

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

HUGO ZAVANELLI MANZANO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PULTRUSÃO NO PROCESSO DE
PRODUÇÃO DE PERFIS DE FIBRA DE VIDRO**

LONDRINA

2022

HUGO ZAVANELLI MANZANO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PULTRUSÃO NO PROCESSO DE
PRODUÇÃO DE PERFIS DE FIBRA DE VIDRO.**

**Influence of pultrusion temperature on production process of fiberglass
profiles**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Felipe Luiz de Assunção Bezerra

Coorientador(a): Larissa Maria Fernandes Gatti

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

HUGO ZAVANELLI MANZANO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PULTRUSÃO NO PROCESSO DE
PRODUÇÃO DE PERFIS DE FIBRA DE VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 12/dezembro/2022

Joel Fernando Nicoletti
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Admilson Lopes Vieira
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Edson Miguel Nunes
Angelus Indústria de Produtos Odontológicos

LONDRINA

2022

Dedico este trabalho à minha família e meus amigos,
pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a minha família, minha mãe Alessandra, minha irmã Victória, meu irmão Heitor, minha tia Adriana, minha prima Mariana, minha avó Marlene, meu tio Ricardo e a todos que, de alguma forma, contribuíram para com minha formação. Agradeço imensamente por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e incentivando, foram meus alicerces para essa conquista. Gostaria de me desculpar pela ausência durante esses 5 longos e intensos anos, mas tudo valeu a pena, nós conseguimos.

Também, aos meus amigos, que, por vezes, foram a minha família aqui, em especial, Gustavo Zamboni, Murilo Ferreira, Victor Willy e Guilherme Castro. Com certeza foram fundamentais e essenciais nessa conquista, compartilhamos inúmeros desafios, mas que contribuíram valiosamente para essa realização.

Ainda, gostaria de agradecer à Angelus, em especial ao meu chefe Guilherme Moreno, pela paciência, persistência, pela confiança no meu trabalho e por ser uma inspiração como profissional, ao meu amigo Edson Nunes, pela parceria, incentivo e por todas as conversas fundamentais para meu crescimento, ao meu amigo Diego Penachini, pelo suporte e convívio que enriqueceram meu processo de aprendizado, a amiga Maria Julia Monteiro, pela ajuda com a coleta de dados e indicadores que solidificaram os resultados, aos amigos Rodrigo Mariano e Ademir Ramos na realização da produção, aos amigos do setor de Tecnologia, Produção e Pesquisa e Desenvolvimento, por todas as conversas e companheirismo, aos meus diretores César Bellinati e Paulo Calixto, pela confiança e oportunidade a mim concedida, e a todos os colaboradores que agregaram de forma direta ou indireta na finalização desta etapa de vida.

E não menos importante, um agradecimento especial para todos os meus professores da graduação, por todos os ensinamentos e também as correções, todos os conselhos, ajudas e paciência que me guiaram até aqui. Ao professor Joel Fernando Nicoletti, por ter sido meu orientador com tamanha dedicação e paciência.

RESUMO

Pultrusão é um processo de fabricação de compósitos poliméricos. Seu princípio de operação envolve a impregnação de fibras de vidro em uma resina epóxi, que transpassa um molde com o formato de perfil cilíndrico, a partir de um tracionador que trabalha a uma frequência constante. Diversas variáveis podem afetar a eficiência do processo e a qualidade do compósito, como a frequência do tracionador, as propriedades resinosas, a quantidade e o posicionamento de fibra e, principalmente, a temperatura do molde de pultrusão. Nesse estudo, investigou-se a influência da temperatura do molde para duas configurações, de acordo com o gradiente de temperatura no interior do molde. De acordo com as configurações propostas foi possível avaliar a melhor performance térmica e mecânica das barras produzidas. Constatou-se que para alcançar melhor desempenho, é necessário que a temperatura no interior do molde atue de forma decrescente no sentido de entrada e saída do perfil no interior do molde, um indicativo de conversão de cura mais rápida. Além disto, pela aplicação da OEE, pôde-se estimar uma eficiência global do equipamento de 8%, adicionado a melhora da qualidade do produto final.

Palavras-chave: Pultrusão; Compósitos Poliméricos; Propriedades Térmicas; Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Pultrusion is a manufacturing process for polymeric composites. Its principle of operation involves the impregnation of glass fibers in an epoxy resin, which passes through a mold with the shape of a cylindrical profile, from a traction device that works at a constant frequency. Several variables can affect the efficiency of the process and the quality of the composite, such as the frequency of the traction device, resin properties, fiber quantity and positioning, and especially the temperature of the pultrusion mold. In this study, we investigated the influence of mold temperature for two configurations, according to the temperature gradient inside the mold. According to the proposed configurations it was possible to evaluate the best thermal and mechanical performance of the produced bars. It was found that to achieve better performance, it is necessary that the temperature inside the mold acts in a decreasing manner in the direction of entry and exit of the profile inside the mold, an indication of faster curing conversion. Furthermore, by applying the OEE, it was possible to estimate an overall efficiency of the equipment of 8%, adding to the improvement in quality of the final product.

