado à (a) 127 °C, (b) 138 °C, (c) 149 °C, (d) 160 °C..... | 17 |
| Figura 3: Micrografia da amostra no seu canto superior esquerdo (a), canto superior direito (b), canto inferior esquerdo (c) e canto inferior direito (d) | 18 |
| Figura 4: Câmera de Vácuo | 20 |
| Figura 5: Geometrias de ventosas à vácuo | 21 |
| Figura 6: Condições de deslocamento para determinadas geometrias de ventosas..... | 22 |
| Figura 7: Força de desmoldagem em função ao tempo de arrefecimento | 24 |
| Figura 8: Molde de injeção (a) aberto e (b) fechado | 25 |
| Figura 9: Fluxograma das atividades desenvolvidas | 27 |
| Figura 10: Estrutura metálica para ensaio de tração..... | 28 |
| Figura 11: Geometria dos moldes do lado (1) e (2)..... | 29 |
| Figura 12: Sequência de preparação para o segundo aquecimento | 30 |
| Figura 13: Comportamento da força de desmoldagem em função da temperatura de desmoldagem..... | 34 |
| Figura 14: Deformação superficial do PVC a temperaturas acima de 60 °C | 35 |
| Figura 15: Comportamento do brilho em função da temperatura de desmoldagem | 36 |
| Figura 16: Relevo superficial das amostras..... | 37 |
| Figura 17: Câmera térmica posicionada no momento da desmoldagem..... | 40 |
| Figura 18: Peças desmoldadas através do método de sucção de ventosas (a) realizadas com sucesso, (b) realizadas em moldes fechados e (c) apresentando o defeito | 41 |
| Figura 19: Método atual de remoção (a) em comparação com o uso da ventosa (b) | 42 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----|-------------------------|
| THF | Tetrahidrofurano |
| CVE | Curso Vertical Elástico |
| RV | Rotação Vertical |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|---|
| P | Pressão (Pa) |
| F | Força (N) |
| A | Área (m ²) |
| F_e | Força de elevação das ventosas (N) |
| S | Área interna da ventosa (mm ²) |
| K_S | Coefficiente de redução de área após sua deformação (-) |
| P_a | Pressão atmosférica (Pa) |
| P_r | Pressão Residual (Pa) |
| K_a | Coefficiente de alterações de pressão atmosférica (-) |
| K | Coefficiente de reserva de força entre a ventosa e a superfície do objeto (-) |
| F_d | Força de Desmoldagem (N) |
| α | Coefficiente de expansão térmica (K ⁻¹) |
| T_m | Temperatura de fusão do material de moldagem (°C) |
| T_e | Temperatura de extração do material moldado (°C) |
| D | Diâmetro do núcleo (mm) |
| E | Módulo de Young (MPa) |
| A | Área de contato entre o núcleo e a moldagem (mm ²) |
| μ | Coefficiente de atrito entre o material de moldagem e o núcleo (-) |
| t | Espessura da modelagem (mm) |
| γ | Coefficiente de Poisson do material de moldagem (-) |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 | TEMA | 12 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 12 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 13 |
| 1.3.1 | Objetivo geral..... | 13 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos | 13 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 2.1 | INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PVC 14 | |
| 2.2 | DISPOSITIVOS DE PRESSÃO PNEUMÁTICA | 18 |
| 2.2.1 | Princípio de Pascal..... | 19 |
| 2.2.2 | Ventosas Pneumáticas | 20 |
| 2.3 | FORÇAS REQUERIDAS PARA A DESMOLDAGEM..... | 23 |
| 3 | METODOLOGIA | 25 |
| 3.1 | OBJETO DE ESTUDO | 25 |
| 3.2 | PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO | 26 |
| 3.2.1 | Ferramentas de Pesquisa e de Ensaio | 27 |
| 3.2.2 | Métodos..... | 30 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 33 |
| 4.1 | RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS | 33 |
| 4.2 | RESULTADOS DO MEDIDOR DE BRILHO..... | 35 |
| 4.3 | SELEÇÃO DA VENTOSA | 37 |
| 4.4 | AVALIAÇÃO DA VENTOSA SELECIONADA | 39 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 43 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 45 |
| | REFERÊNCIAS | 46 |
| | APÊNDICE A – COMPORTAMENTO DAS FORÇAS DE DESMOLDAGEM A DISTINTAS TEMPERATURAS | 47 |

**APÊNDICE B – COMPORTAMENTO BRILHO NAS AMOSTRAS DE PVC
DESMOLDADAS48**

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de moldes metálicos para a injeção de polímeros, qualquer que seja a peça, exige cuidados pelo elevado custo do molde, cuidados estes em especial na etapa de desmoldagem das peças. Segundo Martins (2020), diretor do Instituto Avançado do Plástico (IAP), materiais como PVC, por exemplo, aderem fortemente ao molde fazendo com que muitas vezes métodos convencionais não sejam eficazes o suficiente para sua desmoldagem.

O processo de moldagem de peças em PVC envolve a injeção do material em estado líquido em um molde com a geometria desejada. Em seguida, o molde com o polímero é submetido a um processo de aquecimento (3 min entre 165 °C a 190° C) com finalidade do PVC tomar a geometria do seu molde e, posteriormente, por uma etapa de resfriamento (1 min a 20 °C) para alcançar a solidificação do PVC. Durante o processo de fabricação, o PVC flexível pode sofrer uma contração de 1,5 % a 3 % dentro de seu molde, o que resulta em aderência e resistência a remoção que afetam a desmoldagem do material, conforme mencionado pelo site Moldes Injeção Plásticos (2008).

A desmoldagem de peças injetadas requer a aplicação de uma força localizada para vencer a adesão resultante na interface entre o molde e a peça. Para isso, pinos extratores com formato cilíndrico são amplamente utilizados (GARCIA, 2016). Os extratores cilíndricos apresentam formato circular plano na extremidade, mas também é possível realizar a desmoldagem com extratores de geometrias distintas, como rebaixadas, de lâmina e tubular.

Os extratores são fixados em placas extratoras e avançam contra a superfície das peças, removendo-as do molde. No entanto, esse processo pode deixar marcas na superfície da peça devido à pressão de contato durante a extração. Caso as marcas deixadas na peça não sejam aceitáveis, é possível projetar uma câmara adicional no molde, onde o extrator atuará, causando rebarbas no material. Essas rebarbas poderão ser removidas posteriormente por meio de algum método de usinagem.

Além dos extratores, existem métodos convencionais de desmoldagem que empregam outras abordagens para remover as peças do molde de PVC. Outro método comumente empregado é o uso de sistemas de ejeção mecânica, que consistem em dispositivos automatizados ou semiautomatizados acionados por cilindros pneumáticos, hidráulicos ou elétricos. Esses sistemas aplicam uma força controlada na peça para impulsioná-la para fora do molde, promovendo a desmoldagem.

A extração de peças injetadas pode ser facilitada com o aumento da temperatura do molde pois isso promove a dilatação do material, reduz tensões acumuladas nas paredes e também aumenta a flexibilidade do polímero.

A escolha do método de desmoldagem dependerá das características específicas do processo de fabricação, como o tipo de geometria da peça, o material utilizado, a complexidade do molde e a produção em larga escala ou não.

Neste trabalho será abordado o uso de ventosas de sucção pneumáticas para cargas de desmoldagem dos moldes, com o intuito de remover as peças de PVC do seu molde. Para isso, serão analisadas as condições operacionais às quais o sistema de desmoldagem mecanizado precisará se adaptar, tais como a falta de uniformidade superficial das peças, a porosidade, as diferentes geometrias e áreas de contato das peças com o molde metálico. Também, serão analisados os efeitos da temperatura do molde em relação às forças requeridas para a remoção das peças, visando identificar uma faixa recomendada a ser adotada na linha de produção, tanto para garantir a integridade do produto, quanto para minimizar a energia dispendida para a execução do processo.

1.1 TEMA

O trabalho tem o intuito de identificar e quantificar com testes em bancada, uma relação entre as condições físicas de temperatura, área e rugosidade de peças poliméricas de PVC para redução de cargas axiais na remoção das mesmas do seu molde.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com a alta demanda no mercado de peças PVC, empresas do ramo precisam estar constantemente evoluindo suas diretrizes. Para atender essa demanda e qualidade nos produtos, a mecanização dos processos são aspectos a serem constantemente analisados. O uso de maquinário vem se mostrando eficiente há 21 anos na empresa Qualitá. Com as injetoras de PVC, o trabalho antes realizado por 50 pessoas, atualmente é feito somente por um operador, demonstrando a relevância da inovação no ramo.

Na linha de produção de peças em PVC o maquinário agrega valor comercial, porém os processos artesanais ainda estão presentes nos setores. Essa condição exige mais qualificação e tempo do responsável do processo além de causar eventuais atrasos na linha de produção.

De acordo com o levantamento que a empresa Qualitá Etiquetas e Brindes realizou, seu setor de destaque apresenta o ponto de encontro de todos os produtos da fábrica. Nesse setor o tempo que as peças ficam esperando a desmoldagem é em torno de 15 minutos, que podem gerar prejuízos na faixa de até R\$ 2.000,00 por mês. O atual método de desmoldagem adotado é bastante versátil, mas também se caracteriza por ter baixa produtividade e por danificar as peças. Sendo assim, a diversidade das peças em termos de quantidade e geometria requer o desenvolvimento de um estudo técnico bem embasado para que seja proposto um sistema mecanizado bem sucedido à linha de produção.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar as forças requeridas e os parâmetros de processo que afetam a desmoldagem de peças de PVC de moldes metálicos em testes de bancada.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que serviram para atender os objetivos geral são:

- a) analisar o efeito da temperatura do molde nas forças de desmoldagem;
- b) analisar o efeito da geometria e da área de contato das peças nas forças de desmoldagem;
- c) avaliar a rugosidade superficial das peças a serem desmoldadas;
- d) dimensionar e selecionar ventosas de acordo com as condições operacionais requeridas para a desmoldagem;
- e) avaliar experimentalmente a funcionalidade do conjunto de ventosas proposto para a desmoldagem de peças de PVC.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o objetivo de fornecer o embasamento teórico necessário para a análise do comportamento de peças poliméricas. O foco deste estudo está na reação de materiais poliméricos, com ênfase no PVC, em diversas condições operacionais, incluindo temperatura, qualidade superficial e área de contato das peças. O objetivo é determinar o dimensionamento e a seleção adequada de ventosas com base na fundamentação teórica disponível.

2.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PVC

As pesquisas relacionadas às propriedades do PVC rígido são extensivamente abordadas na literatura científica. Rabinovitch (2003) relatam que esses estudos apresentam alta compatibilidade com o PVC flexível, quando se trata de mudanças morfológicas dos compostos devido a alterações na temperatura de processamento. Experimentos desenvolvidos por Rabinovitch (2003) e os pesquisadores Boerio e Shah (2014), evidenciam as relações entre a variação das propriedades do PVC e a mudança na temperatura de processamento, incluindo aspectos como rugosidade superficial e elasticidade das peças.

