

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ KROLMAN RIBEIRO

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DE ROTOMOLDAGEM EM  
POLIETILENO**

SÃO CARLOS  
2023

ANDRÉ KROLMAN RIBEIRO

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DE ROTOMOLDAGEM EM  
POLIETILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli

SÃO CARLOS  
2023



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

**COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 8/2023/CCEMec/CCET

**Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso**

**Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**ANDRE KROLMAN RIBEIRO [TÍTULO DO TCC]**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos**

São Carlos, 29 de março de 2023

**ASSINATURAS E CIÊNCIAS**

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Armando Ítalo Sette Antonialli
Membro da Banca 1	João Gustavo Pereira da Silva
Membro da Banca 2	Lucas Henrique Staffa



Documento assinado eletronicamente por **Armando Ítalo Sette Antonialli, Docente**, em 29/03/2023, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Gustavo Pereira da Silva, Docente**, em 29/03/2023, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Henrique Staffa, Docente**, em 29/03/2023, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0979678** e o código CRC **F8611E20**.

**Referência:** Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.008638/2023-21

SEI nº 0979678

*Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019*

[Ao nosso grande Deus Criador e Salvador,  
Jesus.]

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força e inspiração para não desistir. À Ellen, minha querida esposa pelo apoio e compreensão. Aos meus pais e irmão, que sempre acreditaram. Ao meu orientador, que com sabedoria e paciência me conduziu durante esse trabalho. À empresa que atualmente trabalho, a Rothobras, que inspirou o tema desse trabalho e me apoiou em tudo que precisei.

*Em Deus acredito, do resto, me traga números.*

Autor desconhecido.

## RESUMO

A Rotomoldagem é o processo de transformação de polímeros que atualmente possui o maior espaço de crescimento na indústria, no entanto ainda é um processo que necessita de estudos para seu aperfeiçoamento. O conhecimento técnico é pouco parametrizado para esse processo, resultando na aplicação do método empírico para a solução de diversos problemas e também para o aperfeiçoamento das atuais técnicas. A principal vantagem da rotomoldagem é a capacidade de produzir peças sem tensões residuais, resultando em peças com alta resistência ao impacto. Já a principal desvantagem desse processo é alto tempo de ciclo, sendo que a maior parte das pesquisas na indústria é pela redução de tempo no processo. No entanto, a tentativa de aprimoramento gera altos custos para a indústria, pois cada teste demanda a fabricação de uma peça que pode ter grandes dimensões e peso. Considerando essa dificuldade, foi construído um equipamento de laboratório em escala reduzida, possibilitando realizar experimentos comparativos, trazendo parâmetros que podem ser extrapolados para a aplicação na escala real do produto. Os moldes de rotomoldagem possuem basicamente dois tipos de acabamento interno, o polido e o jateado. Com dois moldes, cada um com esses respectivos acabamentos, foi investigado a possibilidade de diferença de tempo de processamento entre eles, mediante à diferença de rugosidade interna. Neste estudo foi possível avaliar o comportamento do processo de rotomoldagem e comparar, através da análise da temperatura interna do molde, o comportamento térmico nos moldes com esses dois tipos de acabamentos superficiais. Os resultados mostraram que há diferença no comportamento da curva de temperatura no interior do molde, mas também há similaridade em certo momento do processo, dependendo da etapa em que o mesmo se encontra, mostrando que o molde jateado necessita de menos tempo de processamento. O estudo também trouxe entendimento sobre a maneira que o calor atua durante o processo de aquecimento e resfriamento do molde.

**Palavras-chave:** Processamento de polímeros. Molde. Monitoramento de temperatura. Rugosidade.



## ABSTRACT

Rotomolding is the polymer transformation process that currently has the greatest growth space in the industry, however it is still a process that needs studies for its improvement. Technical knowledge is poorly parameterized for this process, resulting in the application of the empirical method to solve various problems and also to improve current techniques. The main advantage of rotational molding is the ability to produce parts without residual stresses, resulting in parts with high impact resistance. The main disadvantage of this process is the high cycle time, and most of the research in the industry is for the reduction of time in the process. a piece that can have large dimensions and weight. Considering this difficulty, a reduced-scale laboratory equipment was built, making it possible to carry out comparative experiments, bringing parameters that can be extrapolated for application in the product's real scale. Rotomolding molds basically have two types of internal finishing, polished and shot-peened. With two molds, each with these respective finishing, the possibility of difference in processing time between them, due to the difference in internal roughness, was investigated. In this study, it was possible to evaluate the behavior of the rotational molding process and compare, through the analysis of the mold's internal temperature, the thermal behavior in molds with these two types of surface finishing. The results showed that there is a difference in the behavior of the temperature curve inside the mold, but there is also similarity at a certain point in the process, depending on the stage it is in, showing that the blasted mold requires less processing time. The study also brought understanding about the way that heat acts during the mold heating and cooling process.

**Keywords:** Polymer processing. Mold. Temperature monitoring. Roughness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo de rotomoldagem . . . . .	12
Figura 2 – DNA da Rotomoldagem . . . . .	13
Figura 3 – Esquema de equipamento de rotomoldagem . . . . .	14
Figura 4 – Tipos de aletas . . . . .	16
Figura 5 – Deformação por resfriamento assimétrico . . . . .	17
Figura 6 – Ensaio de tração . . . . .	18
Figura 7 – Molde circular . . . . .	19
Figura 8 – Estudo de elementos finitos . . . . .	19
Figura 9 – Resultados de tensão equivalente . . . . .	20
Figura 10 – Polietileno reforçado com fibras . . . . .	21
Figura 11 – Teste de tração . . . . .	21
Figura 12 – Grânulos de FCAC . . . . .	22
Figura 13 – Motor-reductor . . . . .	23
Figura 14 – Queimador Infravermelho . . . . .	23
Figura 15 – Sistema de gás GLP . . . . .	24
Figura 16 – Sistema de aquisição de dados . . . . .	24
Figura 17 – Rolamentos de apoio . . . . .	25
Figura 18 – Equipamento de Laboratório . . . . .	25
Figura 19 – Moldes para o estudo . . . . .	26
Figura 20 – Etapas da rotomoldagem . . . . .	27
Figura 21 – Coalescência do polímero . . . . .	28
Figura 22 – Etapas do processo . . . . .	29
Figura 23 – DNA - Molde Polido x Molde Jateado . . . . .	30
Figura 24 – Molde - Média e desvio padrão do diâmetro . . . . .	31
Figura 25 – Peça - Média e desvio padrão do diâmetro . . . . .	31
Figura 26 – Molde - Média e desvio padrão da rugosidade . . . . .	32
Figura 27 – Peça - Média e desvio padrão da rugosidade . . . . .	32

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>11</b>
1.1 Objetivo geral . . . . .	15
1.2 Objetivos específicos . . . . .	15
<b>2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>23</b>
<b>4 – RESULTADOS</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>5 – CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

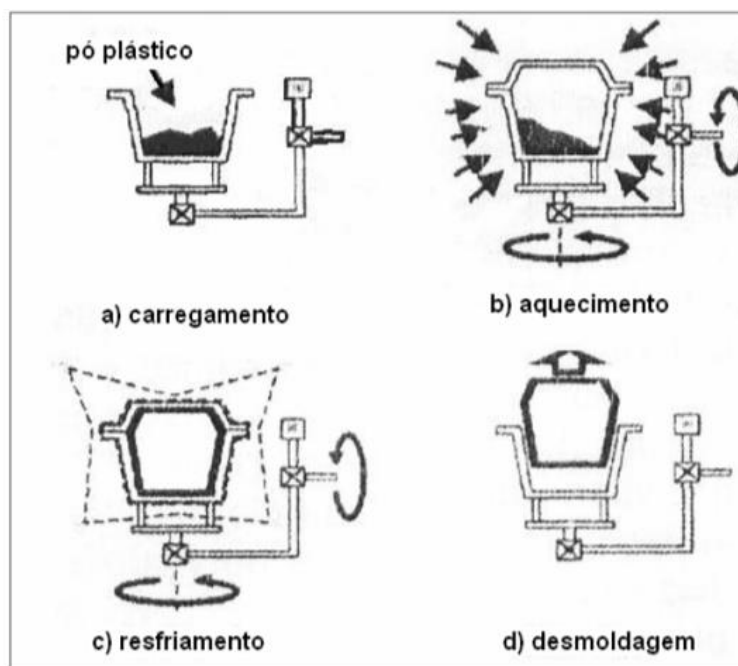
Atualmente o processo de Rotomoldagem vem crescendo a uma taxa superior se comparados aos outros processos de transformação de polímeros. No Brasil ainda há pouca utilização desse processo, se comparado com o processo de sopro, injeção e de extrusão, o que mostra que ainda é um processo pouco explorado e com grande espaço para expansão. Já no hemisfério norte, a rotomoldagem com polietileno é conhecida desde a década de 50, e desde então vem sendo estudada e aprimorada. Uma das grandes vantagens do processo de rotomoldagem é a de produzir peças sem imendas e tensões residuais, o que ocorre devido a lento processo de deposição do polímero no superfície interna do molde [1]. No entanto a principal desvantagem do processo de rotomoldagem é seu tempo de ciclo, ou seja, o tempo necessário para fabricar uma peça [2]. Uma das principais buscas na indústria é pela redução de tempo de ciclo, pois acarreta diretamente no custo da peça e na capacidade produtiva, afetando eficiência comercial em relação aos concorrentes. Para atingir esse objetivo, as pesquisas tangem diversos aspectos do processo, como matéria prima, resfriamento dos moldes e eficiência térmica do forno e molde, sendo esse último o alvo do presente estudo.

O processo de rotomoldagem é relativamente simples, pois basicamente consiste em depositar plástico em pó dentro da cavidade do molde, inserir o molde vedado dentro de um forno, impelindo ao molde rotação no eixo transversal e longitudinal; o plástico fundindo dentro do molde, assume sua geometria interna, que ao fim é resfriado e obtido a peça através da desmoldagem. Um esquema do processo de rotomoldagem pode ser visto na Figura 1[3].