Keywords: Pultrusion Process; Polymer Composites; Thermal Properties; Mechanical Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema do processo de pultrusão	13
Figura 2 – Etapas do processo de pultrusão	14
Figura 3 – Fluxo de calor no molde de pultrusão	14
Figura 4 – Pinos intrarradiculares em fibra de vidro	16
Figura 5 – Usabilidade de um pino intrarradicular	16
Figura 6 – Posição das zonas de setup de temperatura no molde	18
Figura 7 – Barra pultrudada	19
Figura 8 – Máquina de Ensaio Universal	21
Figura 9 – Configuração do ajuste do método de flexão de três pontos	21
Figura 10 – Posição da amostra do perfil no ensaio de flexão de 3 pontos	22
Figura 11 – Equipamento DSC para análises térmicas.	22
Figura 12 – Resultado de Ensaio de Flexão	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições propostas	20
Tabela 2 – Resultados para o teste de flexão com setup da Condição 1.	24
Tabela 3 – Resultados para o teste de flexão com setup da Condição 2.	24
Tabela 4 – Melhoria encontrada nos ensaios mecânicos.	25
Tabela 5 – Melhoria encontrada nos ensaios térmicos	26
Tabela 6 – Melhoria efetiva do equipamento.	26

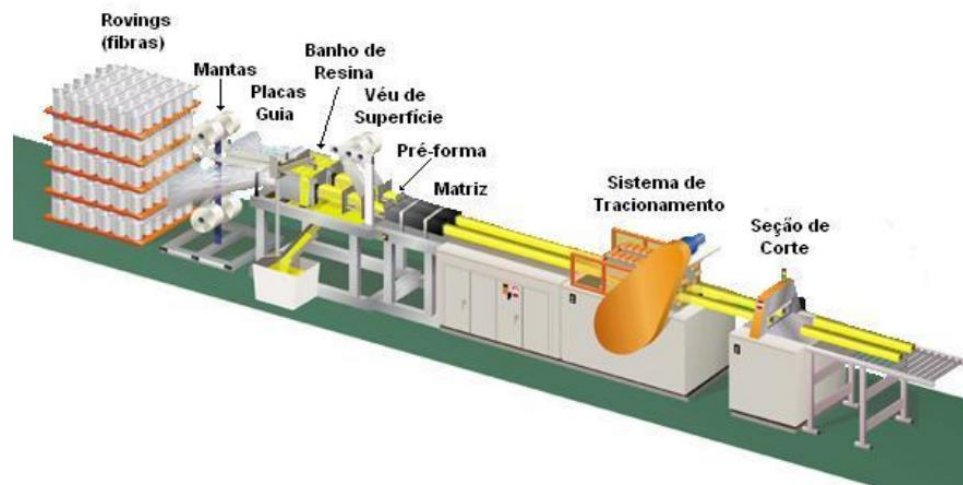
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA.....	18
3	DESENVOLVIMENTO	20
3.1	Processo de Pultrusão.....	20
3.2	Propriedades Mecânicas	20
3.3	Propriedades Térmicas	22
4	RESULTADOS.....	24
4.1	Propriedades Mecânicas	24
4.2	Propriedades Térmicas	26
4.3	Melhoria Contínua	27
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	29

1 INTRODUÇÃO

Pultrusão é um processo contínuo para fabricação de compósitos reforçados com fibra, seja de vidro, metálica ou de carbono. O produto resultante é um perfil de comprimento contínuo e seção transversal constante. O processo de pultrusão se dá pela passagem de fibras de vidros em um banho de resina, composta por um endurecedor, um acelerador, desmoldante e um radiopacificador, sendo em seguida puxadas por um tracionador que opera a uma frequência pré determinada e constante, a partir do momento em que se encontra o perfil com propriedades mecânicas e térmicas capazes de suprirem os critérios de aceitação propostos. A partir da ação do tracionador, o material fibroresinoso passa por um molde saindo na forma do produto desejado, no caso, um perfil cilíndrico, que segue então para a seção de corte. O esquema simplificado é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema do processo de pultrusão



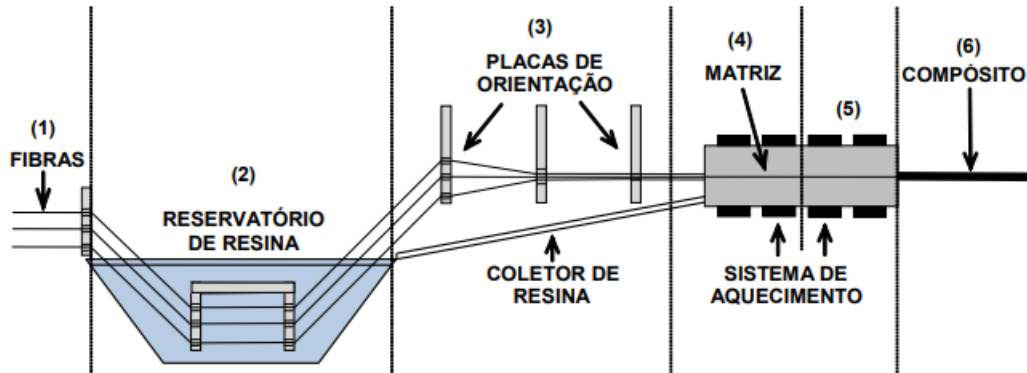
Fonte: BORGES, 2004.

