

Desenvolvimento de um novo método para tomada de decisão de tempo de ciclo de aquecimento na rotomoldagem

Development of a new method for take a heating cycle time decision in rotomolding

Alessandro Fernandes Barros

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do ABC

Silvia Novaes Zilber Turri

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do ABC

José Carlos Curvelo Santana

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do ABC

DOI: 10.47573/aya.88580.2.39.7

Resumo

O processo de Rotomoldagem tem crescido no Mundo devido às características de tipos de peças e acabamentos que podem ser produzidas, entretanto, a falta de informação sobre como finalizar os ciclos de aquecimento do forno, eleva o tempo de ciclo e limita a viabilidade econômica deste processo. Neste contexto, a presente pesquisa desenvolveu um novo método para tomada de decisão de tempo de ciclo de aquecimento na Rotomoldagem. Assim uma máquina de Rotomoldagem tipo carrossel com três braços, foi adaptada através das modificações, como: a instalação de dois moldes estáticos dotados de sensores de temperaturas, em duas posições diferentes, que transmitiu dados através de comunicação Modbus ao CLP da máquina, e um equipamento K-paqTM, que através de sensores e comunicação via rádio frequência, fez as medições da temperatura interna do molde de Produção. Após a realização dos experimentos verificou-se que as adaptações realizadas na Máquina de Rotomoldagem mostram-se eficientes para o desenvolvimento da pesquisa. Os gráficos da Rotomoldagem demonstraram que o processo foi estável e que houve diferença de 82,3°C entre os moldes estáticos 1 e 2. O molde estático 1 apresentou uma diferença de 1,5° C com relação ao molde de produção, indicando que esse foi o melhor entre os moldes testados nesta pesquisa. Assim, ficou demonstrado que método desenvolvido nesta pesquisa foi confiável para tomada de decisão de tempo de ciclo de aquecimento na Rotomoldagem de peças em PEAD.

Palavras-chave: rotomoldagem. tempos de processo. efeito da temperatura.

Abstract

The Rotomolding process has grown in the world due to the characteristics of the types of parts and finishes that can be produced, however, a lack of information on how to complete the furnace heating cycles increases the cycle time and limits the economic viability of this process. In this context, the present study developed a new method for decision making of heating cycle time in Rotomolding. Thus, a carousel type Rotomolding machine, it was adapted through modifications, such as: the installation of two static molds equipped with temperature sensors, in two different positions, which transmitted data via modbus communication to the machine PLC, and a K-paqTM equipment, which, through sensors and radio frequency communication, used the internal temperature of the production mold as a reference. After carrying out the experiments, it was verified that the adaptations carried out in the Rotational Molding Machine are efficient for the development of the research. The Rotomolding graphs showed that the process was stable and that there was a difference of 82.3° C between static molds 1 and 2. Static mold 1 showed a difference of 1.5° C in relation to the production mold, provided that this was the best among the molds tested in this research. Thus, it was found that the method developed in this research was reliable for decision on the heating cycle time in the Rotational Molding of HDPE parts.

Keywords: rotomolding, processing times; temperature effect.

Com o aumento da população mundial, consecutivo aumento do consumo e a busca incessante pela redução de custos, peso de produtos, reciclagem de materiais, observa-se um aumento na utilização das resinas termoplásticas, popularmente conhecidas por plásticos, nos mais diversos segmentos industriais.

O processo de Rotomoldagem tem crescido muito no Mundo principalmente pela característica de tipos de peças e acabamentos que podem ser produzidas, porém a falta de informação precisa para finalização do ciclo de aquecimento do forno eleva o tempo de ciclo, limitando economicamente o crescimento deste processo.

A medição direta de temperatura sendo realizadas no interior do molde onde todas as mudanças e variações físicas e termodinâmicas ocorrem, torna a tomada de decisão do fim de ciclo de aquecimento precisa, independentemente de qualquer outra variável que possa existir seja ela de processo ou no ambiente, possibilitando assim a redução de custos produtivos com tempo de aquecimento desnecessários. Porém devido as temperaturas altas e os movimentos de translação e rotação dos quadros da máquina onde os moldes são dispostos se torna inviável a instalação de algum dispositivo definitivo para medição da temperatura interna dos moldes em Produção. Por outro lado, já existem equipamentos que temporariamente são instalados por serem dotados de comunicação via rádio e controle de temperatura interna que servem para realizar medições referenciais para produção. Desta forma este estudo busca de forma prática instalar dois sistemas paralelos onde o primeiro é composto de um Molde Estático dotado de um sensor de temperatura interno no quadro fixo da máquina com características físicas idênticas aos moldes de produção e o segundo um equipamento de medição do ar interno do molde de produção temporária dotado de comunicação via rádio e responder se é possível desenvolver um novo método para tomada de decisão de tempo de ciclo de aquecimento na Rotomoldagem.

Foram instalados 2 moldes estáticos para verificar se a posição de instalação mudaria a resposta de medição de temperatura e ao mesmo tempo foram realizadas as medições do ar interno do Molde de Produção para verificar a existência de aderência confiável entre as temperaturas interna do molde estático e o do ar interno do molde de produção, usando assim essa informação para tomada de decisão de fim de ciclo de aquecimento do forno da Rotomoldagem.

Em termos de contribuição acadêmica este estudo irá abrir diversas oportunidades de pesquisa na área de controle de processos da Rotomoldagem e de estudos em outras direções para oportunidade de evolução deste processo e em termos de contribuição para o setor de moldadores, a pesquisa abrirá oportunidade de redução de custo do processo de Rotomoldagem de abrangência mundial tendo em vista a possibilidade de finalizar o ciclo de aquecimento no momento em que o Pico de Temperatura do Ar Interno (PTIA), alcançar a temperatura predeterminada e não mais por tempo fixo predeterminado, já que diversos fatores podem afetar o tempo de chegada do PTIA, como temperatura de entrada no forno menor, tempo de set-up, parada para manutenção, temperatura do ambiente externo entre outros fatores. Desta forma o presente projeto de pesquisa pretende desenvolver um novo método para tomada de decisão de tempo de ciclo de aquecimento na Rotomoldagem. Também foi feita uma análise geral sobre o crescimento da utilização dos polímeros e a importância da informação em tempo real da temperatura no interior dos moldes de produção para o crescimento da Rotomoldagem, para isso objetivos

específicos deveriam ser resolvidos como:

Adaptação de dois moldes estáticos dotados de sensores de temperaturas, em duas posições diferentes, com comunicação Modbus ao CLP da máquina; Instalação do equipamento K-paq™ e seus sensores de comunicação via rádio frequência, para realizar a medição da temperatura interna do molde de produção, verificar a estabilidade da medição dos moldes estáticos; estudar se as posições de instalação dos moldes estáticos fazem diferença na medição de temperatura e finalmente comparar qual dos 2 moldes estáticos tem a qualidade mais próxima do molde de Produção e se podem ser usados para tomada de decisão de tempo de ciclo de aquecimento na Rotomoldagem.