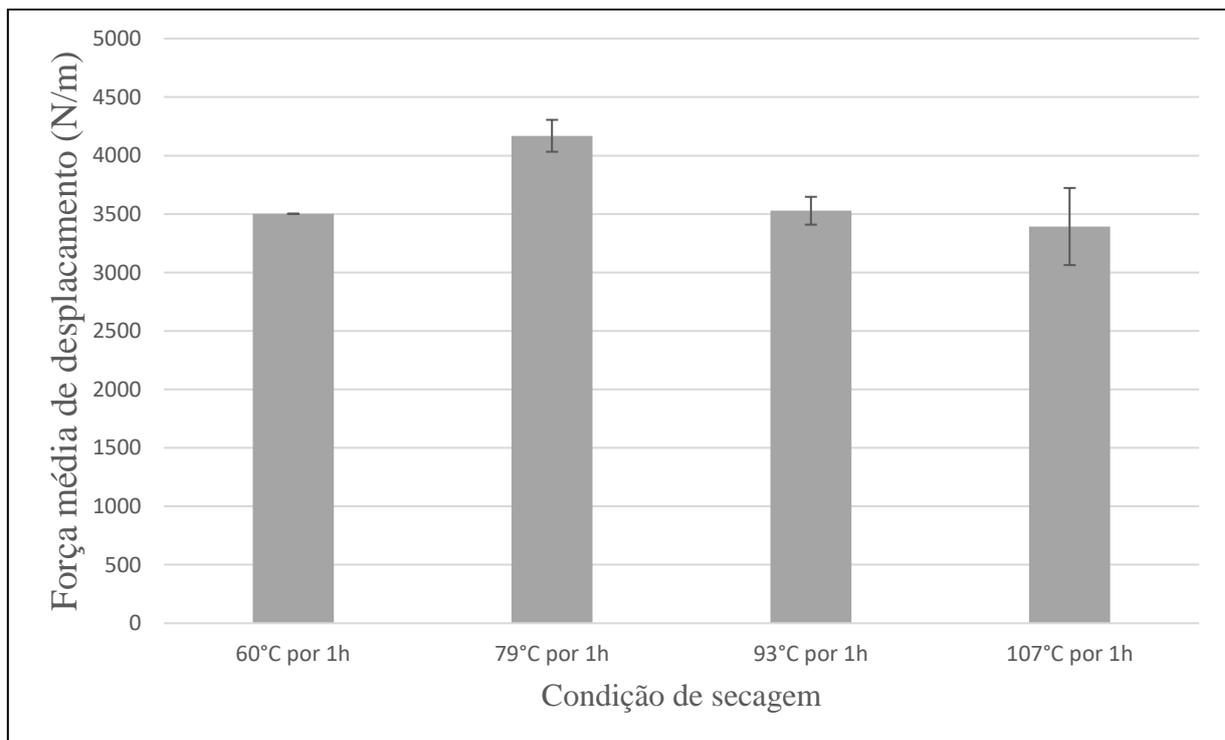
As variações da temperatura de 60 °C, 79 °C, 93 °C e 107 °C, demonstraram um efeito significativo na flexibilidade e na resistência à tração do material estudado. Observou-se que, à medida que a temperatura aumenta, o alongamento causado pela tração da peça aumenta gradualmente, e que esse alongamento é ligeiramente eficiente na redução da compressão do PVC do molde metálico. Essas observações podem ser explicadas pelo grau de fusão das partículas primárias do PVC e pela maior mobilidade dos segmentos de cadeia do polímero, que é influenciado pela temperatura.

Conforme relatado por Boerio e Shah (2007), a adição de cargas como bicarbonatos é capaz de promover a adesão entre polímeros e materiais inorgânicos durante o processo de moldagem por injeção. A eficácia do bicarbonato em promover a adesão do PVC foi comprovada por meio de testes laboratoriais, nos quais moldes de aço escovado receberam o polímero por meio de injetoras de PVC, foram recozidos em fornos a diferentes temperaturas, e então resfriados com água ou tetrahydrofurano (THF). Em seguida, as amostras foram removidas através de ensaios mecânicos de tração a uma velocidade de 2,54 mm/min.

A etapa de secagem do molde foi verificada como um fator determinante na carga de remoção do PVC. Para tal, os objetos foram submetidos ao processo de resfriamento até

temperaturas de 60 °C, 79 °C, 93 °C e 107 °C, sendo que a resistência ao deslocamento apresentou aumento até 79 °C, a partir do qual observou-se uma diminuição na força de aderência. Os resultados obtidos nas temperaturas de 93 °C e 107 °C apresentaram similaridade com aqueles observados a 79 °C. Esses motivos foram quantificados por meio de ensaios de tração em corpos de prova de PVC, cujos resultados foram ilustrados na Figura 1. Na Figura 1, são apresentados quatro corpos de prova submetidos ao processo de remoção, sendo que as diferentes medidas correspondem às variações de temperatura durante o processo de resfriamento do molde. Tais informações permitiram a análise da influência da etapa de secagem do molde na resistência da aderência do PVC.

Figura 1: Influência da temperatura na força de desmoldagem do PVC



Fonte: Adaptado de Boerio e Shah (2007)

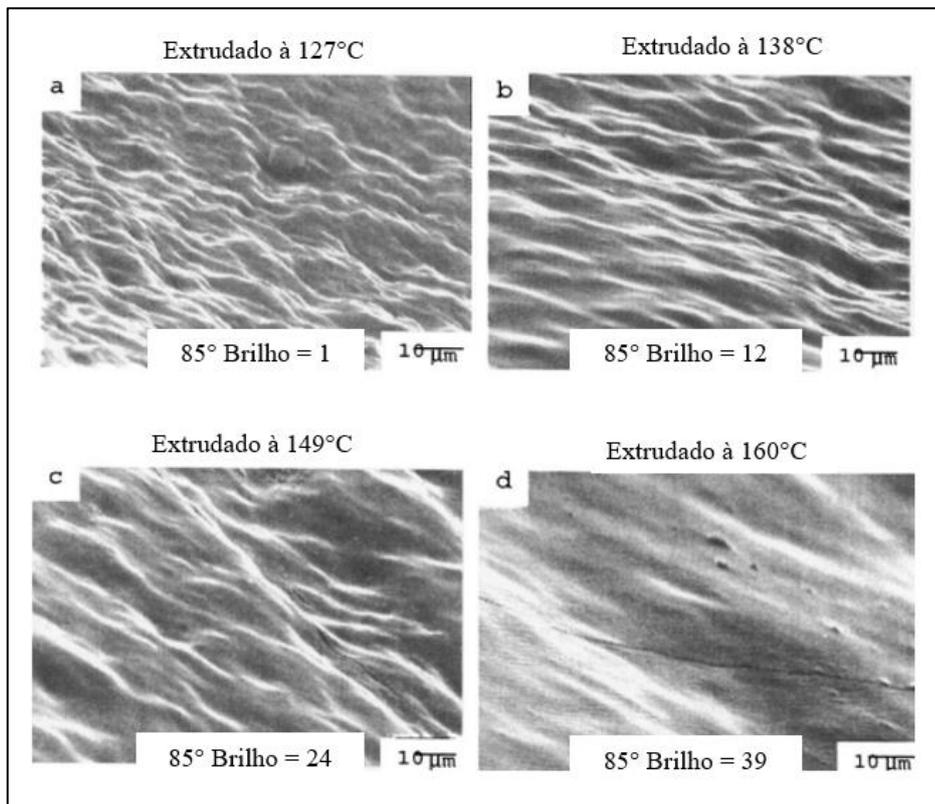
Conforme Boerio e Shah (2007), a adesão apresentou-se elevada quando a quantidade de bicarbonatos era reduzida. Observou-se que o aumento do tempo de recozimento culminou no aumento da porcentagem de grupos de bicarbonato presentes no polímero. A extensão desses grupos, por sua vez, foi progressivamente ampliada conforme o tempo de recozimento foi elevado de 10 para 20 e 30 minutos.

Em uma determinada etapa do estudo, foi realizada uma experimentação que se mostrou fundamental para a condução da pesquisa. Observou-se que as peças moldadas a partir de solução THF apresentavam baixa adesão do PVC ao aço. Para essa experimentação, foram moldados corpos de prova com solução THF e submetidos a recozimento térmico a 170 °C por 15 minutos. Após a desmoldagem, os resultados obtidos indicaram pouca aderência do PVC ao molde de aço.

Outra experimentação semelhante foi realizada utilizando piridina a uma temperatura de 65 °C, onde o PVC foi desidroclorado termicamente nesta solução. Os corpos de prova moldados com solução de piridina apresentaram aderência ao aço após o recozimento termicamente. Essas experimentações revelaram que cloretos alélicos eram os principais responsáveis pela aderência do PVC ao aço.

Com base nas temperaturas estabelecidas por Boerio e Shah (2007), realizou-se uma análise da qualidade superficial das peças de PVC. Rabinovitch (2003) estudou a qualidade superficial através de um equipamento de medidor de brilho e por meio de microscopia óptica com aumento de 700 vezes. Conforme ilustrado na Figura 2, é possível observar que a variação de temperatura de processo também afeta a qualidade superficial do material. À medida que essa temperatura aumenta, a qualidade superficial da peça reduz. O acabamento superficial é considerado “Brilhoso” quando os valores atingem o ângulo de 85°, aumentando seu nível em conjunto conforme a temperatura do processo.

Figura 2: Micrografias eletrônicas de varredura da superfície do perfil extrudado à (a) 127 °C, (b) 138 °C, (c) 149 °C, (d) 160 °C

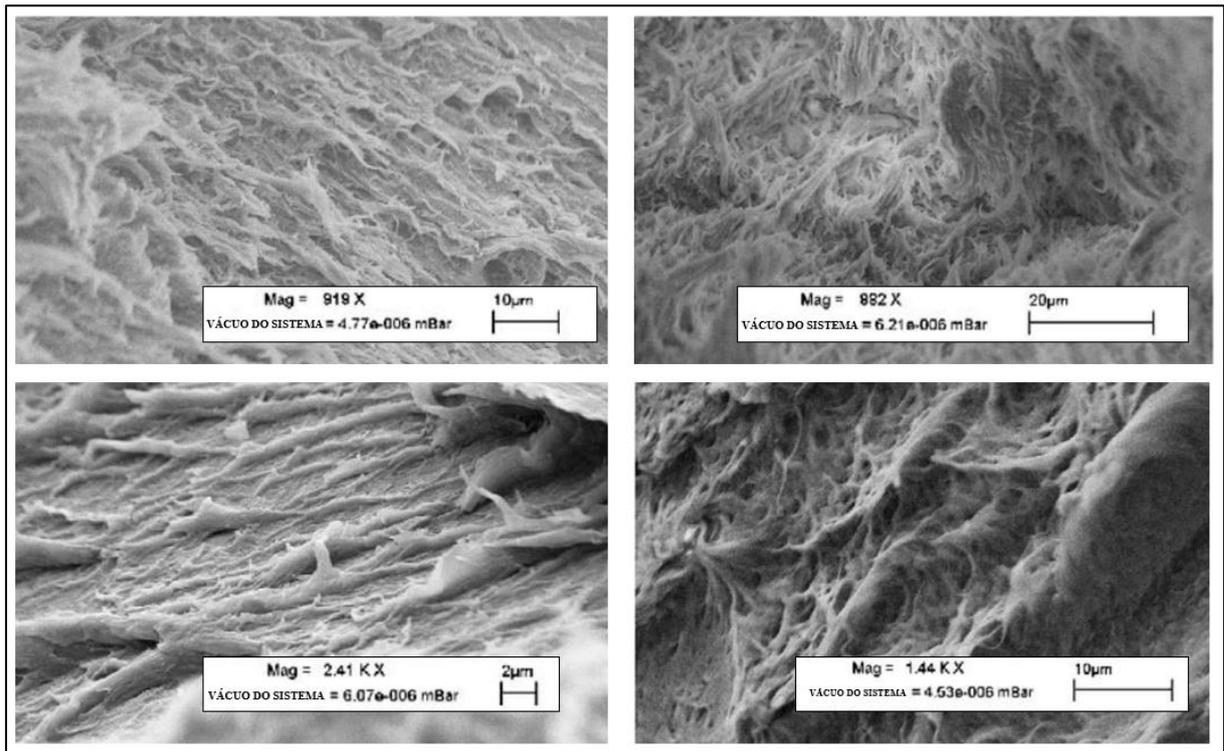


Fonte: Adaptado de Rabinovitch (2003)

A análise realizada sobre o material extrusado a baixas temperaturas indica que a superfície é mais rugosa devido à repulsão entre os aglomerados do composto. Os resultados obtidos mostram que a variação da temperatura pode alterar significativamente a aparência dos produtos extrusados. No entanto, durante os estudos, observou-se que a elevação da temperatura acima de 200 °C causa a fusão do polímero, o que define um limite superior máximo das temperaturas de processamento.