Os compósitos pultrudados são vastamente utilizados na construção civil, na indústria automobilística, na área de transportes e no setor elétrico, contudo, o perfil cilíndrico (barra pultrudada) em questão, passa por uma usinagem e é utilizado na odontologia, com a produção de pinos intrarradiculares.

O processo de pultrusão pode ser dividido em seis etapas, conforme Figura 2. Assim, a etapa (1) representa alinhamento e posicionamento das fibras de vidro; (2) a impregnação das fibras no interior de uma banheira de resina; (3) a orientação e

retirada do excesso de resina sobre as fibras de vidro mais externas; (4) a entrada das fibras impregnadas no molde e início da formação do compósito; (5) o resfriamento gradual e contração volumétrica do perfil pultrudado sólido, de acordo com o formato do molde e, por fim, (6) o corte do compósito (STAR, 2000).

Figura 2 – Etapas do processo de pultrusão

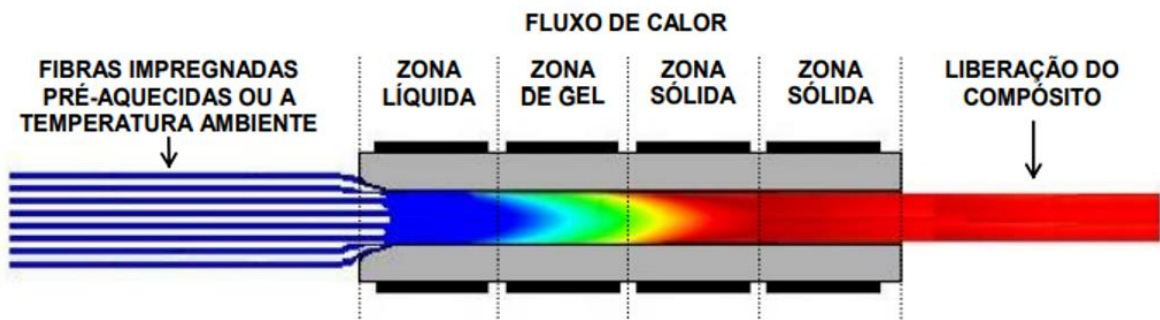


Fonte: STAR, 2000.

As etapas referentes ao sistema de aquecimento (4 e 5) são as mais críticas do processo, uma vez que envolvem a reação de cura da resina epóxi. As características e as propriedades dos compósitos pultrudados dependem da eficiência e da extensão desta reação. Por esta razão, é extremamente relevante analisar as transformações que ocorrem com o perfil pré-moldado no interior da matriz para então, poder definir adequadamente as condições de processamento (STAR, 2000).

Ainda, é possível aprofundar-se nessa etapa do sistema de aquecimento, segregando o molde em três zonas, de acordo com o fluxo de calor, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxo de calor no molde de pultrusão



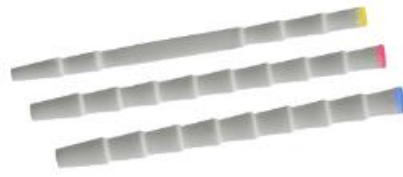
Fonte: STAR, 2000

A Figura 3 apresenta as fases do sistema nas etapas de formação e solidificação do compósito de pultrusão, que é o perfil pré-fabricado no interior da matriz durante o processo de pultrusão. À medida que as fibras de reforço impregnadas se aproximam da primeira zona da matriz (zona líquida) saindo do reservatório de resina, esse material exerce pressão na entrada do molde. A força de tração entre as fibras de reforço e as paredes da matriz remove o excesso de resina nas fibras mais externas do perfil da peça acabada, enquanto simultaneamente o rebocador exerce uma força de cisalhamento no material (zona líquida). É importante nesta fase que a pressão na entrada do molde não seja muito alta, caso contrário, as fibras se romperão e o perfil solidificará, inviabilizando o processo (STAR, 2000).

À medida que as fibras de vidro são tracionadas para o centro do sistema de aquecimento, o material começa a absorver calor da primeira zona de aquecimento (zona de gel). A viscosidade do sistema diminui, o que favorece a impregnação das fibras mais internas do perfil pré-moldado e o seu acondicionamento definitivo no formato do molde. Quando a temperatura de ativação do iniciador for atingida, a reação de cura da matriz polimérica tem início. A reação ocorre na superfície externa do material e o calor gerado pela reação exotérmica, em conjunto com o calor absorvido pelo próprio sistema de aquecimento, se propagam para as camadas mais internas por condução (JOSH, 2003).

No caso da Angelus, Indústria de Produtos Odontológicos, o compósito obtido do processo são perfis cilíndrico de fibras de vidro, que, em um processo terceirizado, passam por usinagem, para então resultarem em pinos utilizados na endodontia pelos profissionais da área odontológica, abastecendo tanto o mercado interno quanto externo. Alguns dos pinos estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Pinos intrarradiculares em fibra de vidro.