Resinas termoplásticas usadas na Rotomoldagem

O plástico gradativamente vem ganhando destaque nas discussões sobre poluição e meio ambiente. É alvo de pesquisas, legislações restritivas e pactos globais desde 2012, aproximadamente.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) a produção mundial de resinas termoplásticas em 2016 alcançou 280 milhões de toneladas contra 369 milhões de Toneladas em 2019 um aumento de 24,1%. (Abiplast, 2017, 2020).

Quanto a transformação de resina termoplásticas no mundo em 2019 foram 385,4 milhões de toneladas. No Brasil 2016 foram transformadas 6.1 milhões de toneladas e em 2019, 7,1 milhões de toneladas representando respectivamente R\$ 36,98 bi e 90,8 bi. As 10.891 empresas de transformação de resinas termoplásticas brasileiras empregam 326.759 pessoas. (Abiplast 2020).

O processo de Rotomoldagem menos usada pela indústria do que outros processos como injeção, sopro e extrusão, porém vem demonstrando um crescimento notável nos últimos anos. O mercado Norte Americano em 2019, atingiram a marca de \$2.47 bilhões em vendas de produtos Rotomoldados (PLASTIC NEWS).

Algumas vantagens competitivas quando comparamos a Rotomoldagem com outros processos concorrentes, como a Injeção e ao Sopro, podemos destacar o baixo custo de moldes, Baixo custo operacional para produtos de baixa produção, variedade de cores sem necessidade de set-up e não desperdício de matéria prima em rebarbas ou canais de injeção. As desvantagens são: a dificuldade de conseguir precisão Dimensional, a intervenção manual de operação e principalmente o tempo de processo. Podem ser utilizadas neste processo de produção resinas termoplásticas como o PVC, PA, PC, POM, ABS, PP, PE entre outros. No entanto, mais de 85% das peças rotomoldadas são fabricadas com polietileno, principalmente em função da sua estabilidade térmica. (Yan *et al.* 2006).

Evolução do processo da Rotomoldagem

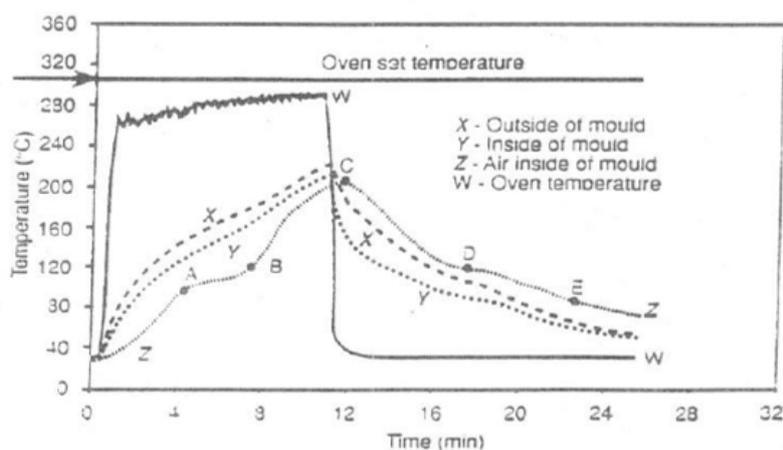
Na década de 1960 trabalhos sobre a melhoria de processos foram realizados. McCourt et al (1960) estudou sobre o resfriamento durante o processo de moldagem rotacional. A motivação deste estudo levava em conta o longo tempo de ciclo e como isso afetaria a economia geral deste processo em termos de fabricação. Desta forma esse trabalho introduziu um dispositivo chamado de 'Rotocooler' que, durante uma série de testes industriais iniciais, demonstrou reduzir

o tempo de ciclo em aproximadamente 12 a 16%, com efeito mínimo nas propriedades mecânicas, levando a uma peça com menos deformação e encolhimento do que uma peça resfriada convencionalmente.

Os princípios da Rotomoldagem foram discutidos por Rao *et al.* (1972), a ênfase naquele momento foi a dedicado à compreensão teórica do processo de moldagem rotacional. Ainda no mesmo ano Throne (1972), escreveu sobre as preocupações com o empenamento e o resfriamento irregular das peças.

Sem sombra de dúvidas o estudo considerado de particular importância foi a introdução do Rotolog™ no início de 1990 por Crawford (1992), O sistema consiste em termopares instalados onde todo o processo de fato ocorre, dentro do molde, controlado por placas eletrônicas dentro de uma caixa térmica e com bolsas de gelo para manter a temperatura em níveis possíveis de serem mantidos os componentes eletrônicos, envia através de um transmissor de rádio as medições dos perfis de temperatura do ar interno do molde e as retransmite para um receptor conectado a um computador. Um programa desenvolvido especificamente para este fim recebe estes dados e monta graficamente as curvas termográficas conforme Figura 1.

Figura 1 - Gráfico do Ciclo Típico da Rotomoldagem.