Para a análise das peças injetadas em PVC, adotou-se a abordagem proposta por Madaleno e Thomsen (2010) para investigar as morfologias e suas propriedades térmicas. A desidrocloração, previamente mencionada por Boerio e Shah (2007), foi considerada, sendo destacado que essa desidrocloração reduz a estabilidade térmica dos nanocompósitos de PVC. Os referidos autores conduziram experimentos para avaliar o impacto da desidrocloração no PVC injetado sobre a morfologia da superfície da peça. Esses experimentos foram realizados a uma temperatura de resfriamento de 70 °C, durante um período de 3 horas.

Figura 3: Micrografia da amostra no seu canto superior esquerdo (a), canto superior direito (b), canto inferior esquerdo (c) e canto inferior direito (d)



Fonte: Adaptado de Madaleno e Thomsen (2010)

A Figura 3 apresenta micrografias da amostra em diferentes regiões: canto superior esquerdo (a), canto superior direito (b), canto inferior esquerdo (c) e canto inferior direito (d), a figura ilustra claramente as variações na morfologia da peça a 70 °C em diferentes partes do molde. Os autores observaram que essa variação na morfologia aumenta à medida que a temperatura do PVC se eleva.

Com base nas variações de rugosidade do material decorrentes da temperatura, conforme abordado por Mykhailyshyn, Savkiv e Maruschak (2022), os parâmetros de funcionamento dos mecanismos de manipulação serão especificados, permitindo a escolha adequada para lidar com as diferentes condições apresentadas pelo PVC ao final do processo.

2.2 DISPOSITIVOS DE PRESSÃO PNEUMÁTICA

Os dispositivos de pressão são equipamentos que utilizam a pressão do ar para gerar funções mecânicas em diversas áreas que requerem força para ativar ou movimentar componentes. Esses dispositivos são embasados no princípio de Pascal, conforme declarado

por Helerbrock (2023), que estabelece que a pressão aplicada em um fluido confinado é transmitida igualmente em todas as direções. Essa propriedade permite à amplificação da força aplicada, possibilitando o trabalho com materiais como o PVC flexível em diferentes faixas de temperatura.

2.2.1 Princípio de Pascal

O Princípio de Pascal, criado por Blaise Pascal em 1623, conforme Helerbrock (2023), é um conceito fundamental na engenharia mecânica e hidráulica. Ele estabelece que a pressão exercida em um fluido ou sólido é proporcional à área em que a força é aplicada. Essa relação é apresentada pela Equação 1, onde a pressão (P) é igual à força (F) sobre a área (A).

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

A pressão é um parâmetro essencial em muitos processos industriais, especialmente em sistemas pneumáticos, que são amplamente utilizados em linhas de produção e equipamentos automatizados. Para gerar a pressão necessária, é utilizado um dispositivo conhecido como compressor de ar. Esse equipamento, alimentado por energia elétrica ou combustível, captura o ar ambiente e armazena em um reservatório para posterior uso nos sistemas pneumáticos. O engenheiro deve dimensionar o compressor apropriado para a aplicação em questão, levando em consideração o menor consumo de energia possível e a eficiência do sistema como um todo.

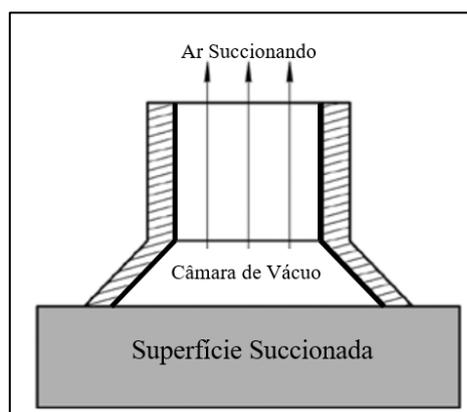
Além disso, a pressão é um fator crítico em muitos outros processos industriais, tais como a extrusão, onde é necessário controlar a pressão do material durante o processo de produção. A seleção adequada do equipamento e a configuração correta do processo de produção são fundamentais para garantir que a pressão seja mantida dentro dos limites necessários para uma produção eficiente e segura. Em resumo, a compreensão e controle da pressão é um aspecto fundamental da engenharia mecânica e um fator chave para o sucesso de muitos processos e sistemas.

2.2.2 Ventosas Pneumáticas

De acordo com Venture (2021), a movimentação de componentes ou peças na indústria pode requerer o uso de ventosas pneumáticas, que são dispositivos fabricados com materiais flexíveis capazes de reduzir a pressão do ar em seu interior ao entrar em contato com uma superfície. Esses dispositivos apresentam como característica distintiva sua flexibilidade, permitindo que se deformem para se adaptarem à forma da superfície em contato, o que amplia suas possibilidades de aplicação em diferentes contextos industriais. Além disso, as ventosas pneumáticas têm se mostrado um modo ergonômico para algumas aplicações, contribuindo para a redução de lesões relacionadas ao trabalho e garantindo maior eficiência e produtividade no ambiente industrial.

A eficiência das operações de manuseio está diretamente relacionada à seleção adequada das ventosas, cujo design é considerado crítico para aplicações específicas. O desenho das ventosas também depende do método de criação do vácuo na câmara de vácuo (Figura 4), em que o ar interno é comprimido a fim de alcançar a condição ideal de vácuo absoluto. Quando a ventosa entra em contato com uma superfície, ocorre uma deformação em seu diâmetro externo devido à pressão interna, resultando em um aumento de volume. Para manter a pressão interna estável, é necessário utilizar um gerador de vácuo.

Figura 4: Câmara de Vácuo



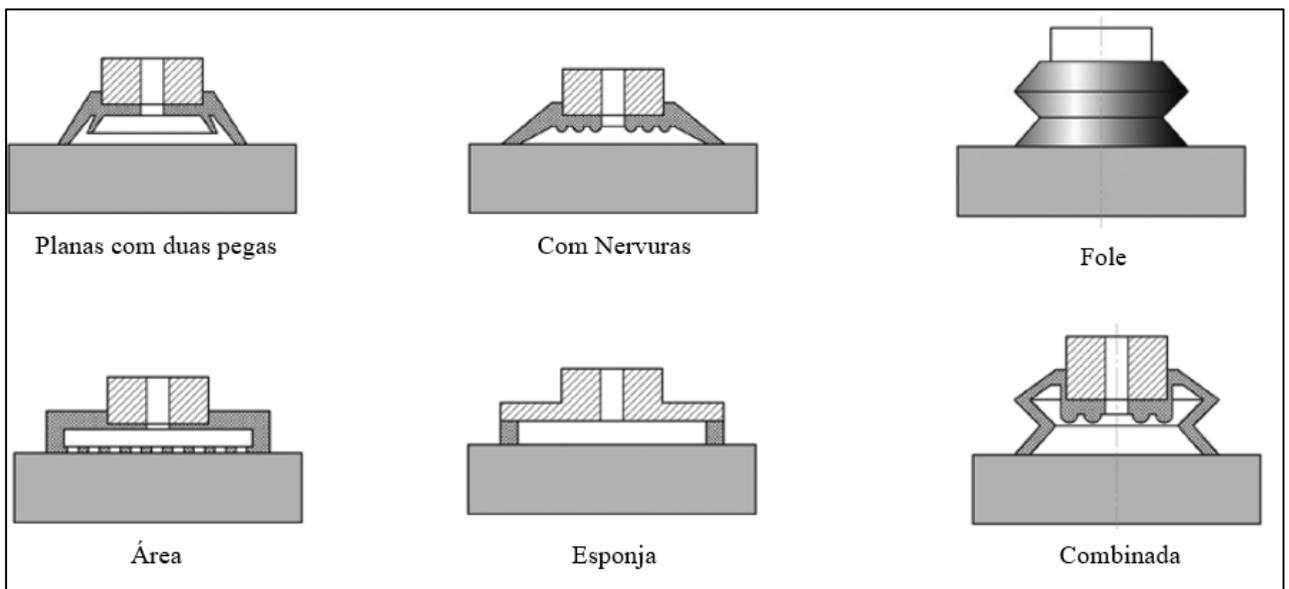
Fonte: Adaptado de Mykhailyshyn, Savkiv e Maruschak (2022)

Para a seleção adequada das ventosas, é necessário realizar pesquisas em diferentes áreas de atuação, analisando o material e as cargas necessárias. Mykhailyshyn, Savkiv e

Maruschak (2022), classificaram as aplicações de objetos que podem ser fixados por meio da criação de vácuo. Esses dispositivos podem ser divididos em três tipos: alto contato, baixo contato e sem contato. Ventosas de alto contato exercem pressão intensa sobre a superfície do objeto, enquanto aquelas de baixo contato têm apenas a força peso da ventosa aplicada sobre o objeto. Já as ventosas sem contato geram um vácuo forte o suficiente para segurar o objeto sem precisar tocá-lo.

Schaffrath (2021) descreve diversos tipos de ventosas: planas com duas pegas (para elevadas rugosidades), com nervuras (para objetos flexíveis), fole (para manipulação de objetos delicados), de área (para baixo peso), esponjosas (para objetos lisos) e combinadas (para aplicação em esgoto e água bruta), todas apresentadas na Figura 5.

Figura 5: Geometrias de ventosas à vácuo



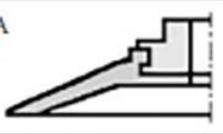
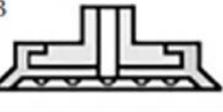
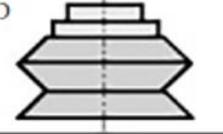
Fonte: Adaptado de Mykhailyshyn, Savkiv e Maruschak (2022)

Fahning (2020) verificou que frequentemente os parâmetros da superfície do objeto afetam as características de elevação das ventosas. De acordo com Mykhailyshyn, Savkiv e Maruschak (2022), a criação do vácuo depende do volume da cavidade interna da ventosa e da superfície do objeto manipulado. Eles também apontam que a vida útil da ventosa diminui com base nesses parâmetros, especialmente quando se trata de objetos com superfícies quentes.

Além do desenho e da superfície, o movimento da ventosa é um parâmetro operacional importante na seleção adequada da ventosa. A análise da deformação da ventosa durante as acelerações, desacelerações e suas direções é fundamental para a manipulação de objetos com ventosas de diferentes desenhos. A Figura 6 mostra que, dependendo do desenho da ventosa,

seu deslocamento será mais eficiente em condições verticais, horizontais, de curso vertical (CVE) ou rotação vertical (RV).

Figura 6: Condições de deslocamento para determinadas geometrias de ventosas

| Desenho \ Critério | Vertical | Horizontal | CVE | RV |
|--|--|--|---|--|
| A  |  |  |  |  |
| B  |  |  |  |  |
| C  |  |  |  |  |
| D  |  |  |  |  |

 Eficácia  Ineficácia

Fonte: Adaptado de Mykhailyshyn, Savkiv e Maruschak (2022)

Com a determinação dos principais parâmetros, Mykhailyshyn, Savkiv e Maruschak (2022), possibilitaram derivar uma equação matemática para a força de elevação das ventosas (F_e), que está relacionada com a área interna da ventosa (S), o coeficiente de redução de área após a sua deformação (K_s), a pressão atmosférica (P_a), a pressão residual dentro da câmara de vácuo (P_r), o coeficiente de alterações de pressão atmosférica (K_a) e o coeficiente de reserva de força entre a ventosa e a superfície do objeto (K). A equação 2 é dada por:

$$F_e = S \cdot K_s \cdot (P_a \cdot K_a - P_r) \cdot K \quad (2)$$

Os parâmetros adotados por Mykhailyshyn, Savkiv e Maruschak (2022) para a formulação incluem um coeficiente K_s de 0,95 a 1,00, o coeficiente K_a aproximadamente igual a 0,90 e um fator K que leva em consideração o fluxo de ar entre a superfície da peça e a ventosa, variando de 1,15 a 1,50. Esses parâmetros são utilizados especificamente para o caso de borracha porosa e devem ser igualados as forças de desmoldagem das peças injetadas em PVC.

2.3 FORÇAS REQUERIDAS PARA A DESMOLDAGEM

A desmoldagem de peças injetadas é frequentemente realizada por meio da extração por pinos, como mencionado por Nunes (2018), devido à sua facilidade de colocação. Nesse método, uma força é aplicada em um molde contra um ou mais pinos, resultando na remoção do material acabado de dentro do molde. Embora esse procedimento seja prático e eficiente para a desmoldagem das peças, as forças aplicadas durante a extração podem causar danos à ferramenta e à peça.