Fonte: Próprio Autor. 2022

Os pinos a base de fibra de vidro são opções ideais para o tratamento de prótese odontológica, o que permite a realização de tratamentos com praticidade, alta eficácia e ótimo resultado estético. Apresentam alta resistência mecânica e não são suscetíveis à corrosão. Os pinos podem ser cimentados em única consulta, o que diminui o tempo clínico. Tem módulo de elasticidade semelhante a dentina, que segundo a literatura, apresenta valores indicados entre 17,06 e 25,07 GPa (Marshall, 2001), distribuindo assim a carga oclusal aplicada no dente e diminuindo a chance de fratura radicular. Além de serem biocompatíveis, possuem alta resistência ao impacto, absorção de choques, alta resistência à fadiga e exigem menor desgaste de dentina radicular, impedindo que a raiz se fragilize, sendo fáceis de remover se necessário (PEGORARO et al., 2013). A sua usabilidade é apresentada na Figura 5, onde o pino entra como suporte, e é necessária a aplicação de um cimentador para fixação do mesmo.

Figura 5: Usabilidade de um pino intrarradicular.



Fonte: Surya Dental, 2020.

Uma das propriedades a serem avaliadas em uma barra pultrudada são provenientes de ensaios mecânicos e térmicos. A partir dos testes mecânicos é possível prever a força de ruptura, resistência flexural e o módulo de elasticidade, enquanto que na avaliação térmica pode-se obter a temperatura de transição vítrea.

Em termos gerais, ensaios mecânicos fazem referência a medida da resistência do produto, a partir da rigidez e flexibilidade do material. A rigidez é associada ao grau de solidez, e é inversamente proporcional a flexibilidade, que por sua vez, representa o grau de curvatura, flexão ou deformação que o produto apresenta antes de ser rompido (EXTRALAB, 2020).

No contexto de polímeros, é importante ressaltar que a temperatura de transição vítrea é uma propriedade térmica fundamental, associada unicamente com a fase amorfa dos polímeros. Essa é a temperatura em que ocorre a transição de um estado vítreo, no qual as moléculas da fase amorfa não possuem mobilidade, para um estado borrachoso, em que as moléculas da fase amorfa passam a ter mobilidade. A temperatura de transição vítrea é afetada pela reação de cura que ocorre no processo. Após a passagem do produto pelo molde, as reações de reticulação aumentam e a rigidez do polímero se torna constantemente maior.

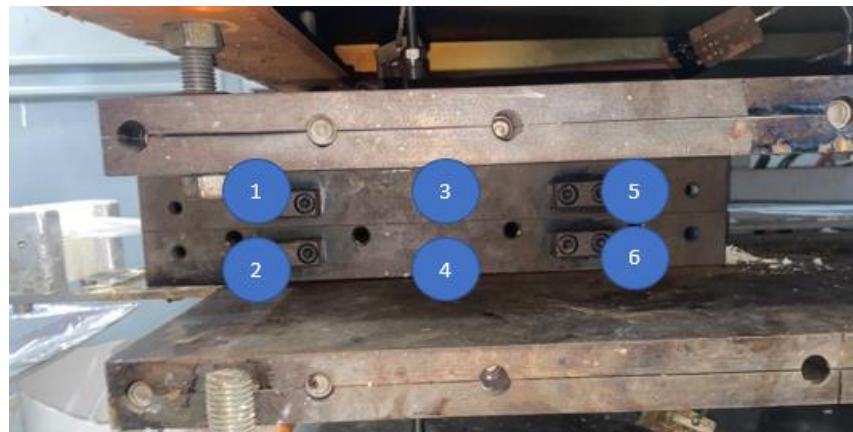
2 JUSTIFICATIVA

O processo de pultrusão realizado na Angelus apresenta diversos parâmetros que interferem na produção e características dos perfis, como as temperaturas do molde, a propriedade da resina a ser imersa à fibra de vidro, a velocidade do tracionador, a quantidade de cabos de fibra de vidro, o posicionamento dos cabos, dentre outros.

Apesar de o processo fornecer um produto que apresenta performance mecânica, posteriormente a aquisição de um equipamento para análise térmica, notou-se que o produto semiacabado, por vezes, deixava a desejar sobre as propriedades térmicas. Com isso, iniciou-se um estudo para aumentar a performance térmica e, talvez, melhorar ainda mais a propriedade mecânica.

Para tal, decidiu-se por estudar a variável temperatura do molde. A temperatura do molde é controlada pelo monitoramento de seis termopares posicionados estrategicamente no molde, conforme Figura 6, partindo da entrada da fibra (zonas 1 e 2).

Figura 6 – Posição das zonas de setup de temperatura no molde.

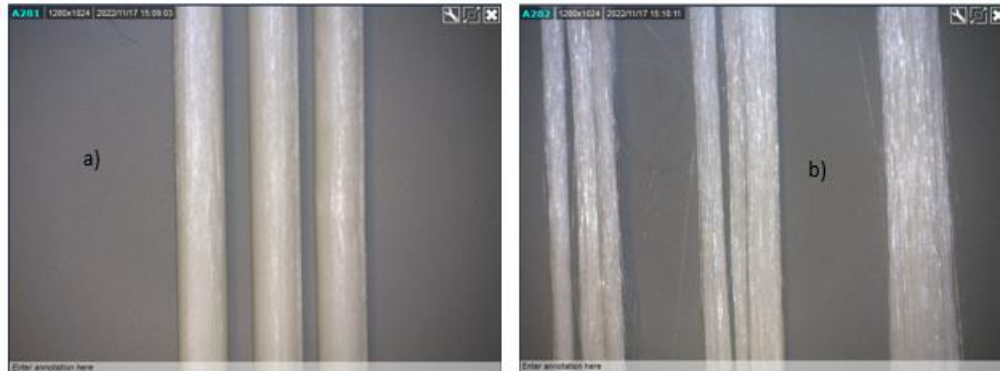


Fonte: Próprio Autor. 2022.