Das etapas do processo, as mais críticas são:

- Configuração de rotações: nesta etapa é definido as rotações longitudinais ao molde, transversais ao molde e período de reversão, que na indústria de rotomoldagem é conhecido como rotação do eixo primário e secundário, e tempo de inversão. Esses parâmetros são cruciais para uniformizar a distribuição do polímero dentro do molde, sendo um parâmetro difícil de estabelecer, devido às diversas geometrias possíveis. Caso os parâmetros de rotação não sejam bem escolhidos, certamente haverá uma variação na espessura da peça, o que na maioria das vezes é indesejado. Atualmente, sua é feita através de recomendações obtidas em literatura, fazendo aproximação com parâmetros de geometrias já estudados. Por fim, é feito um mapeamento de espessura da peça, com o auxílio de um equipamento de medição por ultrassom, para verificar a necessidade de ajustar algum parâmetro de rotação.
- Aquecimento: esta etapa é a responsável pela transformação do polímero em pó para o polímero fundido. Ao adentrar no forno a uma temperatura próxima aos 280°C,

Figura 1 – Etapas do processo de rotomoldagem

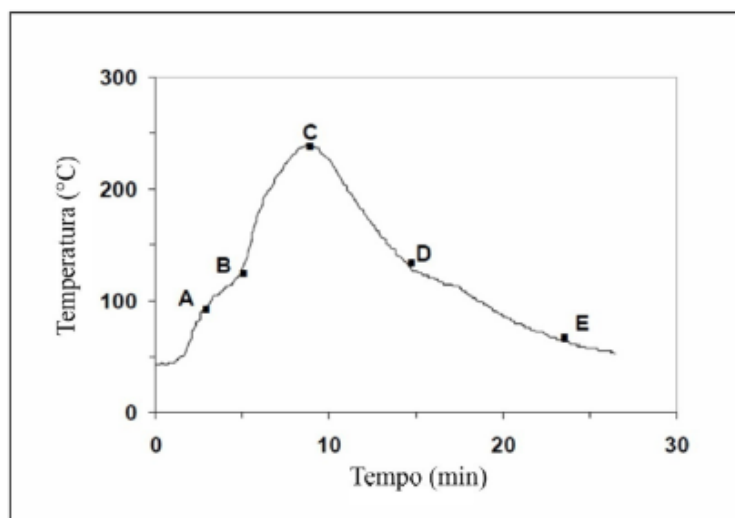


Fonte: Crawford, Mark, [1]

as paredes do molde, que inicialmente estão à temperatura ambiente, começam a absorver calor por convecção através da face externa. Por condução através da parede, o calor é transferido para o ar interno e para o polímero. Com o polímero fundido e a rotação do molde, as cavidades internas são aderidas pelo polímero, formando a peça.

- **Resfriamento:** após o polímero fundido moldar na cavidade interna, é iniciado o processo de resfriamento. O molde é retirado do forno mantendo as rotações dos eixos secundário e primário para manter o polímero fundido corretamente distribuído. Inicialmente, o resfriamento é por convecção natural, e posteriormente por convecção forçada e por aspersão de água. Os parâmetros que regem o resfriamento são os tempos de cada tipo de resfriamento, que devem ser ajustados para minimizar o empenamento da peça. Atualmente as empresas e centros de pesquisa que estudam o processo de rotomoldagem atuam no estudo térmico que envolve a temperatura do forno e a temperatura interna do molde. Com esse estudo concluíram que existe um padrão nas taxas de aquecimento e resfriamento ideais.
- **Ponto A:** Conforme observado no gráfico da Figura 2, até o ponto A, a temperatura fornecida é utilizada para aquecer o polímero dentro do molde. A taxa de aumento de temperatura é dependente do polímero e da temperatura do forno.
- **Ponto B:** do ponto A até o ponto B há uma redução da taxa de aumento de temperatura, causada pela mudança de fase do polímero. Esta mudança de fase é

Figura 2 – DNA da Rotomoldagem



Fonte: Comisso, [4]

endotérmica, absorvendo calor do sistema. Isso ocorre durante todo o processo de fusão do polímero, sendo que no ponto B todas as partículas estão fundidas.

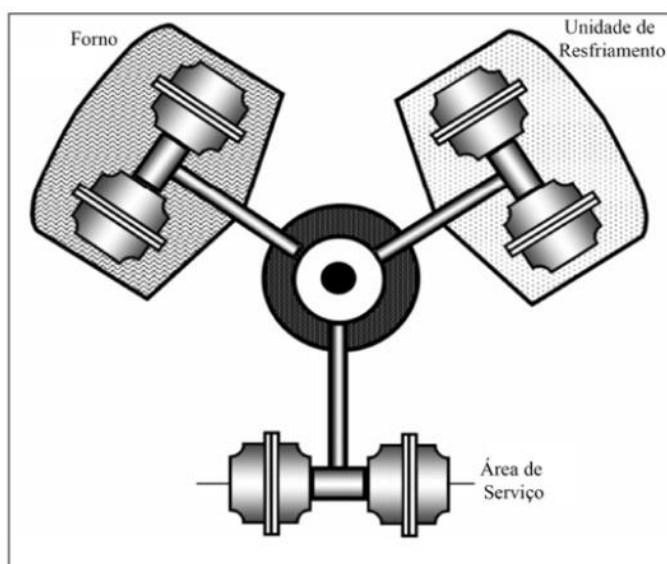
- Ponto C: do ponto B até o C, a taxa de aumento de temperatura retorna a um valor próximo ao do trecho inicial (até ponto A). Durante esse período o polímero é sintetizado nas paredes do molde. O ponto C representa a maior temperatura atingida pelo ar interno ao molde, também conhecida como PIAT, do inglês, peak internal air temperature (Pico de temperatura interna do ar). A temperatura do PIAT é diretamente relacionada com a expulsão de bolhas do polímero, sendo essencial para garantir uma boa resistência mecânica da peça final. Antes de atingir o ponto C, o molde é retirado do forno, entretanto, a temperatura continua a subir, devido à inércia térmica do molde.
- Ponto D: do ponto C ao ponto D, representa o resfriamento do polímero por convecção. Durante essa etapa, o polímero passa por um processo de cristalização e solidificação, um processo exotérmico, que dura até um pouco depois do ponto D.
- Ponto E: do ponto D ao ponto E, o processo de resfriamento continua, porém empregando métodos mais eficazes, como a aspersão de água. Como nessa fase o polímero já está sólido, um rápido resfriamento não causa empenamentos na peça. Após o ponto E, a peça pode ser retirada do molde.

A vantagem desse processo é seu custo, que no que diz respeito ao equipamento e ferramental, possui menor custo comparado com outros processos. Esta vantagem decorre da maneira que o plástico é processado. No processo de rotomoldagem, a transformação do plástico ocorre na pressão ambiente, o que não exige grandes esforços no molde e no equipamento. Os moldes para rotomoldagem são fabricados de chapa de aço, chapa de

alumínio ou em alumínio fundido, podendo ter diferentes acabamentos superficiais [4].

Os equipamentos para rotomoldagem são basicamente: um forno com controle de temperatura automatizada, sistemas de resfriamento e sistemas mecânicos de fixação e rotação dos moldes. Conforme ilustrado na Figura 3, o equipamento do tipo carrossel possui três áreas de processamento: o forno, onde o molde é aquecido, a unidade de resfriamento, onde o molde é resfriado e a área de serviço onde a peça é sacada do molde e uma nova carga de polímero em pó é adicionada ao molde, iniciando o ciclo novamente. Comumente trabalham com temperaturas até 300°C e com pressão atmosférica, o que permite uma construção mais simples, refletindo diretamente no custo de aquisição e manutenção. Os principais requisitos de eficiência de um equipamento de rotomoldagem são a precisão no giro do molde e a eficiência térmica do forno, sendo dois aspectos essenciais ao processo.

Figura 3 – Esquema de equipamento de rotomoldagem



Fonte: Crawford, Mark, [1]

Na maior parte das empresas, os parâmetros de rotomoldagem, como o tempo de forno por exemplo, é determinado de maneira empírica, fazendo ajustes consecutivos, até chegar no tempo aceitável de aquecimento e resfriamento.

Com o intuito de otimizar esse processo, foi desenvolvido o Rotolog, um equipamento instalado junto ao molde, que transmite a temperatura do forno e do molde em tempo real, permitindo o conhecimento das curvas de aquecimento e resfriamento, enquanto o processo ocorre. Com essas informações disponíveis, é possível eliminar o processo empírico e estabelecer o parâmetro ideal para cada peça [5].

## 1.1 Objetivo geral

Investigar a influência da rugosidade superficial interna do molde sobre o processo de rotomoldagem utilizando um equipamento compacto especialmente desenvolvido para esse fim.

## 1.2 Objetivos específicos

Analisar as diferenças entre o processo de rotomoldagem de um molde com superfície interna jateada e um molde com superfície interna polida. Com os parâmetros obtidos, analisar quais as possíveis influências positivas e negativas em cada etapa do processo, com foco na redução do tempo total de fabricação.