Fonte: Crawford (1993)

Este sistema trabalho serviu de base para uma série de trabalhos posteriores com a finalidade de melhoria de processo da Rotomoldagem, como por exemplo: Spence & Scott (2003), Abdullah *et al.*, (2007) e Abu-al-nadi *et al.* (2005). Sem dúvidas as medições sendo feitas no interior do molde onde todas as mudanças ocorrem, terão uma informação mais confiável e direta, porém a desvantagem deste tipo de equipamento é utilizá-lo em produção contínua já que os componentes eletrônicos utilizados não suportam exposição em tempo prolongado as altas temperaturas. O Rotolog e outros equipamentos similares, são utilizados para conseguir referencias de tempos e temperaturas, porém fatores externos como set-up, quebras de máquinas, início de produção, mudanças de temperatura externa, ou qualquer outra variável ou uma somatória das variáveis citadas podem exigir para mais ou para menos o tempo de aquecimento para que o ar interno do molde precisa para alcançar o Pico de Temperatura do Ar Interno (PTAI) do Molde, para o melhor processamento da resina. Nestes casos os parâmetros definidos podem não estar corretos e prejudicar a qualidade do produto bem como somar tempos desnecessários no ciclo de processo.

Muitas pesquisas foram e são voltadas para a redução do tempo de ciclo, bem como

para a melhoria da qualidade das peças, novos materiais e cargas. Áreas promissoras neste momento são a pressurização de moldes e controle autônomo de processo. É sabido que aplicar uma pequena quantidade de pressão internamente ao molde no ponto correto da fase de aquecimento acelera a coalescência das partículas do polímero durante a fusão, produzindo uma peça com menos bolhas em menos tempo e pode retardar a separação da peça da parede do molde devido ao encolhimento durante a fase de resfriamento, auxiliando no resfriamento da peça. A desvantagem é o perigo de explosão de uma peça. Isso impediu a adoção da pressurização do molde em grande escala pelos fabricantes de Rotomoldagem (Tan, 2011).

Sun *et al.* (1993), ainda com a finalidade principal em diminuir o tempo do ciclo, desenvolveram um modelo matemático no qual um termo de aquecimento interno poderia ser incorporado. E suas experiências mostraram que as previsões feitas pelo modelo eram precisas.

Attaran *et al.* (1998), desenvolveram um simulador por computador que permitiu entender os efeitos da forma, material e espessura do molde, pó polimérico, proporções de velocidade, temperatura do forno, método de resfriamento no tempo do ciclo e na distribuição da espessura da parede dos produtos rotomoldados.

Nugent (2000), desenvolveu e pediu patente nos EUA de um aparelho de Rotomoldagem que utilizava monitoramento da temperatura contínua de forma estacionária através de sensores de termometria infravermelha (IRT)

Spence A. *et al.* (2003) enfatizaram o crescimento contínuo do controle de processo para a indústria de moldagem rotacional. Enfatizou a mudança na forma de medir a eficiência do processo, que passou da verificação através da resistência ao impacto e o conteúdo de bolhas na parede das peças moldadas para o dispositivo de controle de processo Rotolog como argumento para destacar os trabalhos realizados e os métodos mencionados anteriormente, aplicando nova metodologia para medir e controlar o processo.

Yan *et al.* (2005) Comparou resultados experimentais e concluíram que os modelos teóricos de Halpin – Tsai – Nielsen e Nicolais – Narkis podiam ser usados para prever os módulos de tração e as forças de tração, respectivamente, para os compósitos reforçados particulados produzidos pelo processo de moldagem rotacional quando a distribuição uniforme do reforço é alcançada.

Abdullah *et al.* (2007) introduziram técnicas de modificação de molde exterior com a aplicação de superfícies estendidas e rugosas para melhorar a transferência de calor, as economias experimentais foram da ordem de 18 e 28%.

Banerjee *et al.* (2008) observou redução no tempo de ciclo na utilização de compósitos reforçados. Esse resultado foi atribuído ao aumento da condutividade térmica dos compósitos particulados e à redução da fração de massa do polímero.

Sarrabi *et al.* (2010) descreveu a necessidade de se definir, preliminarmente, uma janela de processamento no mapa temperatura-massa molar, assim poderia se prever a degradação térmica do polímero durante toda operação de processamento.

Tan *et al.* (2012) realizaram testes com diferentes formas de resfriamento, através do argumento que o processo de resfriamento da Rotomoldagem convencional era relativamente longo devido à baixa condutividade térmica dos plásticos. Concluíram que um bico pneumático

forneceu a taxa média de resfriamento mais alta, enquanto o bico hidráulico forneceu a taxa média de resfriamento mais baixa. O bico ultrassônico com gotículas de tamanho médio em velocidade baixa de deslocamento produziu um acabamento de superfície satisfatório. O resfriamento com jato de água produziu porosidades menores em comparação ao resfriamento ambiente, enquanto o aumento da taxa de resfriamento reduz a porcentagem de cristalinidade.

Ogila *et al.* (2017) Fizeram uma revisão sobre as literaturas até então no campo da Rotomoldagem. Foram avaliados os mecanismos de transferência de calor, sinterização e remoção de bolhas; assim como a degradação e a estabilidade dimensional. Os parâmetros que afetavam o acabamento da superfície foram destacados bem como os sistemas de controle disponíveis para o processo de Rotomoldagem foram mencionados. Melhorias em moldes e maquinários, e até que ponto eles reduziriam os tempos de ciclo, também foram descritos. Finalmente, a gama de materiais disponíveis para o processo de Rotomoldagem foi examinada e desenvolvimentos recentes foram destacados. De particular interesse foi a moldagem rotacional de sistemas de polímero líquido; que demonstraram possuir grande potencial para cumprir muitos dos requisitos de qualidade de superfície da moldagem rotacional, ao mesmo tempo em que reduziam os tempos de ciclo.

Considerando que a Rotomoldagem era uma indústria emergente naquele momento para a fabricação de produtos plásticos ocos de vários tamanhos. (Chaudharya *et al.*; 2018); criaram uma abordagem sistemática e eficiente de tomada de decisão de multi atributo, denominada análise de relações para seleção de materiais em Rotomoldagem,

Sari *et al.* (2019) Usou a técnica de moldagem rotacional para a fabricação de compósitos. A fibra de coco (fibra de coco) foi selecionada como reforço e o efeito do tratamento químico na fibra também foi estudado. Essa foi a primeira tentativa de demonstrar que a moldagem rotacional poderia ser aplicada com sucesso ao PE modificado com plasma como a matriz e fibra de coco como reforço.

Abhilash *et al.* (2019) Processaram tanto o MDPE quanto o HDPE em três diferentes temperaturas do ar interno e as propriedades mecânicas foram estimadas de acordo com os padrões ASTM e observou-se que a resistência à tração e ao impacto melhorou com o aumento da temperatura interna do ar.