Notou-se que o setup da temperatura mantinha um padrão, com temperaturas mais baixas nas zonas 1 e 2, temperaturas intermediárias nas zonas 3 e 4, e temperaturas superiores nas zonas 5 e 6. Conforme discorrido acima, com esta configuração, os perfis obtidos estavam dentro dos padrões mecânicos, porém, na análise térmica, notou-se que as temperaturas de transição vítrea não atingiam um critério mínimo de 115 °C, apresentando um valor de cerca de 87 °C. O aspecto visual

é apresentado conforme Figura 7, onde a primeira imagem representa uma barra com aparência boa, e a segunda, uma barra que passou pelo molde, porém não teve sua reação de conversão completa, portanto, não apresenta efeito de cura.

Figura 7 – Barra pultrudada.



a) Barra pultrudada boa. b) Barra pultrudada não curada.

Fonte: Próprio Autor. 2022.

Uma possível solução para aumentar a propriedade térmica seria a inversão da temperatura de setup da máquina. Assim, as zonas 1 e 2 apresentariam temperaturas mais elevadas, as zonas 3 e 4, temperaturas intermediárias e as zonas 5 e 6, temperaturas inferiores. Esta alteração faria com que a zona de gel, apresentada pela Figura 3, que aparentemente se encontrava nas zonas 3 e 4, se deslocasse para as zonas 1 e 2 desta forma a zona sólida se estabilizaria e o compósito liberado se apresentaria curado.

Diante de tais observações, a presente proposta visou propor um novo gradiente de temperatura para o setup do controlador das seis zonas de temperaturas do molde utilizado na produção de perfis. Essa temperatura de pultrusão, apresentada pelos controladores da chapa de aquecimento, é de suma relevância, uma vez que caso ela não atinja a temperatura ideal, o perfil produzido não performa, ou seja, apresenta falhas mecânica e/ou térmicas, que podem ser observadas em testes de flexão e testes de calorimetria (temperatura de transição vítrea).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 PROCESSO DE PULTRUSÃO

Foi proposta uma inversão no gradiente de temperatura no molde no qual a empresa Angelus, atualmente utiliza na fabricação dos pinos. A Tabela 1 apresenta as temperaturas no interior do molde empregadas pela empresa, representadas pela Condição 1, enquanto a Condição 2 são as temperaturas da nova configuração proposta. Vale ressaltar que atualmente, o perfil ao entrar no molde segue para regiões com temperaturas mais elevadas até sua saída (condição 1), enquanto que, na nova proposta, o perfil segue para temperaturas mais baixas, até sua saída (condição 2).

Tabela 1 – Condições propostas

Temperaturas	Condição 1	Condição 2
Zona 1	167 °C	192 °C
Zona 2	167 °C	192 °C
Zona 3	171 °C	161 °C
Zona 4	171 °C	161 °C
Zona 5	181 °C	150 °C
Zona 6	181 °C	150 °C

Fonte: Próprio Autor. 2022.

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio mecânico avaliado foi o de flexão utilizando um equipamento denominado de máquina de ensaios Universal, modelo 34SC-5, marca Instron, conforme Figura 8. Neste ensaio é possível obter a resistência flexural, força de ruptura e módulo de elasticidade. Para isso, levou-se em conta a norma ISO 14125 – 1998 (Compósitos plásticos reforçados com fibras – Determinação de propriedades flexural). Empregou-se o ensaio de flexão de três pontos, conforme ilustrado na Figura 9, onde deve-se conhecer os valores dos diâmetros do cilindro (no caso o perfil) para

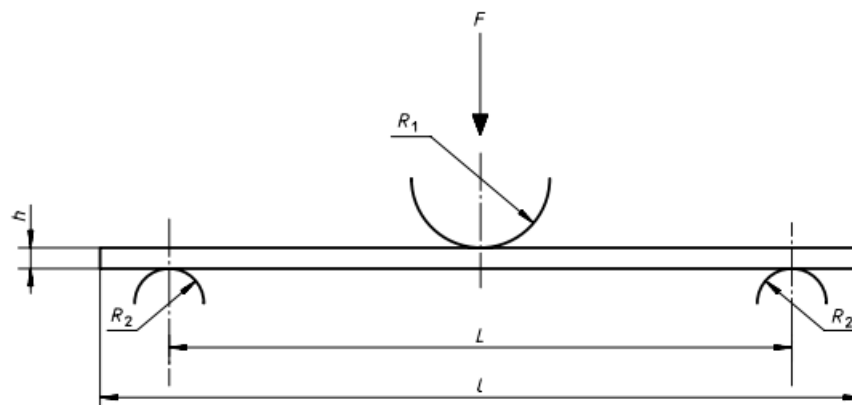
obtenção da área da seção transversal e da distância entre os pontos de contato durante o teste. Em conjunto, a Figura 10 ilustra a posição da amostra (perfil) durante o ensaio de flexão em uma distância de 15 mm de suporte.