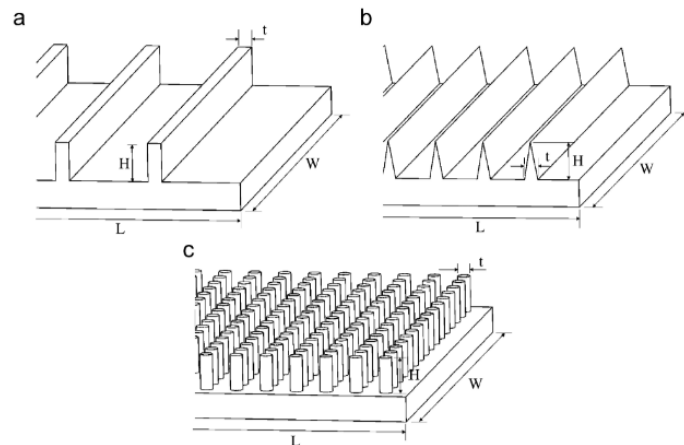


## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os estudos a respeito da rotomoldagem buscam aprofundar o conhecimento técnico sobre aspectos do processo e do produto. Em termos de processo, a busca principal é em torno da redução do tempo de processo, que na rotomoldagem é o fator mais negativo em relação aos outros processos de transformação de polímeros. Nas pesquisas sobre o produto, busca-se aprimorar a resistência mecânica do polímero com a adição de fibras naturais durante o processo da rotomoldagem. Outro aspecto estudado é a ferramenta de produção, como a superfície do molde, o material e o método construtivo. Por fim há estudos que buscam aprimorar a matéria prima utilizada no processo, o polietileno, que influencia diretamente no processo e no produto rotomoldado.

Estudos realizados Shih-Jung Liu e Kwang-Hwa Fu mostraram que a eficiência da troca de calor por convecção pode ser melhorada com a adição de aletas externas ao molde. Como mostrado na Figura 4, foram estudados três tipos de aletas, sendo elas: retangulares (a), triangulares (b) e pinos (c), adotando o mesmo parâmetro de altura ( $H$ ), largura ( $t$ ), comprimento ( $L$ ) e largura ( $W$ ).

Figura 4 – Tipos de aletas

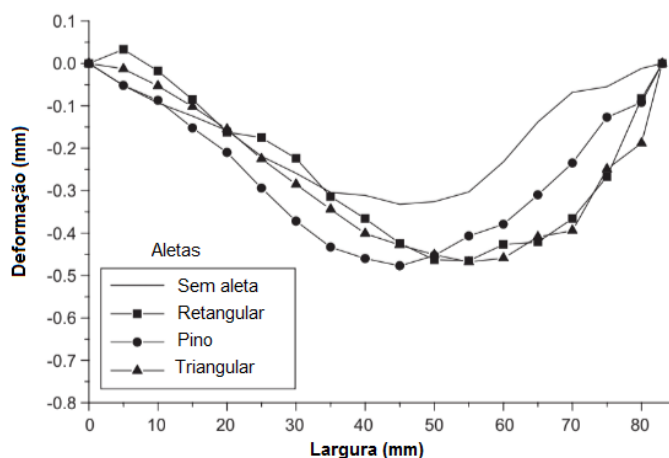


Fonte: Shih-Jung Liu, Kwang-Hwa Fu, [6]

Os resultados mostraram que a maior eficiência foi observada com a aleta do tipo pino, reduzindo o tempo de aquecimento e resfriamento do molde. Analisando o resultado na peça rotomoldada, é possível afirmar que não há diferença na resistência mecânica, no entanto, as peças produzidas em moldes aletados contraem menos e tem maior deformação, por causa do maior resfriamento assimétrico [6].

A Figura 5 mostra a variação da deformação ao longo do comprimento da peça com uma face plana de 80 mm de largura, fabricada com moldes de diferentes tipos de aletas e um sem aletas. A deformação é similar em todos os moldes aletados, e é menor

Figura 5 – Deformação por resfriamento assimétrico



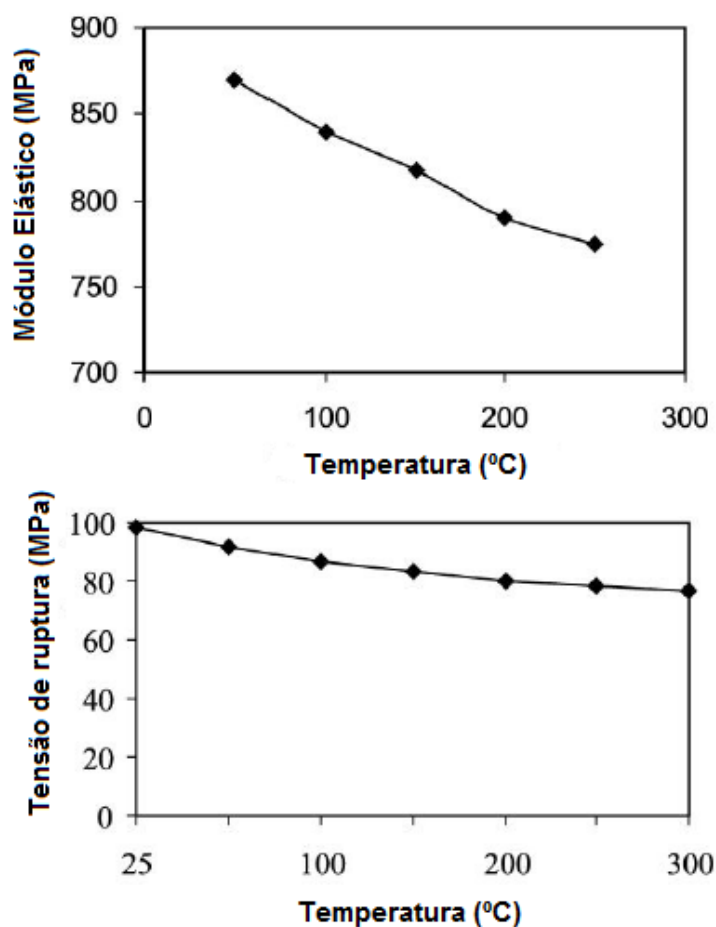
Fonte: Shih-Jung Liu, Kwang-Hwa Fu, [6]

no molde sem aletas, pois o molde sem aletas favorece uma perda de calor mais lenta, que minimiza a diferença de perda de calor interna e externa do molde. O resfriamento assimétrico é causado pela diferença entre a temperatura da superfície interna da peça e temperatura externa da peça, que está em contato com o molde durante o processo de resfriamento. Como o resfriamento ocorre através da convecção na superfície externa do molde, a perda de calor ocorre primeiramente na interface da peça com o molde, enquanto a superfície interna da peça está com a temperatura em equilíbrio com a temperatura interna. Dado esse fato, as deformações são decorrentes da contração do polímero em um primeiro momento na face externa da peça, e em um segundo momento na face interna [1].

A escolha do material para a fabricação do molde tange diversos aspectos, como o acabamento interno, nível de complexidade, eficiência térmica, durabilidade e custo de fabricação. No quesito acabamento interno, os moldes fabricados em alumínio fundido oferecem os melhores resultados, pois podem ser fabricados sem o uso de soldas, quando são moldes de peças simples. No quesito complexidade, o molde de alumínio fundido também se destaca, pois o processo de fundição do molde é feito com um modelo de fundição fabricado em equipamentos de usinagem CNC, o que confere precisão geométrica no molde. No quesito eficiência térmica, os moldes fabricados em chapas soldadas possuem maior vantagem, sendo o molde de chapa de alumínio o de melhor condução térmica, se comparado ao molde de chapa de aço. No quesito durabilidade, a melhor solução é encontrada nos moldes de chapa de aço inox, que são resistentes ao processo de fabricação, que muitas vezes emprega a aspersão de água como meio de resfriamento. Atualmente os moldes de alta produção são fabricados em chapas de aço inox. No quesito custo de fabricação, o molde fabricado em chapa de aço 1020 é o que possui menor custo, sendo muito empregado em moldes de grandes dimensões, onde o acabamento interno não é o principal requisito. Apesar de cada processo de fabricação de molde possuir sua vantagem, todos compartilham de uma mesma desvantagem: o prazo de fabricação. Em média, um

molde de rotomoldagem demora 40 dias para ser concluído e em alguns casos o prazo não atende às necessidades de um projeto personalizado. Para solucionar essa questão, Seibi e Sawaqed fizeram um estudo utilizando um compósito de fibra de vidro com pó de cobre. Para determinar a resistência mecânica do compósito em altas temperatura, foram realizados ensaios de tração em diversas temperaturas, variando de 50°C até 250°C com incrementos de 50°C, obtendo os resultados mostrados na figura 6.

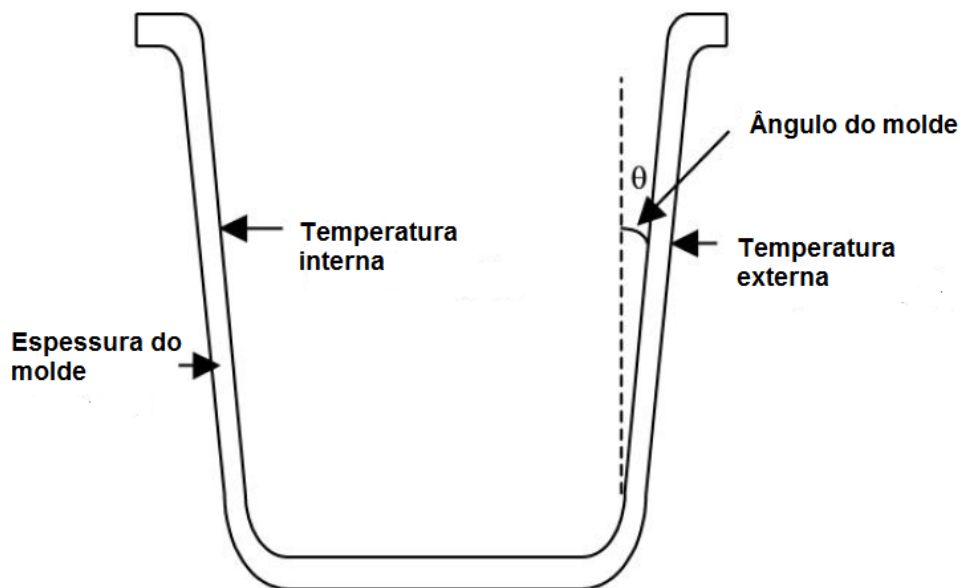
Figura 6 – Ensaio de tração



Fonte: Seibi, Sawaqed, [7]