Manríquez-Legarda *et al.* (2020) apresentaram um projeto de um sistema de controle de loop fechado dinâmico baseado em Arduino. Ajustando os valores de temperatura dos queimadores do sistema por meio de Servo válvulas.

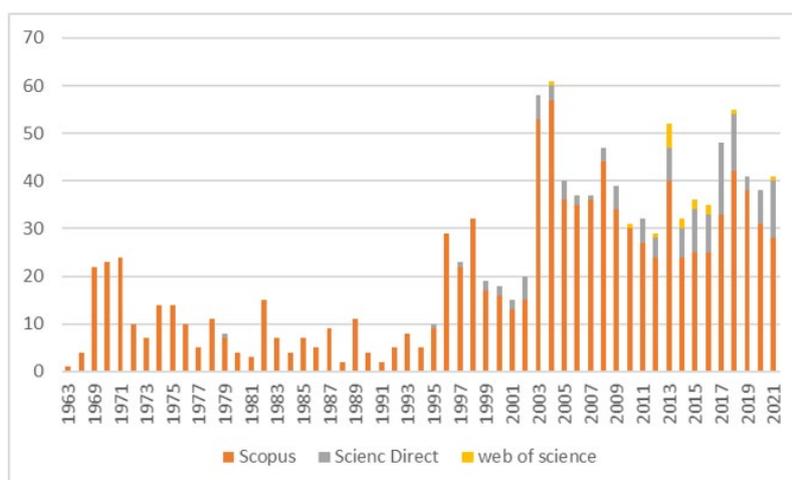
MATERIAIS E MÉTODOS

Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica, foi realizada nas bases Scopus, Web of Science e Science Direct, inicialmente foram pesquisadas as palavras “Rotational Moding” e “Rotomolding”, que são as palavras mais comuns para o processo estudado, a quantidade de resultados encontrados estão demonstrados na Figura 2. Podemos verificar nesta figura que a base Scopus teve a maior base de resultados com as palavras definidas inicialmente, com 1058 na Base Scopus, 125 na

base Science Direct e apenas 16 na web of Science. Um total de 1199 resultados sendo 88,2% na base Scopus. Não foi limitado o ano da pesquisa. Uma verificação importante foi o aumento de pesquisas realizadas nos últimos 18 anos.

Figura 2 - Quantidade de Resultados (“Rotomolding” or “Rotational Molding”)



Aprofundando um pouco mais as pesquisas podemos notar que os autores que mais publicaram este assunto foram: Crawford R. J com 40 publicações, Rodrigue D. com 38 publicações e Añón J. C R com 28 publicações realizadas, na base da Scopus onde temos 88,2% dos resultados.

Local de realização dos experimentos

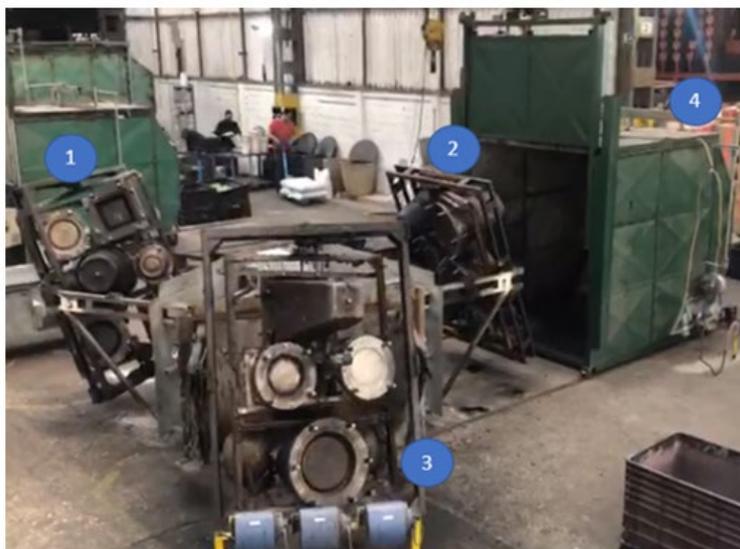
Os Experimentos deste trabalho foram realizados na sede, do grupo de empresas Alfa-mec localizada na cidade de Ribeirão Pires do ABC Paulista no Estado de São Paulo, autorizado e apoiado pelo Chairman da Empresa.

Esse trabalho contou com apoio técnico, equipamentos e matéria prima da empresa Lyondel Bassel que é a maior produtora de polipropileno na América do Norte e na Europa e me autorizou a divulgar o apoio e seus resultados neste trabalho.

Desenvolvimento e adaptações técnicas da Rotomoldagem

Máquina de Rotomoldagem tipo carrossel com três braços de fabricação própria. Os três braços da máquina têm as velocidades dos movimentos de rotação e translação controlados por inversores de frequência. A indicação (1) da Figura 3 mostra a posição de carga de matéria prima e descarga do produto, a indicação (2) mostra a posição de aquecimento com a movimentação do forno, a (3) indica a posição de resfriamento e a indicação (4) mostra o forno.

Figura 3 - Máquina de Rotomoldagem forno aberto



O aquecimento do forno é realizado por 1 queimador de 200.000 Kcal/Hora. Um Termo Elemento tipo K que envia as medições de temperaturas internas do forno para um CLP programado com um módulo de PID (Proporcional, Integral e Derivativo) que modula a válvula proporcional do gás e controla a rampa real de temperatura interna do forno conforme definido pela engenharia de processos.