Figura 8 – Máquina de Ensaio Universal



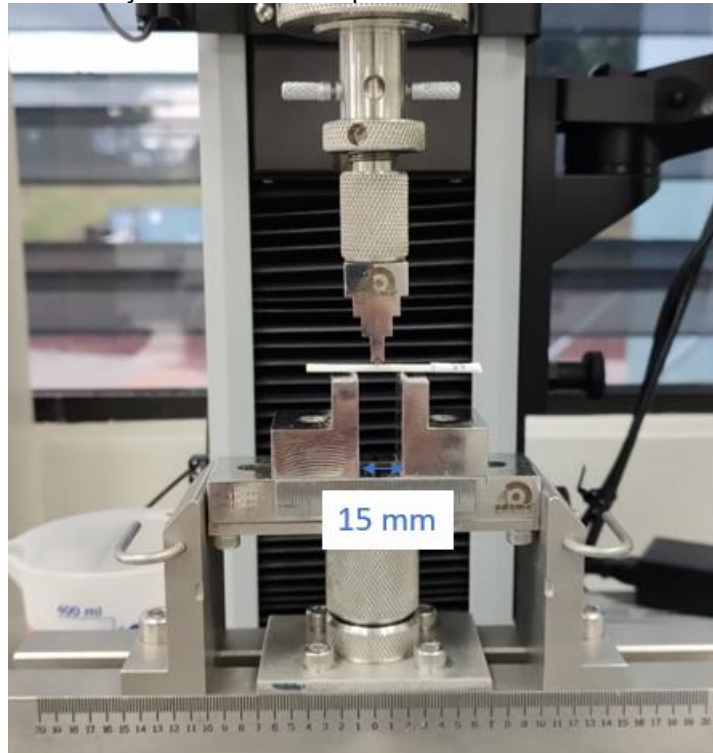
Fonte: Próprio Autor. 2022

Figura 9 – Configuração do ajuste do método de flexão de três pontos.



Fonte: ISO 14125.1998.

Figura 10 - Posição da amostra do perfil no ensaio de flexão de 3 pontos



Fonte: Próprio Autor. 2022.

Utilizou-se cerca de 50 corpos de prova de um mesmo perfil, contudo, leva-se em consideração uma amostragem, de acordo com um procedimento interno da empresa, para tal, foram obtidos resultados de 10 corpos de prova do mesmo perfil.

3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Na avaliação térmica, utilizou-se o equipamento DSC (Calorimetria de Varredura Diferencial). modelo 3500 Sirius, marca NETZSCH, ilustrado na Figura 11. Os ensaios seguiram de acordo com os métodos descritos pelas normas ASTM E1142-15 (Terminologia Padrão Relativo às Propriedades Termofísicas) e ISO 11357-1:2016 (Plásticos. Calorimetria diferencial de varredura. Princípios gerais).

Figura 11 – Equipamento DSC para análises térmicas.



Fonte: Próprio Autor. 2022.

O DSC foi programado para uma varredura de temperatura de 35 a 200 °C, com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min. A partir do software de análise do próprio equipamento, é possível determinar a T_G . O aquecimento ou resfriamento da amostra sofre ação de um gás de purga, no caso, utiliza-se gás nitrogênio.

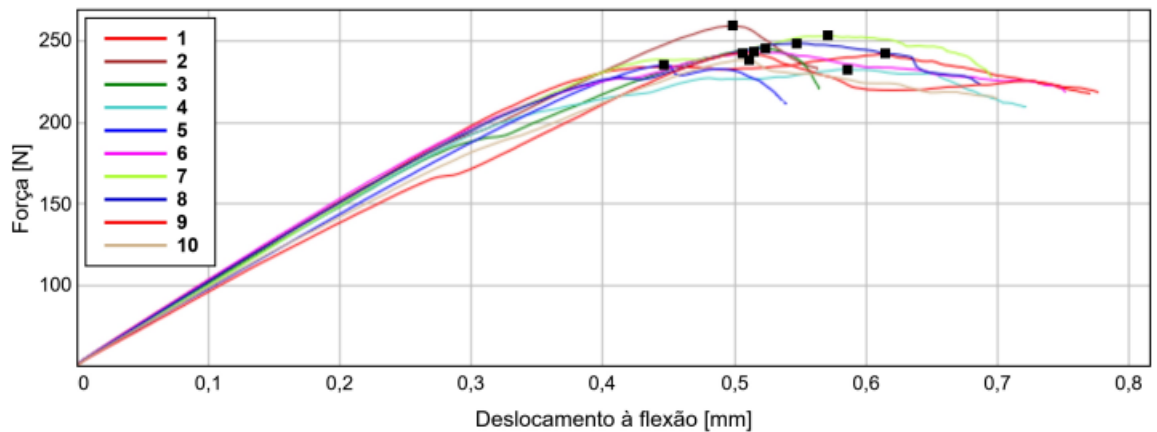
A resina epóxi utilizada na pultrusão possui, em sua composição, aditivos que proporcionam melhores desempenhos no processamento. Para a condição estudada, a resina apresenta um pico exotérmico que indica a cura da região em uma região próxima a 140 °C. Após seu processamento, a resina é convertida em polímeros de alta resistência, graças às ligações cruzadas estabelecidas. Contudo, quando o processamento ocorre em temperaturas muito elevadas, pode ocorrer a degradação da estrutura cristalina formada. Assim, a partir de diversos ensaios, definiu-se o valor mínimo esperado de 115 °C, para que a reação possa ser completa, porém, valores muito elevados podem degradar e/ou amarelar o perfil.