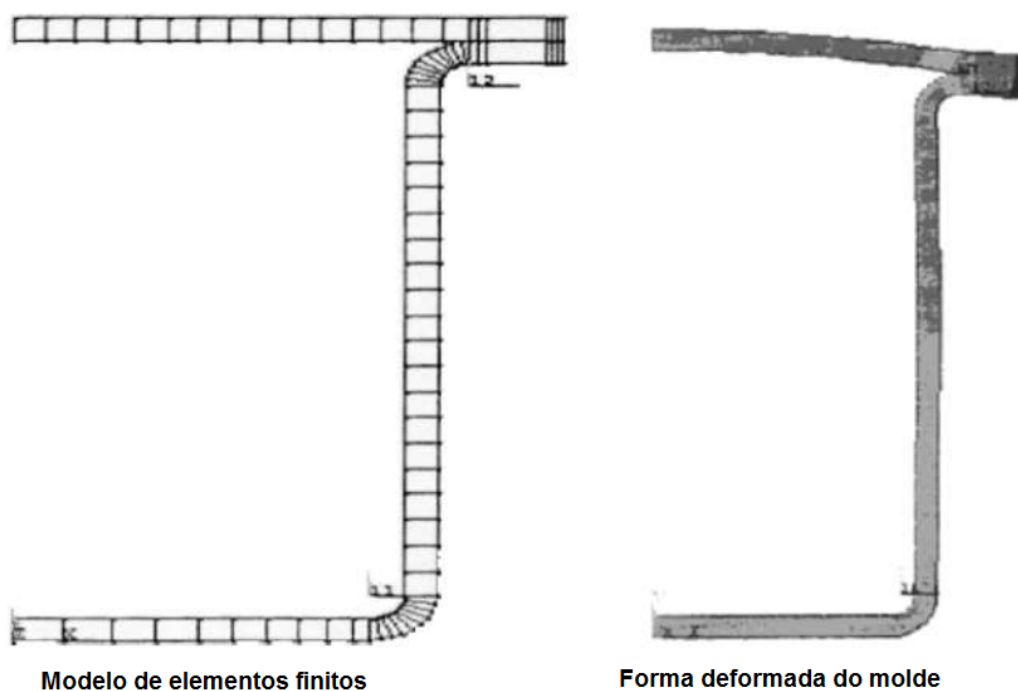
Para verificar se o molde fabricado com esse compósito seria capaz de suportar o processo de aquecimento e resfriamento, foram feitos estudos de elementos finitos, utilizando os esforços e temperatura usuais no processo de rotomoldagem como elementos de contorno. Como mostrado na figura 7, o modelo de estudo contemplou um molde circular simplificado, em um modelo axi-simétrico, com as variáveis a serem estudadas sendo o ângulo do molde e sua espessura. O carregamento térmico consistiu em aplicar a temperatura ambiente (25°C) no lado interno do molde e a temperatura do forno (250°C) na parte externa do molde, para simular o aquecimento, e invertendo a situação para simular o resfriamento.

Figura 7 – Molde circular



Fonte: Seibi, Sawaqed, [7]

Figura 8 – Estudo de elementos finitos

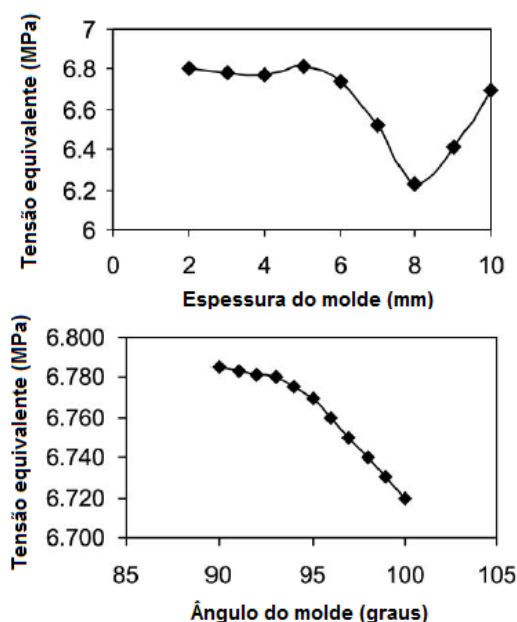


Fonte: Seibi, Sawaqed, [7]

O resultado foi um molde que atende os requisitos mecânicos e térmicos do processo, como pode ser visto da na figura 9, tendo uma espessura ótima de 8mm e um ângulo ótimo de  $100^\circ$ . Em termos de fabricação de molde, houve expressiva melhoria, com uma redução de 64% no custo da ferramenta e 76% de redução no tempo de fabricação da

ferramenta, considerando que a fabricação de um molde de compósito de fibra de vidro e cobre elimina processos complexos de fabricação utilizado nos moldes de alumínio e aço, como a fundição e a caldeiraria, por exemplo [7].

Figura 9 – Resultados de tensão equivalente

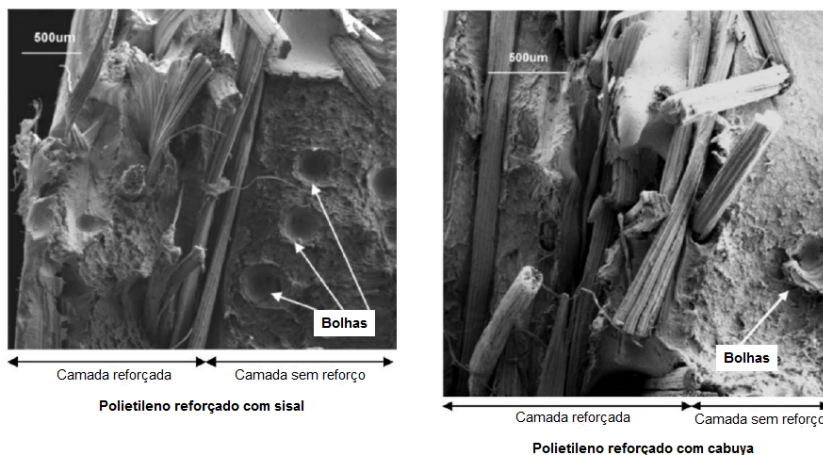


Fonte: Seibi, Sawaqed, [7]

Um dos requisitos de projeto mais importantes em um produto é sua matéria prima, e na rotomoldagem o principal material utilizado é o polietileno, com algumas poucas opções no mercado para atender aos requisitos mecânicos do produto e do processo. Durante o processo de escolha do polietileno a ser utilizado, os principais fatores que são levados em consideração são: a densidade do material e o índice de fluidez. A densidade do polietileno está ligada diretamente à sua rigidez mecânica, quanto maior a densidade, maior a rigidez. Quando o projeto prevê uma maior solicitação mecânica do produto, a escolha mais comum é pelo polietileno de alta densidade. Por outro lado, quanto maior a densidade do polietileno, menor será seu índice de fluidez, o que dificulta o preenchimento de pequenas cavidades do molde durante o processo. Para produtos que possuem pequenos detalhes, como caiaques por exemplo, o material mais comum é o polietileno de baixa densidade, pois possui uma maior fluidez. No entanto quando é necessário que ambos os requisitos sejam atendidos, ainda há um material de médias propriedades, no quesito densidade e fluidez, que é conhecido na indústria como polietileno de média densidade. Para contornar a falta de opções de polietileno que atenda a requisitos mais estritos de produtos, existe a possibilidade de agregar ao polietileno fibras naturais, como a fibra de sisal por exemplo. Para obter esse tipo de compósito, as fibras são misturadas ao polietileno em pó e processadas de maneira igual ao processo tradicional, sendo controlado apenas a porcentagem de fibras que é adicionado ao compósito. Com esse objetivo, Torres e Aragon

realizaram estudos com fibras de sisal e fibras de cabuya, utilizando um corpo de prova cilíndrico pra rotomoldar o compósito [8].

Figura 10 – Polietileno reforçado com fibras

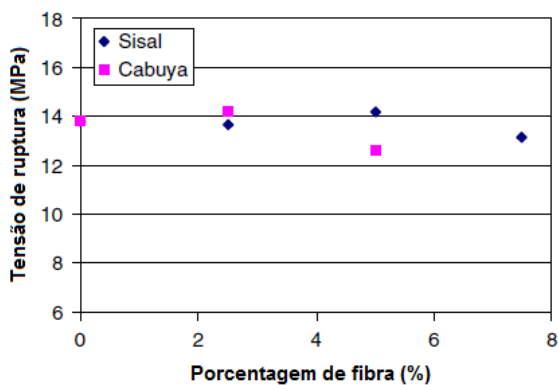


Fonte: Torres, Aragon, [8]

Os estudos foram realizados com polietileno de alta densidade com até 7,5% de fibras, sendo que os ensaios realizados foram de compressão, tração, impacto, indentação e recuperação.

Outros testes também foram realizados para completar o estudo: teste de contração, rachaduras por estresse, espessura e densidade final. O resultado foi o aumento da resistência mecânica do compósito, no entanto há um percentual ótimo para obter esse resultado, devido a presença de bolhas causadas pelo excesso de fibras. O tipo de fibra também influencia o resultado, sendo que a fibra de cabuya mostrou a melhor resultado em comparação ao compósito com fibra de sisal. Nos ensaios de tração foi observado um aumento da resistência do compósito até 2,5% de fibra de cabuya, e caindo mais acentuadamente quando utilizado 5% de fibra, como pode ser visto na figura 11.