Para analisar o comportamento das forças necessárias nos processos de desmoldagem de peças injetadas em PVC, Hopkinson e Dickens (1999) realizaram estudos com peças moldadas em diferentes condições de processamento. Esses estudos revelaram relações importantes entre esses parâmetros e as forças de desmoldagem obtidas.

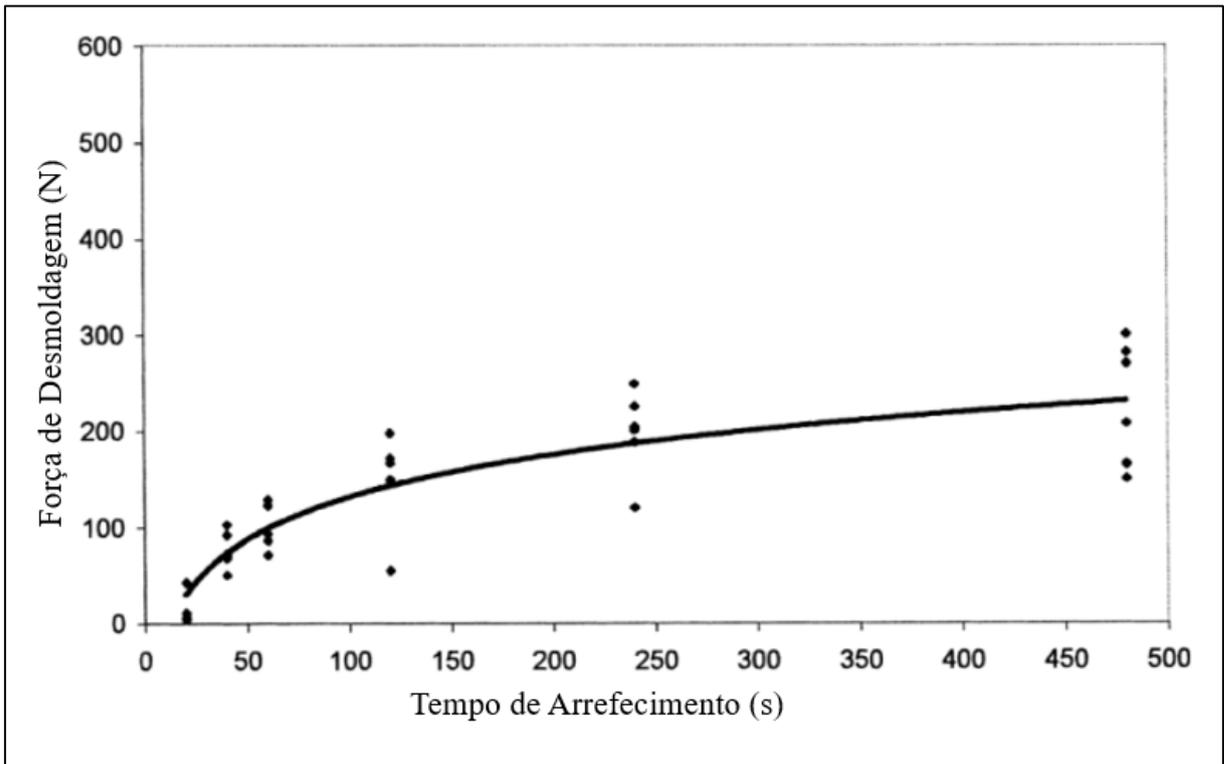
Os estudos conduzidos por Hopkinson e Dickens (1999) revelaram que, à medida que o material é resfriado, ocorre contração no núcleo da molde. Consequentemente, como afirmado por Rabinovitch (2003), observa-se um aumento na rugosidade superficial e nas forças de desmoldagem. Para estimar a força necessária em diferentes situações de desmoldagem, Glanvill e Denton (1965) desenvolveram a Equação 3, que estabelece uma relação entre os parâmetros de processamento do molde injetado como o coeficiente de expansão térmica (α), a temperatura de fusão do material (T_m), o diâmetro do núcleo (D), a espessura da peça moldada (t), o módulo de Young (E), o coeficiente de atrito (μ), a área de contato (A) e o coeficiente de Poisson (γ). Essa equação desempenha um papel fundamental na análise e otimização do processo de desmoldagem de peças injetadas.

$$F_d = \frac{\alpha \cdot (T_m - T_e) \cdot D \cdot E \cdot A \cdot \mu}{D \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot t} - \left(\frac{D \cdot \gamma}{4 \cdot t} \right) \right]} \quad (3)$$

A relação entre a força de desmoldagem (F_d) e a temperatura de extração do material (T_e) foi investigada por Hopkinson e Dickens (1999). Os pesquisadores realizaram experimentos nos quais mantiveram os demais parâmetros constantes, enquanto variaram o tempo de resfriamento para obter diferentes temperaturas de extração. O objetivo principal desses experimentos foi determinar as forças requeridas em diferentes condições de

temperatura. Os testes foram conduzidos utilizando o método de extração por pinos, amplamente empregado na indústria de moldagem. Os tempos de resfriamento variaram de 20 a 480 segundos, e os resultados obtidos revelaram uma relação entre o tempo de resfriamento e as forças de desmoldagem, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 7: Força de desmoldagem em função ao tempo de arrefecimento



Fonte: Adaptado de Hopkinson e Dickens (1999)

O comportamento mostrado na Figura 6 revela que existe uma relação entre o tempo de resfriamento, a temperatura de extração e as forças de desmoldagem. Conforme o tempo de resfriamento aumenta, resultando em uma diminuição da temperatura de extração, observa-se um aumento nas forças de desmoldagem. Esses resultados corroboram a equação proposta por Glanvill e Denton (1965) e evidenciam que as forças de desmoldagem podem atingir magnitudes de até aproximadamente 300 Newtons. É importante ressaltar que, mesmo para tempos de resfriamento iguais, ocorre uma variação nas forças de desmoldagem. Esse fenômeno pode ser explicado pelas variações microestruturais intrínsecas ao processo de fusão do material, como destacado por Hopkinson e Dickens (1999).

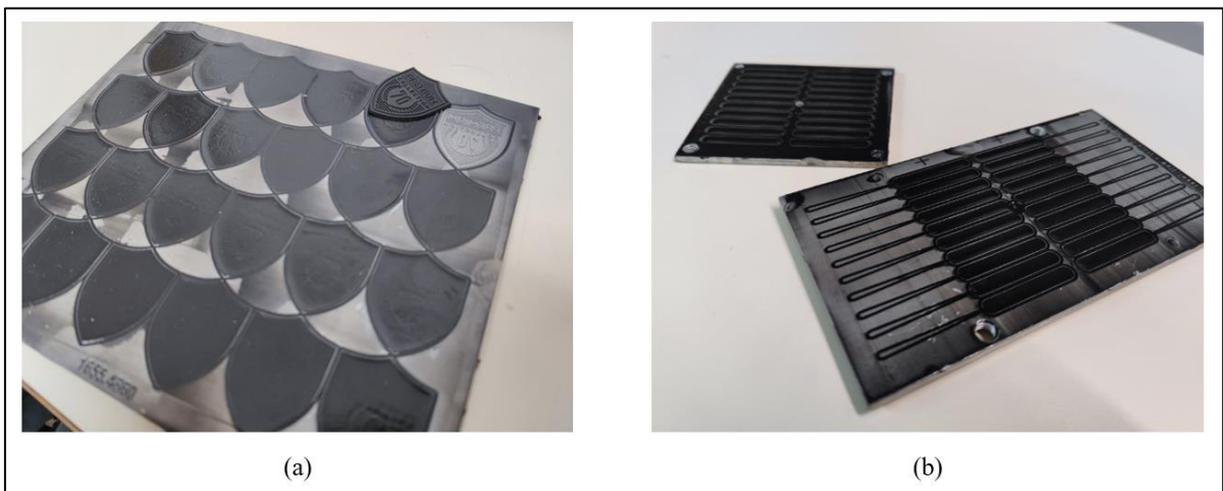
3 METODOLOGIA

Este segmento descreve os procedimentos metodológicos adotados para avaliar as forças de desmoldagem do PVC flexível injetado. O objetivo foi desenvolver uma correlação entre a temperatura de processamento, a qualidade superficial, a geometria da peça e as forças de desmoldagem necessárias para utilizar uma ventosa pneumática na desmoldagem do molde.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

Os moldes utilizados na injeção podem variar de acordo com o projeto, podendo ser destinados à produção de peças simples ou complexas em quantidades variadas. No presente estudo, os moldes utilizados foram fornecidos pela empresa Qualitá Etiquetas e Brindes. Em sua produção, aproximadamente 80% dos moldes possuem 20 cavidades, 10% possuem 10 cavidades e 10% possuem cavidades diversas. Esses moldes são fabricados em aço manganês e possuem dimensões variadas de acordo com a quantidade de cavidades. Além disso, eles podem ser classificados como moldes de injeção abertos ou fechados. A Figura 8 ilustra um exemplo de molde de injeção aberto e um molde fechado.

Figura 8: Molde de injeção (a) aberto e (b) fechado



Fonte: Autor (2023)

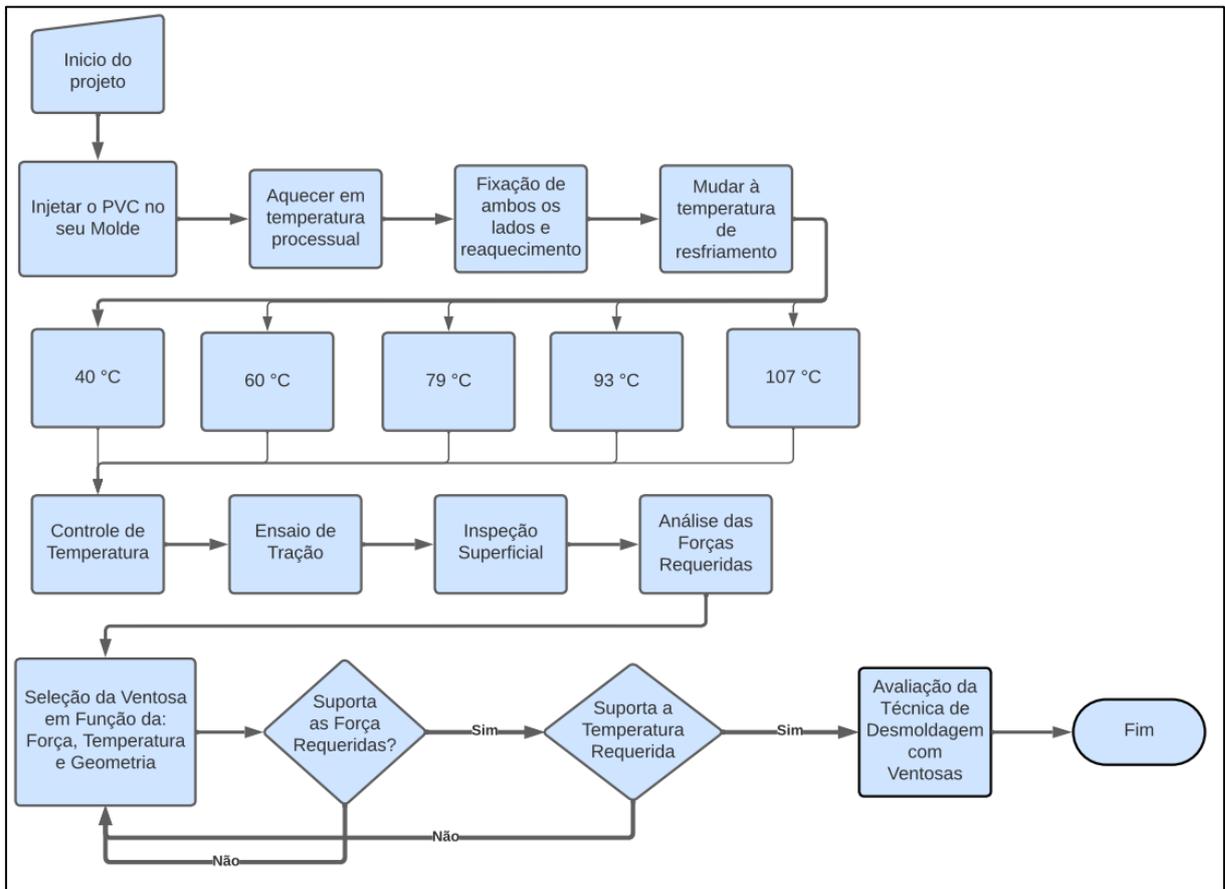
A remoção das peças atualmente é realizada utilizando uma haste pontiaguda que perfura o PVC para a remoção manualmente. Com o objetivo de substituir esse método sem alterar a geometria dos moldes, foram empregadas ventosas pneumáticas para realizar a sucção do PVC injetado nos moldes. Essas ventosas devem ser capazes de suportar as temperaturas de

resfriamento adequadas, garantindo um esforço mínimo durante o processo de remoção e não afetando a qualidade superficial da peça.