4 RESULTADOS

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Durante os testes, foram gerados gráficos de deformação por força conforme apresentado na Figura 12, onde os marcadores (pontos pretos) representam o limite de ruptura, que a partir destes, é possível obter a resistência flexural. Em relação ao módulo elástico, este é obtido pela inclinação das retas considerando a região linear.

Figura 12 – Resultado de Ensaio de Flexão



Fonte: Próprio Autor. 2022.

De acordo com a proposta, foram analisados um lote de perfil de fibra de vidro para cada condição descrita anteriormente (Tabela 1). A Tabela 2 e 3 ilustram os valores da força de ruptura, resistência e módulo elástico obtidos pelo ensaio de flexão considerando 10 corpos de prova para as duas condições avaliadas.

Tabela 2 – Resultados para o teste de flexão com setup da Condição 1.

Número da Amostra	F (N)	σ_f (MPa)	E (GPa)
1	242,050	868,310	29,970
2	259,210	929,860	29,850
3	245,260	879,810	29,640
4	232,620	834,490	29,570
5	235,210	843,750	27,920
6	243,390	873,090	30,800
7	253,260	908,520	29,910
8	248,490	891,390	30,020

9	242,750	870,790	24,410
10	238,430	855,330	27,350
Média	244,067	875,534	28,944
Desvio Padrão	8,044	28,854	1,898

Fonte: Próprio Autor. 2022.

Tabela 3 – Resultados para o teste de flexão com setup da Condição 2.

Número da Amostra	F (N)	σ_f (MPa)	E (GPa)
1	311,220	1116,420	35,170
2	300,070	1076,440	37,800
3	289,690	1039,190	35,380
4	314,250	1127,310	27,590
5	310,970	1115,530	35,830
6	307,410	1102,740	36,990
7	314,720	1128,980	37,380
8	289,960	1040,150	35,520
9	317,190	1137,840	37,280
10	311,240	1116,490	36,270
Média	306,672	1100,109	35,521
Desvio Padrão	10,026	35,967	2,936

Fonte: Próprio Autor. 2022.

Ainda que o valor de resistência flexural, que possui um valor mínimo esperado de 800 MPa, já apresente resultados de conformidade quando seguia o gradiente de temperatura antes empregado (condição 1), notou-se a possibilidade de alcançar valores mais elevados e que geram um desempenho melhor para posterior processo de usinagem quando se fez a inversão do gradiente de temperatura (condição 2).

Assim, uma vez que a zona de gel é deslocada para esquerda (mais para próximo da entrada do molde), a zona sólida também é, o que indica que o perfil apresenta maior rigidez devido ao seu estado vítreo antes da saída do molde, conforme Figura 3. Logo, sua resistência e força de ruptura geram valores maiores.

A partir dos resultados apresentados nos ensaios mecânicos, nota-se um aumento nos três parâmetros analisados, conforme tabela 4.

Tabela 4 – Melhoria encontrada nos ensaios mecânicos.

	Condição 1	Condição 2	Melhoria
Força de Ruptura (N)	244,067	306,672	25,651%
Resistência (MPa)	875,534	1100,109	25,650%
Módulo de Elasticidade (GPa)	28,944	35,521	22,723%

Fonte: Próprio Autor. 2022

4.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Para os ensaios térmicos, foram analisados os resultados de T_G para condições 1 e 2, e observou-se uma melhoria de 33,751% no valor de temperatura de transição vítrea, conforme tabela 5.

Tabela 5 – Melhoria encontrada nos ensaios térmicos.

	Condição 1	Condição 2	Melhoria
Temperatura de Transição Vítrea (°C)	87,7	117,3	33,751%

Fonte: Próprio Autor. 2022.

Logo, para a Condição 1 encontrou-se uma temperatura de transição vítrea de 87,7 °C, o que representa uma reprova da barra pultrudada, uma vez que se esperava um mínimo de 115 °C.

Para isso, seria necessário um novo tratamento térmico em uma estufa pós cura, o que geraria um aumento da T_G e, conseqüentemente, um novo ensaio térmico deveria ser realizado e, assim, o perfil seria aprovado.

Em relação a Condição 2, com a temperatura de molde já elevada na zona de gel, observou-se que a temperatura de transição vítrea resultante do ensaio térmico se enquadra nos resultados esperados, apresentando um resultado de 117,3 °C.