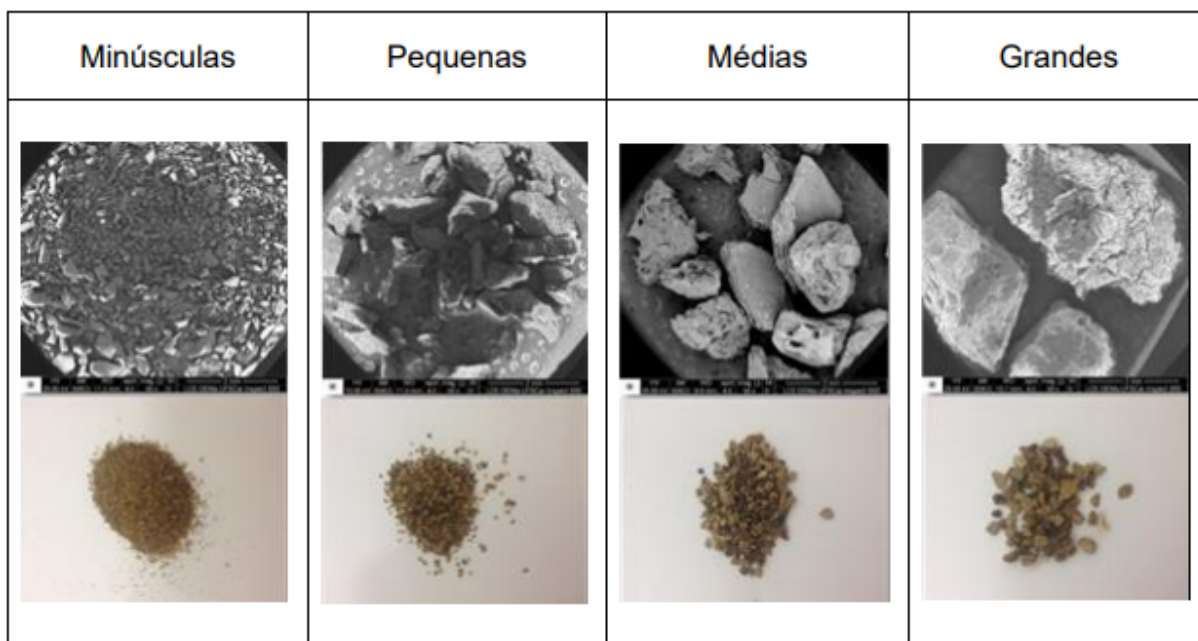
Figura 11 – Teste de tração



Fonte: Torres, Aragon, [8]

Outro estudo realizado pelo Juncioni, L. G. foi analisado o viabilidade a adição de farinha de cascas e das amêndoas do cacau (FCAC) com diferentes granulometrias, conforme a figura 12 [9].

Figura 12 – Grânulos de FCAC



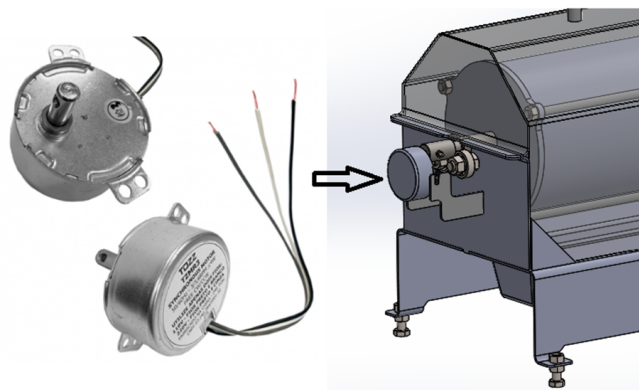
Fonte: Juncioni, [9]

De acordo com seus estudos, esse material pode ser utilizado como carga no polímero puro. No seu trabalho foram feitas análises com diferentes proporções de carga de FCAC, como ensaio de tração e impacto, buscando obter a otimização do percentual de carga no compósito, assim como os estudos realizados por Torres e Aragon. Também como o estudo citado, os resultados são equivalentes e mostram que a adição de carga ao polímero favorece a resistência à tração ao mesmo tempo que agrava a resistência ao impacto. Nas propriedades referentes ao ensaio de tração, a amostra de polietileno com 20% de FCAC grossa obteve um módulo elástico 49% maior, se comparado com o polietileno puro. Já os resultados dos ensaios de impacto Izod mostrou a tendência contrária, onde o polietileno puro obteve uma resistência ao impacto mais de seis vezes maior que o polietileno com 20% de FCAC grosso.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização de estudos em rotomoldagem foi desenvolvido um equipamento em escala laboratorial, excluindo um eixo de rotação, permanecendo apenas o eixo primário. Com essa concepção é possível fabricar peças de perfil de revolução, com as extremidades abertas, que atendem ao objetivo do equipamento, que é a aquisição de dados e fabricação de corpos de prova para diversos ensaios. O equipamento de rotomoldagem de escala laboratorial foi concebido de forma a ser construído com pouco recurso financeiro, sendo selecionado componentes de outros equipamentos já amplamente utilizados. O motor redutor que aciona a rotação do molde é proveniente de um forno microondas, pois atende ao requisito de torque e baixa rotação (3 rpm).

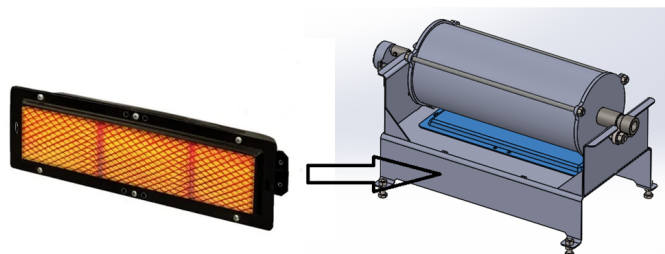
Figura 13 – Motor-reductor



Fonte: O autor

O queimador utilizado é infravermelho alimentado por gás, proveniente de fornos comerciais, com uma potência de 2.250 KCal/h.

Figura 14 – Queimador Infravermelho

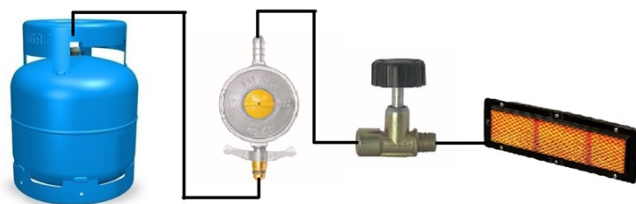


Fonte: O autor

A alimentação do queimador é feita por gás GLP armazenado em um botijão P5 para facilitar a aferição do peso e determinação do consumo de gás no processo. Por segurança, foi instalado no botijão um redutor de pressão e em seguida um regulador de vazão, sendo assim um sistema duplo de controle de gás.



Figura 15 – Sistema de gás GLP



Fonte: O autor

O sistema de aquisição de dados é o mesmo já utilizado na empresa no processo industrial, não havendo custos adicionais com esse componente, no entanto, caso fosse necessário um sistema de aquisição de dados, um datalogger de temperatura, feito com um Arduino seria suficiente para atender ao projeto.

Figura 16 – Sistema de aquisição de dados

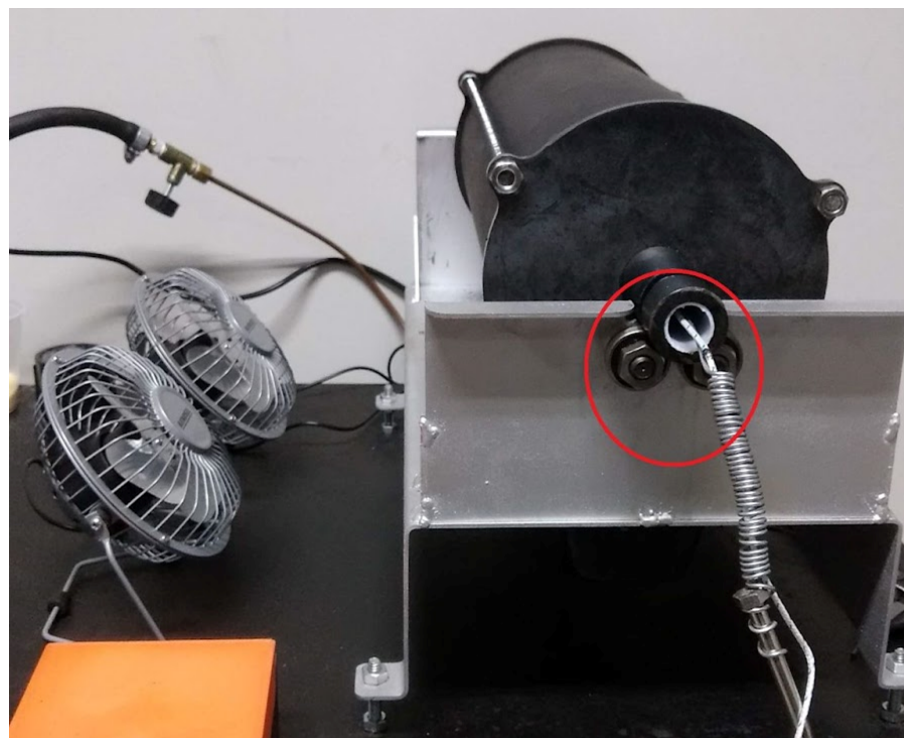


Fonte: O autor

O material utilizado no corpo do forno é a chapa de aço 1020, devido seu baixo custo e facilidade de compra. Já o material dos eixos é o aço 1045, devido a seu baixo custo e facilidade de usinagem. Como o processo de aquecimento do molde nesse equipamento específico é feito com um queimador infravermelho, o molde foi revestido externamente por uma tinta na cor preto fosco para maximizar a absorção de calor, enquanto as paredes do forno foram revestidas por um tinta prateada para refletir o calor emitido via infravermelho, assim maximizando o uso do calor do sistema.