3.2 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO

Para o desenvolvimento da relação da temperatura com a superfície da peça injetada e as forças de elevação requeridas para a desmoldagem das peças através do sistema de sucção pneumática por ventosa, se fez a proposta de implementação, segundo o fluxograma da Figura 9, de preparar os moldes injetados. Os moldes são aquecidos em temperatura de processamento e depois resfriados em temperaturas distintas. Em seguida, faz-se o ensaio mecânico de tração no molde, captando os dados de forças de desmoldagem requeridas no processo e após a desmoldagem do mesmo verifica-se o acabamento superficial da peça injetada para a temperatura proposta. Com os dados de forças obtidos utiliza-se a Equação 1 para calcular a pressão requerida e verificar se as ventosas catalogadas têm suporte para fazer uma força suficiente para a desmoldagem, além de verificar se ela suporta a temperatura de resfriamento proposta, a fim de validar sua utilização no processo.

Figura 9: Fluxograma das atividades desenvolvidas



Fonte: Autor (2023)

3.2.1 Ferramentas de Pesquisa e de Ensaio

Para a realização deste estudo, foram necessários os seguintes elementos: amostras de peças injetadas em PVC Plastisol LT 205 ET para análise da superfície e das forças de desmoldagem requeridas, um dispositivo de ensaio para a realização de ensaios mecânicos e catálogos de ventosas para análise de compatibilidade com o processo e avaliação de suas propriedades.

3.2.1.1 PVC PLASTISOL

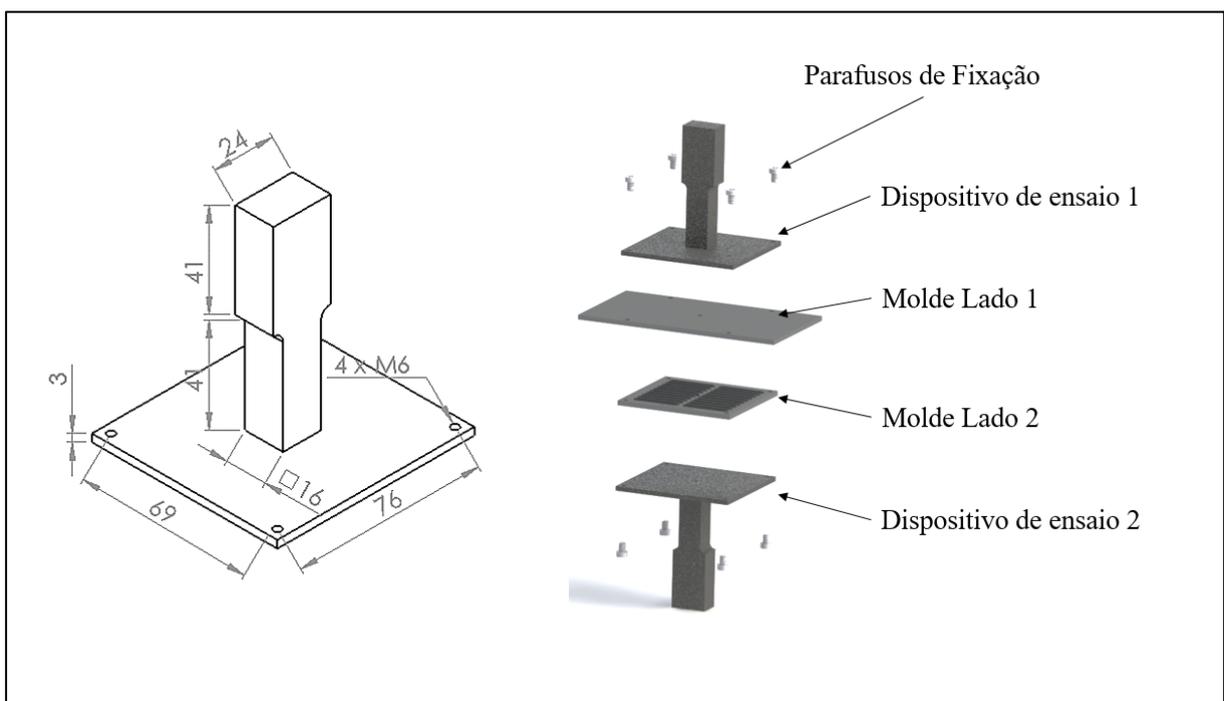
O presente estudo utilizou o material PLASTISOL LT 205 ET, fornecido pela Liton Chemicals, que consiste na dispersão de PVC em plastificante. Esse material é especialmente desenvolvido para aplicações em etiquetas, brindes, chaveiros e peças vinílicas em geral. Ele está disponível em diversas cores, viscosidades e durezas, tanto na forma opaca quanto

transparente. A temperatura de fusão do PLASTISOL LT 205 ET é de 220 °C, e o tempo de aquecimento das peças injetadas, variam de 50 s a 3 min, dependendo da espessura da peça utilizando fornos tradicionais.

3.2.1.2 Dispositivo de Ensaio

Para a realização do ensaio mecânico, foi necessário construir um dispositivo de ensaio que foi acoplado aos moldes de PVC e à máquina de ensaios universal. Essa estrutura foi fabricada em aço-carbono 1020 e consiste em duas chapas metálicas de 103 x 97 mm que foram soldadas a duas hastes de mesmo material, a fim de facilitar a fixação no equipamento de ensaio. As chapas de aço contam com 4 furos roscados M6 em seus vértices para fixar o dispositivo de ensaio aos moldes de injeção. A Figura 10 apresenta uma representação da geometria do mecanismo.

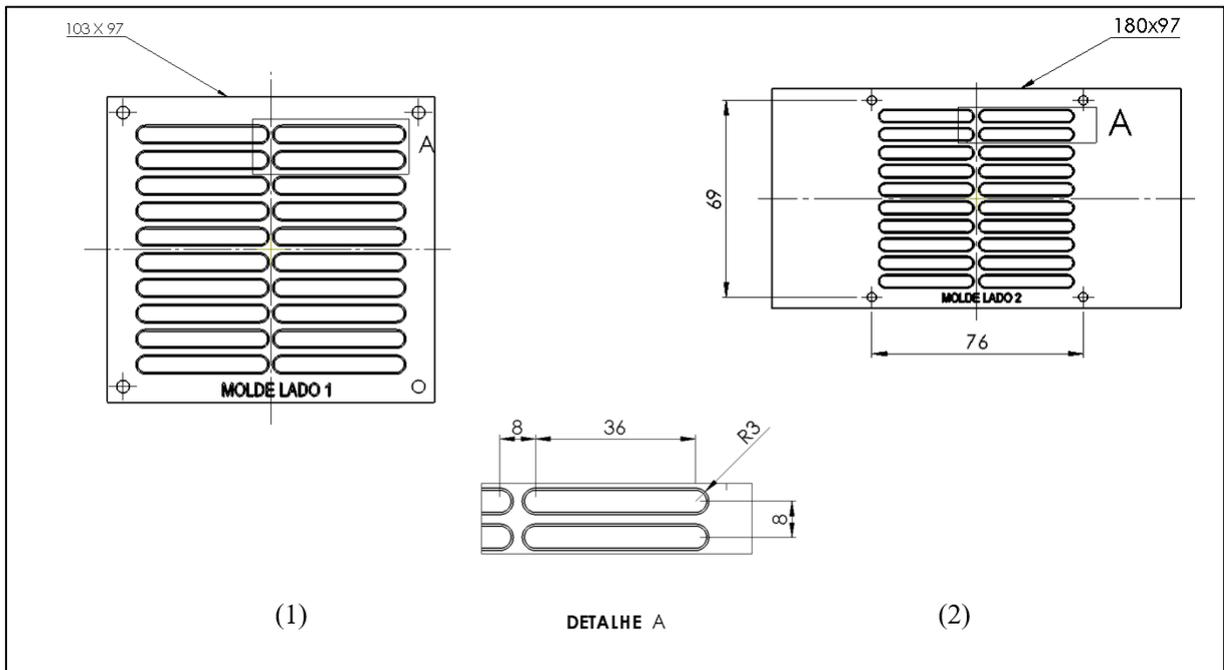
Figura 10: Estrutura metálica para ensaio de tração



Fonte: Autor (2023)

O dispositivo foi integrado a dois moldes de injeção fechados, caracterizados por geometrias simplificadas, com o propósito de minimizar as variáveis relacionadas à aderência do PVC ao molde. A Figura 11 ilustra o formato e a configuração geométrica dos moldes que foram acoplados ao dispositivo.

Figura 11: Geometria dos moldes do lado (1) e (2)



Fonte: Autor (2023)

No âmbito deste estudo, emprega-se o PVC com espessura de 8 mm, o qual foi injetado em no molde fechado da Figura 11. Esse molde foi fixado no dispositivo de ensaio utilizando parafusos, conforme ilustrado na Figura 10. Posteriormente, o molde foi fixado na máquina de ensaios universal, dando início ao processo de ensaio.

3.2.1.3 Ventosa

Tendo como fornecedor ARGOS *Smart Engineering Gripper Application*, as ventosas que estavam sendo avaliadas tiveram variáveis muito importantes para serem validadas. As ventosas estavam sendo submetidas a forças axiais de elevação em temperaturas variadas de acordo com o resfriamento estabelecido, logo para sua validação a ventosa devia suportar a temperatura de desmoldagem e ter força o suficiente para a desmoldagem.

Considerando que as ventosas testadas foram de modelos distintos, foi considerado também o tipo de ventosa e sua afinidade com a rugosidade superficial da peça injetada. Além disso, a ventosa está com a restrição de geometria do bocal para a mínima possível devido ao tamanho das peças injetadas.