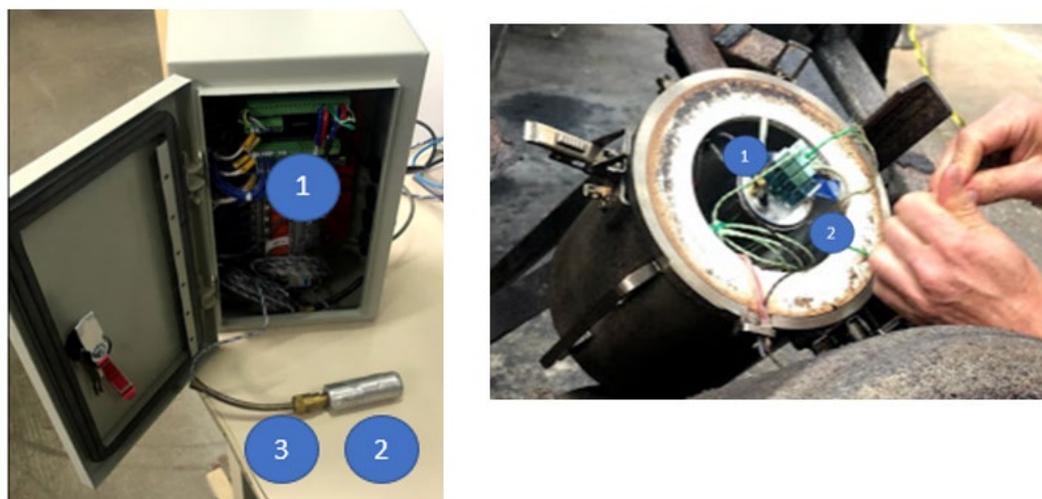
Um molde fundido em alumínio pela empresa Sigma tecnologia em Alumínio, líder brasileira na produção de moldes de alta qualidade para Rotomoldagem.

Resina fornecida pela Lyondel Bassel, PEAD (Polietileno de Alta Densidade), com nome comercial, ICORENE 3850, vermelho 503 UV8.

Moldes estáticos de alumínio com indicação (2) na Figura 4a, confeccionado com o mesmo material e mesmas espessuras dos moldes dos vasos de produção, dotados de Termo Elementos tipo K com a indicação (3), que após estarem montados será identificado neste trabalho como Molde estático.

Para medição do ar interno do molde foi utilizado o equipamento KPAQ-493K, de fabricação Inglesa da empresa K-paq™. Conforme Figura 3. Este equipamento mede em tempo real a temperatura do ar interno do molde e sua própria temperatura de trabalho, já que tem baixa autonomia por ser dotado de placas eletrônicas com a indicação (1) na Figura 4b, com bolsas térmicas congeladas indicadas como (2), para manter a integridade durante alguns testes. Esse equipamento envia via sinal de rádio as temperaturas para um receptor ligado a um computador onde foram gerados os gráficos dos dados.

Figura 4 - a) Equipamento K-paqTM e b) Equipamento K-paqTM



Metodologia do processo de Rotomoldagem

Por se tratar de um trabalho muito específico a metodologia foi escrita de forma a descrever os passos a serem realizados em termos de preparação, realização e coleta de dados dos testes para responder com o melhor nível de clareza os objetivos específicos deste trabalho.

A Figura 5 demonstra de forma geral o ambiente de testes e as instalações dos dispositivos e comunicação e coleta de dados, onde as indicações na cor laranja, demonstram os equipamentos e comunicação da medição do molde de produção, com indicação (1) o equipamento de medição KPAQ, indicação (2) o molde de produção e a indicação 3 o receptor via rádio. As indicações em Azul demonstram o sistema de medição dos 2 Moldes Estáticos dotados de sensor de temperatura, com a indicação (4) os dispositivos estáticos, a indicação (5) o computador ligado ao CLP com as informações da temperatura interna do forno e dos dispositivos estáticos recebidos via sinal de Ethernet.

Figura 5 - Instalações Completas do equipamento utilizado na pesquisa



As medições dos dois dispositivos estáticos e do molde de produção foram realizadas conjuntamente em 3 ciclos completos. O gráfico dos ciclos do Molde Estático foi apresentado inicialmente separadamente e respondeu o primeiro objetivo específico deste experimento, quanto a estabilidade dos ciclos e diferença caso exista entre o Molde Estático 1 e Molde Estático 2.

Este gráfico foi analisado separadamente já que neste caso os dados são apontados segundo a segundo. Após essa análise foi apresentado o Gráfico das medições dos 3 ciclos da temperatura interna do Molde de Produção e da Temperatura interna do Forno para análise de estabilidade, neste caso os dados foram coletados Minuto a Minuto.

Após essas verificações os dados foram compilados em 1 único Gráfico para comparação entre as temperaturas ao longo do tempo entre os 2 Moldes Estáticos e o Molde de produção. Desta forma foi possível verificar se os moldes estáticos tiveram aderência de temperatura com o Molde de Produção e qual dos 2 moldes estáticos teve a maior aderência em relação ao molde de Produção respondendo o segundo objetivo específico deste experimento.

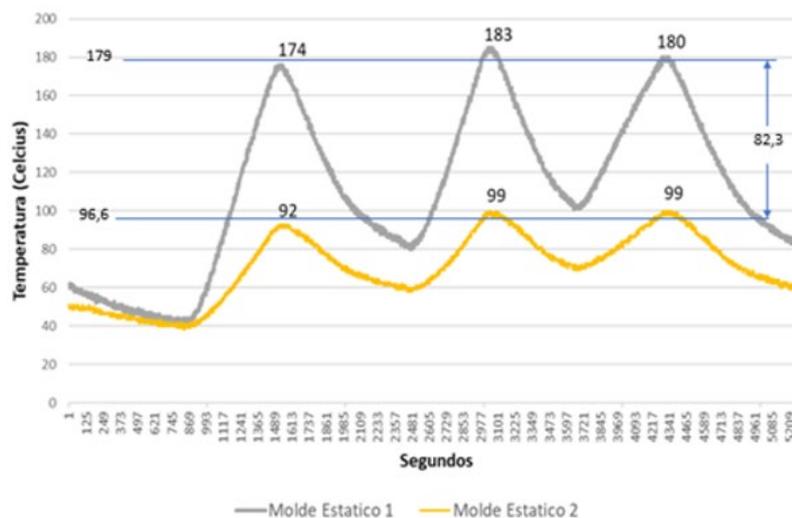
Com essa definição foi realizada a comparação do Molde Estático escolhido com a curva de temperatura do Molde de Produção respondendo então o objetivo principal do experimento quanto a possibilidade de usá-lo como referência para futuras tomadas de decisão de fim de ciclo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Coleta de dados do experimento na Rotomoldagem