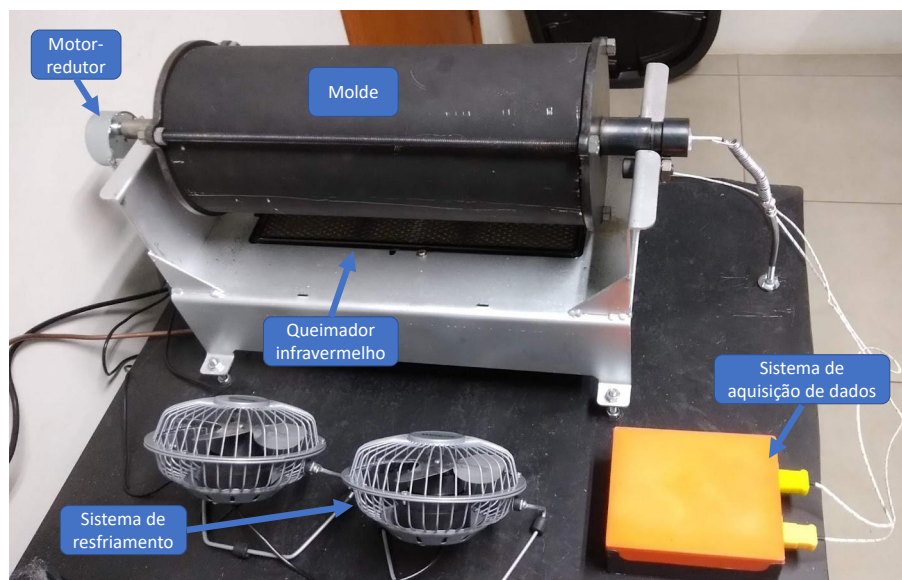
Para permitir o movimento de rotação e facilitar a remoção do molde, foi usado dois rolamentos em cada lado do molde, de forma não concêntrica, de modo que o molde tenha um apoio de mancal inferiormente e livre movimentação superiormente.

Figura 17 – Rolamentos de apoio



Fonte: O autor

Figura 18 – Equipamento de Laboratório



Fonte: O autor

O acabamento superficial da peça é ditado pelo acabamento superficial interno do molde, sendo que existem dois acabamentos principais utilizados nas peças rotomoldadas: o acabamento polido e o jateado. O acabamento polido é obtido através de sucessivos processos de lixamento, iniciando com uma lixa de maior granulometria e finalizando lixa d'água, e por fim um polimento abrasivo.

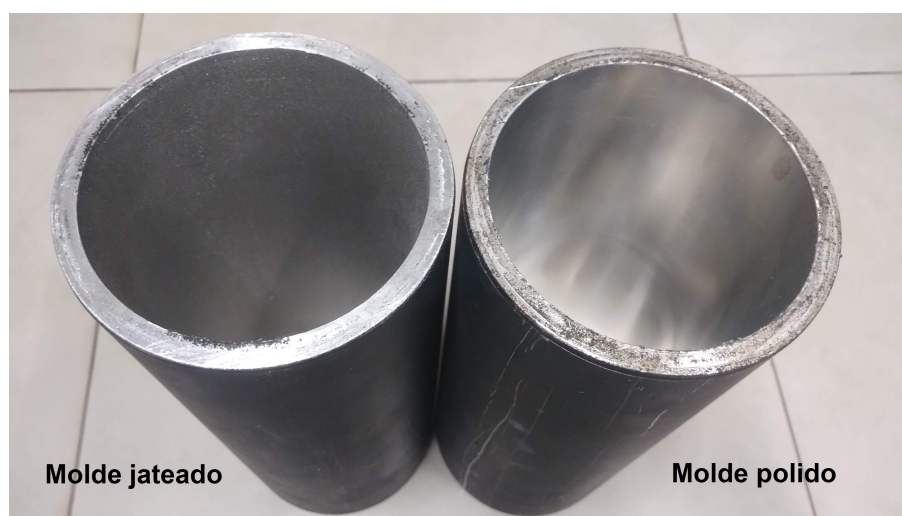
O acabamento jateado é obtido pelo processo de jateamento de granalhas de esferas de aço, com a variação ficando a cargo do tipo de granalha utilizado e a pressão de ar utilizado no sistema de jateamento.

Para obter os parâmetros de rugosidade interna do molde, foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo SJ-210, fazendo cinco medições em locais distintos do molde, obtendo ao um um valor médio.

Para obter o valor de contração de cada amostra é necessário comparar uma medida no molde e na respectiva peça para calcular o quanto contraiu. Neste estudo, a medida adotada para este cálculo é o diâmetro do molde, devido a facilidade de se obter os valores. Foram obtidos seis medidas em locais distintos em cada molde e amostra e calculado a média e desvio padrão, para assim obter uma contração média final.

Neste estudo será avaliado uma possível melhoria no tempo de produção da peça condicionado ao tipo de acabamento superficial interno ao molde. Utilizando o equipamento de rotomoldagem laboratorial serão realizados testes com dois moldes de características idênticas, diferenciando apenas no acabamento superficial, sendo que os moldes foram fabricados a partir de um tubo schedule com diâmetro interno de 122,24mm com tolerância H12 (122,24 a 122,64mm).

Figura 19 – Moldes para o estudo



Fonte: O autor

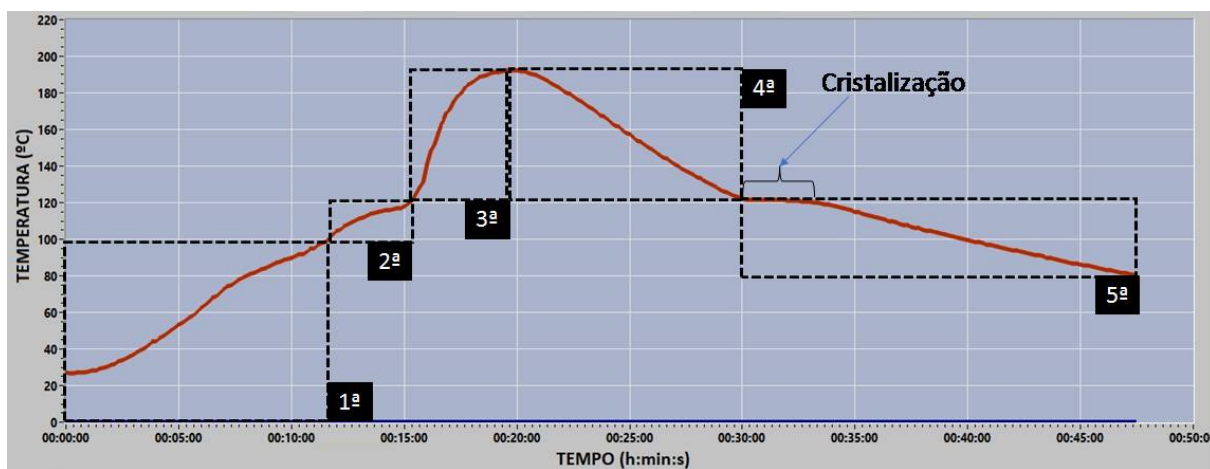
Os corpos de prova foram fabricados com o mesmos parâmetros de rotomoldagem. Considerando que o laboratório possui ambiente com temperatura controlada, qualquer diferença de resultado será atribuída à diferença de acabamento superficial.

Parâmetros Utilizados:

- Tipo de polímero: Polietileno ML3601. [11]
- Quantidade de polímero: 500g
- Temperatura ambiente: 25°C
- Vazão de gás: 190g/h. [10]
- Tempo de aquecimento: 19 minutos
- Tempo de resfriamento: 26 minutos
- Temperatura final do processo: 80°C

Mantendo os parâmetros pré-estabelecidos e utilizando um equipamento de aquisição de dados, foi monitorado a temperatura interna do molde durante o processo, gerando gráficos de temperatura em função do tempo, que são conhecidos como "DNA da rotomoldagem".

Figura 20 – Etapas da rotomoldagem



Fonte: O autor

Através do gráfico obtido foi possível analisar o comportamento do processo em suas diferentes etapas, sendo claro a eficiência do método utilizado.

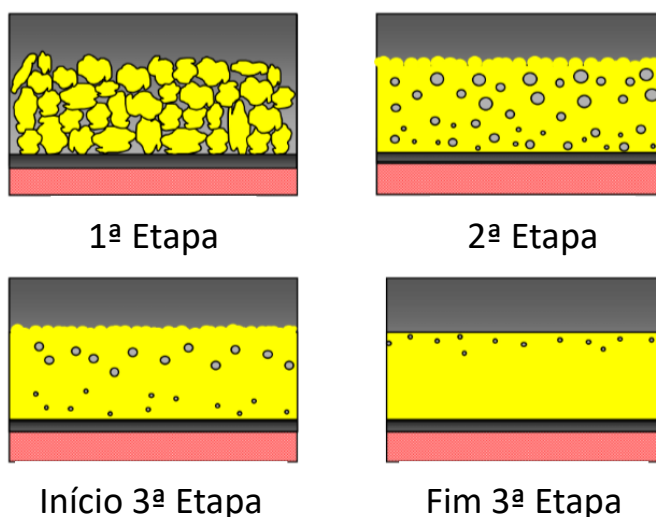
Na primeira etapa do processo, onde o polímero ainda está no formato de pó, a troca térmica é dada principalmente pelo processo de convecção da parede interna do molde com o ar interno. Esse processo ocorre até a temperatura atingir 100°C, onde o polímero começa a mudar de estado físico.

Na segunda etapa do processo, que ocorre entre os 100°C e os 120°C, há o início da coalescência do polímero. Nesse intervalo de processo, o polímero fundido começa a se aderir na parede interna do molde, ao mesmo tempo que ainda possui polímero em pó. Neste momento há uma queda na taxa de aumento de temperatura, devido a maior

absorção do calor pelo polímero que está em fase de transformação.

Na terceira etapa do processo, que ocorre quando a temperatura interna do molde supera os 120°C, todo o polímero está fundido, no entanto ainda há a presença de bolhas que se formaram na etapa anterior. Então é adicionado calor ao polímero até uma temperatura média de 190°C para que o polímero fique isento de bolhas que possam fragilizar a peça.