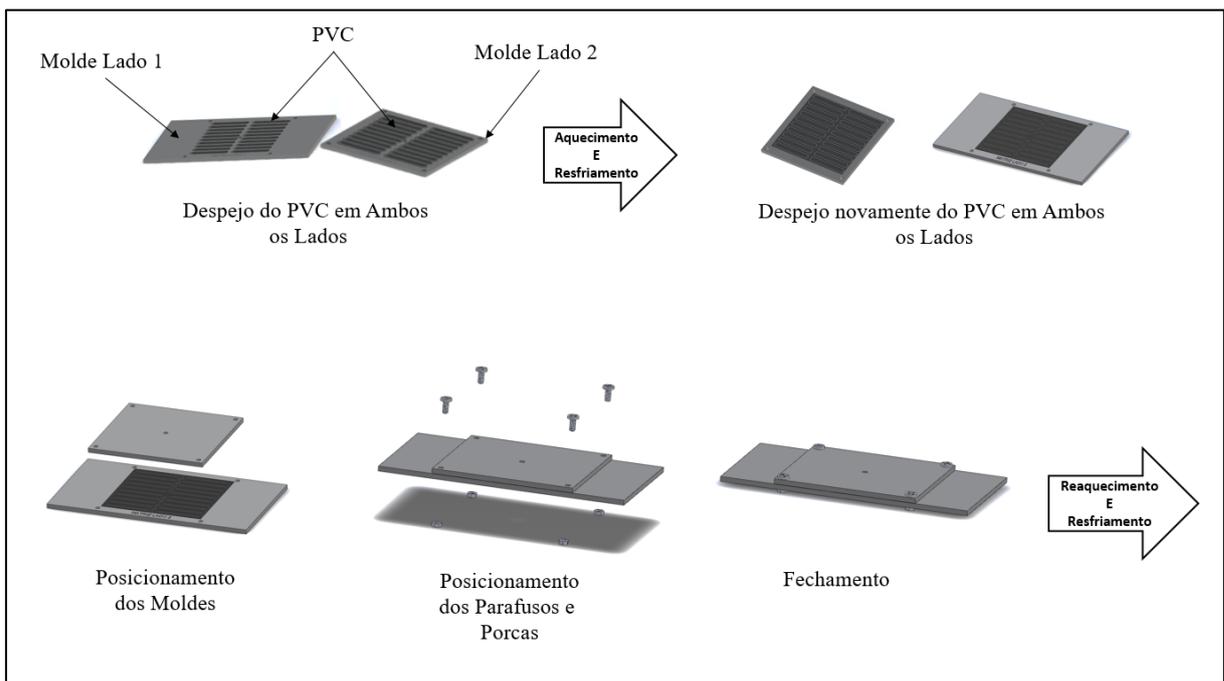
3.2.2 Métodos

Para alcançar o objetivo deste estudo, foram adotados métodos essenciais para garantir a confiabilidade dos testes, desde a preparação do molde injetado até a validação da ventosa selecionada.

3.2.2.1 Preparação do Molde

No início, foi realizada a preparação do molde injetado. O molde selecionado para os ensaios é um molde fechado padrão, fornecido pela empresa Qualita Brinde e Etiquetas, com uma geometria orientada nas duas faces do molde. Ele possui uma profundidade de 4 mm em cada lado e um comprimento de 180 x 97 mm² e o outro lado de 103 x 97 mm². O PVC foi despejado manualmente, em seu estado líquido, em ambos os lados do molde pela falta de disponibilidade da injetora e, em seguida, submetido a um processo de aquecimento em um forno Mufla a 220 °C por 3 minutos, e resfriado em água para a solidificação. Após a primeira solidificação, o procedimento de despejo foi repetido em cima do material recém solidificado de modo que neste segundo processo o PVC cobrisse totalmente as cavidades dos moldes, que agora permanecerão fechados por meio de quatro parafusos em suas extremidades, seguidos de um novo recozimento à 220 °C por 2 minutos como representado na Figura 12.

Figura 12: Sequência de preparação para o segundo aquecimento



Para realizar dois aquecimentos do PVC injetado, foi utilizado um forno Mufla, a temperatura de 220 °C, conforme especificações fornecidas pela Liton Chemicals. Considerando que a espessura da peça injetada é de 8 mm, foi necessário um tempo de aquecimento de 3 min, uma vez que esse é o molde mais espesso disponível. No segundo aquecimento foi aquecido nos mesmos parâmetros.

Após o processo de aquecimento da peça moldada, o molde foi imerso em um recipiente contendo água, permitindo a remoção dos parafusos que mantêm o molde fechado enquanto o material no interior do molde ainda não está solidificado. Em seguida, a peça foi aquecida novamente, sem a presença dos parafusos, a diferentes temperaturas: 40 °C, 60 °C, 79 °C, 93 °C e 107 °C, conforme realizado por Boerio e Shah (2007), e mantidas os mais próximos dessas temperaturas com o auxílio de um soprador de ar por 1 minuto durante a realização do ensaio. Essa variação de temperatura foi monitorada com uma câmera térmica durante todo o processo e tem o objetivo de analisar o comportamento da força de desmoldagem em diferentes condições térmicas.

3.2.2.2 Método de teste de tração e adesão para peças poliméricas

De acordo com os requisitos estabelecidos pela norma ASTM D429 (2014), foram definidos métodos para a realização de ensaios de tração em espécimes de polímeros e metais. Este procedimento foi empregado para avaliar a resistência de adesão do PVC em metais sob condições específicas de temperatura e velocidade.

O ensaio de tração foi conduzido utilizando o equipamento de ensaios universais EMIC dl-20000, capaz de realizar ensaios em uma ampla variedade de materiais, incluindo metais e polímeros. Uma célula de carga com capacidade de 100 N foi utilizada, sendo uma escolha adequada devido às relativamente baixas forças envolvidas no teste. Além disso, a norma ASTM D429 (2010) estabelece parâmetros para a configuração da máquina de ensaio. Conforme a norma, os 25 corpos de provas propostos, devem ser submetidos a uma força axial constante e a uma velocidade uniforme de 2,40 - 24,00 mm/min. Para este estudo, foi selecionada a velocidade de 2,54 mm/s, seguindo a abordagem utilizada por Boerio e Shah (2007) em seus testes laboratoriais. Além disso, buscou-se manter as condições de temperatura o mais próximo possível do proposto. É importante ressaltar que, ao comparar os efeitos de diferentes temperaturas, foi crucial manter as condições das amostras as mais controladas

possíveis com o auxílio de um soprador de ar e a instalação de uma câmara térmica, a fim de evitar qualquer interferência nos resultados experimentais.

Recomenda-se repetir o ensaio em pelo menos três corpos de prova para cada amostra de temperatura de resfriamento variada, descartando aqueles que apresentem falhas. Após a realização do ensaio, o software da máquina fornecerá o esforço nominal, obtido por meio do indicador de extensão do PVC, que também indicará a alteração da aderência superficial. Por fim, é necessário calcular a média e o desvio padrão dos valores obtidos a partir da série de testes realizados. Isso é realizado captando os valores extremos dos testes e calculando a média entre eles.

3.2.2.3 Avaliar a qualidade superficial das peças

O método adotado para medir a qualidade da superfície das peças de PVC consiste na utilização do Medidor de Brilho da empresa BYK configurado para a angulação de aplicação de 60 ° para cada amostra. Esse dispositivo é capaz de capturar a variação de brilho presente nas superfícies das peças. Foi empregado após a etapa de desmoldagem do material injetado em cada temperatura de resfriamento proposta, com a finalidade de investigar se a temperatura de resfriamento exerce influência na qualidade superficial das peças, além da força de desmoldagem. Para garantir uma análise comparativa adequada, foram coletadas 5 amostras de cada ensaio, em pontos centrais onde apresentavam maior concentração de calor visando obter uma média representativa.

3.2.2.4 Validação da Ventosa pneumática

A validação da ventosa foi analisada mediante a comparação dos dados obtidos das forças de desmoldagem com as informações disponíveis no catálogo da *ARGOS Smart Engineering Gripper Application*. Além disso, foi verificado se a ventosa possui resistência adequada à temperatura de resfriamento à qual será mantida. Caso a ventosa não atenda a essas condições, o processo será repetido encontrando uma ventosa que até satisfaça ambas as exigências. Outro aspecto relevante é que a ventosa deve possuir uma geometria de bocal reduzida, a fim de possibilitar sua adaptação ao maior número possível de moldes.

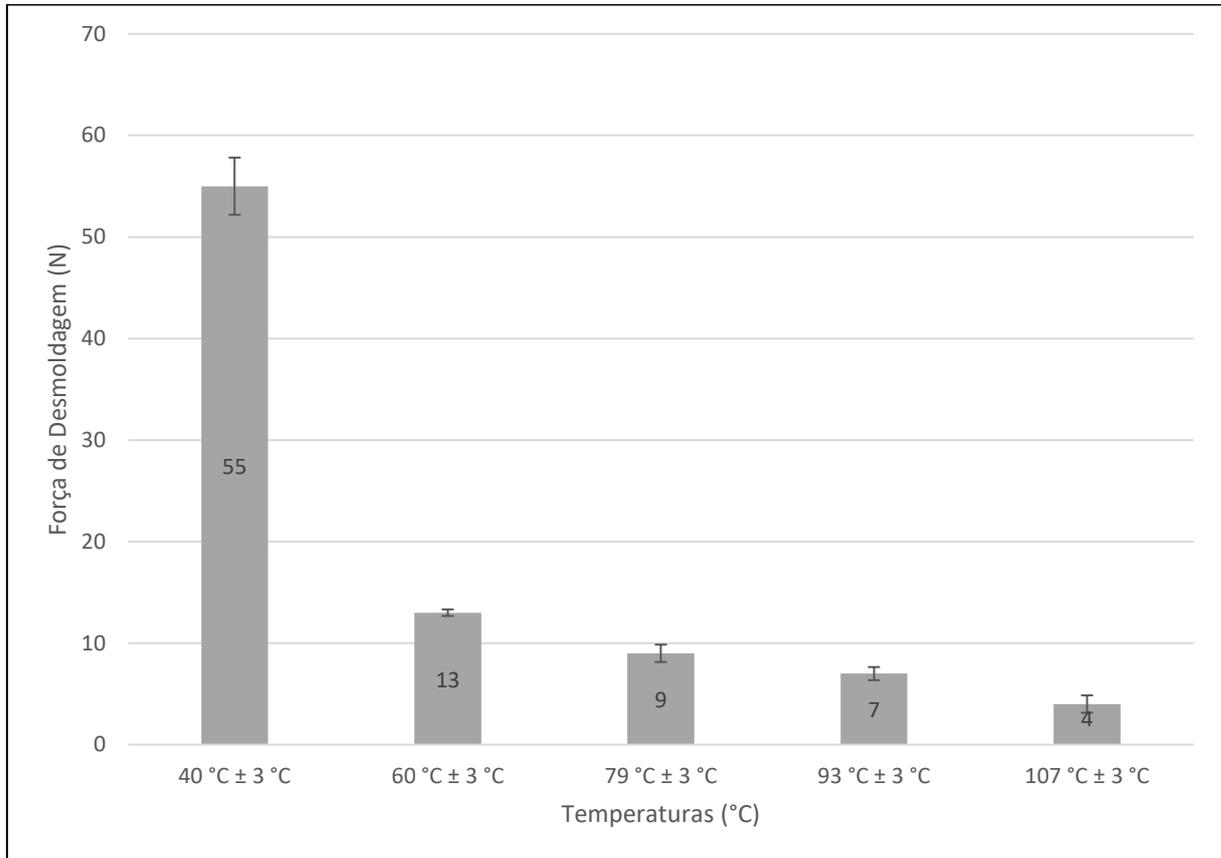
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados decorrentes das metodologias delineadas no capítulo anterior. Os dados obtidos serão analisados e discutidos detalhadamente, com o objetivo de elucidar as conclusões derivadas dessas observações.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Os resultados obtidos dos parâmetros previamente delineados e descritos no item 3.2.2.2, reforçam a tendência de redução das forças de desmoldagem à medida que a temperatura de resfriamento é aumentada, conforme ilustrado na Figura 13 e reforçada no Apêndice A, que representa a relação entre a força de desmoldagem e a temperatura de resfriamento. Notavelmente, eles também indicam que a variação das forças acima de 60 °C não é tão significativa quando comparada aos dois ensaios de temperaturas mais amenas, 40 °C e 60 °C, que apresentaram diferenças de aproximadamente 77% nos resultados, conforme discutido no item 2.1 e observado por Boerio e Shah (2007), quando os polímeros forem resfriados a temperaturas de 60 °C ou superior, os grupos silanol condensaram-se para formar siloxanos e os bicarbonatos de amina foram eliminados permitindo que as moléculas de PVC se penetrassem com os siloxanos e assim que o cloreto alílico reagissem com o amina. Quanto maior a temperatura de resfriamento a reticulação do material do molde tornou-se excessiva e as moléculas do PVC não conseguiram interpenetrar no molde e a adesão diminuiu. Isso sugere a viabilidade de conduzir a desmoldagem do polímero em temperaturas mais próximas dos 60 °C, tornando o processo de extração sob cargas suficientemente menores e temperatura adequada para garantir a longevidade do método de extração pelas ventosas, além de reduzir as chances de danos na superfície final do produto.