4.3 MELHORIA CONTÍNUA

Além de analisar as performances térmicas e mecânicas, é possível analisar a produtividade através de indicadores internos para o equipamento, tanto em horas de produção quanto em performance, qualidade e eficiência do equipamento. De acordo com o livro “Overall Equipment Effectiveness”, de Robert Hansen (2001), o aumento de 1% no índice de OEE pode ser responsável por um retorno financeiro de 3,5% a 7% dos lucros incrementados de uma empresa. Assim, a Tabela 6 apresenta a melhoria efetiva do equipamento a partir de indicadores coletados internamente.

Tabela 6 – Melhoria efetiva do equipamento.

	Condição 1	Condição 2	Melhoria
Horas Produzidas	208	188,5	
Horas Paradas	57,3	37	
Horas Disponível	150,7	151,5	
Disponibilidade	72,452%	80,371%	8%
Peças Planejadas	5900	5700	
Peças Produzidas	4253	4383	
Performance	72,085%	76,900%	5%
Peças Refugadas	147	252	
% Peças Refugadas	3,456%	5,700%	2%
Qualidade	96,544%	94,300%	
OEE	50,400%	58,200%	8%

Fonte: Próprio Autor. 2022.

Simplificadamente, horas paradas representam as horas em que o equipamento parou, seja por travamento do molde gerados por acúmulo de sujeira, por exemplo, seja por limpeza do molde, para evitar o travamento, seja por tempo de ajuste de setup, dentre outros fatores que impedem a utilização do mesmo.

Pela programação mensal e disponibilidade do equipamento, foi possível prever qual seria a quantidade de peças planejadas (de acordo com a ordem de produção) e quantidade produzida real. Assim, observa-se que houve um aumento na quantidade de material perdido em processo, porém, notou-se um ganho significativo em performance e disponibilidade da máquina, com a eliminação da necessidade de ajustes.

E, mais importante, o indicador que gerencia a efetividade global do equipamento e linhas de produção, determinada pelo produto de Disponibilidade,

Qualidade e Performance, OEE indicou uma melhoria de 8%, garantindo que a melhoria contínua apresentada possa proporcionar um retorno maior, mais rápido e com custo zero de implementação, sendo apenas necessário o treinamento dos operadores responsáveis pela produção.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostrou que, apesar de diversas variáveis no processo de pultrusão, o gradiente de temperatura do molde influencia de forma crítica nas propriedades das barras pultrudadas. Além disso, comprovou-se que a temperatura inicial do molde deve ser maior em relação a temperatura ao decorrer do molde, o que fica evidenciado pela melhoria nas propriedades mecânicas e térmicas.

Este estudo também evidenciou que, a partir de uma temperatura maior de entrada no molde, as propriedades mecânicas aumentam. Observou-se um aumento de 25,651% na força de ruptura, 25,650% na resistência a flexão e 22,723% no módulo de elasticidade. Apesar de o resultado anterior já apresentar um desempenho bom, o resultado atual indica uma melhor performance para o perfil, que será usinado posteriormente.

Para o ensaio térmico, observou-se um aumento de 33,751% no valor apresentado pela temperatura de transição vítrea com a inversão do gradiente de temperatura no interior do molde, indicando a necessidade de temperaturas mais elevadas na entrada do molde, o que promove a antecipação da zona de geleificação.

Por fim, notou-se uma melhoria na eficiência global de equipamento (OEE) de 8%, a partir de uma melhoria contínua a custo zero e um retorno imediato. O produto pultrudado apresenta melhor performance e qualidade, e, ainda, observou-se um menor tempo de horas paradas.

Ainda, vale ressaltar que a condição 2 foi implementada e vem resultando em boas performances, graças à disponibilidade e suporte que a Angelus dá a seus colaboradores que venham a propor melhorias.

REFERÊNCIAS

- ASTM D3418 -2105: “Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry”
- ASTM E1142-15 Standard Terminology Relating to Thermophysical Properties.
- BORGES, S. G. Síntese e caracterização de resinas fenólicas líquidas do tipo novolaca aplicáveis no processo de pultrusão. Porto Alegre. UFRGS. 2004.
- ISO 11357-1:2016 Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 1: General principles
- ISO 14125 – 1998 Fibre-reinforced plastic composites — Determination of flexural properties
- JOSH, S. C.; LAM, Y. C.; TUN, U. W. Improved cure optimization in pultrusion with pre-heating and die-cooler temperature. *Composites: Part A*, v. 34, p. 1151-1159, 2003.
- MARCHIONATTI, A M E; et al. Influence of elastic modulus of intraradicular posts on the fracture load of roots restored with full crowns. *Revista de Odontologia da UNESP*, v.46, n.4, p.232-237. São Paulo – SP, 2017.
- Marshall GW Jr, Balooch M, Gallagher RR, Gansky SA, Marshall SJ. Mechanical properties of the dentinoenamel junction: AFM studies of nanohardness, elastic modulus, and fracture. *J Biomed Mater Res*. 2001;54(1):87-95.
- PEGORARO, Luiz Fernando et al. Prótese fixa: bases para o planejamento em reabilitação oral. São Paulo: Artes Médicas. Acesso em: 21 nov. 2022., 2013.
- STAR, T. F. *Pultrusion for Engineers*. 1. ed. Boca Raton, Cambridge: CRC Press, 2000. 336 p.