Foram realizadas as medições em 3 ciclos completos, conjuntamente, com os dois dispositivos estáticos e o molde de produção. A Figura 6 demonstra isoladamente o comportamento da temperatura entre os dois dispositivos estáticos em relação ao tempo em segundos. Pode-se notar nas curvas que os dados dos 2 dispositivos estáticos demonstram comportamentos estáveis dentro dos 3 Ciclos, porém com amplitudes diferente entre eles, no primeiro ciclo o pico de temperatura alcançada pelo Molde Estático 1 foi de 174°C enquanto o Molde Estático 2 foi 92°C, com um delta de diferença de 82°C, no segundo ciclo o pico de temperatura alcança pelo Molde Estático 1 foi de 183°C enquanto o Molde Estático 2 foi 99°C, delta de 84°C e no terceiro ciclo, o pico do Molde Estático 1 foi de 180°C e o Molde Estático 2 foi 99°C, diferença de 81°C, o Molde estático 1 teve uma diferença entre o seu maior e menor valor de 9°C, e média no pico de 179°C. O Molde estático 2 teve uma diferença entre o seu maior e menor valor de 7°C, com uma média no pico de 96,6°C. A diferença entre as médias de picos dos dois dispositivos foi de 82,3° C.

Figura 6 - Comportamento da temperatura entre os dois dispositivos estáticos



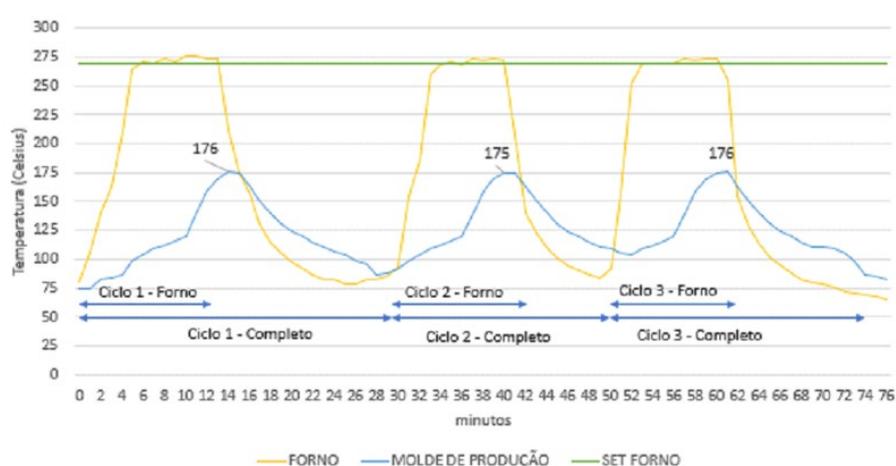
Através destes resultados foi concluído que o local onde os dispositivos foram posicionados influenciam no resultado da medição, bem como a forma de instalação dos mesmos. O Molde estático 1 teve uma exposição maior ao ambiente do forno e respondeu de forma mais ampla do que o molde estático 2. Pode-se concluir também que independentemente da posição existe estabilidade entre os ciclos testados tanto para o molde estático 1 quanto para o Molde estático 2.

A Figura 7 demonstra o comportamento da temperatura do ar interno do molde de Produção, a indicação do set Point da temperatura do Forno, e a evolução da temperatura interna do forno. Todas os dados plotados foram registrados a cada 1 minuto. Como pode se notar que as curvas plotadas, têm as características da figura típica descrita por (Crawford).

Algumas características importantes puderam ser notadas na curva da temperatura do forno, como a rápida subida de temperatura atingindo o set point nos 3 ciclos, a estabilidade da curva dentro do set point determinado, alcançada graças aos equipamentos e softwares disponíveis e programados. Válvula proporcional no sistema do gás controlada por um CLP programado com um algoritmo PID. Notou se ainda uma caída brusca de temperatura quando o queimador foi desligado e o forno aberto, porem todos os ciclos demostraram estabilidade apesar de ter havido um tempo maior entre o ciclo 1 e 2 em relação aos ciclos 2 e 3.

Quanto aos dados da temperatura do ar interno do Molde de Produção, notou-se grande estabilidade entre os picos de temperatura em relação ao tempo de 12 minutos que ficou dentro do forno em cada ciclo. O Ciclo 1 iniciou-se no minuto 0 e foi aberto no minuto 12, o Ciclo 2 iniciou-se no minuto 30 e finalizou no minuto 42, e ciclo 3 ocorreu entre os minutos 50 e 62, entre os ciclos houve a refrigeração do molde de produção, retirada dos produtos, novos abastecimentos com resina. Os Picos de Temperatura do Ar Interno (PTAI), do molde foram: Ciclo 1 com 176°C, Ciclo 2 com 174°C e Ciclo 3 com 176°C. Diferença de 1°C entre a maior e a menor temperatura de PTAI, neste caso mostrou-se muito estável as medições dos 3 ciclos do experimento.

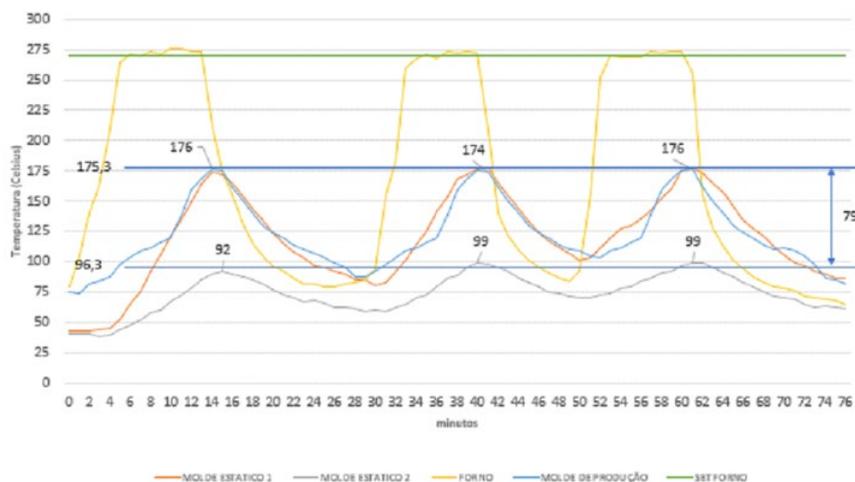
Figura 7 - Comportamento da temperatura do Ar Interno do Molde de Produção