Figura 13: Comportamento da força de desmoldagem em função da temperatura de desmoldagem



Fonte: Autor 2023

Após a obtenção dos resultados, foi realizada a aplicação prática do método de extração por ventosas. À medida que a temperatura ultrapassava os 60 °C, observou-se que as peças começavam a apresentar deformações permanentes. Esse fenômeno tem o potencial de comprometer tanto a qualidade superficial da peça quanto a vida útil da ventosa. A Figura 14 ilustra que a geometria da parte inferior da ventosa provocou deformações permanentes no PVC após o processo de desmoldagem, levando o material a adquirir as formas características do dispositivo. Esses resultados enfatizam a importância de manter as temperaturas de desmoldagem mais baixas possíveis para garantir a integridade da peça e a eficácia do método de extração.

Figura 14: Deformação superficial do PVC a temperaturas acima de 60 °C



Fonte: Autor 2023

Considerando a observação visual de que a qualidade superficial das peças mostradas na Figura 13, diminuiu à medida que a temperatura de desmoldagem aumenta, procedeu-se à verificação utilizando instrumentos especializados para analisar o brilho das peças. Esse método foi empregado como uma estratégia para manter um rigoroso controle de qualidade sobre o produto final.

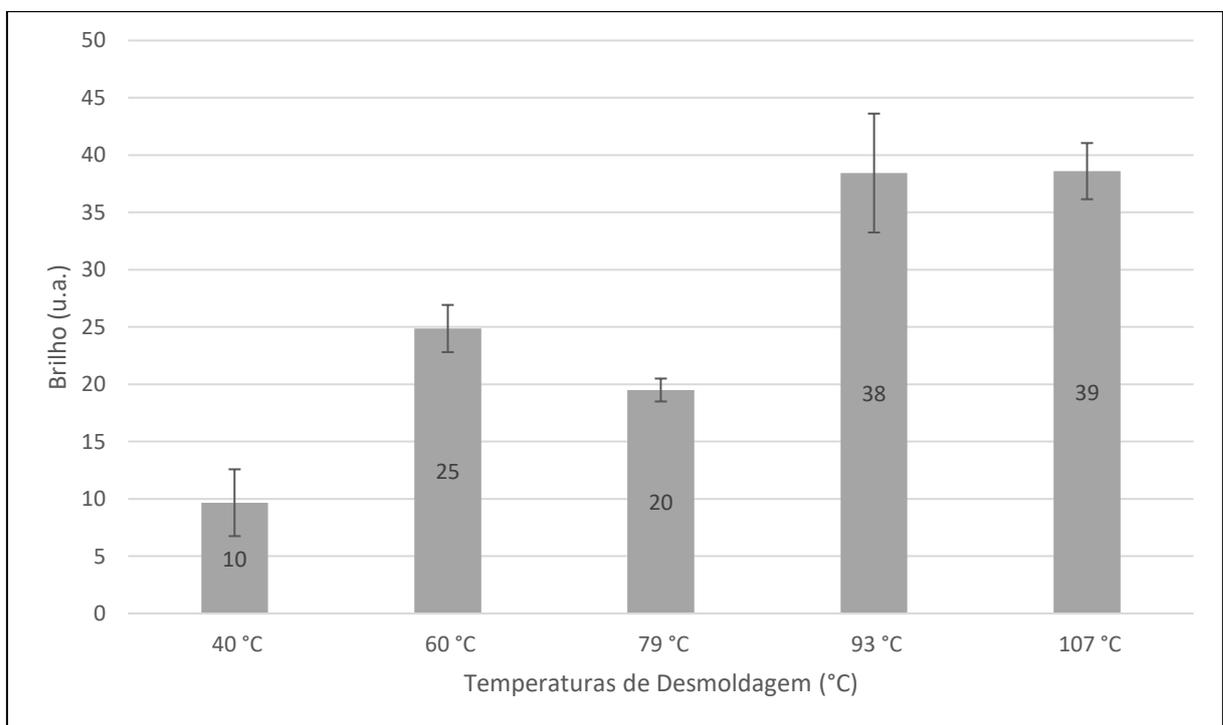
4.2 RESULTADOS DO MEDIDOR DE BRILHO

Após a desmoldagem das peças injetadas, realizou-se uma análise detalhada da qualidade superficial utilizando os parâmetros definidos no item 3.2.2.3. As amostras foram analisadas pelo equipamento de medição de brilho com um ângulo de inclinação de 60°, revelando variações em suas avaliações à medida que a temperatura de desmoldagem variava.

Os resultados das medições, conforme apresentados na Figura 15 e no Apêndice B, revelaram que as temperaturas de desmoldagem de 93 °C e 107 °C produziram os melhores resultados, chegando a uma medida de brilho igual a 39 pontos de unidade arbitrária. O resultado mostrou uma estabilidade no brilho das peças, a partir da temperatura de 93 °C, indicando um possível ponto máximo em termos de brilho, correspondendo às temperaturas mais elevadas enquanto a temperaturas menores a amplitude da medida de brilho é maior. A temperatura de 60 °C apresentou um brilho superior quando comparada às desmoldagens realizadas a 40 °C e 79 °C, porém esse dado pode ter sido afetado pela variação que a temperatura sofria no molde sendo pontos mais aquecidos que outros já que a medida que a temperatura de resfriamento aumentasse as cadeias poliméricas apresentariam maior

concentração, sugerindo que na temperatura de 79 °C a medida de brilho seria superior a de 60 °C. Esse fenômeno sugere que à temperatura de 60 °C é possível obter um nível de brilho que é adequado para o produto final. Portanto, essa temperatura se mostra uma escolha apropriada para alcançar a qualidade desejada das peças. Além disso, essa temperatura permite a manutenção das condições de trabalho estipuladas pelo autor, garantindo que os mecanismos de desmoldagem não sejam tão afetados, o que por sua vez assegura a qualidade da superfície das peças moldadas.

Figura 15: Comportamento do brilho em função da temperatura de desmoldagem



Fonte: Autor 2023

A variação nos resultados para cada temperatura individual pode ser atribuída à presença de irregularidade na superfície, embora em uma escala reduzida. Essas irregularidades na superfície dificultam a leitura precisa do aparelho, tornando as medições menos precisas à medida que a aspereza aumenta. Na Figura 16 é possível identificar as ondulações da peça que podem ocasionar na oscilação dos resultados.

Figura 16: Relevo superficial das amostras



Fonte: Autor 2023

4.3 SELEÇÃO DA VENTOSA

A compreensão da influência da temperatura nas forças de desmoldagem e na qualidade superficial das peças possibilita a determinação de uma temperatura ideal que atenda aos parâmetros definidos para a seleção de uma ventosa pneumática. Conforme detalhado no item 3.2.2.4, essa ventosa foi escolhida com base no catálogo da *ARGOS Smart Engineering Gripper Application*.

A partir dos resultados obtidos, foi realizado um processo de seleção no catálogo de ventosas da *ARGOS Smart Engineering Gripper Application* (2023). Inicialmente, o objetivo foi identificar uma ventosa adequada para suportar as temperaturas especificadas. Em seguida, foram avaliadas as ventosas com os menores diâmetros, visando atender a uma variedade mais ampla de peças moldadas, e aquelas com capacidade de elevação proposta, priorizando a força necessária para a desmoldagem das peças. A ventosa B30-2 Chloroprene foi escolhida como a mais apropriada com base nos critérios estabelecidos neste estudo.

No processo de pesquisa pela ventosa adequada, no catálogo foram identificados cerca de 2000 modelos distintos de ventosas. No entanto, apenas quatro modelos, cada um com 29 variantes, são dedicados à aplicação em peças poliméricas injetadas: B20 Chloroprene, B30-2 Chloroprene, B40 Chloroprene e B50-2 Nitrile-PVC. Levando em consideração a necessidade de a ventosa superar a força máxima obtida a 60 °C, que é de 13 N, e o requisito de manter uma pressão máxima de 60 kPa, devido as limitações de pressão disponível na empresa, as ventosas variantes B20 Chloroprene foram descartadas devido à necessidade de pressões superiores a 60

kPa para alcançar a força de desmoldagem desejada. Ela e os demais modelos foram apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Ventosas catalogadas para peças de polímeros injetados

| Modelos | Capacidade de Elevação (N) | | | Temperatura | Diâmetro externo (mm) | Custo |
|--|----------------------------|--------|--------|--------------|-----------------------|-----------|
| | 20 kPa | 60 kPa | 90 kPa | | | |
| B20 Chloroprene  | 5,9 | 9,8 | 14 | -40 à 110 °C | 22 | R\$ 37,13 |
| B30-2 Chloroprene  | 12 | 22 | 27 | -40 à 110 °C | 34 | R\$ 52,43 |
| B40 Chloroprene  | 22 | 39 | 49 | -40 à 110 °C | 46 | R\$ 67,73 |
| B50-2 Nitrile-PVC  | 33 | 65 | 82 | 0 à 90 °C | 51,8 | R\$ 83,03 |

Fonte: Autor (2023)

Para este estudo, a escolha recaiu sobre a ventosa B30-2 Chloroprene devido ao fato de ser projetada especificamente para peças moldadas por injeção de polímeros e apresentar um custo mais acessível em comparação com outras alternativas disponíveis no mercado. Com um diâmetro de bocal de 34 mm, essa ventosa é adequada para a remoção de peças de pequeno porte. Além disso, a ventosa B30-2 Chloroprene é capaz de resistir a temperaturas de até 110 °C, alcançando uma força máxima de 27 N, superando todas as forças requeridas nos testes executados a 60 °C. As ventosas B40 Chloroprene e B50-2 Nitrile-PVC foram descartadas por terem diâmetros externos maiores do que os da ventosa B30-2 Chloroprene, o que limitaria sua aplicação a um menor número de casos.

Considerando uma pressão máxima de 60 kPa para o procedimento de desmoldagem, observa-se que a força máxima de elevação especificada no catálogo é de 22 N para a ventosa B30-2 Chloroprene. Sob essa carga, as temperaturas de resfriamento do molde durante o processo de desmoldagem devem ser iguais a 60 °C. Tendo em vista essas informações, realizou-se um cálculo com o objetivo de comparar as forças de desmoldagem da ventosa estimadas pela área de atuação a fim de sistematizar uma sequência de ventosas para a desmoldagem dos polímeros.

A força máxima de desmoldagem requerida (F) para a temperatura de resfriamento de 60 °C foi estabelecida em 13 N, considerando uma área de contato do PVC injetado (A) de $13,64 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, obtida através de um software de desenho. Esses parâmetros foram inseridos na Equação 1 para calcular a força por metro ao quadrado necessária para realizar a desmoldagem.

$$P = \frac{13}{13,64 \times 10^{-3}} = 952,80 \text{ N/m}^2$$

Com base no cálculo que indica a adesão de 952,80 N/m² do PVC sobre o molde testado, foi conduzido um estudo para determinar a área na qual a ventosa B30-2 Chloroprene é capaz de remover a superfície do molde fechado utilizado, aplicando sua força máxima estabelecida de 22 N.

A área foi calculada dividindo a força máxima da ventosa (22 N), pela pressão de adesão do molde em questão (952,80 N/m²), resultando em $23 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Este valor implica em uma área plana de 152 x 152 mm, indicando a distância na qual mais de uma ventosa pode ser aplicada. Esse resultado sugere a viabilidade da automação do processo, com a capacidade de expansão conforme a seleção dos moldes.

4.4 AVALIAÇÃO DA VENTOSA SELECIONADA

Para verificar a viabilidade do método proposto, foram realizados ensaios de desmoldagem de peças de PVC com moldes abertos e fechados, utilizando a ventosa B30-2 Chloroprene selecionada no item 4.3. A temperatura de resfriamento foi mantida em 60 °C. Em 90% dos casos, a desmoldagem foi realizada com sucesso, porém em 10% dos casos houve

danos na parte da peça que entrou em contato com a ventosa quando a peça estava ou no centro do molde ou nas suas extremidades. Esses danos podem ter sido causados por variações de temperatura no molde durante o processo de desmoldagem como mostrado na Figura 17. Para evitar esse problema, é necessário manter a temperatura uniforme ao longo de todo molde durante a remoção da peça.