Figura 21 – Coalescência do polímero



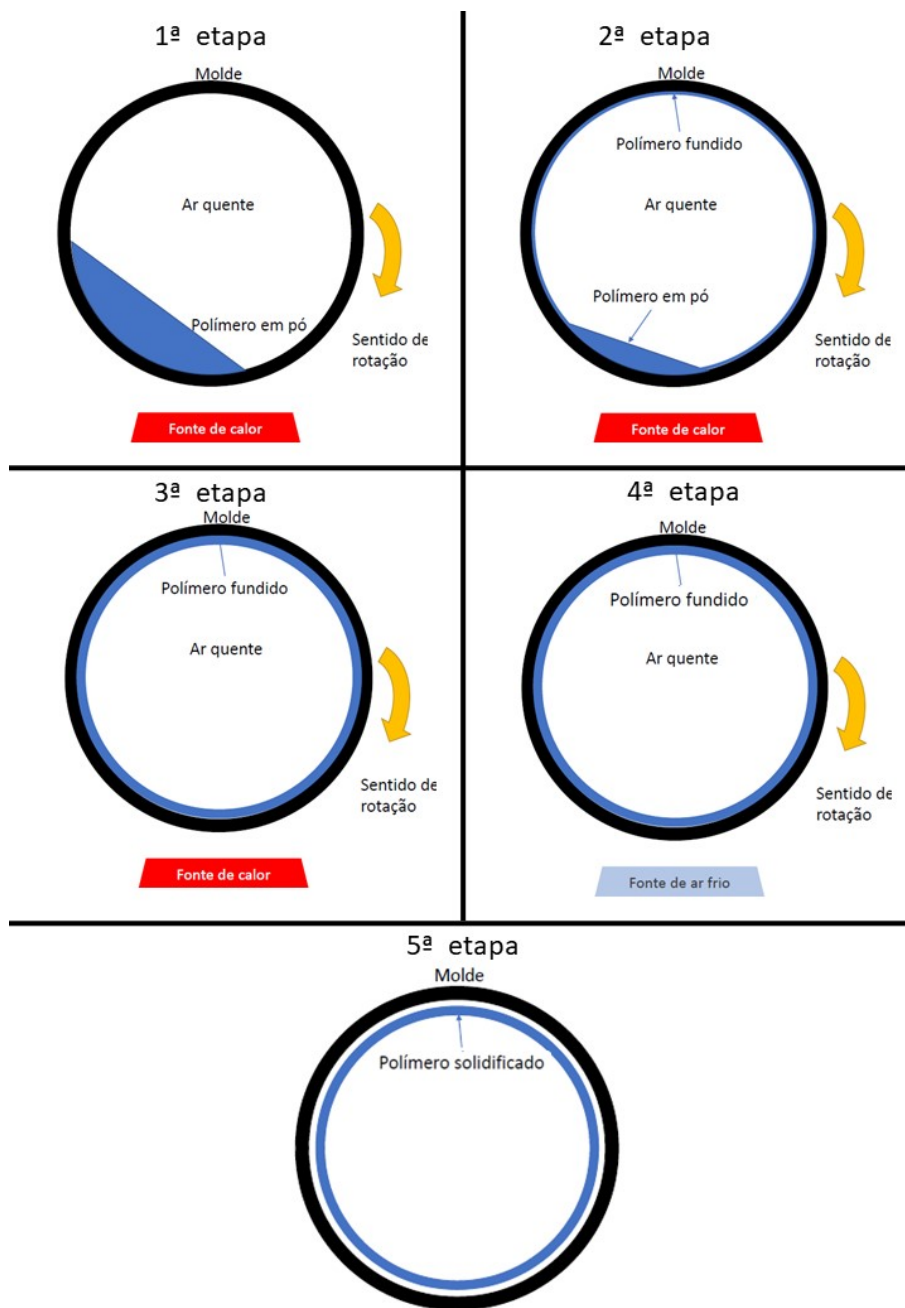
Fonte: Crawford, Mark, [1]

Na quarta etapa, a adição de calor é cessada e se dá início ao processo de resfriamento com o polímero aderido à parede do molde. Nesse momento a perda de calor ocorre por convecção forçada pelos ventiladores que sopram na superfície externa no molde, e através do polímero e do molde de alumínio por condução térmica.

A quinta etapa do processo se inicia quando a temperatura interna do molde atinge novamente os 120°C, e nesse momento se inicia a cristalização do polímero, onde serão estabelecidas as cadeias poliméricas. Esse processo é exotérmico, ou seja, libera calor, como pode ser observado no gráfico do DNA da rotomoldagem, a perda de calor pelo resfriamento externo se equipara à liberação de calor pela cristalização do polímero, mantendo a temperatura constante dentro do molde até que a cristalização esteja completa. Após isso, a temperatura continua a reduzir até a temperatura de 80°C, que é a temperatura de extração da peça.



Figura 22 – Etapas do processo

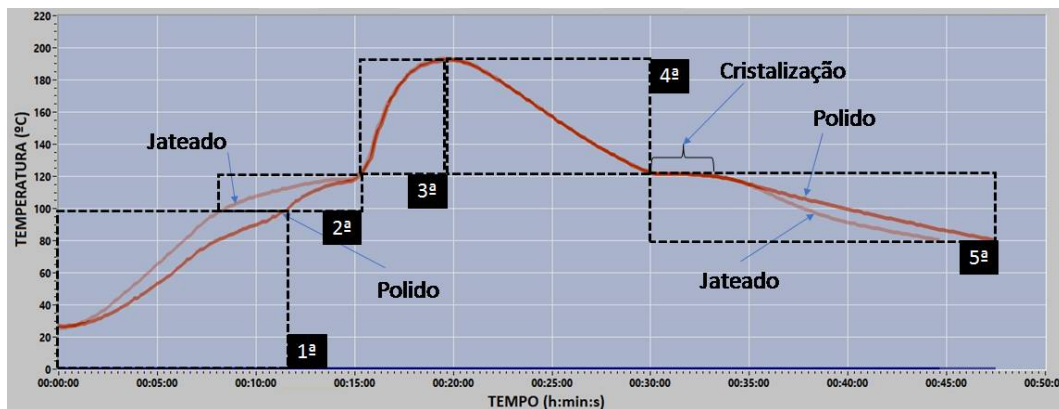


Fonte: O autor

## 4 RESULTADOS

O resultado do estudo mostrou uma significativa diferença entre o comportamento do polímero dentro do processo. Conforme o gráfico obtido através da aquisição da temperatura, mostra que a condução de calor é diferente para cada molde.

Figura 23 – DNA - Molde Polido x Molde Jateado



Fonte: O autor

Observando a primeira fase do processo, onde se inicia o aquecimento do molde, é possível verificar que o ganho de temperatura do molde jateado é maior, se comparado ao molde polido, pois a troca térmica por convecção térmica é diretamente proporcional à área de contato, que no molde jateado é maior devido sua alta rugosidade superficial.

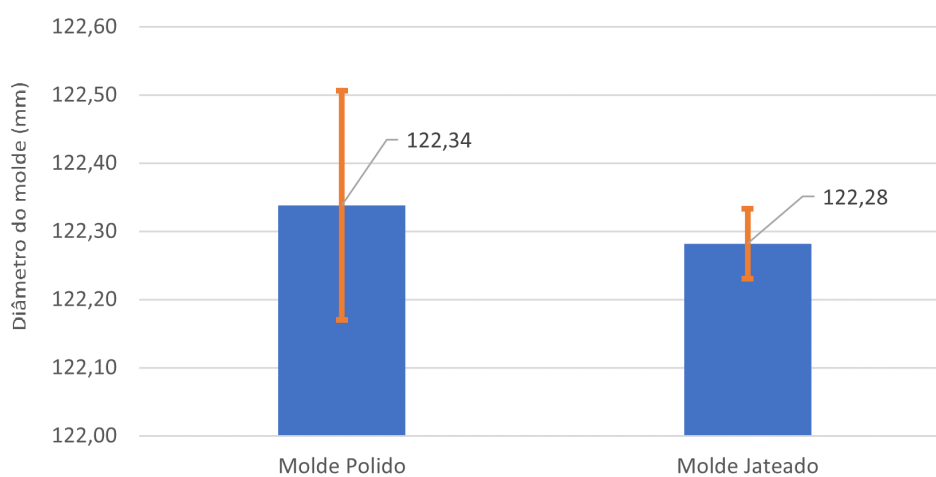
Já na segunda etapa, ao iniciar a formação das camadas de polímero fundido na parede do molde, a convecção cessa e é substituída pela condução, levando então a uma equivalência de troca de calor em ambos os moldes. Ao fim da segunda etapa, ambos os moldes estão na mesma temperatura, mostrando que a rugosidade do molde não traz resultado efetivo em termos de condução de calor em sua fase inicial.

Como o polímero está aderido à parede do molde, tanto o ganho de temperatura na terceira etapa, quanto a perda de temperatura na quarta etapa são iguais em ambos os moldes, pois não há troca de calor por convecção na interface entre o polímero e o molde, apenas troca por condução térmica.

Do início até o fim da cristalização do polímero observa-se que não há redução de tempo de processo do molde jateado e relação ao molde polido. No entanto após o fim da cristalização, a taxa de redução de temperatura do molde jateado retoma a um valor próximo à taxa anterior ao processo de cristalização, a passo que o a taxa do molde polido retoma a um valor menor. Isso acontece devido ao deslocamento da peça do molde, ou seja, após a cristalização do polímero, ele volta ao seu estado sólido, que por sua vez obedece a um coeficiente de dilatação térmico. Com a redução da temperatura, o polímero reduz suas dimensões, criando uma camada de ar entre o molde e o polímero.