Na Figura 8 todos os dados foram plotados para análise completa dos dados, nesta análise verificou-se que as temperaturas iniciais dos dois moldes estáticos se encontravam aproximadamente 40° C abaixo da temperatura inicial do ar interno do molde de produção, isso ocorreu, pois o molde de produção já estava sendo utilizado em produção antes do início dos experimentos e os moldes estáticos foram instalados no início dos experimentos, porem a cur-

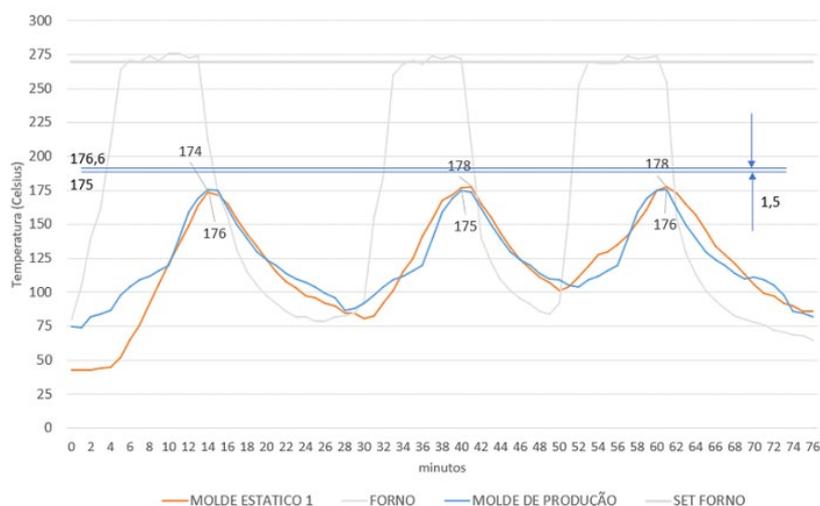
va inicial do experimento demonstrou que no minuto 9, as curvas do molde estático 1 e a curva da temperatura do ar interno do molde de produção já estavam estabilizados e se mantiveram para os outros ciclos. Comparando-se ainda as curvas mencionadas foi possível verificar que o molde estático 1, acompanha não só a temperatura do ar interno do molde de produção quando são aquecidos, mas durante todo o processo de resfriamento. Foi possível ainda verificar que o Molde estático 2 apesar de acompanhar o aquecimento e resfriamento do ar interno do molde de produção, mostrou um delta de temperatura de PTAI elevado, em média esta diferença foi de 79° C, por outro lado ficou claro na Figura 8, que as temperaturas medidas no Molde estático 1 teve aderência gráfica com a curva da medição do ar interno do molde de produção.

Figura 8 - Comparativo entre os moldes estáticos 1 e 2 e o ar interno do molde de produção



Assim, a curva do molde estático 2 foi descartada. A Figura 9, pudemos analisar a curva do Molde estático 1, e a curva de temperatura do ar interno do molde de produção. Inicialmente analisamos os PTAIs dos Ciclos. No Primeiro ciclo o molde estático teve seu PTAI no minuto 14 a 174° C e o Molde de produção no minuto 15 a 175° C, no segundo ciclo o molde estático teve seu PTAI no minuto 41 a 178° C e o Molde de produção no mesmo minuto 41 a 174° C e o no terceiro ciclo o molde estático teve seu PTAI no minuto 61 a 178° C e o Molde de produção no mesmo minuto 61 a 176° C. A variação entre o maior e a menor temperatura de PTAI do molde estático foi de 4 graus, porem duas das 3 medições foram de 178° C, com média de 176,6° C. e mesma variação para o ar interno do molde de produção foi de 2 ° C, com média de Temperatura de PTAI de 175° C.

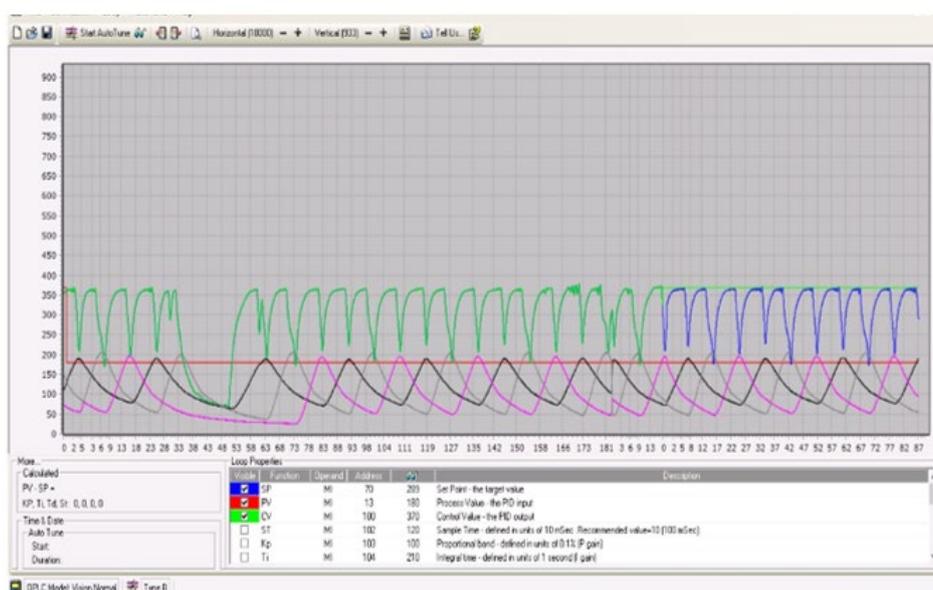
Figura 9 - Molde Estático 1 e Ar Interno do Molde de Produção



Desta forma foi possível comparar as medias de PTAI, de 176,6° C para o molde estático e 175° C para o ar interno do molde de produção, sendo apenas 1,5° C de diferença entre as medias. Desta forma foi possível afirmar que o dispositivo estático instalado na posição 1 pode ser usado como referência para tomadas de decisão de fim de ciclo na Rotomoldagem.

Após a realização dos testes de forma positiva, foram realizadas instalação do molde estático nos outros dois braços da Máquina, conforme pode-se verificar na Figura 10, desta foram a planta fabril já está sendo beneficiada de alguns resultados positivos desta instalação, como redução de tempo de ciclo e economia de gás, entre outros. A curva superior nas cores verde e azul indicam a temperatura do interna do Forno. As curvas nas cores preta, lilás e cinza demonstram os dispositivos estáticos. O forno é desligado no momento em que as temperaturas dos dispositivos estáticos atingem 180° C.