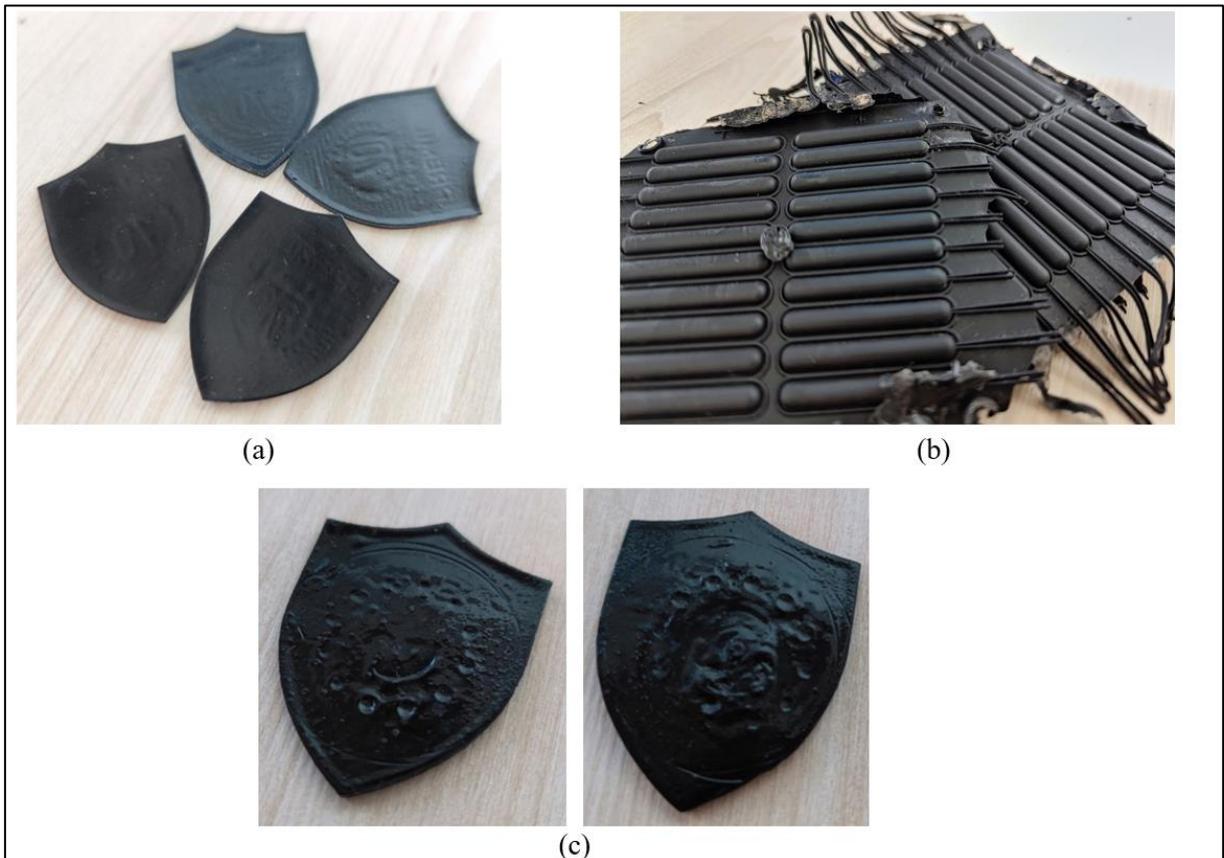
Figura 17: Câmera térmica posicionada no momento da desmoldagem



Fonte: Autor (2023)

A Figura 18 destaca os resultados da desmoldagem utilizando o método proposto. A Figura 18a exibe quatro peças retiradas de um molde aberto por meio da ventosa, evidenciando que a superfície em contato com o novo método de extração permaneceu intacta, exibindo um acabamento superficial nitidamente adequado. Em seguida, a Figura 18b mostra peças provenientes de moldes fechados desmoldadas pelo procedimento de ventosa em um dos lados do molde e outro fixado, indicando a capacidade da ventosa em extrair peças de ambos os tipos de moldes investigados, preservando sua qualidade superficial. Por fim, a Figura 18c destaca marcas correspondentes à geometria externa da ventosa, identificando possíveis falhas no procedimento implementado.

Figura 18: Peças desmoldadas através do método de sucção de ventosas (a) realizadas com sucesso, (b) realizadas em moldes fechados e (c) apresentando o defeito



Fonte: Autor (2023)

A comparação do método atual de remoção com a solução proposta mostrou que a desmoldagem com a ventosa B30-2 Chloroprene é mais rápida e eficiente. O método atual, que utiliza uma haste pontiaguda de metal, leva em média 56 segundos para remover 24 peças do molde aberto. Com a ventosa, esse tempo é reduzido para 30 segundos, um ganho de 46%. Além disso, a comparação superficial das peças desmoldadas mostrou que a ventosa não deixou marcas visíveis em 22 peças, enquanto a haste pontiaguda deixa uma pequena marca de perfuração em todas as peças do molde, como mostrado na Figura 19.

Figura 19: Método atual de remoção (a) em comparação com o uso da ventosa (b)



Fonte: Autor (2023)

A análise visual das peças, conforme indicado na Figura 18 e Figura 19, revelou que a maioria das peças apresentou acabamento superficial aceitável para a produção. No entanto, algumas peças apresentaram defeitos, que devem ser analisados para identificar a causa. Apesar disso, o método proposto se mostrou capaz de realizar a desmoldagem das peças de forma mais rápida e mantendo a qualidade superficial do produto final, validando sua utilização nas situações testadas.

5 CONCLUSÃO

Com base nos experimentos e análises conduzidos neste estudo, foi possível concluir que a temperatura de desmoldagem exerce uma influência crucial na qualidade superficial e na facilidade de desmoldagem das peças de PVC moldadas por injeção. Foi observado que à medida que a temperatura de desmoldagem aumenta, a força de desmoldagem necessária diminui, mas isso não ocorre sem consequências. Temperaturas excessivamente altas, acima de 60 °C, resultam em deformações nas peças, comprometendo tanto a qualidade superficial quanto a vida útil das ventosas utilizadas no processo de extração.

A análise de brilho revelou que a temperatura de desmoldagem de 60 °C proporciona um nível de brilho adequado para as peças, indicando que esta temperatura pode ser considerada ideal para manter a qualidade superficial desejada sem comprometer a eficácia do processo de desmoldagem. A temperatura de 60 °C foi identificada como a mais adequada para o caso de estudo, pois apresenta um equilíbrio entre força de desmoldagem e qualidade superficial. Com base nesse resultado, foi possível selecionar uma ventosa adequada para o processo de desmoldagem.

Acima da temperatura de 60 °C as medidas dos parâmetros de interesse indicaram menores variações, tanto para as forças requeridas para a desmoldagem quanto para o brilho das mesmas. Isso sugere que existe um ponto de equalização entre força de desmoldagem e qualidade superficial, que ocorre antes da temperatura de fusão do PVC.

A comparação do método atual de desmoldagem com o método proposto mostrou que o método proposto é mais rápido e apresenta qualidade superficial similar. Além disso, a automação do processo de desmoldagem é viável, especialmente ao considerar a área que uma única ventosa pode cobrir, indicando um potencial para a expansão do processo por meio da seleção criteriosa dos moldes.

Em resumo, este estudo enfatiza a importância de ajustar a temperatura de desmoldagem para garantir a qualidade superficial das peças de PVC moldadas por injeção. A escolha cuidadosa das ventosas e a consideração dos limites térmicos são essenciais para manter a eficácia do processo de extração e preservar a integridade das peças produzidas. Estas descobertas têm implicações significativas para a indústria de moldagem por injeção, oferecendo *insights* valiosos para aprimorar a produção de peças de alta qualidade e aumentar a eficiência dos processos de desmoldagem. Esses resultados permitem que os fabricantes

ajustem a temperatura de resfriamento para garantir a qualidade desejada das peças ou a facilidade de desmoldagem desejada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros sugere-se realizar uma análise aprofundada do impacto da temperatura no molde e elaborar um método para equalizar uniformemente a temperatura em toda a sua estrutura. Este procedimento envolve a compreensão das variações térmicas no molde e a implementação de estratégias eficazes para garantir uma distribuição homogênea da temperatura em todas as suas regiões, otimizando assim a qualidade das peças moldadas.

REFERÊNCIAS

ASTM D429. *Standard Test Methods for Rubber Property – Adhesion to Rigid Substrates*. *ASTM International*, Mai, 2014. Acesso em: 23 de jun. 2023.

BOERIO, F. J.; SHAH, P. *Adhesion of Injection Molded PVC to Steel Substrates*. *The Journal of Adhesion*, Jan, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00218460590954656>. Acesso em: 22 de abr. 2023.

GARCIA, M. C. R. Moldes para Injeção de Termoplásticos. *Academia Edu*. Disponível em: https://www.academia.edu/13129661/moldes_para_inje%C3%87%C3%83o_de_termopl%C3%81sticos_1_introdu%C3%87%C3%83o. Acesso em: 12 ago. 2023.

GLANVILL, A. B.; DENTON, E. N. *Tool Construction*. *Injection-mould design fundamentals*, 1965. Disponível em: <https://archive.org/details/injectionmouldde00glan/page/n5/mode/2up>. Acesso em: 23 mai. 2023.

HELERBROCK, R. Princípio de Pascal. *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/principio-de-pascal.htm>. Acesso em: 23 mai. 2023.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P. *Study of ejection forces in the AIMTM process*. *Elsevier*, 1999. Acesso em 10 mai. 2023.

MADALRNO, L.; THOMSEN, J. *Morphology, thermal and mechanical properties of PVC/MMT nanocomposites prepared by solution blending and solution blending + melt compounding*. *Composites Science and Technology*, Fev, 2010. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.01.016. Acesso em: 18 nov. 2023.

MARTINS, G. Coordenador técnico do Instituto Avançado do Plástico. Limpeza de moldes – Técnica adequada reduz danos. *Plástico.com*, 2020. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/limpeza-de-moldes-tecnica-adequada-reduz-danos/>. Acesso em 20 abr. 2023.

MYKHAILYSHYN, R.; SAVKIV, V.; MARUSCHAK, P. *A Systematic Review on Pneumatic Gripping Devices for Industrial Robots*. *Vilnius Tech*, Mar, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2022.17110>. Acesso em: 02 mai. 2023.

NUNES, H. Quais são os sistemas de extração de moldes mais utilizados? *Mundo do Plástico*, 2018. Disponível em: <https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/gestao/quais-sao-os-sistemas-de-extracao-de-moldes-mais-utilizados>. Acesso em: 23 mai. 2023.

RABINOVITCH, E. B. *Effect of Extrusion Melt Temperature on Properties of Flexible PVC*. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, Vol. 9, No. 2 Jun 2003.

SCHAFFRATH, R. *Vacuum gripper without central compressed air supply*. *Procedia CIRP* Vol. 97, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.207>. Acesso em: 23 mai. 2023.

VENTOSAS INDUSTRIAIS. *Venture Automação*, 2021. Disponível em: <https://ventureautomacao.com.br/ventosas-industriais/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

**APÊNDICE B – COMPORTAMENTO BRILHO NAS AMOSTRAS DE PVC
DESMOLDADAS**

| Leitura | Amostra | Amostra | Amostra | Amostra | Amostra |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 40 °C | 60 °C | 79 °C | 93 °C | 100 °C |
| | 60 ° |
| 1 | 6,3 | 23,3 | 20,5 | 22,1 | 47,2 |
| 2 | 5,3 | 16,7 | 22,0 | 46,3 | 41,1 |
| 3 | 11,3 | 34,5 | 17,2 | 40,7 | 27,1 |
| 4 | 13,6 | 27,2 | 19,5 | 42,1 | 38,5 |
| 5 | 11,4 | 24,1 | 18,5 | 32,5 | 36,2 |
| Média | 9,58 | 25,1600 | 19,5400 | 36,7400 | 38,0200 |
| Desvio Padrão | 3,59 | 6,4721 | 1,8393 | 9,5931 | 7,3578 |