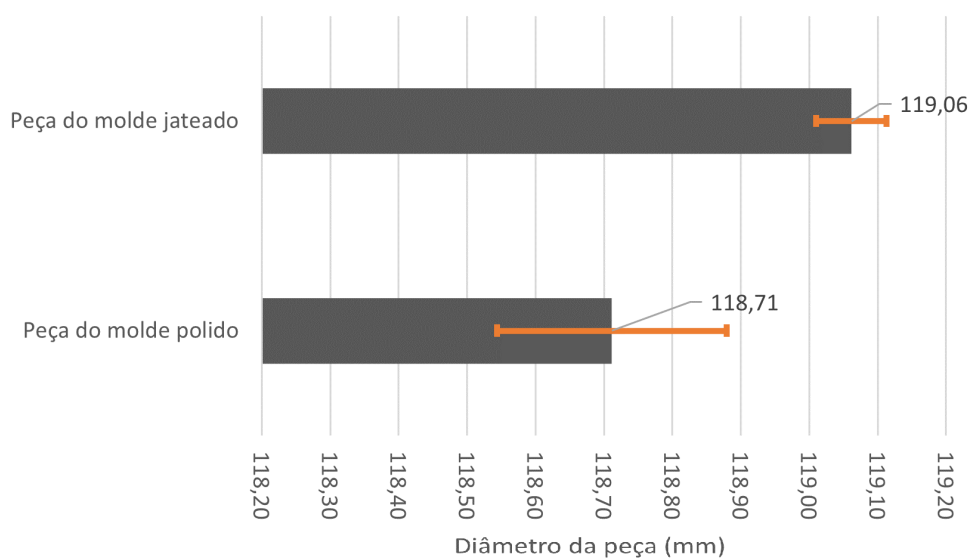
Observando a diferença de contração entre as duas amostras, é verificado que a amostra do molde jateado é 0,3% maior em relação à amostra do molde polido. Na amostra do molde jateado verificou-se uma contração de 2,7% enquanto no molde polido, verificou-se uma contração de 3,0%, evidenciando uma maior aderência da peça jateada ao molde. Outro aspecto observado é que o molde polido apresenta a contração nominal de 3%, que é usualmente adotada na rotomoldagem, enquanto o molde jateado possui uma contração menor. Essa informação é de grande importância, pois afeta diretamente projetos das peças, que devem gerar uma ferramenta com a contração adequada, de acordo com o acabamento superficial escolhido.

Figura 24 – Molde - Média e desvio padrão do diâmetro



Fonte: O autor

Figura 25 – Peça - Média e desvio padrão do diâmetro

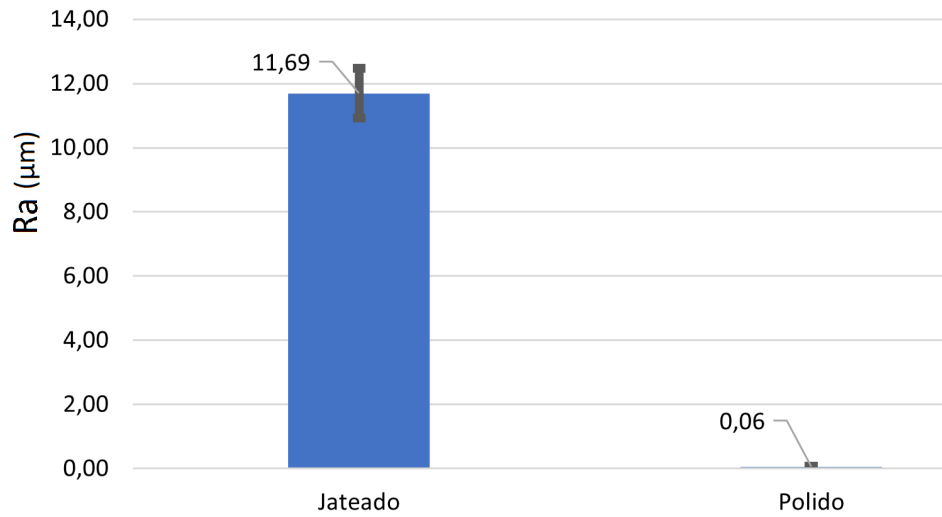


Fonte: O autor



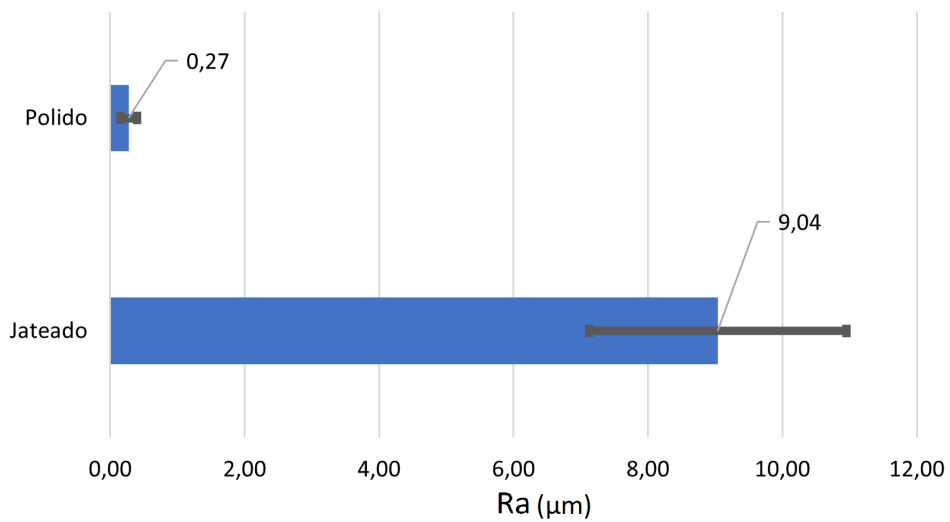
Por fim foi comparado a rugosidade do molde e de sua respectiva peça, confirmando que as peças possuem acabamento superficial semelhante ao do molde, como pode ser verificado na rugosidade média obtida.

Figura 26 – Molde - Média e desvio padrão da rugosidade



Fonte: O autor

Figura 27 – Peça - Média e desvio padrão da rugosidade



## 5 CONCLUSÃO

Através dos estudos realizados, foi possível comprovar a eficácia do equipamento de rotomoldagem em escala laboratorial em fornecer dados precisos e coerentes do processo, sendo observado através do gráfico tempo por temperatura, que se sobrepôs onde o processo é idêntico aos diferentes moldes, e evidenciou as diferenças esperadas de acordo com os moldes estudados.

O molde jateado tem um tempo de processamento total 6% menor que o molde polido, no entanto mostrando sua maior eficiência apenas na quinta etapa do processo, onde o fato da sua superfície ser mais rugosa, favoreceu a aderência do polímero ao molde, retardando assim o deslocamento e mantendo sua perda de calor. Já o molde polido, imediatamente ao fim da cristalização, deslocou do molde, criando uma bolsa de ar entre o molde e a peça, o que retardou a perda de calor, devido ao isolamento térmico criado. Do ponto de vista prático, é necessário estudos para verificar se esse resultado se replica em moldes de escala real, sendo essa comparação um possível estudo futuro.

Outro ponto a ser observado é o comportamento da temperatura de ambos os moldes na primeira e segunda etapa do processo. No início da primeira etapa, o molde jateado possui uma taxa maior de ganho de temperatura se comparado ao molde polido, o que é esperado devido sua maior área superficial, no entanto ao final da segunda etapa, ambos os moldes se encontram na mesma temperatura. O raciocínio utilizado para explicar o ganho de eficiência na quinta etapa do processo não consegue explicar o que ocorre no início do processo, pois no início do processo ocorre predominantemente a troca de calor por convecção.

Outro ponto a ser levado em consideração é a aderência do polímero em pó na parede do molde durante a primeira etapa. Como o molde polido possui uma rugosidade muito baixa em relação ao molde jateado, a tendência é que o polímero se concentre no fundo do molde polido, enquanto se concentra mais na lateral no molde jateado. Tal ponto leva o raciocínio para outros aspectos do processo ainda não estudados. Os fatores físicos que explicam esse fato podem ser alvo de futuros estudos, abrangendo também o comportamento físico-químico do polímero durante a fase inicial do processo de rotomoldagem. Outro estudo pertinente é a análise térmica DSC (escaneamento diferencial de calor), com a possibilidade de identificar correlações com a curva DTA de rotomoldagem e com isso encontrando as informações que explicam a similaridade de ambos os moldes possuem na terceira e quarta fase do processo.

## REFERÊNCIAS

- [1] Crawford, R. J., Mark P. K., “Practical guide to rotational molding”, Rapra Technology Limited, Queen’s University, Belfast, 2003, p.1.
- [2] Pamphlet, AMC, Engineering design handbook, Rotational molding of plastic powders, Estado Unidos, 1975, p.3
- [3] Crawford, R. J., Thorne, J. L., “Rotational molding technology”, William Andrew Publishing, New York, 2002, p.2.
- [4] Comisso, T. B., Estudo experimental do processo de rotomoldagem: efeitos sobre a morfologia e estabilidade dimensional/ Tiago Boni Comisso. Ponta Grossa, 2011, p.27-28.
- [5] Crawford, R. J. Recent advances in the manufacture of plastic products by rotomoulding. Journal of Materials Processing Technology. V. 56, p. 263-271, 1996.
- [6] Shih-Jung Liu, Kwang-Hwa Fu, Effect of enhancing fins on the heating/cooling efficiency of rotational molding and the molded product qualities, Taiwan, 2007
- [7] Seibi, A. C., Sawaqed, N. M., Design of copper filled fibreglass moulds for manufacturing a customized product using linear programming optimization and finite element analysis, Oman, 2002.
- [8] Torres, F. G., Aragon, C. L., Final product testing of rotational moulded natural fibre-reinforced polyethylene, Lima, Peru, 2006
- [9] Juncioni, L. G., Utilização de resíduos de cacau em compósitos poliméricos a base de poliolefinas, São Carlos, 2021
- [10] <https://www.maqenge.com.br/produto/queimador-2250-kcal-com-espera-para-acendimento-automatico/258> acessado em 15/03/2023.
- [11] <https://www.braskem.com.br/cms/Principal/produto/download?id=6IYpRYgLHhU=&folhadados=true> acessado em 15/03/2023