Figura 10 - Tela do controle dos moldes estáticos instalados e em produção



CONSIDERAÇÕES FINAIS

As adaptações realizadas na máquina de Rotomoldagem dos dois moldes estáticos dotados de sensores de temperaturas, em duas posições diferentes, com comunicação Modbus ao CLP da máquina, bem como a Instalação do equipamento K-paq™, e seus sensores de comunicação via rádio frequência, para realização da medição da temperatura interna do molde de produção, mostram se eficientes para o desenvolvimento da pesquisa.

As figuras na forma de picos e vales dos moldes estáticos demonstram a forma características do processo de Rotomoldagem, estabilidade nas medições de aquecimento e resfriamento ao longo do tempo. Quanto ao posicionamento dos moldes estáticos houve diferença com delta diferencial de 82,3°C no Pico, entre os moldes estáticos 1 e 2.

O molde estático 2 apresentou uma diferença de 79° C em relação ao molde de produção enquanto que o molde estático 1, teve uma diferença média de apenas 1,5° C, indicando assim que a posição do último foi o melhor entre eles, ou seja, o molde estático 1 teve a curva de temperatura mais próxima do molde de Produção.

Assim, ficou demonstrado que método desenvolvido nesta pesquisa foi confiável para tomada de decisão de tempo de ciclo de aquecimento na Rotomoldagem para o produto testado em PEAD.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico; Relatório Perfil 2020; São Paulo, 2020. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Perfil2020_abiplast.pdf. Acessado em 26/08/2020.

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico; Relatório Perfil 2017; São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-2017.pdf>. Acessado em 23/03/2021.

ABU-AL-NADI, D. I. *et al.*; Control of rotational molding using adaptive fuzzy systems. *Advances in Polymer Technology*; v. 24, n. 4, p. 266–277, 2005.

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

ABHILASH S. S., LUCKOSE R., SINGARAVELU D. L.; Processing and characterization of HDPE and MDPE processed by rotational moulding; *Materials Today: Proceedings*; v. 27, p. 2029 – 2032; 2020

ATTARAN M. T., WRIGHT E. J., CRAWFORD R. J.; Computer Simulation of the Rotational Moulding Process for Plastics; *Plastics and Rubber Processing and Applications*; 1998

BANERJEE S., YAN W., BHATTACHARYYA D., Modeling of Heat Transfer in Rotational Molding, *Polymer Engineering and Science*; 2008

CHAUDHARYA B., RAMKUMARB P. L., ABHISHEKC K.; Material Selection for Rotational Moulding Process Using Grey Relational Analysis Approach; *Materials Today: Proceedings*; v. 5, p. 19224–19229, 2018

CRAWFORD R.J., NUGENT P J.; A new process control system for rotational moulding. *Plastics; Rubber and Composites Processing and Applications*, 17, 23–31, 1992.

CRAWFORD R.J.; Recent advances in the manufacture of plastic products by rotomoulding.; *Journal of Materials Processing Technology*; v. 56, n. 1–4, p. 263–271, 1996.

HORNSBY, P. R.; KEARNS, M. P.; MCAFEE, M. P.; MCCOURT, M.P, TAN, S. B.; Internal cooling in rotational molding; *Polymer Engineering and Science*; v. 51, n. 9, p. 1683–1692, 2011.

MANRÍQUEZ-LEGARDA J. L., CHÁVEZ-VALDEZ S. J., SÁENZ-ZAMARRÓN D., ARANA-DE-LAS-CASAS N. I., SANTIESTEBAN-TOCA, C. E., VELARDE-BEDREGAL H. R.; Temperature control for rotomolding machine; *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, n. July, p. 27–31, 2020.

NUGENT P. J.; Rotational molding apparatus and method using infrared thermometry; U.S. Patent 6036897 A, USA, 2000.

OGILA K. O., SHAO M., YANG W. TAN J.; Rotational molding: A review of the models and materials; Express Polymer Letters; v. 11, n. 10, p. 778–798, 2017.

RAO M. A., JAMES L. THRONE J. L.; Principles of Rotational Molding; Polymer Engineering and Science; v.12, n. 4; 1972

SARI P. S., THOMAS S., SPATENKA P., GHANAM Z., JENIKOVA Z.; Effect of plasma modification of polyethylene on natural fibre composites prepared via rotational moulding; Composites Part B; v. 177; 2019

SARRABI S., COLIN X., TCHARKHTCHI A.; Kinetic Modeling of Polypropylene Thermal Oxidation; Journal of Applied Polymer Science, v. 118, p. 980–996; 2010

SPENCE A., ROB SCOTT; Rotational Molding Process Control; Alvin Centro Incorporated; p. 1241–1245, 2003.

SUN D., CRAWFORD R. J.; Analysis of the Effects of Internal Heating and Cooling During the Rotational Molding of Plastics; Polymer Engineering and Science; V. 33, n. 3; 1993

TAN, S.B.; Accelerated Cooling of Thermoplastics in Rotational Moulding; Ph.D. Thesis in Mechanical and Aerospace Engineering; Queen's University Belfast, 2010.

TAN, S.B. ; Hornsby, P. R. ; MCAFEE, M. B. ; KEARNS, M. P. ; MCCOURT, M. P.; Water spray cooling of polymers; Polymer Engineering and Science; v. 52, n. 5, p. 1069-1081, 2012.

THRONE L. J.; Some Factors Influencing Cooling Rates of Rotationally Molded Parts; Polymer Engineering and Science; v.12, n. 5; 1972

PLASTIC NEWS - Custom rotomolders crowd the top of 2020's ranking. Disponível em: <https://www.plasticsnews.com/blog/custom-rotomolders-crowd-top-2020s-ranking> acessado em 28/03/21

YAN, W.J.; LIN, R.J.T.; BHATTACHARYYA, D.; Particulade reforçede rotationally mouded polyethylene composites – Mixing methods and mechanical properties; Composites Science and Technology; v. 66, n. 13, p. 2080–2088, 2006.